


Д. П. Андрианов, В. И. Афонин, Н. П. Бадалян

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ПРАКТИКУМ

«Инфра-Инженерия» 

Д. П. Андрианов, В. И. Афонин, Н. П. Бадалян

# **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2022

УДК 621.316  
ББК 31.2 + 32.85  
А65

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники  
КГГА им. В. А. Дегтярева *Чащин Е. А.*;  
кандидат технических наук, доцент кафедры БЭСТ (ИИТР ВлГУ)  
*Евграфов В. В.*

**Андрианов, Д. П.**

**А65** Основы электротехники и электроники. Практикум : учебное пособие / Д. П. Андрианов, В. И. Афонин, Н. П. Бадалян. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 180 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0810-3

Изложены базисные процессы, протекающие в электрических и электронных элементах, устройствах и схемах. Представлены теоретические материалы, рекомендации и методические указания, необходимые для проведения лабораторных, практических занятий и самостоятельной работы. Показаны примеры решения задач с помощью пакета MathCad.

Для студентов направлений «Материаловедение и технологии материалов», «Управление в технических системах», «Информационно-аналитические системы безопасности», «Мехатроника и робототехника», «Автоматизация технологических процессов и производств».

УДК 621.316  
ББК 31.2 + 32.85

ISBN 978-5-9729-0810-3

© Андрианов Д. П., Афонин В. И., Бадалян Н. П., 2022  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебно-практическое пособие включает в себя теоретические материалы, рекомендации и методические указания, необходимые для проведения лабораторных, практических занятий и самостоятельной работы студентов дневной и контрактно-заочной форм обучения.

Составлены применительно к действующим учебным планам подготовки бакалавров неэлектрических направлений.

Учебно-практическое пособие состоит из двух разделов, посвященных электротехнике и электронике. В каждом разделе последовательно изложены теоретические сведения, материалы для проведения лабораторных, практических и самостоятельных работ студентов.

Лабораторные работы рассчитаны на 4 академических часа, проводимых за семестр. Практические занятия рассчитаны на 2 академических часа. При проведении занятий предпочтительно использование математического пакета MathCad. В пособии представлены примеры решения задач с помощью пакета MathCad.

Теоретическая часть к каждому из разделов содержит краткие базисные сведения, позволяющие уяснить физический смысл процессов, протекающих в электрических и электронных элементах, устройствах и схемах.

Решение предлагаемых задач прививает навыки практического применения теоретических знаний, показывает связь количественных и качественных характеристик.

Выполнение лабораторных работ и практических расчетов направлено на развитие и закрепление у студентов понимания физической сущности изучаемых процессов.

В рекомендуемом списке литературы приведены ссылки на адреса доступа к источникам в Интернете.

# РАЗДЕЛ 1 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

## 1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Базовые понятия

1. Электротехника – отрасль науки и техники, связанная с получением, преобразованием и использованием электрической энергии в практической деятельности человека, охватывающая вопросы применения электромагнитных явлений в различных отраслях промышленности и в быту.
2. Названия, обозначения и единицы измерения основных электрических величин электротехники приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Название	Обозначение	Единица измерения	
Сила тока	$I$	Ампер	А
Напряжение	$V$	Вольт	В
Проводимость	$G$	Симменс	См
Сопротивление <ul style="list-style-type: none"> <li>• активное</li> <li>• реактивное</li> <li>• полное</li> </ul>	$R$ $X$ $Z$	Ом	Ом
Индуктивность	$L$	Генри	Гн
Электрическая емкость	$C$	Фарада	Ф
Электрический заряд	$q$	Кулон	Кл
Магнитная индукция	$B$	Тесла	Тл
Магнитный поток	$\Phi$	Вебер	Вб
Энергия	$A$	Джоуль	Дж
Мощность <ul style="list-style-type: none"> <li>• активная</li> <li>• реактивная</li> <li>• полная</li> </ul>	$P$ $Q$ $S$	Ватт Вольт-ампер реактивный Вольт-ампер	Вт В·Ар В·А
Частота электрического тока	$f$	Герц	гц

3. Наиболее часто употребительные дольные и кратные единицы физических величин электротехники приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Кратные единицы		Дольные единицы	
приставка	множитель	приставка	множитель
тера	$10^{12}$	милли	$10^{-3}$
гига	$10^9$	микро	$10^{-6}$
мега	$10^6$	нано	$10^{-9}$
кило	$10^3$	пико	$10^{-12}$

4. Электрический ток – направленное движение электрических зарядов в веществе или вакууме под воздействием электромагнитного поля. Ток характеризуется силой, измеряемой в амперах (А). Сила тока в 1 ампер [А] соответствует заряду в 1 кулон, протекающему через поперечное сечение за 1 секунду. Ампер – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия  $2 \cdot 10^{-7}$  ньютон.
5. Для установившихся режимов различают два вида электрических токов:
- постоянный – ток, который может изменяться по величине, но не изменяет своего знака сколь угодно долгое время;
  - переменный – ток, который периодически изменяется как по величине, так и по знаку.
6. Напряжение – разность потенциалов между двумя точками электрического поля. Напряжение 1 вольт [В] – разность потенциалов между двумя точками, когда при прохождении между ними положительного заряда в 1 кулон совершается работа в 1 джоуль (выделение мощности 1 ватт при токе 1 ампер).
7. Сопротивление определяет силу тока, текущего по электрической цепи при заданном напряжении.

Сопротивление 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором устанавливается ток в 1 ампер при напряжении 1 вольт на его концах.

Электрическое сопротивление проводника

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление  $[\frac{\text{Ом мм}^2}{\text{м}}]$ ,

$L$  – длина проводника [м],

$S$  – поперечное сечение проводника [мм<sup>2</sup>].

Зависимость сопротивления от температуры

$$R = R_0 (1 + \alpha (t - t_0)),$$

где  $R$  и  $R_0$  – сопротивление проводника при конечной  $t$  и начальной  $t_0$  температурах,

$\alpha$  – температурный коэффициент.

Проводимость – величина обратная сопротивлению.

Проводимость 1 симменс [см] равна величине, обратной 1 Ом.

8. Электродвижущая сила источника – работа сторонних сил при перемещении единицы положительного заряда.

9. Работа электрического тока [дж]

$$W = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} t = I^2 \cdot R \cdot t.$$

10. Мощность электрического тока [Вт]

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R.$$

Активная мощность электрической цепи – [ватт] – мощность электрической цепи эквивалентная механической мощности 1 Вт.

Реактивная мощность электрической цепи – [вар] – мощность электрической цепи с синусоидальным переменным током при  $\sin \varphi = 1$  и действующих значениях напряжения 1 В и силы тока 1 А.

Полная мощность электрической цепи – [вольт-ампер] – мощность электрической цепи с действующими значениями напряжения 1 В и силы тока 1 А.

11. Электрическая емкость – [фарада] – емкость конденсатора между обкладками которого при заряде 1 Кл возникает напряжение 1 В.

12. Индуктивность – [генри] – индуктивность контура, с которым при силе постоянного тока в нем 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.
13. Магнитный поток – [вебер] – магнитный поток, при убывании которого до нуля в контуре, сцепленном с этим потоком с сопротивлением 1 Ом проходит количество электричества 1 Кл.
14. Наиболее часто употребляемые основные электрические величины электротехники:
  - сила тока  $I$ ,
  - напряжение  $V$ ,
  - сопротивление  $R$ ,
  - мощность  $P$ .

Взаимосвязь между указанными электротехническими параметрами показана на диаграмме рис. 1.1.

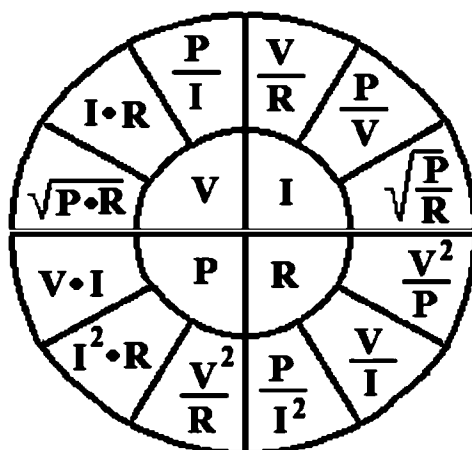


Рис. 1.1. Взаимосвязь между основными электротехническими параметрами

### *Электрический ток в различных средах*

1. Металлы – вещество, имеющее ионную кристаллическую решетку, между узлами решетки находятся в свободном состоянии электроны в виде электронного газа. Проводимость металлов электронная.

Скорость движения электронов  $10^{-4}$  м/с, скорость распространения электрического тока –  $3 \cdot 10^8$  м/с.



Тепловое действие электрического тока – выделение энергии при столкновении электронов с узлами кристаллической решетки.

Сопротивление металлов прямо пропорционально температуре.

Возможно состояние сверхпроводимости – потери электрического сопротивления – в условиях сверхнизких температур.

2. Вакуум – разреженное пространство, отсутствие вещества. Проводимость определяется наличием свободных носителей заряда. Электровакuumные приборы основаны на явлении термоэлектронной эмиссии – образовании в вакууме около нагретого электрода электронного газа, который начинает перемещаться с образованием электрического тока при наложении на него разности потенциалов.

3. Полупроводники – материал, способный менять свою электрическую проводимость в зависимости от внешнего воздействия (температура, свет, заряды). Проводимость полупроводников электронная и дырочная.

В электронике применяют примесные полупроводники, когда в кристаллическую решетку внедряют атомы, обеспечивающие проводимость:

- n-типа (донорная) – избыток свободных электронов,
- p-типа (акцепторная или дырочная) – недостаток свободных электронов.

4. Газы – появление электрического тока (газового разряда) возможно только при ионизации атомов газа. Проводимость газов ионная и электронная. Возможны следующие типы газовых разрядов:

- тлеющий при высоком напряжении и низком давлении,
- дуговой при высоких температурах,
- коронный при неоднородности электрического поля,
- искровой при высоком напряжении и атмосферном давлении.

5. Жидкости проводят электрический ток при наличии в них свободных носителей электрических зарядов. Проводимость жидкостей ионная, сопровождается переносом вещества.

Электролит – раствор солей, кислот, оснований. Прохождение тока через электролит сопровождается выделением вещества на электроде.

Типовые вольт-амперные характеристики сред, проводящих электрический ток приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

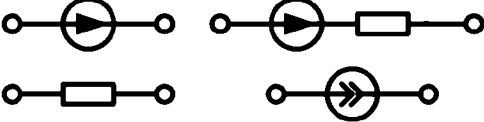
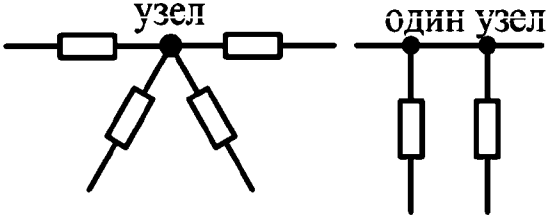
Металлы	
Вакуум	
Полупроводники	
Газы	
Жидкости	

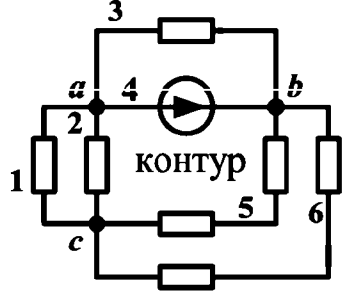
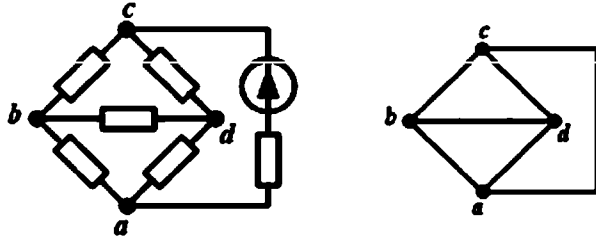
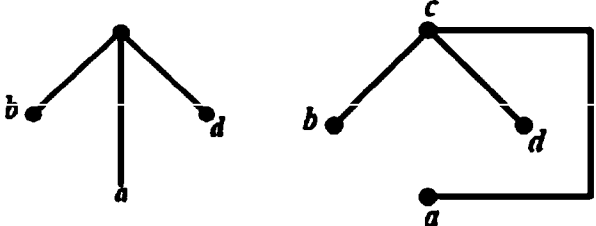
### Электрические цепи

1. Электрическая цепь – совокупность генерирующих, приемных и вспомогательных устройств, соединенных между собой электрическими проводами.
2. Элементы электрической цепи, обладающие электрическим сопротивлением  $R$  (резисторы), характеризуются вольт-амперной характеристикой – зависимостью  $I(U)$  или  $U(I)$ . Сопротивление  $R$  и проводимость  $g = \frac{1}{R}$  есть параметры электрической цепи. Электрическая цепь, электрическое сопротивление участков которой не зависит от значений и направлений токов и напряжений в цепи, называется линейной электрической цепью.

3. Схема электрической цепи – графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее их соединение. В схему включают идеализированные элементы, которые являются математической моделью, описывающей физические явления в реальном элементе. Геометрическая конфигурация схемы характеризуется понятиями ветвь, узел, контур, граф, дерево графа и т. п.
4. Активные элементы электрической цепи – те, в которых индуцируется ЭДС. Все прочие электроприемники и соединительные провода являются пассивными элементами. В пассивных элементах электрическая энергия рассеивается или накапливается.
- Примеры топологических элементов схемы приведены в табл. 1.4.
5. Расчет сложной (многоугольной) электрической цепи, имеющей  $m$  ветвей с активными и пассивными элементами и  $n$  узлов, сводится к определению величины и направления токов отдельных ветвей, а также напряжений на зажимах элементов, входящих в данную цепь. Эту задачу решают с помощью уравнений, вытекающих из законов Кирхгофа.

Таблица 1.4

Топологические элементы схемы	Пример
Ветвь – участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток	
Топологические элементы схемы	
Узел – место соединения трех или большего числа ветвей	

Топологические элементы схемы	Пример
<p>Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям</p>	 <p>Схема электрической цепи с шестью ветвями и тремя узлами</p>
<p>Граф – изображение схемы электрической цепи, в которой ветви схемы представлены отрезками – ветвями графа (ab, bc, cd, dd, ac), а узлы – точками-узлами графа (a, b, c, d)</p>	 <p>Схема электрической цепи      граф</p>
<p>Дерево графа – любая совокупность ветвей графа, соединяющих все узлы графа без образования контуров</p>	

1. Расчет сложной (многоугольной) электрической цепи, имеющей  $m$  ветвей с активными и пассивными элементами и  $h$  узлов, сводится к определению величины и направления токов отдельных ветвей, а также напряжений на зажимах элементов, входящих в данную цепь. Эту задачу решают с помощью уравнений, вытекающих из законов Кирхгофа.
2. Для упрощения сложной электрической цепи применяют методы преобразований.
3. Эквивалентное сопротивление в зависимости от типа соединений сопротивлений рассчитывается по формулам, приведенным в таблице 1.5.

Таблица 1.5

№	Тип соединения	Обобщенная схема	Формула
1.	Последовательное		$R_3 = \sum_{i=1}^n R_i$
2.	Параллельное		$\frac{1}{R_3} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_j};$ $\frac{1}{R_3} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_j}}$
3.	Смешанное		$R_3 = \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_j}}$

Сумма сопротивлений последовательно соединенных участков цепи называется эквивалентным сопротивлением или общим сопротивлением цепи.

Для участка цепи с параллельным соединением сопротивлений

$g_3 = \frac{1}{R_3}$  – эквивалентная проводимость электрической цепи,

$g_i = \frac{1}{R_i}$  – проводимость ветви электрической цепи.

### Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда»

1. Типовые схемы соединений «звезда» и «треугольник» приведены на рис. 1.2.

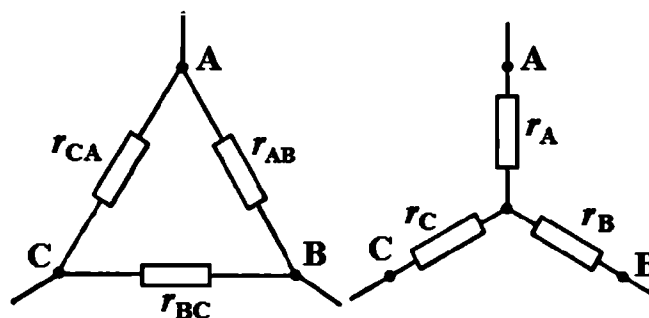


Рис. 1.2. Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда»

2. Соотношения между сопротивлениями ветвей схем «звезда» и «треугольник»

$$r_A = \frac{r_{AB} \cdot r_{CA}}{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}},$$

$$r_B = \frac{r_{AB} \cdot r_{BC}}{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}},$$

$$r_C = \frac{r_{BC} \cdot r_{CA}}{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}}.$$

3. Последовательность эквивалентных преобразований схем представлена на рис. 1.3.

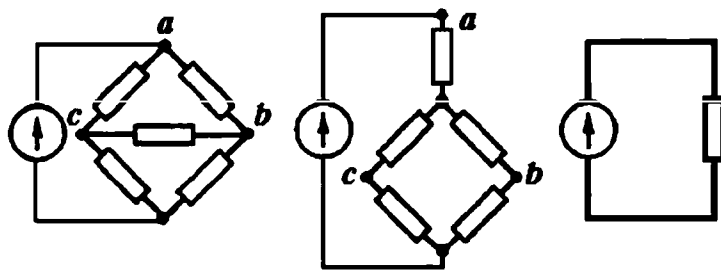


Рис. 1.3. Эквивалентные преобразования электрических схем

4. На практике используется схема, объединяющая соединения сопротивлений по схемам звезда и треугольник (рис. 1.4).

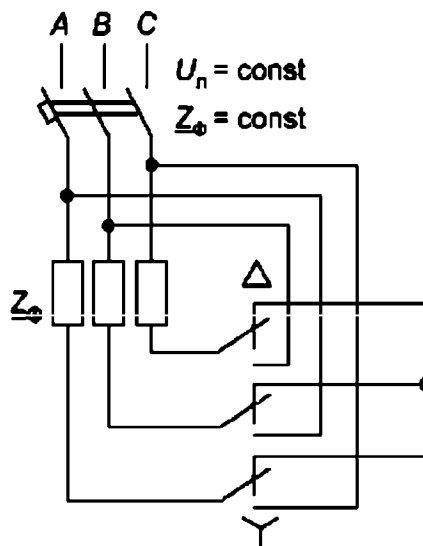
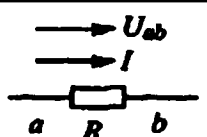
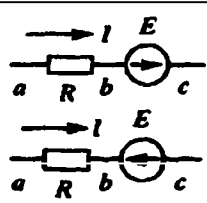


Рис. 1.4. Объединенная схема «треугольник-звезда»

## Законы Ома и Кирхгофа

1. Закон Ома для участка цепи в зависимости от наличия ЭДС может иметь разную формулировку (таблица 1.6).

Таблица 1.6

№	Участок цепи	Формулировка закона Ома	Схема
1.	Не содержит ЭДС	$U_{ab} = IR,$ $I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}$	
2.	Содержит ЭДС	$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{U_{ac} + E}{R}$ $I = \frac{\varphi_a - \varphi_c - E}{\bar{R}} = \frac{U_{ac} - E}{\bar{R}}$	
3.	Обобщенный	$I = \frac{U_{ac} \pm E}{R} = \frac{(\varphi_a - \varphi_c) \pm E}{R}$	

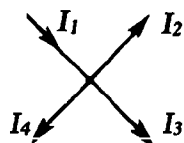
2. Первый закон Кирхгофа (баланс токов):

Алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю.

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0 \text{ или } \sum_k^m I_k = \sum_{k=1}^4 I_k = 0.$$

Сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих от узла токов.

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$



Физически первый закон Кирхгофа означает, что движение зарядов в цепи не сопровождается их накапливанием ни в одном из узлов.

3. Второй закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС вдоль того же контура:

$$\sum R \cdot I = \sum E.$$

Алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю.

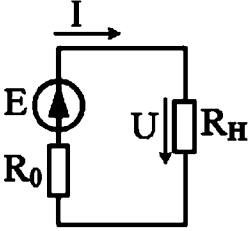
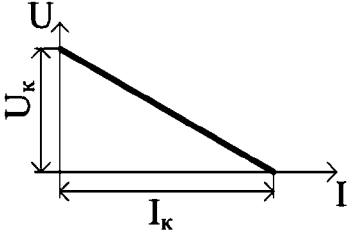
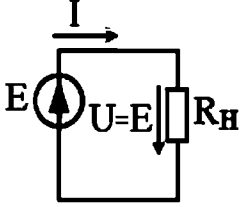
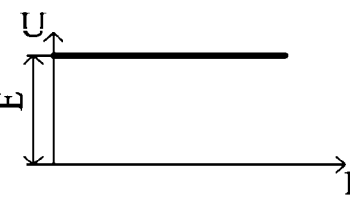
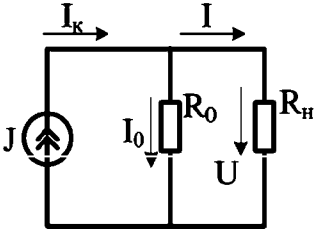
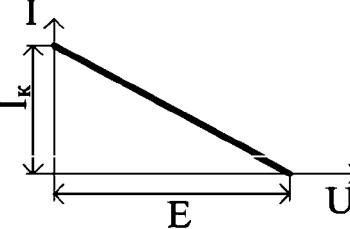
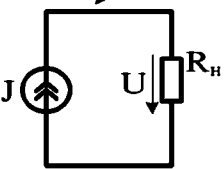
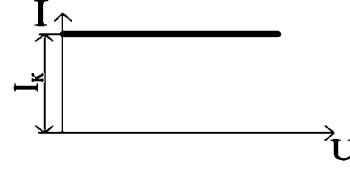
### Сложные цепи постоянного тока

1. Сложная электрическая цепь содержит несколько источников ЭДС и представляет собой смешанное соединение пассивных элементов, она не может быть представлена эквивалентной схемой из одного источника ЭДС и одного пассивного элемента.
2. Рассчитать электрическую цепь означает – определить токи в ветвях при известных сопротивлениях всех элементов и источников.
3. Если направление тока в источнике электрической энергии совпадает с ЭДС, то это означает, что источник отдает энергию в цепь и работает в режиме генератора.
4. На практике применяются следующие методы расчета сложных электрических цепей;
  - по уравнениям, составленным по законам Кирхгофа,
  - метод контурных токов,
  - метод на основе принципа наложения,
  - метод эквивалентного генератора,
  - метод узловых потенциалов.
5. Система алгебраических уравнений, описывающих сложную электрическую цепь, включает в себя уравнения для баланса токов в узлах по I закону Кирхгофа (количество уравнений меньше числа узлов на единицу) и уравнения для баланса падений напряжений замкнутых контуров по II закону Кирхгофа (количество уравнений в сумме с уравнениями по I закону Кирхгофа равно числу неизвестных).
6. В общем случае электрическая цепь имеет  $p$  ветвей и  $q$  узлов.
7. Так как неизвестными являются токи в ветвях, то число неизвестных равно  $p$ , для нахождения которых необходимо иметь систему из  $p$  уравнений.
8. По первому закону Кирхгофа можно записать  $q$  уравнений или  $q - 1$  независимых уравнений для  $q - 1$  независимых узлов. В независимое уравнение должен входить хотя бы один ток, не вошедший в другие уравнения.



9. По второму закону Кирхгофа можно записать столько уравнений, сколько можно выделить замкнутых контуров в цепи. Независимый контур – в контур входит хотя бы одна ветвь, не вошедшая в другие контуры. Число независимых контуров и независимых уравнений  $n = p - q + 1$  зависит от конфигурации схемы.
10. По законам Кирхгофа можно записать  $(q - 1) + (p - q + 1) = p$  независимых уравнений. Решив такую систему уравнений, можно найти все токи в ветвях.
11. Примеры эквивалентных схем источников электрической энергии представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Источник энергии	Эквивалентная схема	Внешняя вольт-амперная характеристика
Источник э. д. с. Характеризуется э. д. с. $E$ и внутренним электрическим сопротивлением $R_0$		
Идеальный источник э. д. с. $E$ имеет $R_0=0$		
Источник тока характеризуется током $I_K$ и внутренним сопротивлением $R_0=0$ , $I_K=I+\frac{U}{R_0}$		
Идеальный источник тока имеет $R_0=\infty$		

## Расчет цепей переменного тока

1. Периодический ток – ток, для которого выполняется равенство

$$I(t) = I(t+T),$$

где  $T$  – постоянный промежуток времени (период). Простейшим переменным током является гармоническая синусоидальная функция.

2. Гармонический синусоидальный ток определяется выражением

$$i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \Psi\right),$$

где  $I_m$  – максимальное значение амплитуды тока,

$\Psi$  – фаза гармонического тока [рад].

Частота – величина, обратная периоду [Гц]

$$f = \frac{1}{T}.$$

3. Для описания процессов в цепях переменного тока используется понятие функции комплексного переменного.

Рассматривается числовая плоскость с осями действительных «+1» и мнимых «+j» чисел (рис. 1.5). Мнимая единица  $j$  равна квадратному корню из минус единицы:  $j = \sqrt{-1}$ .

Комплексное число представляется как вектор, соединяющий начало координат с точкой на плоскости.

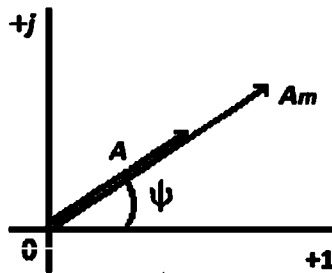


Рис. 1.5. Вектор на плоскости комплексных чисел

Возможны три формы представления комплексного числа:

- показательная  $\underline{A} = A e^{j\varphi}$ ,
- тригонометрическая  $\underline{A} = A \cos \varphi + j A \sin \varphi$ ,
- алгебраическая  $\underline{A} = \text{Re } \underline{A} + j \text{Im } \underline{A}$ .

Для обозначения вектора величины  $A$  используется знак подчеркивания  $\underline{A}$ .

Вещественная  $\text{Re } \underline{A}$  и мнимая  $\text{Im } \underline{A}$  составляющие комплексного числа связаны с тригонометрическими функциями, описывающими комплексное число:

$$\text{Re } \underline{A} = A \cos \psi \text{ и } \text{Im } \underline{A} = A \sin \psi$$
$$A = \sqrt{(\text{Re } \underline{A})^2 + (\text{Im } \underline{A})^2}; \quad \psi = \text{arctg} \frac{\text{Im } \underline{A}}{\text{Re } \underline{A}}.$$

Синусоидальные колебания напряжения и силы тока в цепях переменного тока рассматриваются как комплексные векторы, причем длина вектора соответствует амплитуде колебаний  $A$ , а угол между вектором и осью действительных чисел  $\varphi$  – фазовому сдвигу колебаний относительно нуля осей координат.

4. Протекание переменного тока по резистору.

Резистор – проводник, не обладающий индуктивностью и емкостью.

Ток, текущий через резистор, совпадает по фазе с напряжением.

Мощность переменного тока определяется действующими значениями силы тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$ :

$$P = I_d U_d = I_d^2 R = \frac{U_d^2}{R}.$$

5. Конденсатор в цепи переменного тока.

Ток в цепи конденсатора опережает по фазе напряжение на  $\pi/2$ .

*Заряд конденсатора*

$$q = UC = U_{\text{MAX}} C \cos(\omega t),$$
$$I = \frac{dq}{dt} = -U_{\text{MAX}} C \omega \sin(\omega t),$$
$$I_{\text{MAX}} = U_{\text{MAX}} C \omega.$$

*Емкостное сопротивление*

$$X_c = \frac{U_{\text{MAX}}}{I_{\text{MAX}}} = \frac{1}{C\omega}.$$

6. Катушка индуктивности в цепи переменного тока.

При расчете идеальной катушки индуктивности – ее активным сопротивлением можно пренебречь.

### ЭДС самоиндукции

$$-L \frac{di}{dt} = U_{MAX} \cos(\omega t).$$

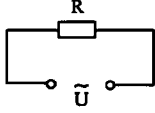
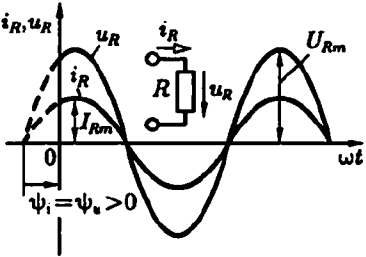
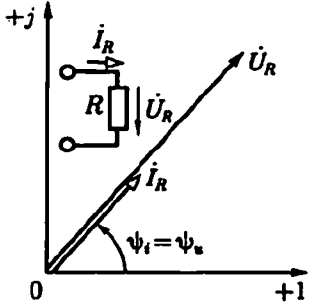
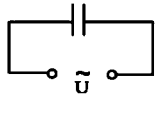
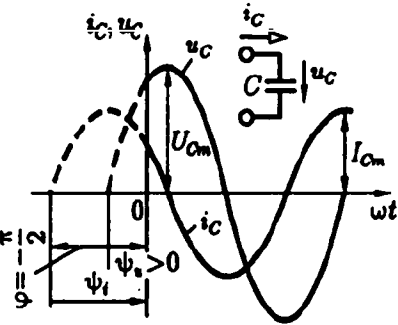
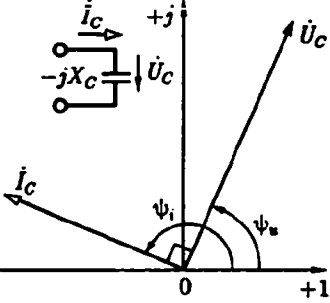
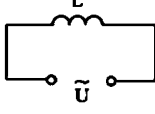
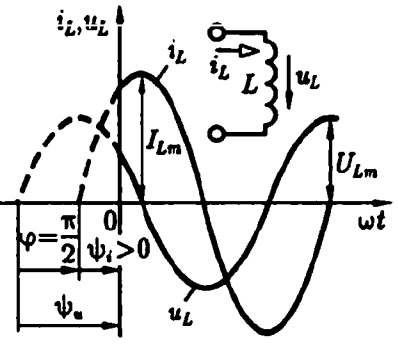
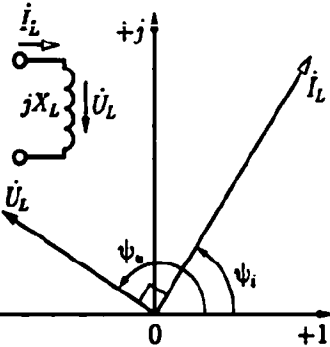
После интегрирования

$$i = \left( \frac{U_{MAX}}{\omega L} \right) \sin(\omega t) = \left( \frac{U_{MAX}}{\omega L} \right) \cos\left( \frac{\omega t - \pi}{2} \right),$$

$$I_{MAX} = \frac{U_{MAX}}{\omega L}.$$

Сила тока в идеальной катушке индуктивности отстает по фазе на  $\pi/2$  от приложенного напряжения.

Таблица 1.8

Элемент	Схема	График	Диаграмма
Резистор			
Ёмкость			
Индуктив- ность			

7. В сводной таблице 1.8 приведены графики изменения напряжения и силы тока и соответствующие им векторные диаграммы для вариантов протекания переменного электрического тока через резистор, ёмкость и индуктивность.

8. Мгновенная мощность переменного тока  $S(t)$  является произведением мгновенных величин напряжения  $U(t)$  и силы тока  $I(t)$

$$S(t) = U(t) \cdot I(t).$$

Представляя напряжение и силу тока как безразмерные (амплитуда равна 1) и синусоидальные величины, получаем выражение для мощности:

$$S(t) = \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где  $\varphi$  – разность фаз между колебаниями напряжения и силы тока,  
 $\omega$  – круговая частота.

График изменения мгновенной мощности как функции от времени  $t$  и фазового расхождения  $\varphi$  между колебаниями напряжения и силы тока приведен на рис. 1.6.

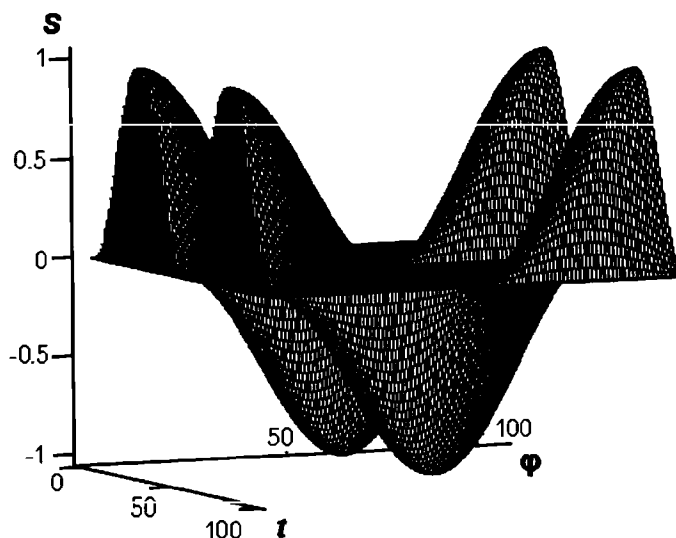


Рис. 1.6. Представление мощности как двухпараметрической функции

Временной промежуток и фазовое расхождение между напряжением и силой тока рассматриваются в пределах одного периода колебаний. Следует отметить удвоение частоты колебаний мощности относительно частоты колебаний напряжения и силы тока.

## Измерение ёмкостей и индуктивностей пассивных элементов цепи переменного тока

1. Для измерения ёмкостей и индуктивностей пассивных элементов цепи переменного тока используют *прямые* (мостовые) и *косвенные* (использование амперметра и вольтметра) методы измерения.
2. Диапазон измеряемых ёмкостей – от пикофарад до сотен микрофарад, индуктивностей – от сотых долей микрогенри (высокочастотные цепи) до сотен и тысяч генри.
3. Метод вольтметра-амперметра (косвенный) применяется для измерения сравнительно больших ёмкостей и индуктивностей от источника низкой частоты 50...1000 Гц.
4. Для R-C-цепи переменного тока векторная диаграмма сопротивлений представляет собой прямоугольный треугольник, катетами которого являются вектор сопротивления резистора  $R$  и вектор сопротивления ёмкости  $\underline{X}_C$

$$\underline{Z} = R + \underline{X}_C,$$

где  $\underline{X}_C = 1 / (j\omega C)$  – сопротивление конденсатора [Ом],

$\omega$  – круговая частота [рад/с],

$C$  – ёмкость [Ф],

$j$  – мнимая единица.

С учетом показаний приборов имеем

$$\frac{U}{I} = R + \frac{1}{j\omega C},$$

где  $U$  и  $I$  – показания вольтметра и амперметра.

Ёмкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}}.$$

5. Схема косвенного метода измерения ёмкостей (метод вольтметра-амперметра) (рис. 1.7).

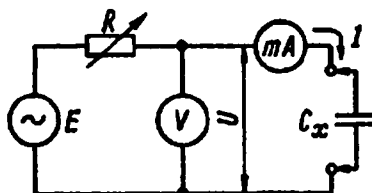


Рис. 1.7. Схема измерения ёмкости

6. Для R-L-цепи переменного тока векторная диаграмма сопротивлений представляет собой прямоугольный треугольник, катетами которого являются вектор сопротивления резистора  $R$  и вектор сопротивления катушки индуктивности  $X_L$ . Полное сопротивление R-L-цепи:

$$\underline{Z} = R + jX_L.$$

С учетом показаний приборов и расшифровки сопротивления индуктивности имеем

$$\frac{U}{I} = R + j\omega L.$$

где  $j$  – мнимая единица,

$\omega$  – круговая частота [рад/с],

$L$  – индуктивность [Гн],

$U$  и  $I$  – показания вольтметра и амперметра соответственно.

Переходя от комплексной записи уравнения к действительным значениям, получаем следующую зависимость для индуктивности

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}.$$

7. Схема косвенного метода измерения индуктивностей (метод вольтметра-амперметра) приведена на рис. 1.8.

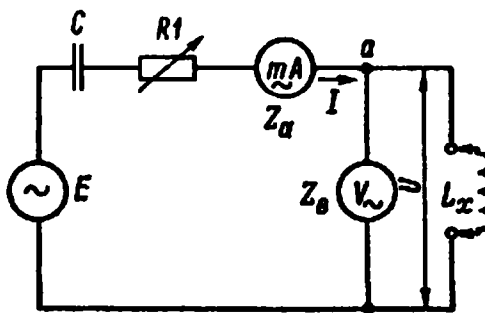


Рис. 1.8. Схема измерения индуктивности

Приборы переменного тока, применяемые в данной схеме, не должны реагировать на постоянные составляющие измеряемого ими тока или напряжения; для вольтметра  $V_{\sim}$  это легко обеспечивается посредством включения последовательно с ним конденсатора ёмкостью в несколько микрофард.

8. Мостовые схемы работают как пара двухкомпонентных делителей напряжения, подсоединённых параллельно к источнику напряжения, индикатор *нулевого сигнала* включён в диагональ моста для определения «баланса» при нулевом сигнале (рис. 1.9).

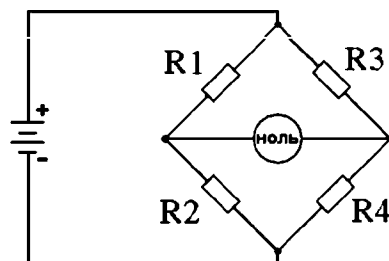


Рис. 1.9. Схема измерения с помощью моста сопротивлений

Когда мост находится в условиях баланса (индикатор показывает нулевой сигнал), отношение определяется как:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4}.$$

9. В мостовых схемах неизвестное значение «балансируется» по известному стандарту, полученному из высококачественного, калиброванного компонента, значение с которого считывается при индикации на детекторе нуля баланса. В зависимости от того, как устроен мост, значение неизвестного компонента может быть получено с калиброванного элемента как напрямую, так и рассчитано по формуле.

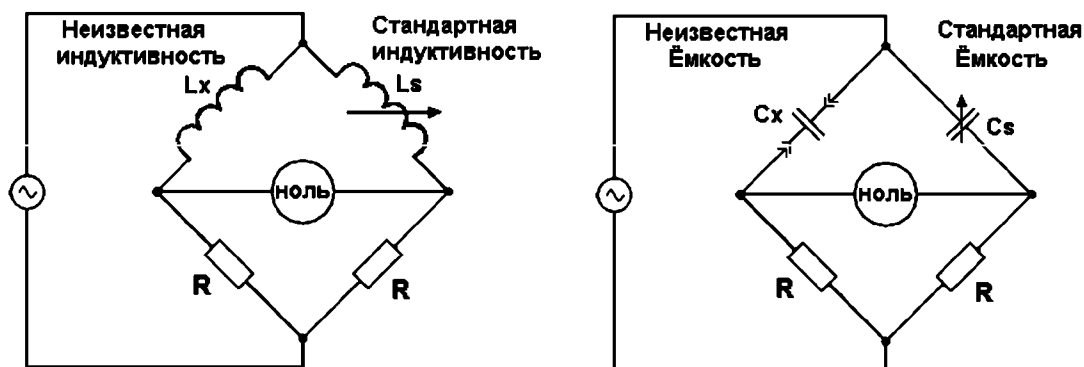


Рис. 1.10. Симметричный мост измеряет неизвестную индуктивность (ёмкость) путём сравнения её со стандартной



Мостовые схемы (рис. 1.10) балансируются путём регулирования калиброванных реактивных элементов ( $L_s$  или  $C_s$ ). Они упрощены по сравнению с их реальными схемами (мост имеет калиброванный переменный резистор, соединённый последовательно или параллельно с реактивным компонентом для балансирования побочного сопротивления в измеряемом элементе).

10. Схема с компенсацией реальных неидеальностей может быть в *Мосте Вина (Wienbridge)*, который использует параллельно соединённые стандартные конденсатор и резистор для балансировки неизвестного последовательного внутреннего сопротивления измеряемого конденсатора (рис. 1.11). Все конденсаторы имеют некоторое внутреннее сопротивление, активное или эквивалентное (из-за потерь в диэлектрике).

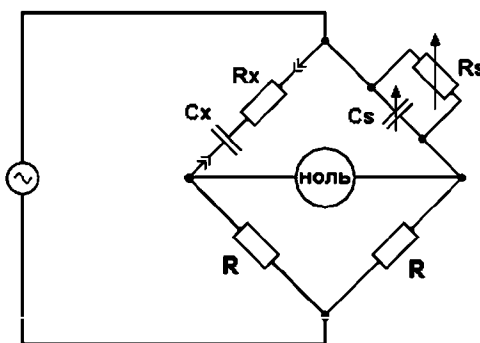


Рис. 1.11. Мост Вина

11. Мостовые схемы нашли широкое применение в измерительных приборах. Требуемая схема измерений формируется с помощью сложной системы коммутаций (рис. 1.12)

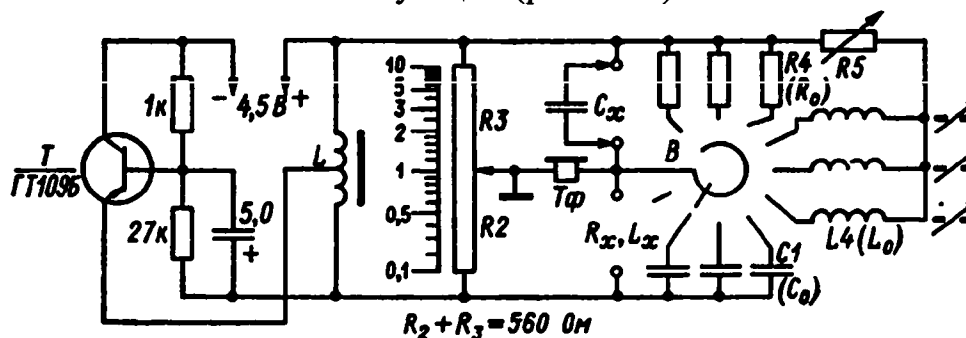


Рис. 1.12. Схема универсального реохордного моста для измерения сопротивлений, ёмкостей и индуктивностей

12. R-L-C-цепь является колебательным контуром.

Резонансная частота колебательного контура определяется исходя из равенства сопротивлений индуктивности и ёмкости:

$$X_L = X_C.$$

Резонансная круговая частота колебательного контура с учетом расшифровки значений реактивных сопротивлений:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

### Трёхфазные электрические цепи

1. Трёхфазная электрическая цепь – совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником электрической энергии.

2. Фаза – отдельная электрическая цепь, входящая в состав трехфазной электрической цепи, в которой может существовать один из токов трехфазной системы. Фазой являются обмотка генератора, в которой индуцируется ЭДС, и нагрузка, присоединенная к этой обмотке.

Фазное напряжение – напряжение между началом и концом фазы источника или приемника.

Фазный ток – ток в фазе трехфазной цепи.

3. Линейные провода – провода, соединяющие начала одноименных фаз источника и приемника.

Линейный ток – ток в линейных проводах.

Линейное напряжение – напряжение между линейными проводами или между началами разных фаз.

4. На практике используют трехфазные электрические цепи

$$\frac{U_L}{U_\Phi} = \frac{220}{127} ; \frac{380}{220} ; \frac{660}{380} \text{ В.}$$

5. Трёхфазная система ЭДС (токов, напряжений) – совокупность ЭДС (токов, напряжений) в трехфазной цепи. Общепринятые обозначения начал и концов фаз для источников и приёмников приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Фаза	источник		приемник	
	начало	конец	начало	конец
А	А	Х	а	х
В	В	У	б	у
С	С	Z	с	z

Симметричная система ЭДС (токов, напряжений) – амплитудные (действующие) значения ЭДС (токов, напряжений) во всех фазах равны и сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол  $2\pi/3$ .

6. Выражения для ЭДС трехфазной симметричной системы приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Мгновенные значения	Комплексные значения
$e_A = E_m \sin(\omega t + \Psi)$ $e_B = E_m \sin(\omega t + \Psi - 2\pi/3)$ $e_C = E_m \sin(\omega t + \Psi - 4\pi/3)$	$E_A = E e^{j\Psi}$ $E_B = E e^{j\Psi} e^{-j2\pi/3}$ $E_C = E e^{j\Psi} e^{-j4\pi/3}$

7. Трехфазные симметричные системы ЭДС удовлетворяют уравнениям

$$e_A + e_B + e_C = 0;$$

$$E_A + E_B + E_C = 0.$$

8. Симметричный приемник электрической энергии – трехфазный приемник, у которого комплексные сопротивления всех фаз одинаковы

$$Z_a = Z_b = Z_c.$$

Симметричный режим работы трехфазной цепи – режим работы, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны.

9. Связанная трехфазная цепь – цепь, в которой все фазы электрически соединены. Основными способами соединения фаз являются соединения звездой (рис. 1.13) и треугольником (рис. 1.14).

10. Основные параметры трехфазных цепей связаны между собой в комплексной форме (таблица 1.11).

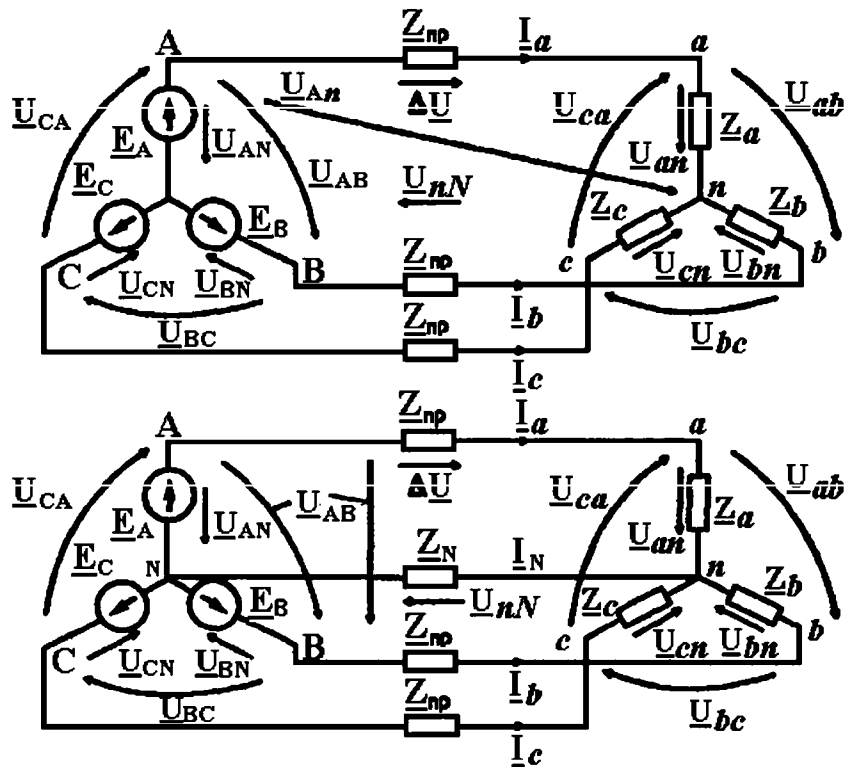


Рис. 1.13. Соединение фаз звездой без нейтрали и с нейтралью

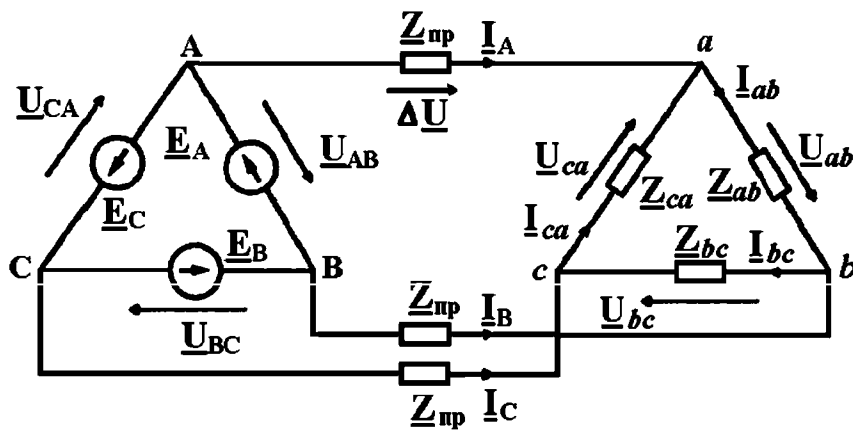


Рис. 1.14. Соединение фаз треугольником

Таблица 1.11

Фазные токи и ток в нейтральном проводе	Линейные и фазные напряжения
$I_a = \frac{U_a}{Z_a} = \underline{U}_a \cdot \underline{Y}_a = \frac{U_{An}}{Z_A} = \underline{U}_{An} \cdot \underline{Y}_A$	$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A + \underline{U}_B$
$I_b = \frac{U_b}{Z_b} = \underline{U}_b \cdot \underline{Y}_b = \frac{U_{Bn}}{Z_B} = \underline{U}_{Bn} \cdot \underline{Y}_B$	$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B + \underline{U}_C$
$I_c = \frac{U_c}{Z_c} = \underline{U}_c \cdot \underline{Y}_c = \frac{U_{Cn}}{Z_C} = \underline{U}_{Cn} \cdot \underline{Y}_C$	$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C + \underline{U}_A$
$I_N = \frac{U_{nN}}{Z_N} = \underline{U}_{nN} \cdot \underline{Y}_N = I_a + I_b + I_c$	$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$

Зависимости, связывающие линейные и фазные параметры для симметричных систем, приведены в таблице 1.12.

Таблица 1.12

Система	Связь между токами	Связь между напряжениями
$\lambda - \lambda$	$I_L = I_\phi$	$U_L = \sqrt{3}U_\phi$
$\Delta - \Delta$	$I_L = \sqrt{3}I_\phi$	$U_L = U_\phi$

11. В трехфазной цепи полную, активную и реактивную мощности определяют, как и в однофазных цепях.

Формулы для определения мощности трехфазного источника или приемника приведены в таблице 1.13.

Таблица 1.13

	Одна фаза	Трехфазный источник или приемник	
		Симметричный	Несимметричный
$S$	$ S_\phi  = \sqrt{R_\phi^2 + Q_\phi^2}$	$3S_\phi$	$\sum_1^3 S_\phi$
$P$	$Re(S_\phi) = U_\phi I_\phi \cos a$	$3P_\phi$	$\sum_1^3 P_\phi$
$Q$	$Im(S_\phi) = U_\phi I_\phi \sin a$	$3Q_\phi$	$\sum_1^3 Q_\phi$

## Переходные процессы в электрических цепях

1. Переходный процесс в электрической цепи – изменение энергетического состояния электрической цепи при переходе от одного установившегося состояния к другому вследствие инерционности её индуктивных и ёмкостных элементов.
2. Переходный процесс в электрических цепях является динамическим и описывается дифференциальными уравнениями.
3. Законы коммутации заключаются в том, что в момент коммутации энергия, запасенная в пассивном реактивном элементе цепи не может изменяться скачками: сила тока в индуктивном и напряжение в ёмкостном элементах не могут изменяться скачком.
4. Для R-L-C-цепи режим синусоидального тока описывается уравнением

$$U = R i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_m \sin \omega t.$$

5. Возможны различные подходы к расчету переходных процессов: аналитическое (классический, операторный и частотный методы) и численное решение дифференциальных уравнений.

При аналитическом классическом решении искомая величина представляется как сочетание свободной и вынужденной составляющих (элементарных математических функций), при подстановке которых в уравнение, последнее вырождается в тождество. Коэффициенты элементарных функций определяются из граничных условий.

При численном решении конечным результатом является таблица значений искомых величин, получаемая за счет применения специальных вычислительных алгоритмов.

## Трансформаторы

1. Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее два или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной

индукции одной или нескольких систем переменных токов и напряжений в одну или несколько других систем переменных токов и напряжений, как правило, той же частоты (рис. 1.15).

2. Первичная обмотка трансформатора – обмотка трансформатора, включаемая в электрическую сеть переменного тока.

Вторичная обмотка трансформатора – обмотка трансформатора, к которой подключают приемники электрической энергии.

3. Номинальные данные трансформатора:

полная мощность  $S_{ном}$ , линейные напряжения первичной  $U_{1лном}$  и вторичной  $U_{2лном}$  обмоток, частота сети  $f$ .

Паспортные данные: значения тока холостого хода  $I_0$  в первичной обмотке (% от  $I_{лном}$ ), напряжение испытательного короткого замыкания  $U_k$  (% от  $U_{1лном}$ ). Для многофазных трансформаторов – схемы соединения обмоток и группа соединения.

Номинальная мощность трансформатора – полная мощность трансформатора.

Номинальное вторичное напряжение – напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода трансформатора.

Номинальный вторичный ток – ток, рассчитанный по номинальной мощности при номинальном вторичном напряжении.

Параметры трансформатора существенно зависят от количества фаз (таблица 1.14).

Таблица 1.14

Фазность трансформатора	Линейный ток $I_{2лном}$	Фазный ток $I_{2ном}$	Номинальная мощность $S_{ном}$
однофазный	$\frac{S_{ном}}{U_{2ном}}$	$\frac{S_{ном}}{U_{2ном}}$	$U_{1ном} I_{1ном} = U_{1лном} I_{1лном}$
трехфазный	$\frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{2ном}}$	$\frac{S_{ном}}{3 U_{2ном}}$	$3 U_{1ном} I_{1ном} = \sqrt{3} U_{1лном} I_{1лном}$

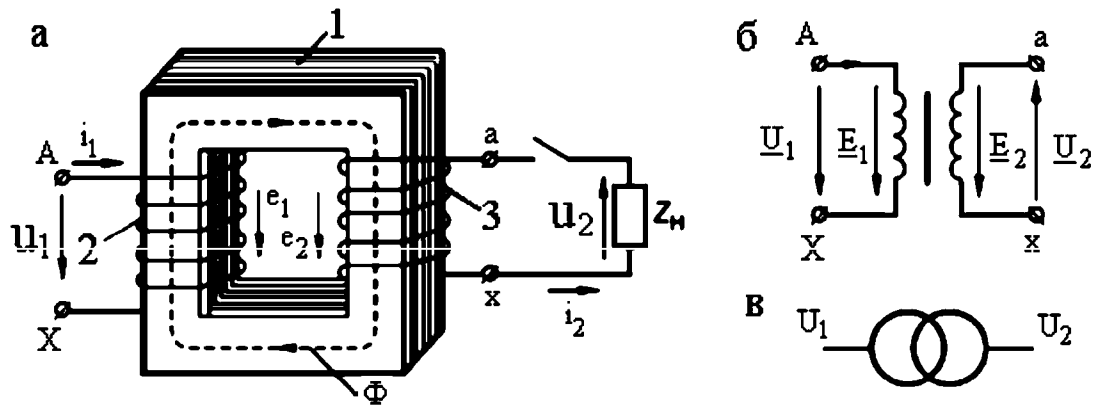


Рис. 1.15. Трансформатор:  
а – принципиальная схема; б, в – условные обозначения

4. Для трансформатора характерны ЭДС (таблица 1.15):

- ЭДС, индуцированная в первичной и вторичной обмотках основным магнитным потоком, замыкающимся по магнитопроводу  $e$ ;
- действующие значения ЭДС, индуцированные основным магнитным потоком  $E$ ;
- ЭДС рассеивания в обмотках  $E_{рас}$ .

Основной магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t).$$

Таблица 1.15

	Первичная обмотка	Вторичная обмотка
Индуцированная ЭДС	$-w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$	$-w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$
Действующая ЭДС $E$	$4,44 f w_1 \Phi_m$	$4,44 f w_2 \Phi_m$
ЭДС рассеивания $E_{рас}$	$-j X_1 I_1$	$-j X_2 I_2$
Индуктивные сопротивления $X$	$\omega L_1$	$\omega L_2$

Коэффициент трансформации определяется отношением количества витков обмоток на выходе и на входе

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$



5. Схема замещения однофазного (одной фазы трехфазного) двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 1.16.

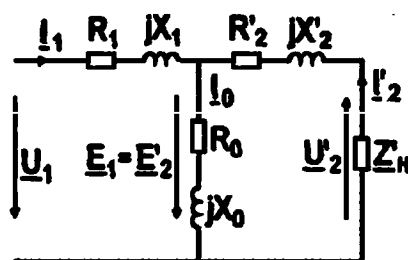


Рис. 1.16. Схема замещения одной фазы трансформатора

$R_1$  и  $X_1$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;

$Z_1 = R_1 + jX_1$  – комплексное сопротивление первичной обмотки;

$Z_2 = R_2 + jX_2$  – комплексное сопротивление приведенной вторичной обмотки;

$R_0$  и  $X_0$  – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания;

$Z_0 = R_0 + jX_0$  – комплексное сопротивление ветви намагничивания.

6. Параметры вторичной обмотки реального и приведенного трансформатора связаны между собой через коэффициент трансформации:

$$E'_2 = n E_2 = E_1, U'_2 = n U_2, I'_2 = I_2/n,$$

$$R'_2 = n^2 R_2, X'_2 = n^2 X_2, Z'_k = n^2 Z_k.$$

где  $E_2, U_2, I_2, R_2, X_2$  – параметры вторичной обмотки реального трансформатора,

$E'_2, U'_2, I'_2, R'_2, X'_2$  – параметры вторичной обмотки приведенного трансформатора,

$Z_k$  – полное фазное сопротивление нагрузки.

7. Уравнения напряжений и токов приведенного трансформатора

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (R_1 + jX_1),$$

$$\underline{U}'_2 = -\underline{E}'_2 + \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2 = -\underline{E}'_2 + \underline{I}'_2 (R'_2 + jX'_2),$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}_2), \underline{I}_0 = \underline{U}_{1ном} / (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) = -\underline{E}_1 / \underline{Z}_2 = -\underline{E}'_2 / \underline{Z}'_2,$$

где  $\underline{I}_0$  – ток холостого хода.

$-I'_2 = -1/nI_2$  – составляющая тока  $I_1$ , обусловленная током во вторичной обмотке.

Ток в нагрузке реального и приведенного трансформаторов

$$\underline{I}_2 = \frac{U_2}{Z_2}; I'_2 = \frac{U'_2}{Z'_2}.$$

8. Коэффициент загрузки трансформатора

$$B = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I'_2}{I_{1\text{ном}}}.$$

9. Сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$Z_k = Z_1 + Z'_2 = R_k + jX_k = Z_k e^{j\varphi_k} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \cdot e^{j\varphi_k},$$

$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}$  – аргумент  $Z_k$ .

Для симметричной схемы замещения справедливо

$$Z_1 = Z'_2 = \frac{Z_k}{2}; R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}; X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2}.$$

Потеря напряжения в трансформаторе

$$\Delta u = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2).$$

Мощность потерь в режиме

- холостого хода

$$P_0 = U_{1\text{ном}} I_0 \cos \varphi_0 = I_0^2 (R_1 + R_0) \sim I_0^2 R_0,$$

$$P_0 = 3U_{1\text{ном}} I_0 \cos \varphi_0 = 3I_0^2 (R_1 + R_0) \sim 3I_0^2 R_0.$$

- испытательного короткого замыкания

$$P_0 = U_{1к} I_{1\text{ном}} \cos \varphi_k = I_{1\text{ном}}^2 R_k,$$

$$P_0 = 3U_{1к} I_{1\text{ном}} \cos \varphi_k = 3I_{1\text{ном}}^2 R_k.$$

Мощность потерь в трансформаторе

$$\Sigma P_n = P_0 + \beta^2 R_k.$$

КПД трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}.$$

Максимальное значение КПД

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{2P_0}{\beta_{\text{опт}} S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2P_0}.$$

## **1.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

### ***1.2.1. Лабораторная работа № 1***

#### **Исследование пассивных линейных двухполюсников в цепях постоянного тока**

**Цель работы:** изучить методики измерения силы тока, напряжения, определения эквивалентного сопротивления пассивного двухполюсника.

#### **Объект и средства измерения**

Объектом исследования служат линейные двухполюсные элементы, содержащие сопротивления из комплекта наборных элементов (комплектующие лабораторного стенда УИЛС-1).

В работе используется регулируемый источник постоянного напряжения 0-30 В, расположенный в блоке постоянных напряжений. Включение источника осуществляется тумблером «Вкл./сеть», при этом загорается светодиод над тумблером. Регулировка напряжения осуществляется поворотом ручки потенциометра «напряжение».

Блок находится под защитой от коротких замыканий. В случае некорректной сборки электрической схемы загорается индикатор «защита» и срабатывает зуммер.

Измерение напряжения осуществляется вольтметром, встроенным в блок постоянных напряжений. Измерение силы тока осуществляется учебным миллиамперметром. Измерение сопротивления наборных элементов осуществляется цифровым переносным мультиметром серии VC9808.

#### **Подготовка к работе**

1.1. Ознакомиться с методами измерения тока, напряжения приборами непосредственной оценки.

1.2. Ознакомиться с методами анализа пассивных линейных двухполюсников в цепях постоянного тока.

#### **Рабочее задание**

1.3. Используя цифровой мультиметр определить величины сопротивлений, задействованных в схеме двухполюсника (выдаются преподавателем).

1.4. Последовательно собрать схемы (рис. 1.17) с полученными для опытов сопротивлениями и используя показания вольтметра и амперметра рассчитать по закону Ома величины сопротивлений.

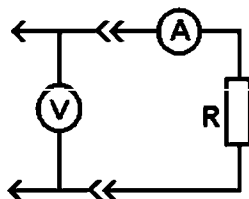


Рис. 1.17. Электрическая схема для определения сопротивления

1.5. Определить процентное расхождение между величинами сопротивлений, измеренными мультиметром и приборами стенда:

$$\Delta = \frac{2|R - R_m|}{R + R_m},$$

где  $R$  – величина сопротивления, рассчитанная по закону Ома согласно показаниям миллиамперметра и вольтметра,

$R_m$  – величина сопротивления, измеренная мультиметром.

Результаты внести в таблицу 1.16.

1.6. Собрать схему с подключенным линейным двухполюсником из четырех сопротивлений согласно рис. 1.18.

Таблица 1.16

Сопротивление	Показания мультиметра $R_m$ , Ом	Показания вольтметра $U$ , В	Показания амперметра $I$ , мА	$R = \frac{U}{I}$	$\Delta = \frac{2 R - R_m }{R + R_m}$
R1					
...					
R5					

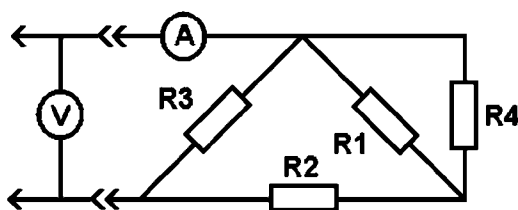


Рис. 1.18. Электрическая схема линейного двухполюсника

1.7. Снять показания амперметра и вольтметра при напряжении источника питания 10 В. Определить по закону Ома величину эквивалентного сопротивления двухполюсника.

1.8. Вывести формулу эквивалентного сопротивления пассивного двухполюсника по схеме рис. 1.16 исходя из значений сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Рассчитать эквивалентное сопротивление с учетом измеренных величин сопротивлений по пункту 1.3.

1.9. Сравнить результаты, полученные из опыта и при выводе формулы эквивалентного сопротивления двухполюсника. Определить процент расхождения сравниваемых результатов.

1.10. Собрать схему с подключенным линейным двухполюсником согласно рис. 1.18.

1.11. Повторить пункты 1.7–1.9 применительно к схеме рис. 1.19.

1.12. Снять вольт-амперную характеристику пассивного двухполюсника (рис. 1.16):

- принять начальное напряжение на входе 2,5 В, шаг приращения 2,5 В;
- зафиксировать 8–9 показаний;
- по полученным данным заполнить таблицу 1.17.

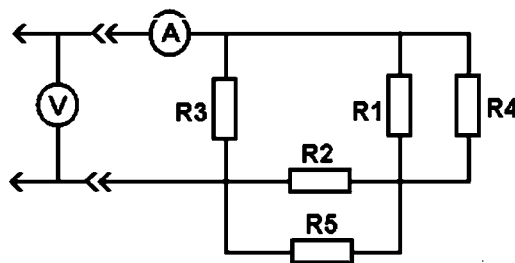


Рис. 1.19. Электрическая схема линейного двухполюсника

Таблица 1.17

U, В							
I, мА							

Построить на графике вольт-амперную характеристику пассивного двухполюсника согласно таблице 1.17.

## **Контрольные вопросы**

1. Каковы особенности измерения сопротивлений амперметром и вольтметром?
2. Что такое омметр?
3. Что такое вольт-амперная характеристика двухполюсника?
4. Каковы параметры активных двухполюсников?
5. Как определить погрешность измерения?
6. Как определяется цена деления амперметра, вольтметра?
7. Как осуществить выбор измерительных приборов для конкретных измерений?
8. Что такое электрическое сопротивление?

### ***1.2.2. Лабораторная работа № 2***

#### **Определение параметров пассивных элементов в цепях переменного тока**

**Цель работы:** овладеть методикой определения характеристик пассивных элементов в цепях переменного тока.

#### **Объект и средства измерения**

Объектом исследования служат двухполюсные элементы, содержащие емкость и индуктивность из комплекта наборных элементов (комплектующих лабораторного стенда УИЛС-1).

В работе используется регулируемый источник переменного напряжения 0-30 В, расположенный в блоке переменных напряжений. Включение источника осуществляется тумблером «Вкл./сеть», при этом загорается светодиод над тумблером. Регулировка напряжения осуществляется поворотом ручки потенциометра «напряжение». Настройка частоты колебаний переменного тока осуществляется тумблером и ручкой потенциометра «плавно».

Измерение напряжения осуществляется вольтметром, встроенным в блок постоянных напряжений. Измерение силы тока осуществляется учебным миллиамперметром.

В лабораторной работе используется цифровой переносной мультиметр серии МУ6Х для измерений сопротивлений резисторов, емкости конденсатора и частоты колебаний переменного тока.

### **Подготовка к работе**

2.1. Ознакомиться с методами измерения тока, напряжения, приборами непосредственной оценки.

2.2. Освоить методику построения векторных диаграмм для цепей переменного тока.

### **Рабочее задание**

2.3. Определение ёмкости конденсатора с помощью мультиметра.

Измерить емкость конденсатора цифровым мультиметром:

- убедиться в разрядке конденсатора;
- установить конденсатор в гнезда наборного поля стенда;
- в цифровом мультиметре VC9808 на передней панели:
  - красный щуп подключить к гнезду mA,
  - черный щуп подключить к гнезду COM;
- переключатель рода работы мультиметра установить в положение «F» ( $20\mu\text{F}$ );
- включить мультиметр (кнопка «POWER», кнопка «DC/AC»);
- концы щупов подключить к свободным гнездам узла стенда, к которому подсоединен конденсатор.

2.4. Определение сопротивлений резисторов с помощью мультиметра.

Используя цифровой мультиметр определить величины сопротивлений резисторов, задействованных в исследуемых схемах.

2.5. Определение частоты колебаний с помощью мультиметра.

Используя цифровой мультиметр определить частоту колебаний тока, генерируемых блоком переменного тока стенда:

- установить резистор в гнезда наборного поля стенда,
- соединить проводами выходы блока переменного тока с выходами резистора,
- включить стенд, установить напряжение 5 В,

- переключатель рода работы мультиметра установить в положение «МГц»,
- концы щупов подключить к свободным гнездам узла стенда, к которому подсоединена нагрузка.

### 2.6. Измерение ёмкости методом вольтметра-амперметра:

- собрать R-C цепь по схеме на рис. 1.20, а;
- снять показания приборов при напряжении источника 10 В;
- построить векторную диаграмму сопротивлений, рассчитать значение ёмкости  $C$ , основываясь на показаниях приборов.

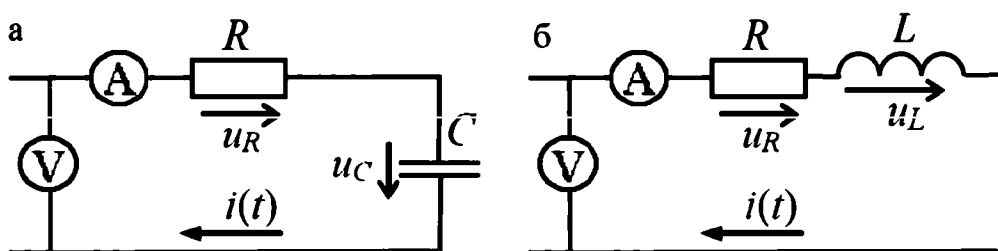


Рис. 1.20. Схемы RC-цепи (а) и RL-цепи (б)

### 2.7. Измерение индуктивности методом вольтметра-амперметра:

- собрать R-L цепь по схеме на рис. 1.20, б;
- построить векторную диаграмму сопротивлений, рассчитать значение индуктивности  $L$ , основываясь на показаниях приборов (напряжение источника 10 В).

### 2.8. Измерение ёмкости конденсатора по мостовой схеме.

Собрать мостовую схему по рис. 1.21.

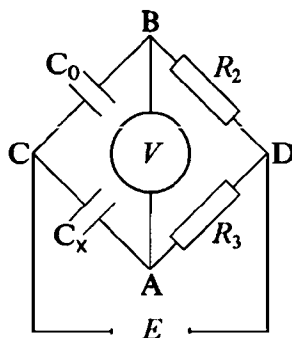


Рис. 1.21. Мостовая схема для измерения конденсаторов:

$R_3$  и  $R_2$  – магазины сопротивлений;  $C_0$  – магазин емкостей;  $C_x$  – конденсатор, емкость которого требуется определить



Полные сопротивления плеч моста (рис. 1.19):

$$Z_1 = X_1 = 1/\omega C_0 \quad (R_1 = 0);$$

$$Z_2 = R_2 \quad (X_2 = 0);$$

$$Z_3 = R_3 \quad (X_3 = 0);$$

$$Z_4 = X_4 = 1/\omega C_4 \quad (R_4 = 0).$$

При балансе моста

$$X_1 \cdot R_3 = X_4 \cdot R_2$$

или

$$C_x = C_0 \cdot R_2 / R_3.$$

Изменяя величину емкости магазина емкостей  $C_0$  можно добиться минимального показания вольтметра.

2.9. Определение резонансной частоты колебательного контура:

- собрать R-L-C цепь по схеме на рис. 1.22;
- снять показания приборов при напряжении источника 10 В;
- рассчитать резонансную частоту R-L-C цепи. Построить векторную диаграмму.

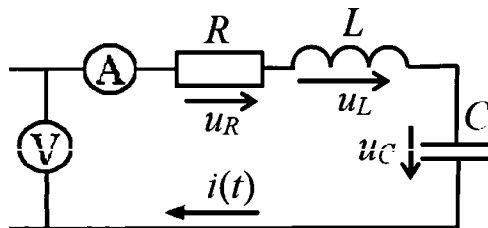


Рис. 1.22. Схема колебательного контура

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- исследуемые схемы (пп. 2.6, 2.7, 2.8, 2.9);
- векторные диаграммы комплексных сопротивлений (пп. 2.3, 2.4);
- значения измеренных приборами величин;
- значения рассчитанных величин (пп. 2.8, 2.9);
- цель работы и выводы.

## Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются синусоидальный ток?
2. Каково соотношение между амплитудным и действующим значениями величин, изменяющихся по синусоидальному закону?
3. Построить векторную диаграмму напряжения и тока для участка цепи.
4. Как величина индуктивного и емкостного реактивных сопротивлений зависит от частоты питающего напряжения?
5. Построить векторные диаграммы для участков цепи с идеальной индуктивностью и идеальной емкостью.
6. Как определяют активное, реактивное и полное сопротивления цепи, содержащей несколько последовательно включенных элементов?

### 1.2.3. Лабораторная работа № 3

#### Исследование режимов работы сложных цепей постоянного тока

**Цель работы:** исследовать режим работы двух и трехконтурных цепей постоянного тока, содержащих два источника ЭДС.

#### Объект и средства исследования

Объект исследования – двух и трехконтурная электрическая цепь постоянного тока, содержащая два источника ЭДС:

- стационарный источник постоянного тока E1 (стенд УИЛС-1),
- переносной источник постоянного тока E2 (DCPOWERSUPPLY).

Измерительные приборы: миллиамперметр А и вольтметр В.

Двухконтурная электрическая цепь (рис. 1.23) содержит 3 линейных сопротивления.

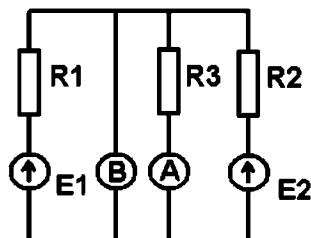


Рис. 1.23. Схема двухконтурной электрической схемы

Трехконтурная электрическая цепь (рис. 1.24) содержит 5 линейных сопротивлений.

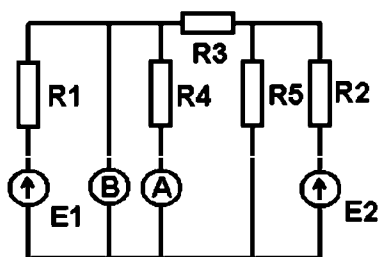


Рис. 1.24. Схема трехконтурной электрической схемы

Сопротивление соединительных проводов принимается равным нулю.

### Подготовка к работе

- 3.1. Составить систему алгебраических уравнений по 1 и 2 законам Кирхгофа, описывающих электрические цепи на рис. 1.23 и рис. 1.24.
- 3.2. Задав значения  $E1 = 12 \text{ В}$  и  $E2 = 15 \text{ В}$  рассчитать показания амперметра А и вольтметра В.

### Рабочее задание

- 3.3. Разместить на наборном поле стенда сопротивления, подсоединить их к измерительным приборам и источникам питания согласно схеме на рис. 1.23. Настроить источники питания на  $E1 = 12 \text{ В}$  и  $E2 = 15 \text{ В}$ . Снять показания приборов.
- 3.4. Сравнить результаты измерений с результатами расчетов для двухконтурной электрической цепи.
- 3.5. Разместить на наборном поле стенда сопротивления, соединить необходимыми проводами и подсоединить к измерительным приборам и источникам питания согласно схеме на рис. 1.24. Настроить источники питания на  $E1 = 12 \text{ В}$  и  $E2 = 15 \text{ В}$ . Снять показания приборов.
- 3.6. Сравнить результаты измерений с результатами расчетов для трехконтурной электрической цепи.

3.7. По согласованию с преподавателем выбрать схему рис. 1.23 или рис. 1.24. Задаться фиксированным значением  $E_1 = 10$  В. Снять показания приборов при изменении  $E_2$  от 1 В до 19 В с шагом 2 В. Заполнить таблицу 1.18.

Таблица 1.18

$E_2, \text{ В}$	1	3	...	17	19
$I, \text{ мА}$					
$U, \text{ В}$					

Построить графики зависимостей  $I = f(E_2)$ ,  $U = f(E_2)$ .

3.8. Задаться фиксированным значением  $E_2 = 10$  В. Снять показания приборов при изменении  $E_1$  от 1 В до 15 В с шагом 2 В. Построить график зависимостей  $I = f(E_1)$ ,  $U = f(E_1)$ .

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- исследуемые схемы (пп. 3.3, 3.5) и уравнения, описывающие их;
- значения измеренных приборами величин;
- графики зависимостей (пп. 3.7);
- цель работы и выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что понимается под независимым контуром?
2. Какое количество уравнений по 1 закону Кирхгофа можно использовать для расчета сложной цепи?
3. По каким правилам формируются матрицы системы алгебраических уравнений для расчета сложных цепей?
4. Что такое контурный ток?
5. В чем заключается сущность метода наложений для расчета сложных электрических цепей?
6. В чем заключается отличие сложных цепей от простых?
7. Сколько узлов и ветвей содержит двухконтурная (трехконтурная) электрическая цепь?

### **1.2.4. Лабораторная работа № 4**

#### **Исследование трехфазной электрической цепи при присоединении приемников звездой**

**Цель работы:** изучить и экспериментально исследовать трех- и четырехпроводную трехфазные цепи при симметричной и несимметричной нагрузке. Научиться строить векторные диаграммы трехфазных электрических цепей при соединении приемников звездой.

#### **Объект и средства измерения**

Объектом исследования служит трехфазная электрическая цепь, собранная на базе учебно-исследовательского лабораторного стенда УИЛС-1.

В работе используется блок трехфазной цепи, содержащий три источника переменного тока с фазовым сдвигом относительно друг друга. Исследуемую трехфазную цепь собирают на наборном поле, соединяя сопротивления из блока сопротивлений.

Измерение токов и напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами или цифровым переносным мультиметром серии VC9808. Измерение сопротивления наборных элементов осуществляется цифровым переносным мультиметром серии VC9808.

#### **Рабочее задание**

- 4.1. Собрать несвязанную трехфазную электрическую цепь по схеме на рис. 1.25. Настройка напряжения фаз блока питания трехфазной цепи осуществляется соответствующими тумблерами блока.
- 4.2. Измерить напряжения и токи во всех фазах цепи. Результаты записать в таблицу 1.19. Определить величины сопротивлений нагрузки.

Таблица 1.19

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Напряжение, В			
Сила тока, А			
Сопротивление, Ом			

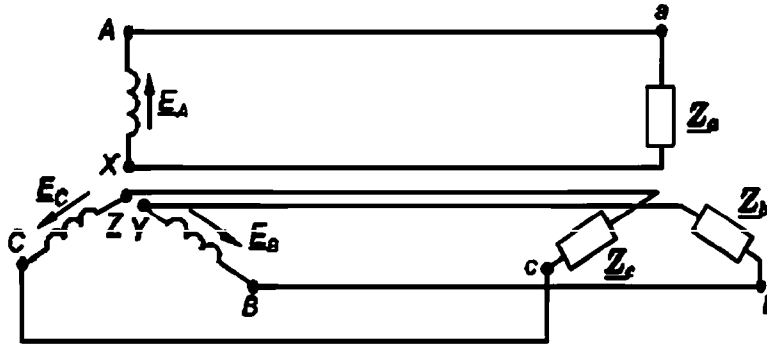


Рис. 1.25. Схема несвязанной трехфазной электрической цепи

- 4.3. Собрать связанную трехфазную электрическую цепь с нейтральным проводом по схеме на рис. 1.26. Сопротивления  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  выбираются из набора сопротивлений комплектующих лабораторного стенда УИЛС-1 исходя из обеспечения симметричной и несимметричной нагрузки. Узел N собирается на наборном поле лабораторного стенда присоединением одного из выходов каждой фазы блока питания трехфазной цепи.
- 4.4. Измерить фазные напряжения и токи во всех фазах цепи для вариантов схемы (рис. 1.26) с симметричной и несимметричной нагрузкой. Результаты записать в таблицу 1.20.

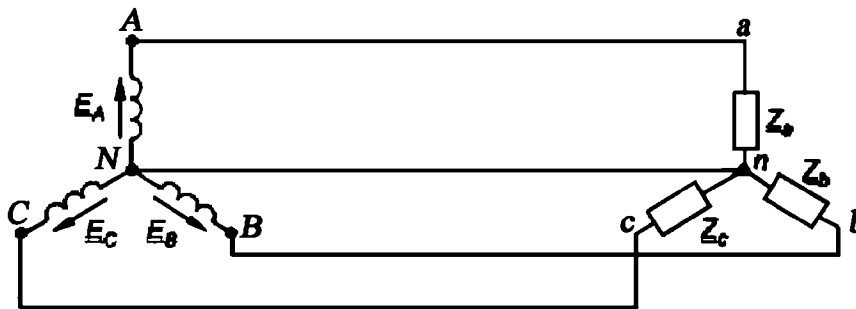


Рис. 1.26. Схема связанной трехфазной электрической цепи

- 4.5. Измерить линейные напряжения цепи для вариантов схемы (рис. 1.26) с симметричной и несимметричной нагрузкой. Результаты записать в таблицу 1.21.
- 4.6. Собрать связанную трехфазную электрическую цепь без нейтрального провода по схеме на рис. 1.27.

Таблица 1.20

	Измеряемый параметр	Симметричная нагрузка	Несимметричная нагрузка	Сопротивление нагрузки	
				симметр. нагрузка	несимметр. нагрузка
Фаза А	Напряжение				
	Сила тока				
Фаза В	Напряжение				
	Сила тока				
Фаза С	Напряжение				
	Сила тока				
Нейтральный провод	Сила тока				

Таблица 1.21

	Симметричная нагрузка	Несимметричная нагрузка
АВ		
ВС		
АС		

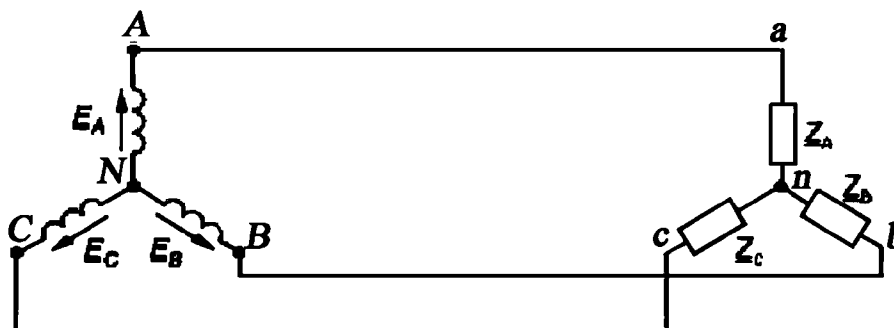


Рис. 1.27. Схема трехфазной электрической цепи без нейтрали

- 4.7. Измерить линейные напряжения цепи для вариантов схемы (рис. 1.27) с симметричной и несимметричной нагрузкой. Результаты записать в таблицу 1.22.
- 4.8. Построить векторные диаграммы токов (напряжений) для пп. 4.3 и 4.5.
- 4.9. Определить мощность трехфазного приемника для пп. 4.3 и 4.5.

Таблица 1.22

	Симметричная нагрузка	Несимметричная нагрузка
АВ		
ВС		
АС		

### Контрольные вопросы

1. Что такое фазное и линейное напряжения трехфазной электрической цепи?
2. Что такое фаза трехфазной электрической цепи?
3. Каково соотношение между фазами в трехфазной электрической цепи?
4. Какие функции играет нейтральный провод трехфазной электрической цепи?
5. Как определить мощность приемника трехфазной электрической цепи?
6. Как изменится векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве одного из проводов в трехфазной симметричной связанной цепи с нейтральным проводом?
7. Как изменится векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве одного из линейных проводов в трехфазной симметричной связанной цепи?
8. Как связаны между собой линейные и фазные напряжения для симметричной трехфазной электрической цепи?
9. Как изменится векторная диаграмма напряжений и токов при изменении нагрузки в одной из фаз трехфазной симметричной связанной цепи с нейтральным проводом?



## 1.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### 1.3.1. Практическое занятие № 1

#### Параллельно-последовательное соединение сопротивлений

**Цель занятия:** освоение методов расчета эквивалентных сопротивлений и проводимостей при параллельно-последовательных схемах соединения сопротивлений.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### Решение примеров

**Задание:** рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис. 1.28), если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10$  Ом.

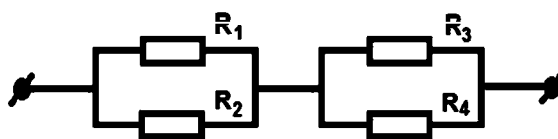


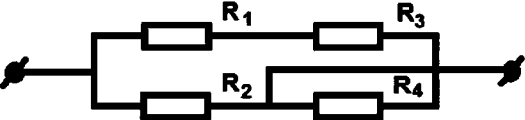
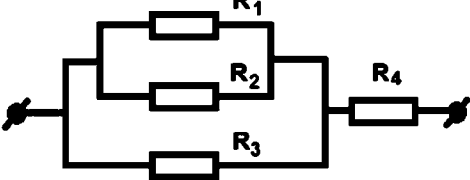
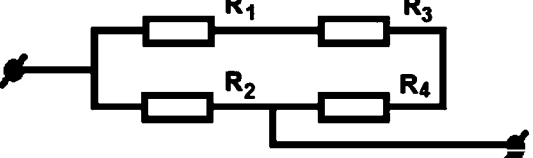
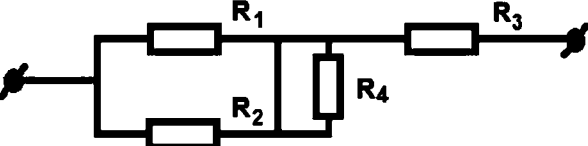
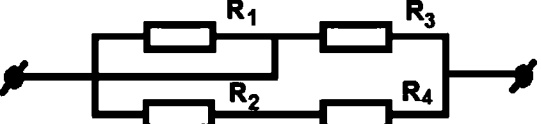
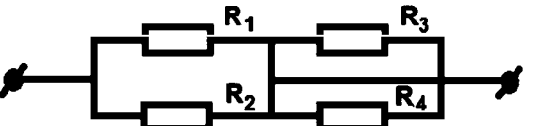
Рис. 1.28

**Решение:** участок электрической цепи представляет собой два блока из двух параллельных сопротивлений соединенных последовательно, соответственно

$$R_{\text{Э}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = 10.$$

**Задание 1:** рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи из четырех сопротивлений (табл. 1.23), если

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом.}$$

№	Варианты расчетных схем
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Задание 2: рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис. 1.29) для случая включения ключа К и его выключения, если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10 \text{ Ом}$ .

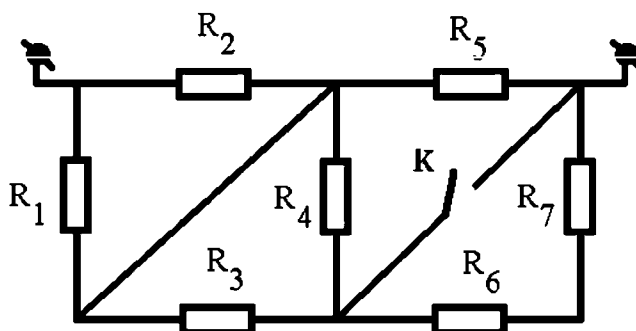


Рис. 1.29

## **Контрольные вопросы**

1. Как определить проводимость проводника?
2. Как определить сопротивление проводника?
3. Как связаны между собой величина сопротивления и температура нагрева проводника?
4. Как выглядит вольтамперная характеристика для проводника, у которого сопротивление не зависит от температуры?
5. Как определить сопротивление пассивного участка электрической цепи через потребляемую мощность?
6. Назовите единицу измерения в системе СИ для сопротивления и проводимости.
7. Сколько сопротивлений номиналом 10 Ом потребуется для получения двухполюсника с эквивалентным сопротивлением 12,5 Ом? Изобразите схему соединений.
8. Сколько сопротивлений номиналом 10 Ом потребуется для получения двухполюсника с эквивалентным сопротивлением 15 Ом? Изобразите схему соединений.
9. Сколько сопротивлений номиналом 10 Ом потребуется для получения двухполюсника с эквивалентным сопротивлением 17,5 Ом? Изобразите схему соединений.

### ***1.3.2. Практическое занятие № 2***

#### **Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Потенциальные диаграммы**

**Цель занятия:** освоение методов расчета эквивалентных сопротивлений и проводимостей при схемах соединения сопротивлений звезда-треугольник. Освоение методики построения потенциальных диаграмм.

#### **План проведения занятия**

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

## Решение примеров

*Задание:* построить потенциальную диаграмму для цепи (рис. 1.30), если  $E_1 = 8$  В;  $E_2 = 24$  В;  $E_3 = 12$  В;  $r_1 = 4$  Ом;  $r_2 = 6$  Ом;  $r_3 = 10$  Ом;  $r_4 = 12$  Ом;  $r_5 = 8$  Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

Построение потенциальной диаграммы начинаем с точки А в обход контура по часовой стрелке (рис. 1.31).

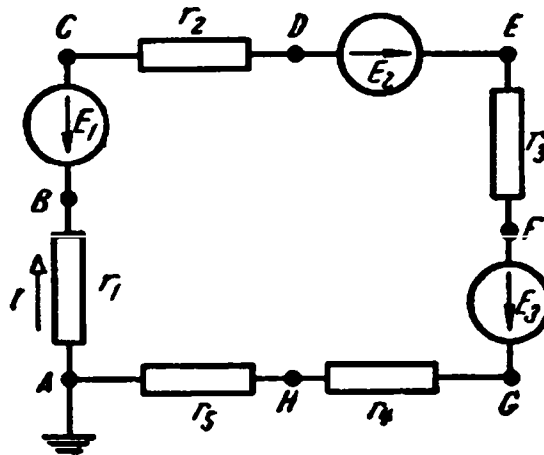


Рис. 1.30. Схема электрической цепи

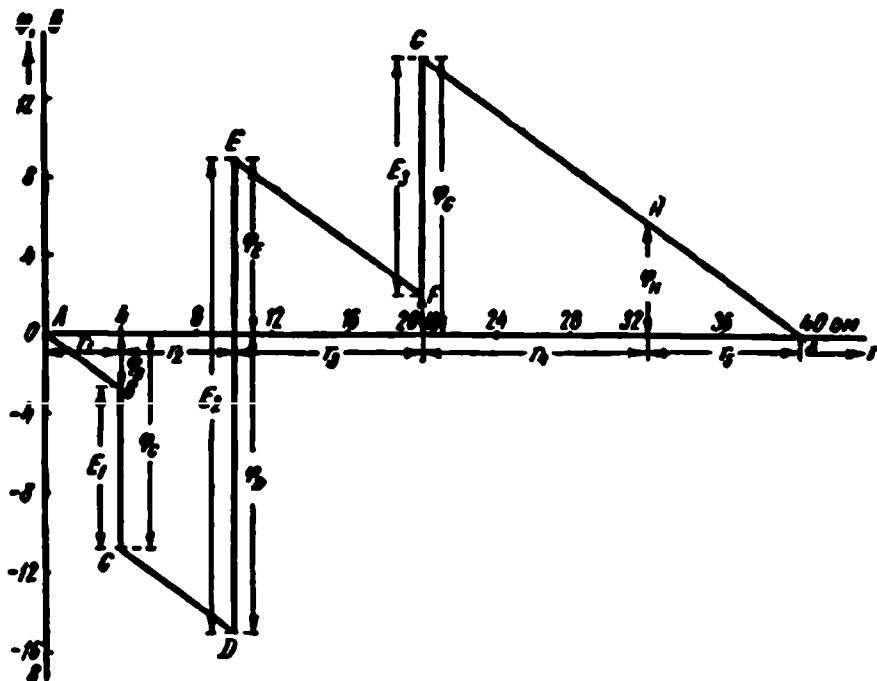


Рис. 1.31. Пример построения потенциальной диаграммы

## Расчетные задания

*Задание 1:* определить эквивалентное сопротивление цепи (рис. 1.32), если сопротивления отдельных ветвей цепи:  $r_1 = 7,9 \text{ Ом}$ ;  $r_2 = 17 \text{ Ом}$ ;  $r_3 = 20 \text{ Ом}$ ;  $r_4 = 14 \text{ Ом}$ ;  $r_5 = 13 \text{ Ом}$ ;  $r_6 = 5 \text{ Ом}$ ;  $r_7 = 50 \text{ Ом}$ ;  $r_8 = 30 \text{ Ом}$ .

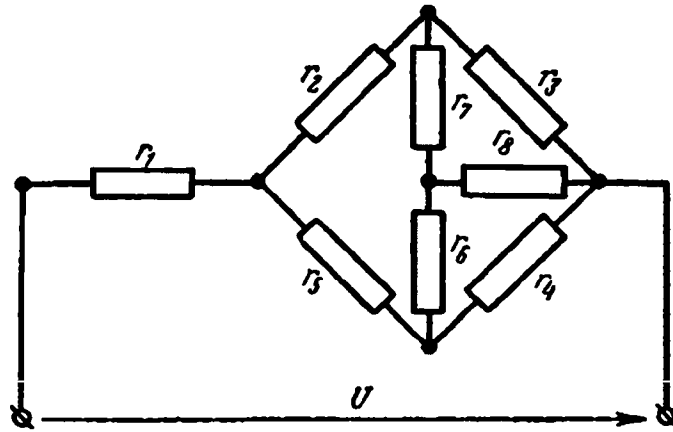


Рис. 1.32. Схема к расчетному заданию 1

*Задание 2:* определить ток  $I_5$  в диагонали схемы моста (рис. 1.33), сопротивление которой  $r_5 = 100 \text{ Ом}$ , если сопротивления плеч моста  $r_1 = 40 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $r_3 = 60 \text{ Ом}$ ,  $r_4 = 30 \text{ Ом}$ , а ЭДС источника  $E = 12 \text{ В}$  и внутреннее сопротивление его  $r_{в} = 4 \text{ Ом}$ .

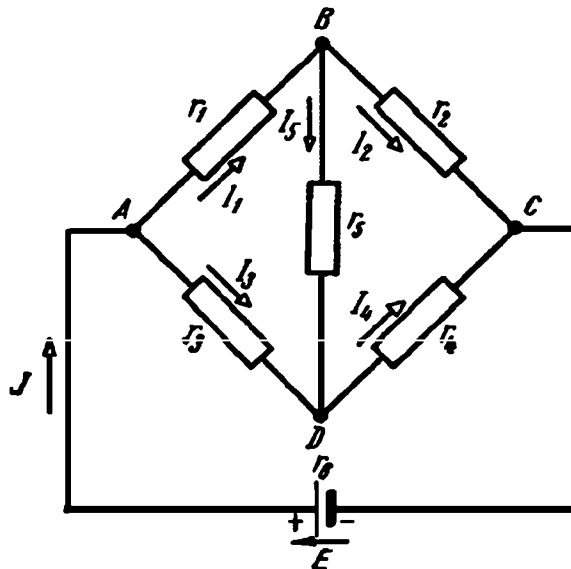


Рис. 1.33. Схема к расчетному заданию 2

**Задание 3:** построить потенциальную диаграмму для цепи (рис. 1.34), если  $E_1 = 125$  В,  $E_2 = 115$  В,  $r_{B1} = 0,4$  Ом,  $r_{B2} = 0,2$  Ом,  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 5$  Ом,  $r_3 = 2,4$  Ом.

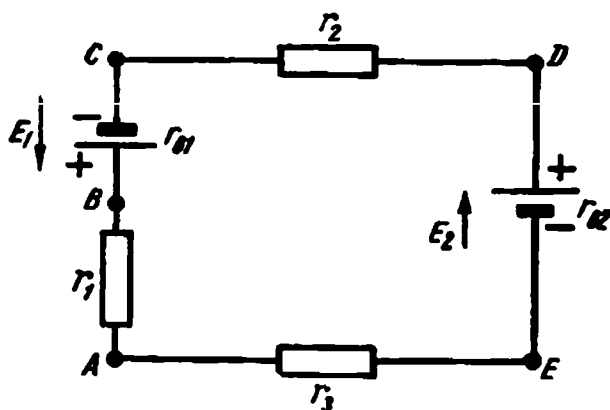


Рис. 1.34. Схема к расчетному заданию 3

### Контрольные вопросы

1. Какие требования к параметрам электрической цепи необходимо соблюдать при эквивалентной замене схем «звезда» и «треугольник»?
2. В каких устройствах применяются схемы соединений «звезда» и «треугольник»?
3. Как отображается величина ЭДС источника на потенциальной диаграмме?
4. Как отображается влияние сопротивлений на потенциальной диаграмме?

### 1.3.3. Практическое занятие № 3

#### Законы Ома и Кирхгофа

**Цель занятия:** освоение методов расчета простых электрических цепей с использованием законов Ома и Кирхгофа.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Решение примеров.
3. Ответы на контрольные вопросы.

## Решение примеров

*Задание 1:* вычислить эквивалентную проводимость  $g$  и эквивалентное сопротивление  $r$  цепи (рис. 1.35), напряжение  $U$  на зажимах цепи и токи в параллельных ветвях, если ток  $I = 46,2$  А,  $r_1 = 10$  Ом,  $r_2 = 50$  Ом,  $r_3 = 20$  Ом,  $r_4 = 25$  Ом.

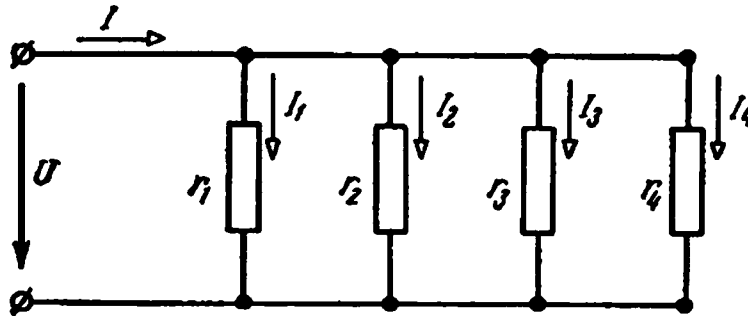


Рис. 1.35. Схема к заданию 1

*Задание 2:* найти ток в цепи (рис. 1.36), если известно, что ЭДС каждого гальванического элемента  $E = 1,45$  В, а его внутреннее сопротивление  $r_1 = 1$  Ом, а внешнее сопротивление  $r = 4,8$  Ом.

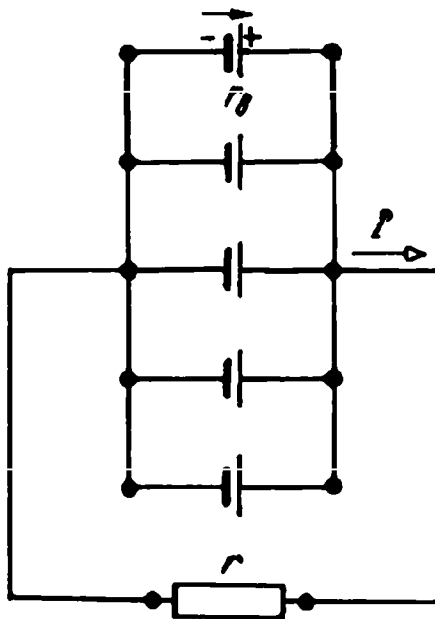


Рис. 1.36. Схема к заданию 2

*Задание 3:* Определить токи  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  в цепи (рис. 1.37), если  $E_1 = 120$  В,  $E_2 = 119$  В,  $r_{B1} = 0,6$  Ом,  $r_{B2} = 0,3$  Ом,  $r_1 = 4,4$  Ом,  $r_2 = 2,7$  Ом,  $r = 22$  Ом.

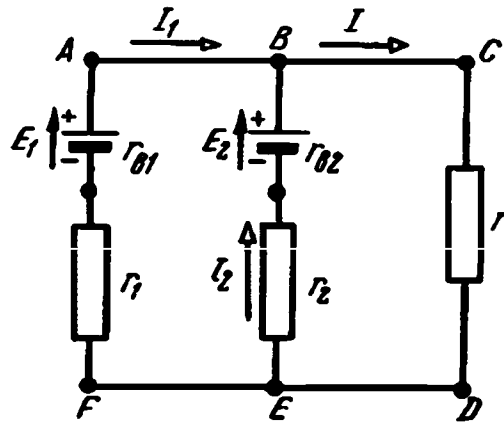


Рис. 1.37. Схема к заданию 3

**Задание 4.** Электрическая цепь (рис. 1.38) имеет сопротивления  $R_1 = 18 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ . Определить токи ветвей, если напряжение  $U = 120 \text{ В}$ .

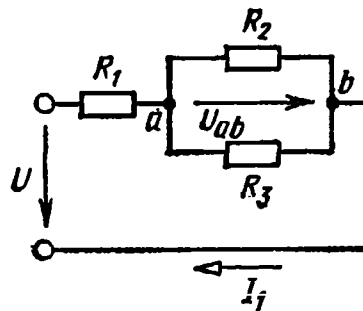


Рис. 1.38. Схема к заданию 4

**Задание 5.** Найти распределение токов в схеме (рис. 1.39), если  $R_1 = R_2 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_7 = 2 \text{ Ом}$ . Напряжение на входе  $U = 120 \text{ В}$ .

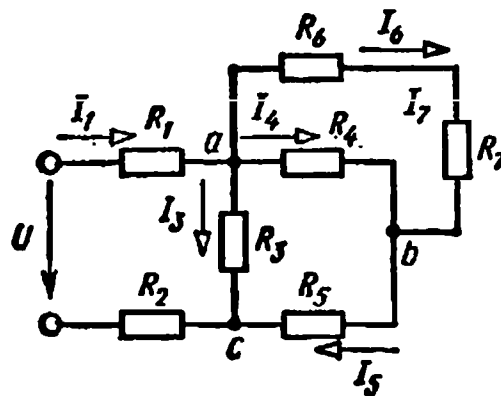


Рис. 1.39. Схема к заданию 5



## Контрольные вопросы

1. Как изменится напряжение на участках  $R_2$  и  $R_3$  (рис. 1.40) при замыкании ключа  $K$  ( $U = \text{const}$ )?

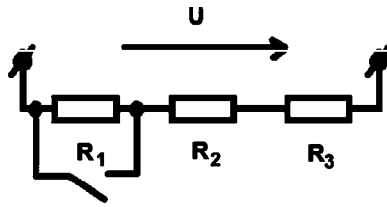


Рис. 1.40. Схема к контрольному вопросу 1

2. Если сопротивление  $R$  и напряжение  $U$  увеличить в два раза, то что произойдет с током  $I$  (рис. 1.41)?

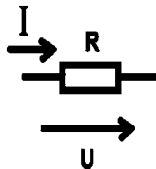


Рис. 1.41. Схема к контрольному вопросу 2

3. Как изменится напряжение на сопротивлении  $R_1$ , если сопротивление  $R_3$  уменьшилось при неизменном напряжении  $U$  (рис. 1.42)?

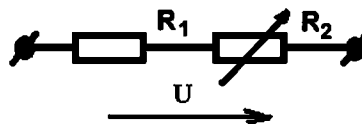


Рис. 1.42. Схема к контрольному вопросу 3

4. Как изменятся токи  $I_1$  и  $I_2$ , если сопротивление  $R_3$  уменьшится (рис. 1.43)?

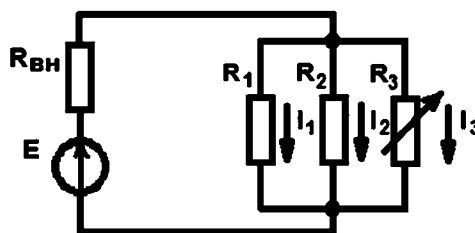


Рис. 1.43. Схема к контрольному вопросу 4

### 1.3.4. Практическое занятие № 4

#### Расчет цепей переменного тока

**Цель занятия:** освоение методов расчета электрических цепей переменного тока.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### Пример решения типовой задачи

**Задача.** К электрической цепи (рис. 1.44) приложено синусоидальное напряжение  $u = Um \cdot \sin \omega t$ . Используя законы Кирхгофа, составить систему уравнений для токов в ветвях в дифференциальной форме и преобразовать ее в систему для комплексных токов.

**Решение.** Приняв условные положительные направления токов и напряжений и направления обхода контуров (рис. 1.44) система уравнений имеет вид

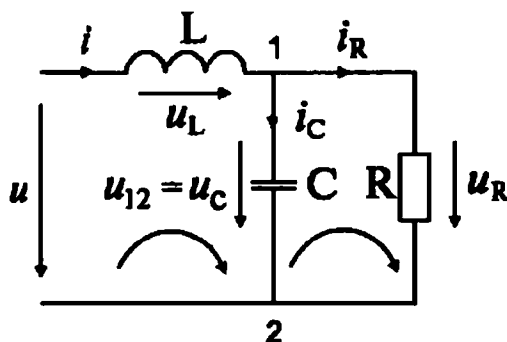


Рис. 1.44. Схема к задаче

$$i - i_R - i_C = 0,$$

$$u_L + u_C - u = 0,$$

$$u_R - u_C = 0.$$

С учетом уравнений связи система уравнений примет вид

$$i - i_R - i_C = 0,$$

$$R i_R - \frac{1}{C} \int i dt = 0,$$

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = u.$$

Синусоидальным напряжениям, току, производным и интегралам от них соответствуют их комплексные изображения

$$u \rightarrow U_m e^{j\omega t}; \quad i \rightarrow I_m e^{j\omega t}; \quad i_R \rightarrow I_{Rm} e^{j\omega t}; \quad i_C \rightarrow I_{Cm} e^{j\omega t};$$

$$\frac{di}{dt} \rightarrow j\omega I_m e^{j\omega t}; \quad \int i_C dt = \frac{1}{j\omega} I_C e^{j\omega t}.$$

После подстановки комплексных изображений параметров в систему дифференциальных уравнений получим систему уравнений для комплексных действующих токов и напряжений

$$\underline{I} - \underline{I}_R - \underline{I}_C = 0,$$

$$jX_L \underline{I} - jX_C \underline{I}_C = \underline{U},$$

$$R \underline{I}_R + jX_C \underline{I}_C = 0.$$

где  $X_L = \omega L$  и  $X_C = 1/\omega C$  – индуктивное и емкостное сопротивления.

Полученной системе уравнений соответствует схема на рис. 1.45.

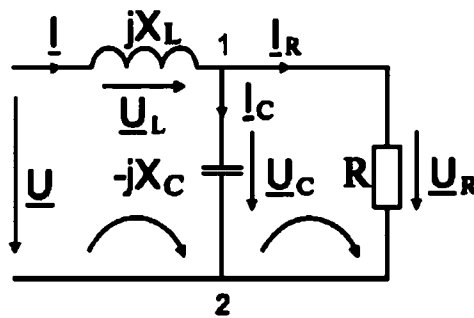


Рис. 1.45. Уточненная схема

Примеры расчета электрической цепи переменного тока в математическом пакете MathCad приведены на рис. 1.46 и рис. 1.47.

Пример 1.

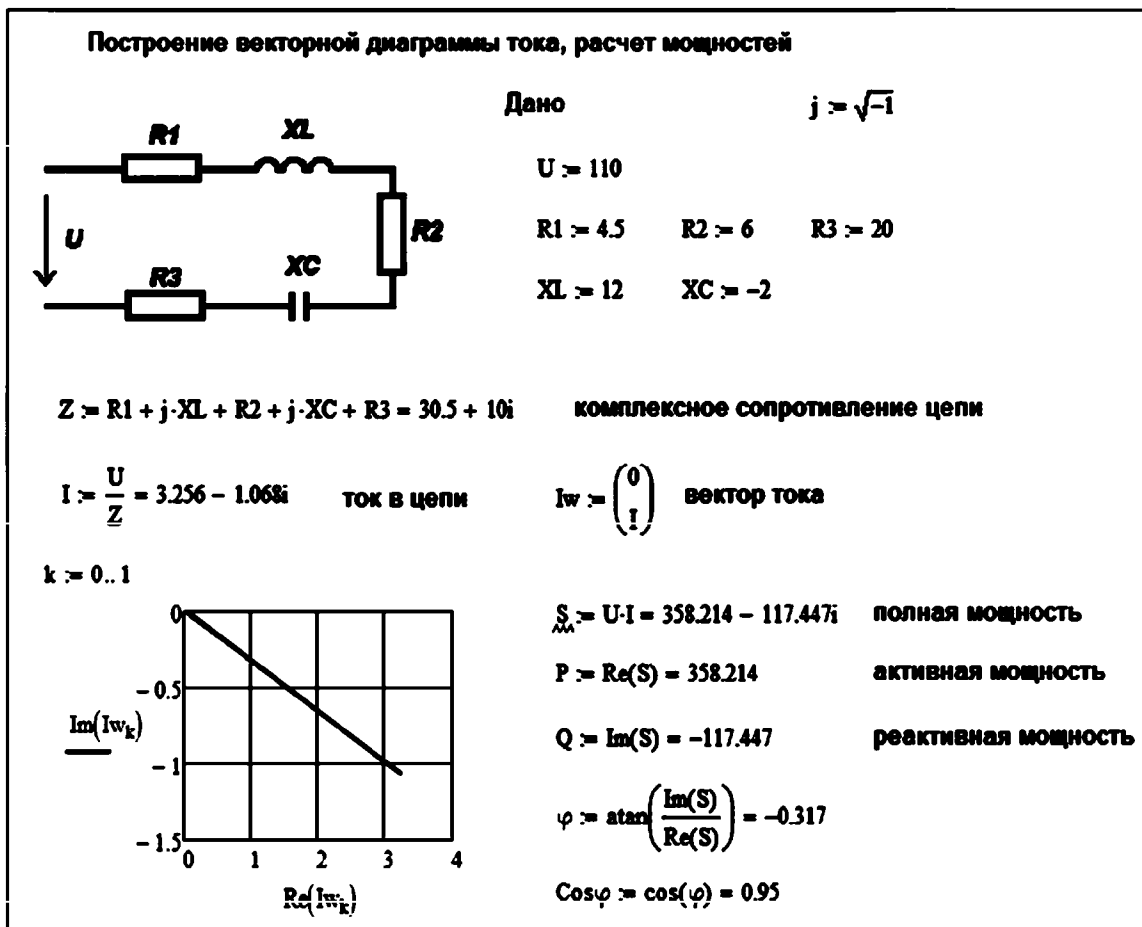


Рис. 1.46. Образец листинга выполнения задания расчета простой цепи

Пример 2.

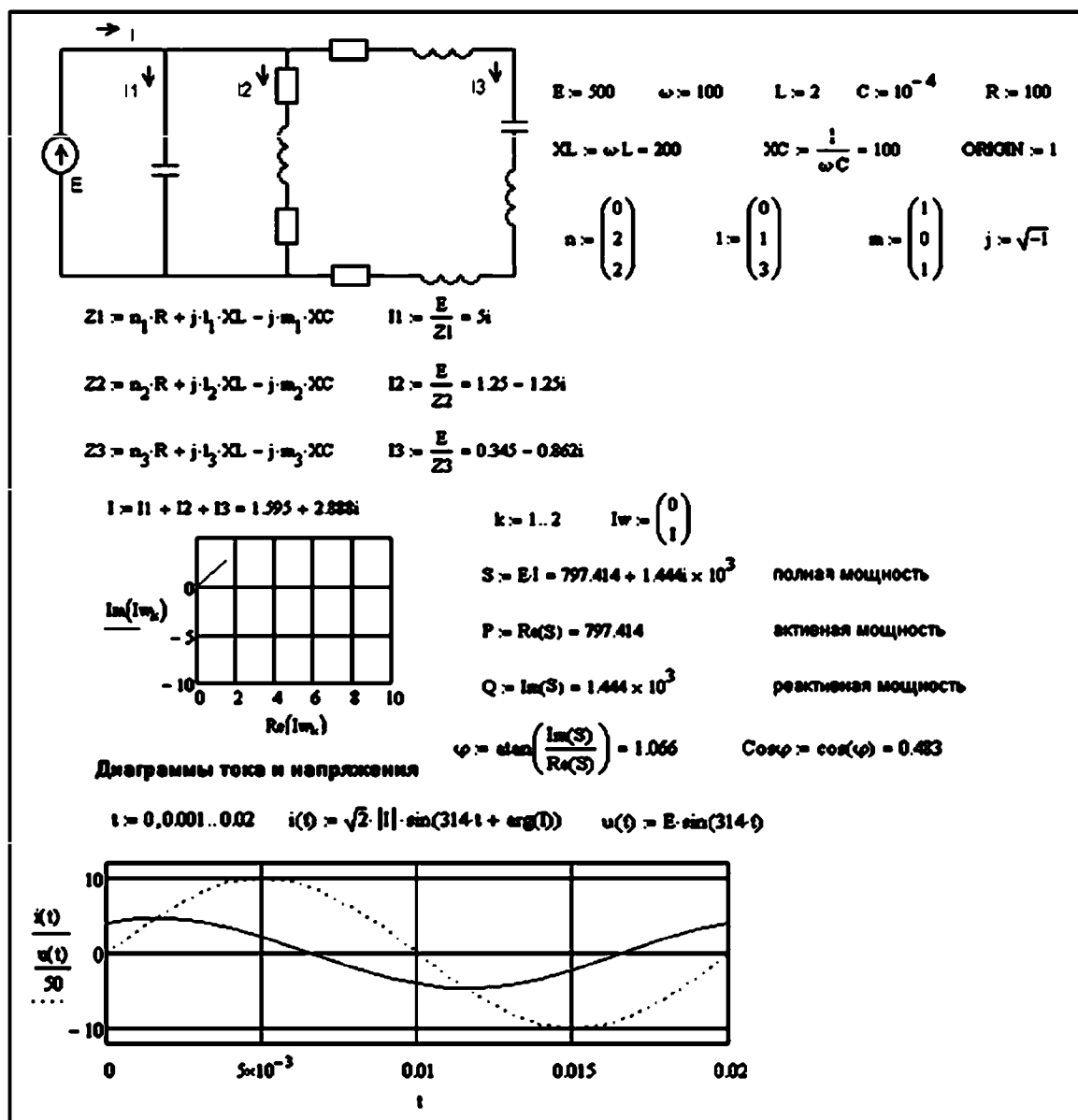


Рис. 1.47. Образец листинга выполнения задания расчета сложной цепи

Отображение вектора в графическом окне осуществляется по правилам векторной графики, при этом масштабирование происходит автоматически, исходя из заданных размеров окна. Определенная сложность возникает при программировании стрелки, которой должен оканчиваться вектор и которая указывает направленность вектора.

На рис. 1.48 приведен листинг примера построения ориентированного вектора, начинающегося из центра координат и заканчивающегося в точке числовой плоскости  $8 - 16j$ . Функция  $Vr()$ , описывающая вектор, имеет два входных параметра: координаты начальной и конечной точек, задаваемых как комплексные числа. Функция является матрицей-столбцом из 5 строк, в которых заложена последовательность отрисовки вектора: первые две строки описывают собственно сам вектор, последующие три строки – отрисовку стрелки вектора.

В графическом окне отдельно по осям выводятся мнимая  $Im()$  и вещественная  $Re()$  части функции, описывающей вектор.

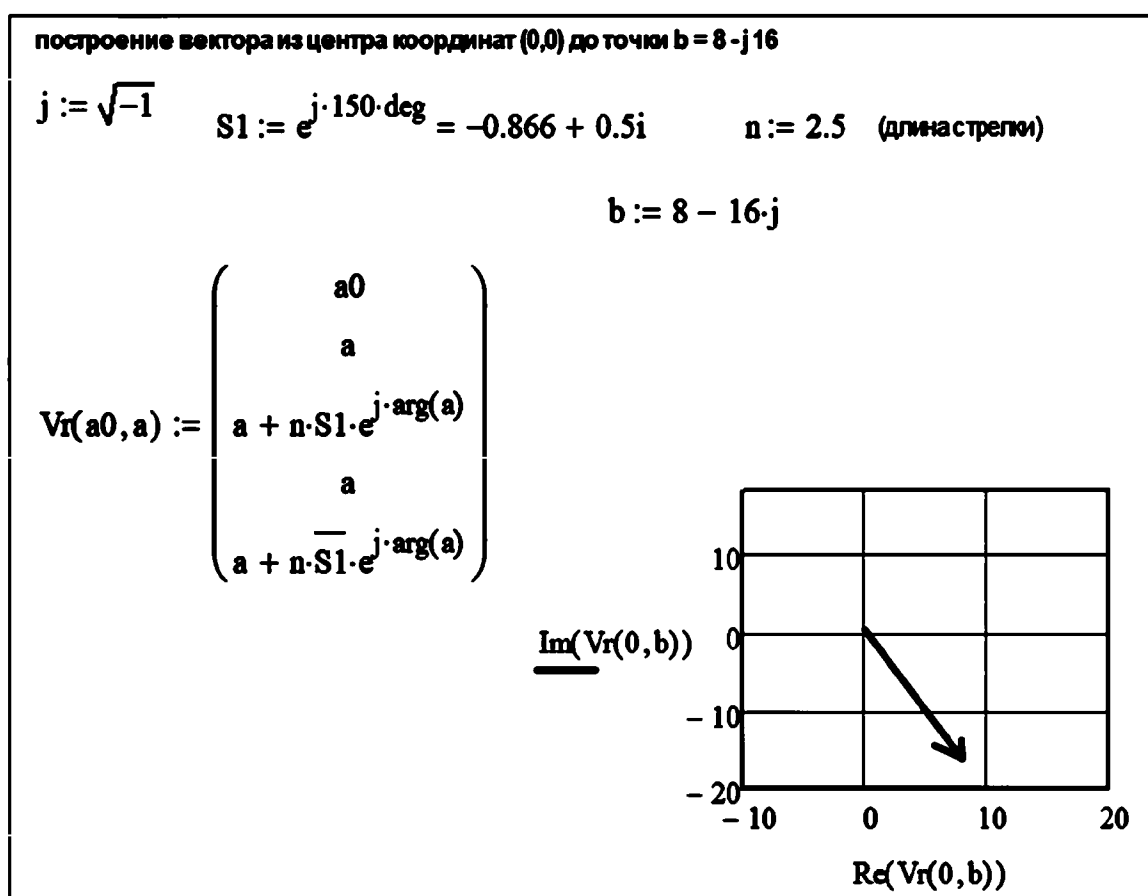


Рис. 1.48. Листинг примера построения ориентированного вектора

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для участка цепи с сопротивлением, индуктивностью и емкостью.
2. Как определяется комплексное сопротивление для индуктивности?
3. Как определяется комплексное сопротивление для емкости?
4. Как определяется комплексное сопротивление для R-C цепи?
5. Как определяется комплексное сопротивление для R-L цепи?
6. Как определяется комплексное сопротивление для R-L-C цепи?

### 1.3.5. Практическое занятие № 5

#### Расчет сложных цепей

**Цель занятия:** освоение методов расчета сложных электрических цепей.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### Пример решения типовой задачи

**Задача 1.** Необходимо рассчитать электрическую цепь (рис. 1.49). Известны величины сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ , ЭДС источников напряжения  $E_1$  и  $E_2$ . Необходимо определить токи во всех ветвях.

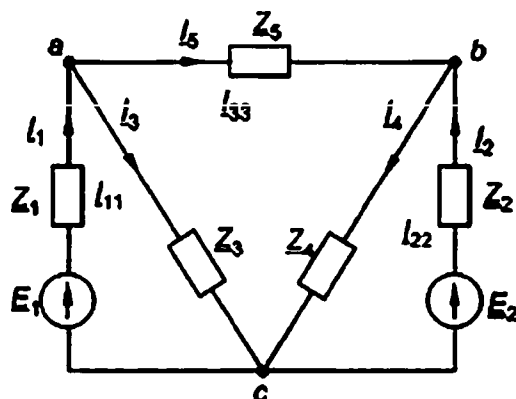


Рис. 1.49. Схема сложной электрической цепи

1. На схеме замещения выделяются узлы a, b, c и независимые контуры I, II, III (рис. 1.50).
2. Составляется система уравнений, описывающих статический режим функционирования электрической схемы. Так как электрическая цепь состоит из пяти ветвей, решаемая система должна включать в себя пять уравнений.
3. Первые два уравнения (баланс токов в узле) составляются по первому закону Кирхгофа для узлов a и b. Направления токов в ветвях принимаются условно и показаны на рис. 1.50.
4. Оставшиеся три уравнения (баланс падений напряжения в контуре) составляются по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III. Направления обхода контуров принимаются условно и показаны на рис. 1.50.

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{I}_1 - \underline{I}_3 - \underline{I}_5 &= 0, \\
 \underline{I}_2 - \underline{I}_4 + \underline{I}_5 &= 0, \\
 \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_3 \underline{I}_3 &= \underline{E}_1, \\
 \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{Z}_4 \underline{I}_4 &= \underline{E}_2, \\
 \underline{Z}_3 \underline{I}_3 - \underline{Z}_4 \underline{I}_4 - \underline{Z}_5 \underline{I}_5 &= 0.
 \end{aligned} \right\}$$

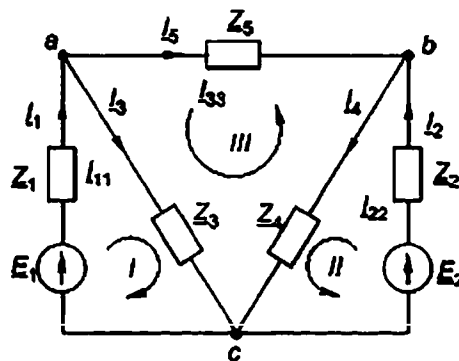


Рис. 1.50. Система расчетных уравнений для сложной электрической цепи

Рассмотренная методика справедлива как для скалярных (цепи постоянного тока), так и для векторных (цепи переменного тока) величин. В случае расчета цепей переменного тока следует задавать условные направления протекания электрического тока.

*Задача 2.* Пример расчета сложной электрической цепи постоянного тока, состоящей из 9 ветвей в математическом пакете MathCad приведен в листинге на рис. 1.51.

*Замечание.* Для определения неизвестных токов используется матричное уравнение

$$X = A^{-1}B,$$

где  $X$  – матрица-столбец неизвестных,



$B$  – матрица-столбец правых частей уравнений,

$A$  – матрица-определитель системы алгебраических уравнений.

Первые 4 строки матричного уравнения соответствуют 1 закону Кирхгофа (баланс токов в узлах). Последующие 5 строк матричного уравнения соответствуют 2 закону Кирхгофа (баланс падений напряжений в замкнутых контурах).

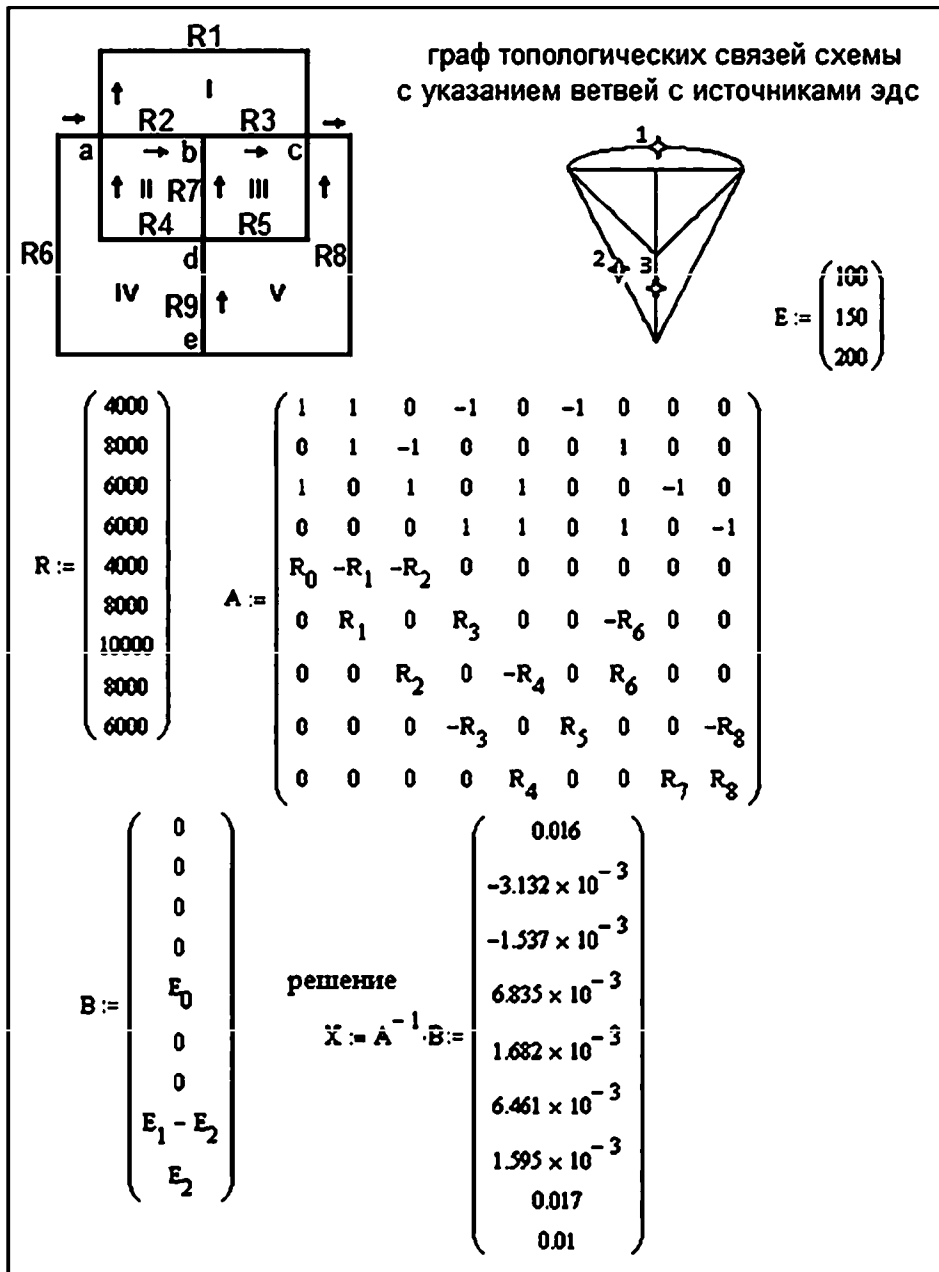


Рис. 1.51. Образец листинга выполнения задания для расчета цепей постоянного тока

## Контрольные вопросы

1. Что такое независимый контур электрической цепи?
2. Как определить число независимых контуров для сложной электрической цепи?
3. Как определить контурный ток в сложной электрической цепи?
4. Как определяется направление обхода замкнутого контура электрической цепи?
5. Как учитывать в системе расчетных уравнений сложной цепи ветвь, содержащую только идеальный источник тока?

### 1.3.6. Практическое занятие № 6

#### Трехфазные электрические цепи

**Цель занятия:** освоение методов расчета трехфазных электрических цепей.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### Решение примеров

*Задача.* К трехфазному генератору подключен симметричный приемник электрической энергии (рис. 1.24). Линейное напряжение генератора  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ , сопротивление проводов  $\underline{Z}_{\text{лр}} = (0,5 + j1)$ , сопротивление приемника  $\underline{Z} = (10 + j6)$ .

Определить фазное напряжение генератора, токи, фазные и линейные напряжения приемника, падение напряжения в линейных проводах, мощность приемника. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Режим работы трехфазной цепи симметричный, напряжение между нейтральными точками  $U_{\text{н}} = 0$ .

Фазное напряжение

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127.$$

Система комплексных фазных напряжений

$$\underline{U}_A = 127, \quad \underline{U}_B = 127 e^{j180}, \quad \underline{U}_C = 127 e^{j180}.$$

Комплексные фазные сопротивления и проводимости

$$\underline{Z}_{\phi} = \underline{Z} + \underline{Z}_{\text{ПР}} = (10 + j6) + (0,5 + j1) = 10,5 + j7 = 12,6 e^{j34},$$

$$\underline{Y}_{\phi} = 1 / \underline{Z}_{\phi} = 1 / 12,6 e^{j34} = 7,9 \cdot 10^{-2} e^{-j34} = (6,6 - j 4,4) \cdot 10^{-2}.$$

Фазные напряжения

$$\underline{U}_{\text{АЛ}} = 127, \quad \underline{U}_{\text{ВЛ}} = 127 e^{j180}, \quad \underline{U}_{\text{СЛ}} = 127 e^{j180}.$$

Фазные токи приемника

$$I_a = U_{\text{АЛ}} Y_a = 127 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2} e^{-j34} = 10 e^{-j34},$$

$$I_b = I_a e^{-j120} = 10 e^{-j154},$$

$$I_c = I_a e^{j120} = 10 e^{-j86}.$$

Действующие значения фазных токов

$$I_a = I_b = I_c = 10 \text{ А}.$$

Система фазных напряжений приемника

$$\underline{U}_a = I_a \underline{Z}_a = 10 e^{-j34} (10 + j6) = 10 e^{-j34} 11,7 e^{j31} = 117 e^{-j3},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_a e^{-j120} = 117 e^{-j123},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_a e^{j120} = 117 e^{j117}.$$

Действующие значения фазных напряжений приемника

$$U_a = U_b = U_c = 117 \text{ В}.$$

Система линейных напряжений приемника

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{U}_a - \underline{U}_b = 117 e^{-j3} - 117 e^{-j123} = \\ &= (116,8 - j6,1) - (-64,8 - j98,1) = 180 + j92 = 202 e^{27}; \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{ab} e^{-j120} = 202 e^{-j93},$$

$$\underline{U}_{ac} = \underline{U}_{ab} e^{j120} = 202 e^{j147}.$$

Падения напряжений в линейных проводах

$$\Delta \underline{U}_a = \underline{I}_a \underline{Z}_{\text{ЛП}} = 10 e^{-j34} (0,5 + j1) = 10 e^{-j34} 1,12 e^{j63} = 11,2 e^{j29};$$

$$\Delta \underline{U}_b = \underline{U}_a e^{-j120} = 11,2 e^{-j91};$$

$$\Delta \underline{U}_c = \underline{U}_a e^{j120} = 11,2 e^{j149};$$

Фазные полная, активная и реактивная мощности приемника

$$\underline{S}_\phi = \underline{S}_a = \underline{S}_b = \underline{S}_c = U_a I_a = 117 e^{-j3} 10 e^{j34} = 1003 + j603;$$

$$S_\phi = 1170 \text{ В}\cdot\text{А}; \quad P_\phi = 1003 \text{ Вт}; \quad Q_\phi = 603 \text{ В}\cdot\text{Ар}.$$

Полная, активная и реактивная мощности приемника

$$\underline{S} = \Sigma \underline{S}_\phi = 3 \underline{S}_\phi = 3510 e^{j31} = (3010 + j1810);$$

$$S = 3510 \text{ В}\cdot\text{А}; \quad P = 3010 \text{ Вт}; \quad Q = 1810 \text{ В}\cdot\text{Ар}.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов приведена на рис. 1.52.

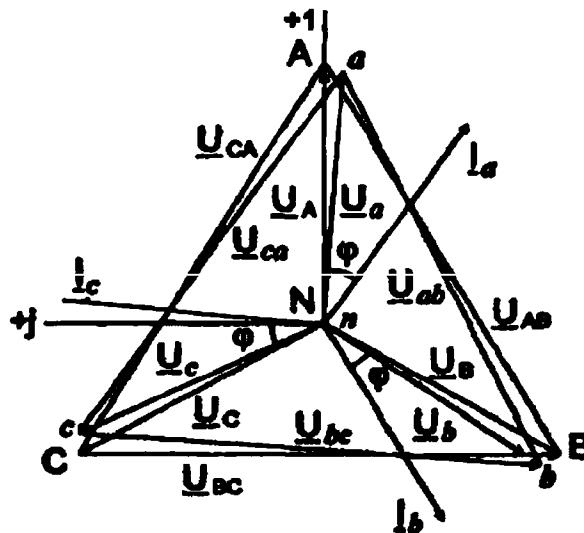


Рис. 1.52. Векторная диаграмма

Образец листинга расчета векторной диаграммы токов приведен на рис. 1.53.

### Построение векторных диаграмм

$j := \sqrt{-1}$  В результате расчета трехфазной цепи  
получены следующие токи

$$I_a := 3 + 3j \quad I_b := 1 - 4j \quad I_c := -4 + j$$

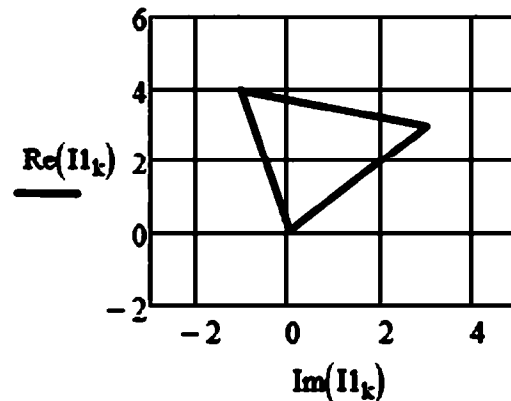
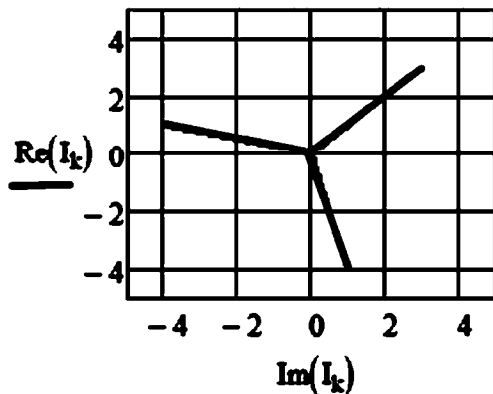
$k := 0..5$

$$I := \begin{pmatrix} 0 \\ I_a \\ 0 \\ I_b \\ 0 \\ I_c \end{pmatrix}$$

$n := 0..3$

$$I1 := \begin{pmatrix} 0 \\ I_a \\ I_a + I_b \\ I_a + I_b + I_c \end{pmatrix}$$

### Векторные диаграммы токов



*Начальная точка для всех векторов - нулевая точка  
Конечная точка - значение комплексного числа,  
соответствующего значению тока*

Рис. 1.53. Образец листинга расчета векторной диаграммы токов

### Задачи

1. Три одинаковые индуктивные катушки, соединенные звездой, включены в трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_{л} = 380$  В. Активное сопротивление каждой катушки  $R = 16$  Ом, реактивное  $X = 12$  Ом. Найти токи в катушках, активную, реактивную и полную мощности.

2. Данные задачи 1 при условии, что катушки соединены треугольником.
3. В трехфазную четырехпроводную сеть с линейным напряжением  $U_{л} = 220$  В включены резистор с сопротивлением  $R_a = 10$  Ом, индуктивная катушка с комплексным сопротивлением  $Z_b = (6 + j8)$  Ом, и конденсатор с комплексным сопротивлением  $Z_c = (7 - j24)$  Ом. Определить линейные токи, ток в нейтральном проводе, активную, реактивную и полную мощности.
4. К трехфазному источнику подключена несимметричная трехфазная нагрузка (рис. 1.54). Известно:
  - линейное напряжение  $U_a = 220$  В,
  - сопротивления:  $r_1 = 24$  Ом,  $r_2 = 21$  Ом,  $X_c = 28$  Ом,  $X_L = 25$  Ом.

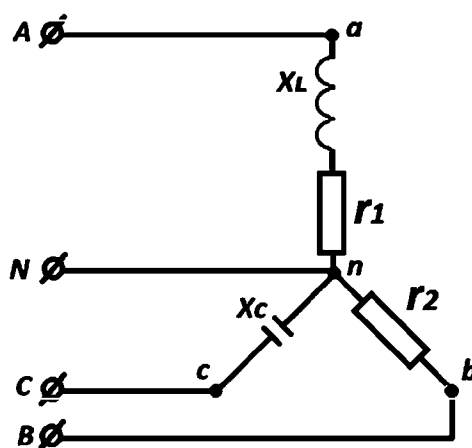


Рис. 1.54. Схема к задаче 4

Построить векторную диаграмму токов.

### Контрольные вопросы

1. Какой ток протекает в нейтральном проводе при несимметричной нагрузке в трехфазной электрической цепи?
2. Какой ток протекает в нейтральном проводе при симметричной нагрузке в трехфазной электрической цепи?
3. Что такое несвязанная трехфазная электрическая цепь?
4. Что такое связанная трехфазная электрическая цепь?
5. Как определить линейное напряжение в трехфазной электрической цепи?

6. Необходим ли нейтральный провод при несимметричной (симметричной) нагрузке трехфазных электрических цепей?

### 1.3.7. Практическое занятие № 7

#### Переходные процессы в электрических цепях

**Цель занятия:** освоение методов расчета переходных процессов электрических цепей.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.

#### Пример решения типовой задачи

*Задача 1.* Рассчитать переходные токи во всех ветвях схемы (рис. 1.55) после замыкания выключателя во второй ветви.

$E = 150 \text{ В}; R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}; L = 0,1 \text{ Гн}.$

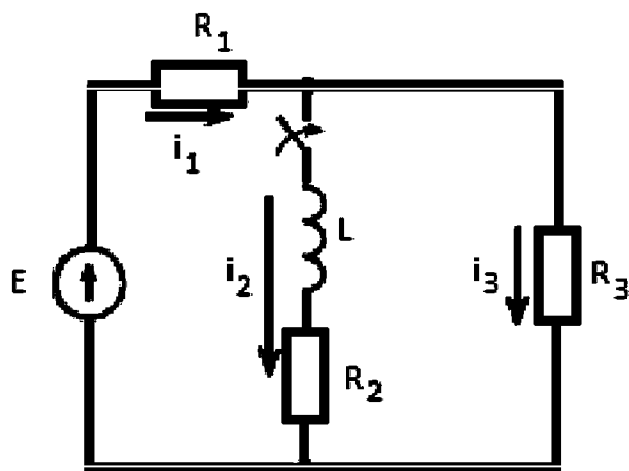


Рис. 1.55. Схема к задаче 1

Уравнения по законам Кирхгофа для схемы после коммутации

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0;$$

$$R_1 i_1 + R_3 i_3 = E;$$

$$R_2 i_2 + L \frac{di_2}{dt} - R_3 i_3 = 0.$$

Систему уравнений Кирхгофа преобразуем в уравнение относительно одной переменной (тока  $i_2$ ). После исключения переменных  $i_1$  и  $i_3$  получим дифференциальное уравнение тока для  $i_2$ .

$$L \frac{di_2}{dt} + \left( R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \right) i_2 = \bar{E} \frac{R_3}{R_1 + R_3}.$$

Решение ищем в виде

$$i_1 = i_{1cv} + i_{1np}; \quad i_2 = i_{2cv} + i_{2np}; \quad i_3 = i_{3cv} + i_{3np}.$$

Уравнение для свободного режима

$$L \frac{di_{2cv}}{dt} + \left( R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \right) i_{2cv} = 0.$$

Характеристическое уравнение

$$pL + \left( R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \right) = 0$$

имеет один корень

$$p = - \frac{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}}{L} = - \frac{100 + 10^4 / 200}{0,1} = -1500 \text{ c}^{-1} = - \frac{1}{\tau},$$

где  $\tau$  – постоянная времени цепи.

Свободные составляющие токов

$$i_{1cv} = A e^{pt}; \quad i_{2cv} = B e^{pt}; \quad i_{3cv} = C e^{pt}.$$

В установившемся режиме принужденные токи

$$i_{1np} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{150}{100 + \frac{100 \cdot 100}{100 + 100}} = 1 \text{ A.}$$

$$i_{2np} = i_{1np} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1 \frac{100}{200} = 0,5 \text{ A,}$$

$$i_{3np} = i_{1np} - i_{2np} = 0,5 \text{ A.}$$

Токи во время переходного процесса

$$i_1 = A e^{pt} + 1; \quad i_2 = B e^{pt} + 0,5; \quad i_3 = C e^{pt} + 0,5.$$

По 1-му закону коммутации

$$i_2(0) = i_2(0_-) = 0.$$

Из уравнения для второго тока при  $t = 0$  получаем

$$0 = B + 0,5;$$



$$B = -0,5 \text{ A.}$$

Начальные значения токов  $i_1(0)$  и  $i_3(0)$  (зависимые начальные условия) определяются из уравнений Кирхгофа для момента времени  $t = 0$ .

$$i_1(0) - i_2(0) - i_3(0) = 0,$$

$$\bar{R}_1 i_1(0) + \bar{R}_3 i_3(0) = \bar{E},$$

$$i_1(0) = i_3(0) = \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{150}{200} = 0,75 \text{ A.}$$

Постоянные интегрирования

$$0,75 = A + I; A = -0,25; 0,75 = C + 0,5; C = 0,25.$$

Переходные токи (рис. 1.56)

$$i_1 = 1 - 0,25e^{-1500t} \text{ A}; i_2 = 0,5 - 0,5e^{-1500t} \text{ A}; i_3 = 0,5 + 0,25e^{-1500t} \text{ A};$$

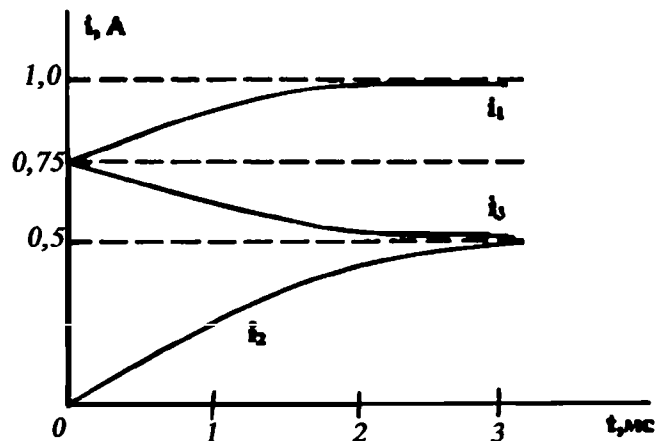


Рис. 1.56. График изменения тока

**Задача 2.** В последовательном RLC-контуре с параметрами  $R = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,1 \text{ Гн}$ ,  $C = 100 \text{ мкФ}$  в катушке индуктивности в момент времени  $t_1 = 0,025 \text{ с}$  произошло частичное короткое замыкание витков, при этом  $R = 1 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,01 \text{ Гн}$ . ЭДС источника цепи  $E = 10 \text{ В}$ . В момент времени  $t_2 = 0,05 \text{ с}$  параметры катушки восстановлены. Определить ток в цепи, напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности. Величина емкости не изменяется.

**Решение.** Изменение индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$  задаем как функции времени  $t$ :

$$L(t) = 0,01 \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2 \text{ иначе } L(t) = 0,1;$$

$$R(t) = 1 \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2 \text{ иначе } R(t) = 5.$$

Переходный процесс в цепи описывается системой из двух дифференциальных уравнений первого порядка в сосредоточенных параметрах с переменными коэффициентами:

- баланса падений напряжения на элементах цепи,
- силы тока через емкость.

Решение проводится численным методом Рунге – Кутта с постоянным шагом интегрирования в математическом пакете MathCad.

Для использования стандартной функции интегрирования *rkfixed* начальную систему уравнений представим в форме Коши с выделением производных в левых частях уравнений.

$$D(t, x) = A(t) x + B(t),$$

где  $A(t)$  – матрица коэффициентов при неизвестных,

$B(t)$  – матрица правых частей уравнений,

$x$  – матрица (столбец) неизвестных.

Начальные значения искомым параметров принимаются нулевыми.

После перевода коэффициентов при производных в правую часть уравнений, получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих изменение:

- силы тока,
- напряжения на емкости.

В квадратной матрице  $A(t)$  строки соответствуют уравнениям переходного процесса, столбцы – искомым неизвестным параметрам.

На рис. 1.57 приведен листинг кода решения задачи численными методами в математическом пакете MathCad.

Входные параметры подпрограммы *rkfixed*:

- матрица (столбец) искомым параметров,
- время начала переходного процесса,
- время окончания переходного процесса,
- количество точек результирующего графика,
- матрица уравнений.

Решением являются массивы чисел, описывающие:

- $x^{(1)}$  – силу тока  $i(t)$ ,
- $x^{(2)}$  – напряжение на емкости  $Uc(t)$ .

Массив решений с нулевым индексом  $x^{(0)}$  содержит значения времени, соответствующие точкам графика.

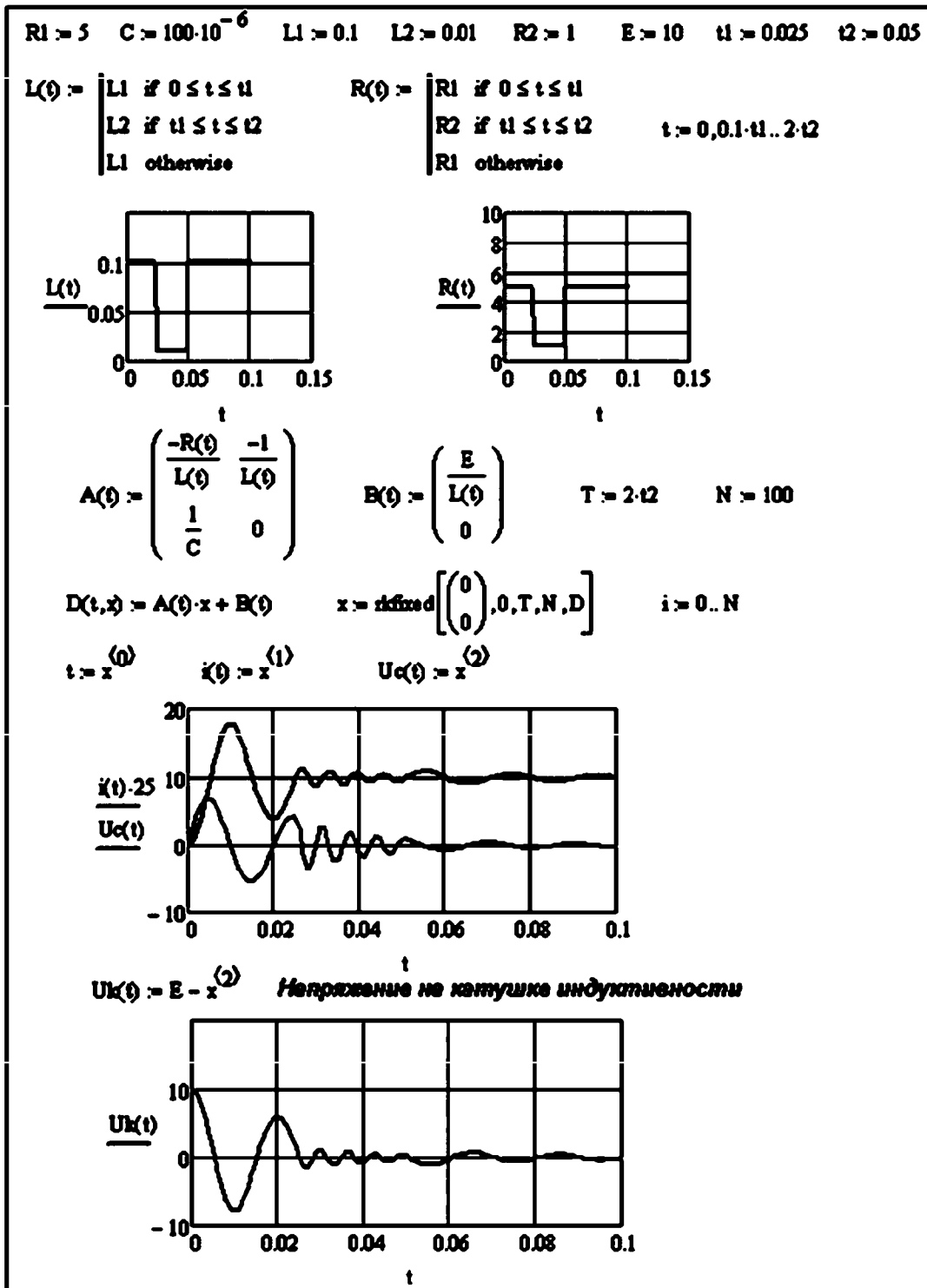


Рис. 1.57. Листинг решения задачи о переходном процессе

### 1.3.8. Практическое занятие № 8

#### Трансформаторы

**Цель занятия:** изучение параметров трансформаторов и освоение методов расчета основных характеристик трансформаторов.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.

Идеальный трансформатор можно представить, как пассивный четырехполюсник (рис. 1.58), для которого выполняется условие передачи электрической мощности без потерь, т. е. мощность на входе равна мощности на выходе:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2$$

или

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2,$$

где  $\underline{S}_1$ ,  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{I}_1$  – комплексные мощность, напряжение и сила тока на входе в трансформатор;

$\underline{S}_2$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{I}_2$  – комплексные мощность, напряжение и сила тока на выходе из трансформатора.

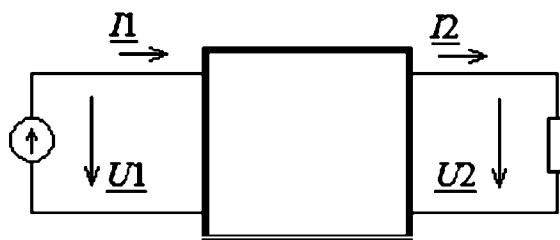


Рис. 1.58. Четырехполюсник

Из условия равенства мощностей можно получить соотношения для комплексных напряжений и токов:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Двухобмоточный трансформатор (рис. 1.59) можно представить, как сочетание входной и выходной цепей с индуктивностью и сопротивлением:

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1 + j \omega L_1 I_1 - j \omega N L_2 I_2 \\ -U_2 = R_2 I_2 + j \omega L_2 I_2 - j \omega N L_1 I_1 \end{cases}$$

где  $N$  – коэффициент трансформации (отношение чисел витков индуктивностей на входе и на выходе),

$\omega$  – круговая частота,

$j$  – мнимая единица.

Матричная запись системы уравнений соответствует уравнению четырехполюсника (форма  $Z$  уравнений передачи четырехполюсника), связывающего матрицы напряжений и токов:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix},$$

где комплексные сопротивления

$$Z_{11} = R_1 + j \omega L_1,$$

$$Z_{22} = -(R_2 + j \omega L_2),$$

$$Z_{12} = -Z_{21} = j \omega N.$$

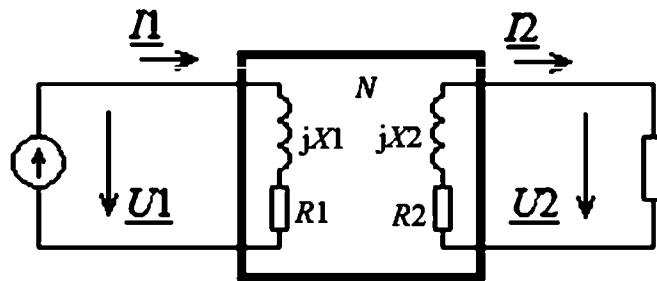


Рис. 1.59. Двухобмоточный трансформатор

### Решение примеров

**Задача 1.** Первичное напряжение трансформатора  $U_1 = 230$  В, вторичное  $U_2 = 5770$  В. Для определения чисел витков первичной и вторичной обмоток трансформатора на сердечнике намотали дополнительную обмотку с числом витков  $\omega_d = 20$ . В режиме холостого хода напряжение на зажимах дополнительной обмотки  $U_d = 140$  В.

Определить число витков первичной и вторичной обмоток и амплитудное значение главного магнитного потока, если частота сети 50 Гц.

*Решение.*

1. В режиме холостого хода

$$U_d = E_d, U_2 = E_2, U_1 = E_1.$$

2. ЭДС, индуцируемая в одном витке

$$E_{d,1} = E_d / \omega_d = 140 / 20 = 7 \text{ В.}$$

3. Число витков первичной и вторичной обмоток

$$w_1 = E_1 / E_{d,1} = 230 / 7 = 33; w_2 = E_2 / E_{d,1} = 5770 / 7 = 825.$$

4. Амплитудное значение главного магнитного потока

$$\Phi_m = E_d / (4,44 \cdot f \omega_d) = 140 / (4,44 \cdot 50 \cdot 20) = 0,0315 \text{ Вб.}$$

*Задача 2.* Понижающий трансформатор К встроен в электрическую цепь с активно-индуктивной и емкостной нагрузкой (рис. 1.60). Входное напряжение  $U_{вх} = 36 \text{ кВ}$ , напряжение на нагрузке  $U_n = 380 \text{ В}$ . Частота переменного тока 50 Гц. Входная цепь имеет активное сопротивление  $R_1 = 1 \text{ Ом}$  и индуктивность  $L_1 = 10^{-5} \text{ Гн}$ . Параметры нагрузки:  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 0,3 \text{ Гн}$ ,  $C = 20 \text{ мкФ}$ .

Рассчитать переходный процесс и построить графики изменения токов на входе и на активно-индуктивной нагрузке и график изменения напряжения на емкостной нагрузке. Трансформатор учитывать, как идеальный элемент с коэффициентом трансформации  $k = U_{вх} / U_n$ .

*Решение.*

Система дифференциальных уравнений, соответствующая схеме замещения на рис. 1.60, состоит из уравнений, описывающих ток на входе  $i_1$ , ток нагрузки  $i_2$  и напряжение на ветви емкости  $U_C$ . Влияние трансформатора учитывается введением коэффициента трансформации К при условии соблюдения передачи электрической мощности.

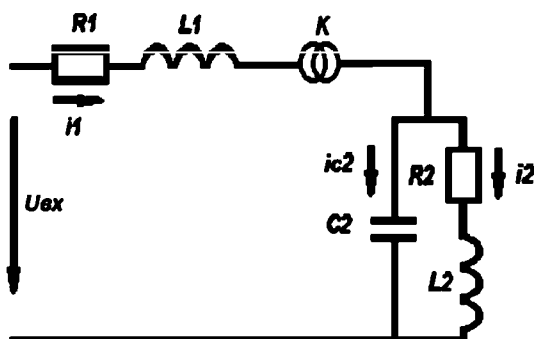


Рис. 1.60. Схема замещения электрической цепи

Решение проводится численным методом, для чего составляется система дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемый процесс. Для получения системы уравнений в форме Коши необходимо в левой части выделить первые производные искомых параметров. В матричной форме решаемая система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_1(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \\ \frac{du_c(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{K}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{K}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{вх}(t)}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Влияние трансформатора учитывается в уравнениях:

- баланса падений напряжения входной ветви-емкости

$$L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 i_1(t) + K u_c(t) = u_{вх}(t);$$

- баланса токов в узле соединения входной ветви и нагрузки

$$K i_1(t) - i_2(t) - C \frac{du_c(t)}{dt} = 0.$$

При составлении модели переходного процесса не учитывается магнитный гистерезис и утечки тока трансформатора, а также взаимное влияние индуктивностей.

Листинг решения задачи приведен на рис. 1.61.

В качестве расчетного метода был выбран алгоритм Рунге – Кутта 4-го порядка с автоматическим выбором шага интегрирования.

Время переходного процесса 0,16 с. Количество точек графиков 800.

R1 := 1    L1 := 0.00001    C2 := 0.00002    R2 := 100    L2 := 0.3

U := 36000     $\varphi := \frac{\pi}{2}$     Kt := 90

i1   i2   Uc2

$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 380 \end{pmatrix}$

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} \frac{-R1}{L1} & 0 & Kt \cdot \frac{-1}{L1} \\ 0 & \frac{-R2}{L2} & \frac{1}{L2} \\ Kt \cdot \frac{1}{C2} & \frac{-1}{C2} & 0 \end{pmatrix} \cdot x + \begin{pmatrix} \frac{U}{L1} \sin(100 \cdot \pi \cdot t + \varphi) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Z := Rkadapt(x, 0, 0.16, 800, D)

n := 0..799

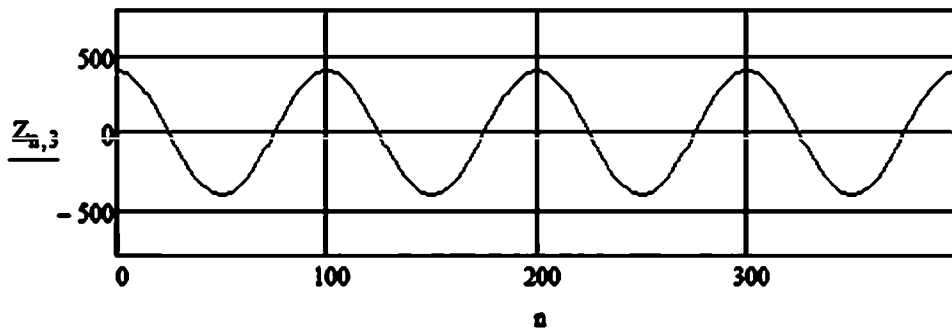
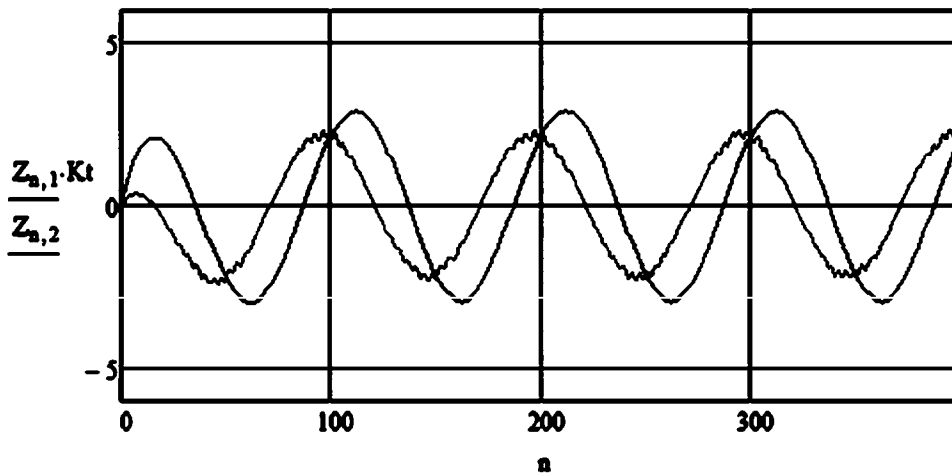


Рис. 1.61. Листинг решения задачи о переходном процессе с участием трансформатора



## 1.4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

### 1.4.1. Расчетно-графическое задание по электротехнике № 1

#### Расчет цепей постоянного тока

Дано: схема электрической цепи постоянного тока, содержащая источник ЭДС и 5 сопротивлений (рис. 1.62).  $U_{ab} = 120$  В. Рассчитать показания вольтметра, присоединенного к точкам с и d:  $U_{cd}$ . Значения сопротивлений указаны в таблице 1.24

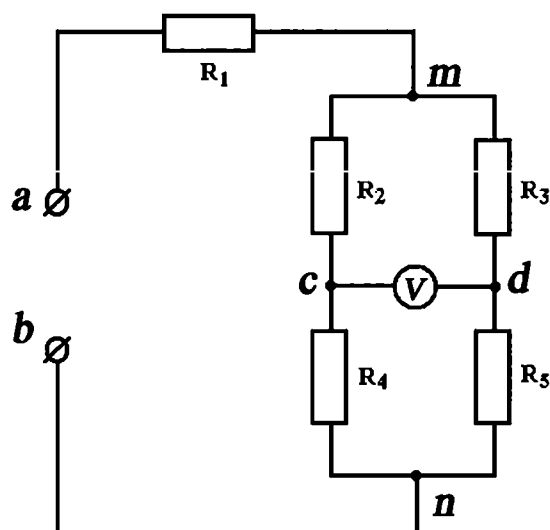


Рис. 1.62. Схема электрической цепи

Таблица 1.24

№ вар.	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом
1	6	15	15	15	30
2	6	30	10	30	30
3	10	25	25	25	50
4	10	30	10	30	50
5	16	20	20	20	40
6	16	30	10	30	30
7	22	15	15	15	30
8	24	30	30	30	60
9	33	10	10	10	50
10	36	20	20	20	40
11	36	20	30	20	30
12	36	30	30	10	30
13	38	35	35	35	70
14	45	10	10	10	50

### 1.4.2. Расчетно-графическое задание по электротехнике № 2

#### Расчет параллельных цепей с одним гармоническим источником

Дано: на рис. 1.63 приведены неориентированные графы схемы цепей с одним гармоническим источником. Номер графа для каждого варианта выбирается по колонке 2 таблицы 1.25. Номер индуктивных и емкостных элементов указаны в колонках 3 и 4 таблицы 1.25. Остальные элементы являются сопротивлениями.

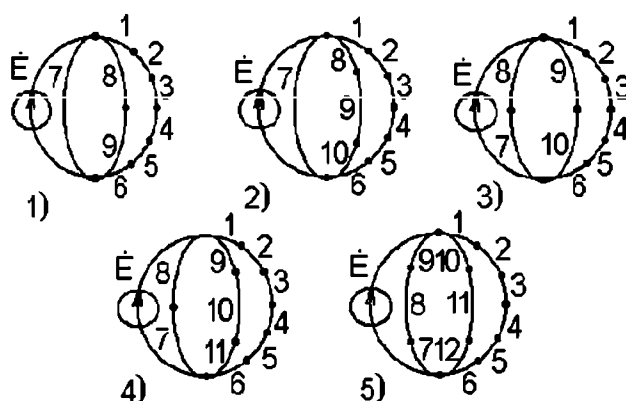


Рис. 1.63

Индуктивность, емкость и активное сопротивление соответствующего  $i$ -го элемента равны:

$$L_i = 0,2 \text{ Гн}, C_i = 10 \text{ мкФ}, R_i = 100 \text{ Ом}.$$

Мгновенное значение ЭДС источника

$$E(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $E_m = \sqrt{2} 500 \text{ В}$ ,

$$\omega = 2\pi f = 10^3 \text{ рад / с},$$

$\varphi$  – начальный фазовый угол (выбирается произвольно),

$f$  – частота изменения ЭДС источника.

Найти:

1. Напряжения на каждом из элементов ветви с наибольшим количеством последовательно включенных элементов.

2. Токи во всех ветвях, показания амперметров, включенных последовательно с каждой из ветвей исследуемой цепи.
3. Суммарный ток.
4. Активную, реактивную и полную мощности для ветви с наибольшим количеством последовательно включенных элементов.
5. Активную, реактивную и полную мощности источника.
6. Построить векторную диаграмму сопротивлений для ветви с наибольшим количеством последовательно включенных элементов.

Таблица 1.25

№ варианта	№ графа схемы	№ реактивных элементов	
		Li	Сi
1	5	1,3,8,11	6,10
2	1	1,3,8	4,7
3	2	1,4,7	5,9
4	3	2,4,9	5,7
5	4	2,4,9	6,7
6	5	2,3,7,10	5,11
7	1	2,3	6,7,8
8	2	1,2,7,8	5,9
9	3	1,2,7	4,10
10	4	1,2,3,7,9	6,10
11	5	1,2,4,10	5,7,11
12	1	1,2,5,8	6
13	2	1,3,5,8	6,7
14	3	1,3,4,8	6,9
15	4	2,3,5,8	6,10
16	5	3,11	1,5,8
17	1	4	1,6,8
18	2	3	1,6,7,9
19	3	3,8,9	1,4
20	4	4,8,9	1,5,10
21	5	4,11	2,5,8,10
22	1	4,7,8	2,6
23	2	3,9	2,5,7,8
24	3	3,10	2,6,8
25	4	2,8	1,5,10
26	5	2,8,11	1,4

№ варианта	№ графа схемы	№ реактивных элементов	
		Li	Сi
27	1	1,2,6,7	4,8
28	2	1,2,5,9	4
29	3	1,2,6	5,8,10
30	4	1,3,6,9	5,8,10
31	5	1,3,6,8,11	4,10
32	1	2,3,6,8	5,7
33	2	5	1,3,9

## 1.5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

### 1.5.1. Вопросы для самостоятельного изучения

1. Расчеты сложных электрических цепей с использованием математических пакетов.
  - 1.1. Организация матричных вычислений в MathCad (MATLAB).
  - 1.2. Оформление результатов расчета в MathCad (MATLAB).
  - 1.3. Представление в матричном виде системы алгебраических уравнений, описывающих сложную электрическую цепь.
  - 1.4. Применение графов для расчетов электрических цепей.
2. Электрические цепи переменного тока.
  - 2.1. Резонансные явления и частотные характеристики.
  - 2.2. Расчет трехфазных цепей.
  - 2.3. Расчет электрических цепей при несинусоидальных периодических ЭДС, напряжениях и токах.
  - 2.4. Электрические цепи переменного тока.
3. Магнитное поле.
  - 3.1. Магнитные свойства и характеристики ферромагнитных материалов.
  - 3.2. Магнитные цепи.
  - 3.3. Законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей.
  - 3.4. Расчет магнитных цепей.

4. Переходные процессы в электрических цепях.
  - 4.1. Преобразование Лапласа.
  - 4.2. Численные методы решения дифференциальных уравнений.
  - 4.3. Расчет переходных процессов в электрических цепях.
5. Электрические измерения.
6. Электроизмерительные приборы.
7. Трансформаторы.
8. Электрические машины постоянного тока.
  - 8.1. Классификация и параметры генераторов постоянного тока.
  - 8.2. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.
  - 8.3. Пуск и способы регулирования двигателей постоянного тока.
9. Асинхронные машины.
  - 9.1. Устройство и принцип действия асинхронных машин.
  - 9.2. Характеристики асинхронных машин.
  - 9.3. Пуск и регулирование частоты асинхронных двигателей.
10. Синхронные машины.
  - 10.1. Устройство и принцип действия синхронных машин.
  - 10.2. Характеристики синхронных машин.
  - 10.3. Пуск и регулирование частоты синхронных двигателей.

### ***1.5.2. Контрольные задачи***

1. Три генератора постоянного тока с ЭДС и сопротивлениями:  $E_1=480$  В,  $R_1=0,2$  Ом,  $E_2=460$  В,  $R_2=0,4$  Ом,  $E_3=480$  В,  $R_3=0,3$  Ом работают параллельно на линию, общая нагрузка которой 400 А. Определить:
  - а) ток каждого генератора;
  - б) как изменятся токи 2-го и 3-го генераторов, если 1-й генератор отключить;
  - в) ЭДС и внутреннее сопротивление генератора, эквивалентного всем трем генераторам.
2. Определить ток  $I_3$ , если  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = R_4 = 1$  Ом,  $R_3 = 1$  Ом,  $E_1 = 110$  В,  $J = 2$  А (рис. 1.64).

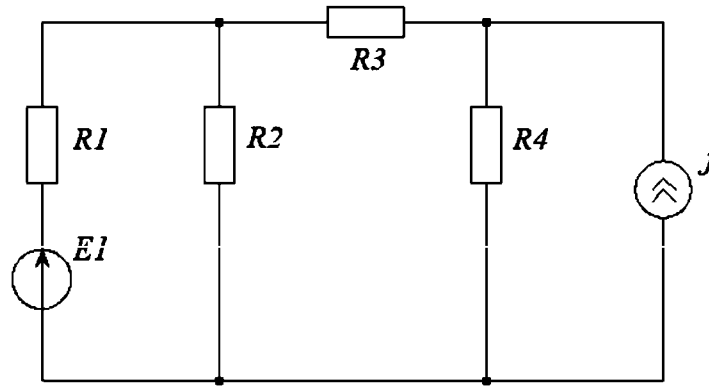


Рис. 1.64. Схема к задаче 2

3. Определить ток  $I_3$ , если  $R_1 = R_2 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = R_6 = 6 \text{ Ом}$ ,  $E_1 = 100 \text{ В}$ ,  $E_2 = 92 \text{ В}$  (рис. 1.65).

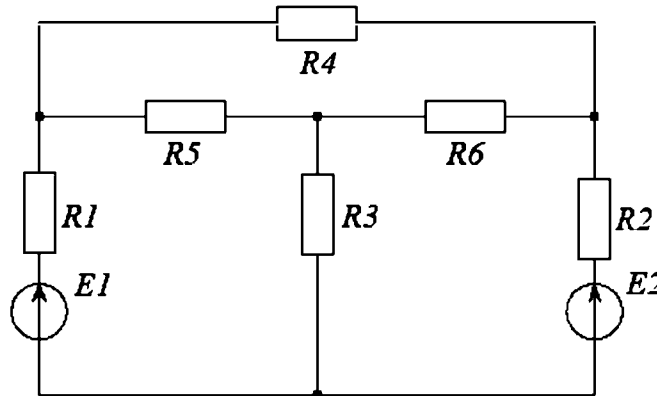


Рис. 1.65. Схема к задаче 3

4. При какой величине сопротивления  $R$  мощность, выделяемая в нем в виде тепла, максимальна? Определить эту мощность, если  $R_1 = R_2 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 60 \text{ Ом}$  (рис. 1.66).

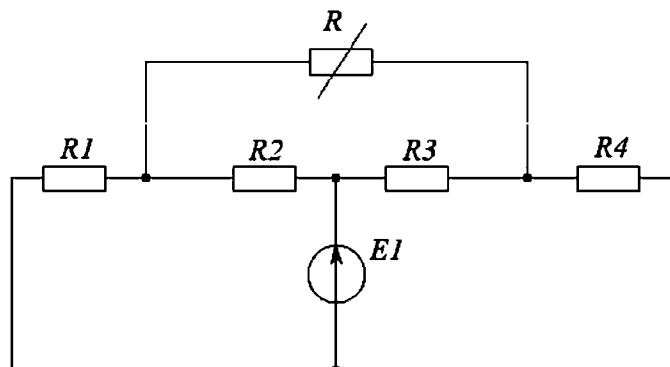


Рис. 1.66. Схема к задаче 4

5. Напряжение в контактной сети электрифицированной железной дороги (на постоянном токе) составляет при холостом ходе 3300 В, ток короткого замыкания между теми же точками 20000 А. Определить напряжение на электровозе, проходящим эту точку сети и потребляющим ток 1000 А.
6. Как известно, если увеличивать ток нагрузки  $I$ , то при малых значениях этого тока аккумулятор заряжается, а при больших – разряжается.

Определить:

- а) при каком значении тока нагрузки  $I_{\text{пред}}$  аккумулятор переходит с зарядки на разрядку;
- б) какую мощность отдают нагрузке генератор и аккумулятор при токе, превышающем  $I_{\text{пред}}$  в 1,5; 2; 2,5 раза, если  $E_r = 14$  В;  $E_{\text{ак}} = 12$  В;  $R_r = 0,2$  Ом;  $R_{\text{ак}} = 0,1$  Ом (рис. 1.67)?

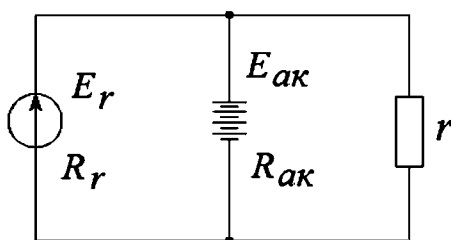


Рис. 1.67. Схема к задаче 6

7. Какую ЭДС должен иметь генератор с внутренним сопротивлением 0,2 Ом, чтобы он, работая на зарядке аккумулятора, имеющего ЭДС 240 В и внутреннее сопротивление 0,25 Ом, мог отдавать ток 100 А?
8. Определить ток  $I$  и потенциалы точек b, c, d, e, f, g, h (рис. 1.68), считая потенциалы  $\varphi_a$  и  $\varphi_k$  неизменными; определить ток, который потечет по сопротивлению  $R = 100$  Ом, если его подключить к точкам c и g,  $\varphi_a = -50$  В,  $\varphi_k = 25$  В,  $E_1 = 10$  В,  $R_{вн1} = 1$  Ом,  $E_2 = 30$  В,  $R_{вн2} = 8$  Ом,  $E_3 = 20$  В,  $R_{вн3} = 10$  Ом,  $E_4 = 15$  В,  $R_{вн4} = 6$  Ом,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 20$  Ом,  $R_3 = 50$  Ом,  $R_4 = 20$  Ом.

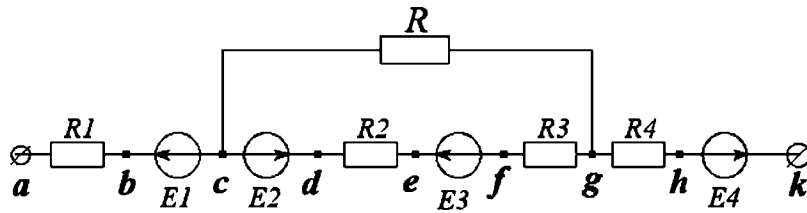


Рис. 1.68. Схема к задачам 7 и 8

9. Определить показание вольтметра и все токи (рис. 1.69), если  $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $E = 1 \text{ В}$ . Сопротивление вольтметра  $R_V = 100 \text{ кОм}$ ,  $I_0 = 10 \text{ А}$ .

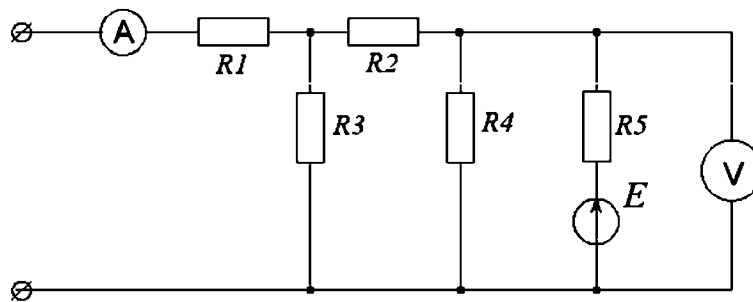


Рис. 1.69. Схема к задаче 9

10. Вольтметр показывает 120 В (рис. 1.70). Что покажет ваттметр, если  $R = 30 \text{ Ом}$ ,  $X_{c1} = 20 \text{ Ом}$ ,  $X_{c2} = 40 \text{ Ом}$ ,  $X_{c3} = 60 \text{ Ом}$ ,  $X_{c4} = 80 \text{ Ом}$ ?

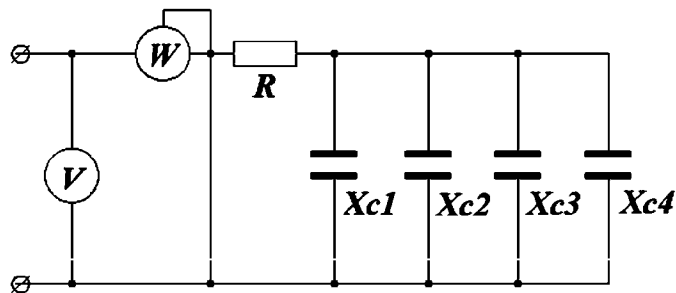


Рис. 1.70. Схема к задаче 10

11. Активная мощность, отдаваемая генератором,  $P = 31,25 \text{ кВт}$ ,  $Q = 0$ ,  $R = 2 \text{ Ом}$ ,  $X_c = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 75 \text{ Ом}$ . Определить напряжение на входе и построить топографическую диаграмму.



12. В цепи резонанс. Вольтметр показывает 120 В. Определить показания остальных приборов, пренебрегая их собственным потреблением мощности.  $R_1 = 1000 \text{ Ом}$ ,  $R_k = 50 \text{ Ом}$ ,  $L = 100 \text{ мГн}$ .
13. Три приемника питаются от трехфазного генератора, соединенного звездой. Сопротивления приемников одинаковы. Определить показания второго и третьего амперметров, если известно, что показание первого амперметра равно 4 А.
14. Определить действующее значение линейных токов и построить векторную диаграмму, если  $R_1 = 11 \text{ Ом}$ ,  $R_k = 6 \text{ Ом}$ ,  $\omega L = 8 \text{ Ом}$ . (Схема дается преподавателем).
15. Фазные напряжения генератора, соединенного звездой, симметричные, но несинусоидальные. Кроме первой гармоники они содержат третью (остальными можно пренебречь). Определить отношение амплитуды третьей гармоники к амплитуде первой гармоники фазного напряжения, если фазное напряжение, измеренное электромагнитным вольтметром, равно 135 В, а линейное составляет 220 В.
16. К генератору с несинусоидальным напряжением подключена цепь, состоящая из последовательного соединения активного  $R$ , индуктивного  $X_L$ , и емкостного  $X_C$  сопротивлений. Написать уравнение тока в цепи, если напряжение генератора может быть выражено уравнением  $U = 40 + 120 \sin 1000t + 60 \sin (2000t - \pi/6) + 50 \sin (5000t - \pi/3)$ .
17. Найти действующее значение тока в R-L-C-цепи и напряжение на емкости, активную мощность, потребляемую цепью, если  $R = 50 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,05 \text{ Гн}$ ,  $C = 5 \text{ мкФ}$ . Действующее значение напряжения от источника ЭДС  $U = 20 \text{ В}$ .
18. Активное сопротивление каждого из приемников энергии равно 24 Ом. Последовательно с одним включен конденсатор 143 мкФ, последовательно с другим – катушка с  $RL = 2 \text{ Ом}$ . Сравнить токи приемников, если на входе напряжение  $u = 130 + 170 \sin \omega t$ , где  $\omega = 1000 \text{ с}^{-1}$ .

## РАЗДЕЛ 2 ЭЛЕКТРОНИКА

### 2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### Диоды

Диод – двухэлектродный электронный прибор, обладающий различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока.

Электроды диода:

- анод – подключен к положительному полюсу источника;
- катод – подключен к отрицательному полюсу.

Открытие диода сопровождается падением сопротивления. Полупроводниковые диоды используют свойство односторонней проводимости р-п-перехода – контакта между полупроводниками с разным типом примесной проводимости, либо между полупроводником и металлом (диод Шоттки).

При одинаковом напряжении кремниевые диоды имеют во много раз меньшие обратные токи, чем германиевые (рис. 2.1). Допустимое обратное напряжение кремниевых диодов 1000–1500 В, у германиевых – 100–400 В. Кремниевые диоды могут работать при температурах от –60 до + 150 °С, германиевые – от –60 до + 85 °С.

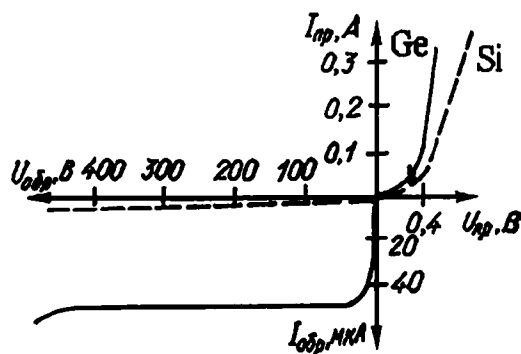


Рис. 2.1. Сравнительные характеристики германиевых и кремниевых диодов

#### Вторичные источники питания

1. Для получения электрической энергии нужного вида часто приходится преобразовывать энергию переменного тока в энергию постоянного тока (выпрямление) либо энергию постоянного тока в энергию переменного тока (инвертирование).



Рис. 2.2. Классификация выпрямителей

2. Виды нагрузок: активная, активно-индуктивная, активно-емкостная и с противо-ЭДС.

Выпрямители малой мощности – активная и активно-емкостная нагрузка.

Выпрямители средней и большой мощности – активно-индуктивная нагрузка.

Нагрузку с противо-ЭДС. выпрямитель имеет при питании двигателя постоянного тока или при зарядке аккумулятора.

3. Однофазный выпрямитель (рис. 2.3).

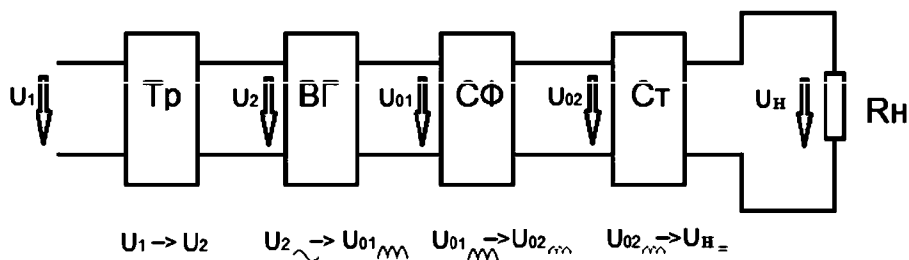


Рис. 2.3. Структурная схема однофазного выпрямителя: Тр – трансформатор, ВГ – вентильная группа, СФ – сглаживающий фильтр, СТ – стабилизатор постоянного напряжения

4. Двухполупериодный мостовой выпрямитель (рис. 2.4) состоит из трансформатора и четырех диодов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подсоединяется вторичная обмотка трансформатора, а к другой – нагрузочный резистор  $R_n$ . Каждая пара диодов (Д1-Д3 и Д2-Д4) работают поочередно.

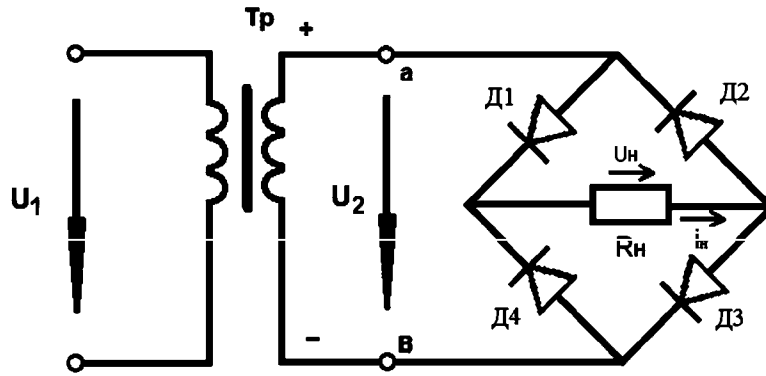


Рис. 2.4. Двухполупериодный мостовой выпрямитель.

Первый полупериод:  $0-0,5T$ ; диоды Д2 и Д4 закрыты.

Второй полупериод:  $0,5T-T$ ; диоды Д1 и Д3 закрыты. В оба полупериода ток через нагрузочный резистор  $R_n$  имеет одно и тоже направление

5. Однополупериодный выпрямитель (рис. 2.5) состоит из трансформатора, к вторичной обмотке которого последовательно подсоединены диод Д и нагрузочный резистор  $R_n$ . Применяют для питания высокоомных нагрузочных устройств (например, электронно-лучевых трубок) допускающих повышенную пульсацию, мощность не более 10–15 Вт.

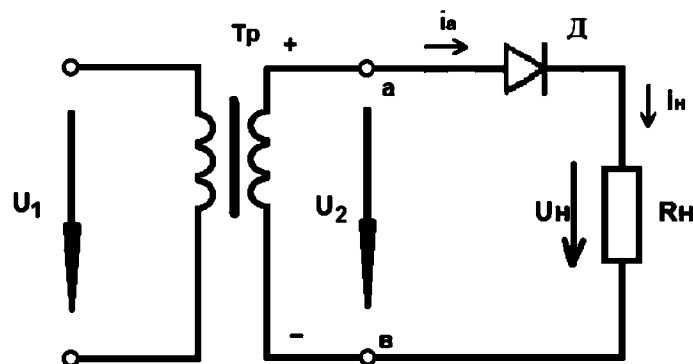


Рис. 2.5. Однополупериодный выпрямитель. Первый полупериод:  $0-0,5T$ ; диод Д открыт. Второй полупериод:  $0,5T-T$ ; диод Д закрыт

6. Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рис. 2.6) можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включен-

ных на один и тот же нагрузочный резистор  $R_H$ . Недостатки: габариты, масса и стоимость трансформатора больше, чем в однополупериодных и мостовых выпрямителях.

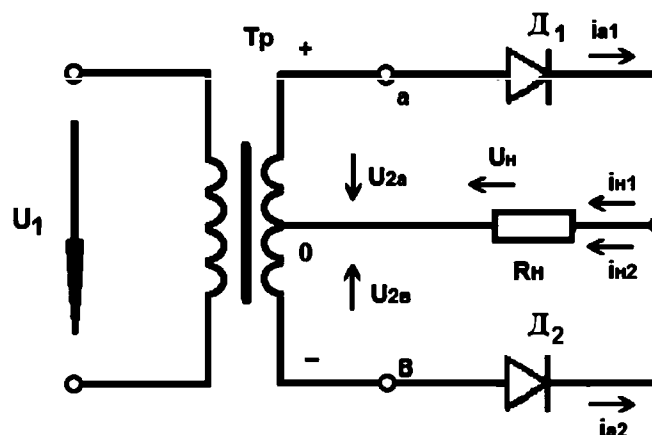


Рис. 2.6. Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки.  
Первый полупериод:  $0-0,5T$ ; диод  $D_1$  открыт,  $D_2$  закрыт. Второй полупериод:  $0,5T-T$ ; диод  $D_1$  закрыт,  $D_2$  открыт

### Моделирование работы выпрямительных устройств

Одно и двух полупериодные выпрямители дают пульсирующее напряжение, которое необходимо сглаживать для обеспечения корректной работы электрических приборов. Схемы простейших однополупериодных выпрямителей приведены на рис. 2.7.

Выпрямляющим элементом для рассматриваемых схем является диод  $VD$ , пропускающий ток только в одном направлении. Промежуток периода, во время которого диод заперт, сопровождается провалом силы тока (напряжения). Установка фильтра (емкости, индуктивности или емкости и индуктивности) позволяет перераспределить силу тока в течение периода, то есть выровнять в определенных пределах пульсацию электрического тока. Величина остаточной пульсации определяется соотношением параметров колебательной системы.

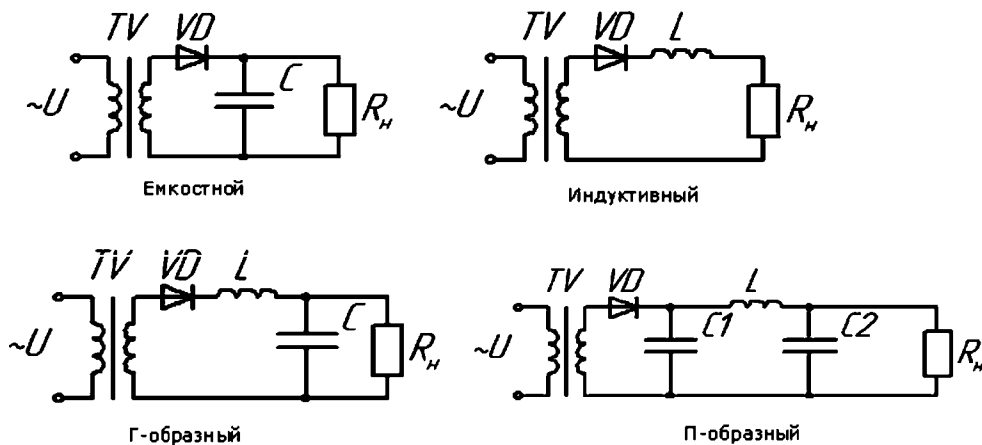


Рис. 2.7. Схемы однополупериодных выпрямителей

В емкостном фильтре роль фильтрующего элемента играет конденсатор, устанавливаемый параллельно нагрузке (рис. 2.8).

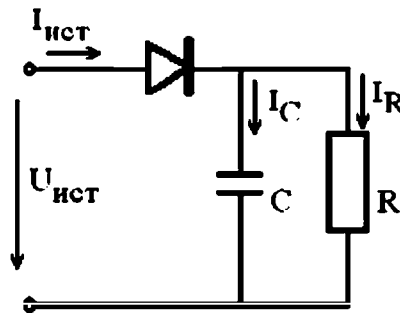


Рис. 2.8. Схема замещения емкостного фильтра

Первый закон Кирхгофа применительно к рассматриваемой схеме

$$I_{ист} = I_C + I_R,$$

где  $I_{ист}$  – сила тока на входе в выпрямитель (до диода);

$I_C, I_R$  – сила тока через емкость и нагрузку соответственно.

Учитывая закон Ома, баланс токов в узле можно представить как дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{U_{ист}}{Z} = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R},$$

где  $U_{ист}$  – переменное напряжение от источника;

$Z$  – эквивалентное сопротивление схемы замещения;

$C, R$  – емкость и сопротивление соответственно.

Уравнение колебаний в стандартной форме Коши относительно первой производной от напряжения

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} \left( \frac{u}{R} - \frac{U_{ист}}{Z} \right).$$

Напряжение на входе в выпрямитель (до диода)

$$U_{ист} = Um \sin (\omega t + \varphi),$$

где  $Um$  – амплитудное значение напряжения от источника,  $\omega$  – круговая частота,  $t$  – время,  $\varphi$  – начальная фаза. Диод пропускает ток только в одном направлении. В результате на выходе из диода напряжение

$$U_{ист} = Umsin (\omega t + \varphi) \text{ при } \sin (\omega t + \varphi) > 0,$$

$$U_{ист} = 0 \text{ при } \sin (\omega t + \varphi) < 0.$$

Эквивалентное сопротивление схемы  $Z$  определяется как векторная сумма активного  $R$  и емкостного  $X_C$  сопротивлений (сопротивлением диода пренебрегаем), его модуль равен:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2}}.$$

Эффект сглаживания пульсаций (рис. 2.9) определяется параметрами колебательного контура: нагрузкой  $R$  и емкостным сопротивлением  $X_C$ . В свою очередь емкостное сопротивление зависит от частоты колебаний и емкости конденсатора

$$X_C = \omega C.$$

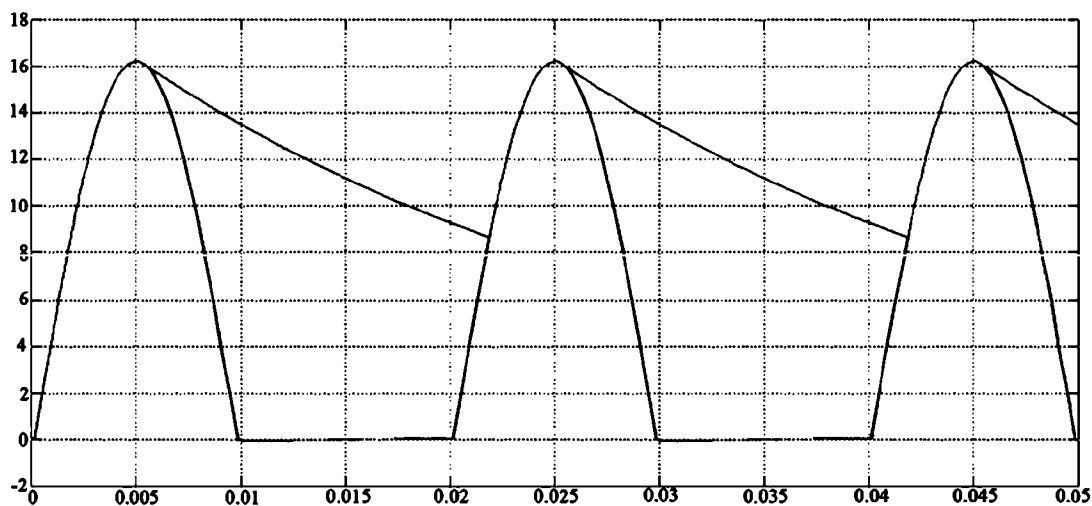


Рис. 2.9. Диаграмма пульсаций напряжения при использовании емкостного фильтра

На практике значение емкости фильтра выбирается из соотношения

$$R > X_C,$$

или с учетом  $\omega = 2\pi f$  емкость конденсатора фильтра

$$C > \frac{1}{\omega R}.$$

### Оптические приборы

1. Светодиод или светоизлучающий диод (СД, СИД; англ. *light-emitting diode, LED*) – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении.

Излучаемый светодиодом свет (СД видимого диапазона) лежит в узком диапазоне спектра – в отличие от лампы, излучающей более широкий спектр, где нужный цвет можно получить лишь применением внешнего светофильтра. Диапазон излучения светодиода во многом зависит от химического состава использованных полупроводников (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Цветовая характеристика	Длина волны, нм	Напряжение, В	Материал*
Инфракрасные	до 760	до 1,9	GaAs, AlGaAs
Красные	610–760	от 1,6 до 2,03	AlGaInP, GaP
Оранжевые	590–610	от 2,03 до 2,1	GaAsP, AlGaInP, GaP
Желтые	570–590	от 2,1 до 2,2	GaAsP, AlGaInP, GaP
Зеленые	500–570	от 2,2 до 3,5	InGaN, GaN, AlGaInP,
Синие	450–500	от 2,5 до 3,7	InGaN, SiC
Фиолетовые	400–450	от 2,8 до 4	InGaN,
Ультрафиолетовые	до 400	от 3,1 до 4,4	AlN, AlGaIn, AlGaInN
Белые	Широкий спектр	от 3 до 3,7	

\* – обозначения химических элементов периодической системы Менделеева:

Al – алюминий, As – мышьяк, C – углерод, Ga – галлий, In – индий, N – азот, P – фосфор, Si – кремний.



2. При пропускании электрического тока через р-п-переход в прямом направлении, носители заряда – электроны и дырки – рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой). Если излучение не происходит, высвобожденная энергия переходит в тепловую, нагревая вещество.
3. Не все полупроводниковые материалы эффективно испускают свет при рекомбинации. Лучшие излучатели относятся к прямозонным полупроводникам (разрешены прямые оптические переходы зона-зона), типа  $A^{III}B^V$  (GaAs или InP) и  $A^{II}B^{VI}$  (ZnSe или CdTe). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS). Диоды, сделанные из непрямозонных полупроводников (кремния, германия или карбида кремния), свет практически не излучают.
4. Светоизлучающий диод, как и обычный диод, представляет собой кристалл из полупроводникового материала, легированного различными примесями для создания р-п-перехода. Ток протекает через переход между полупроводником р-типа (анод) и полупроводником п-типа (катод), но не в обратном, а в прямом направлении.

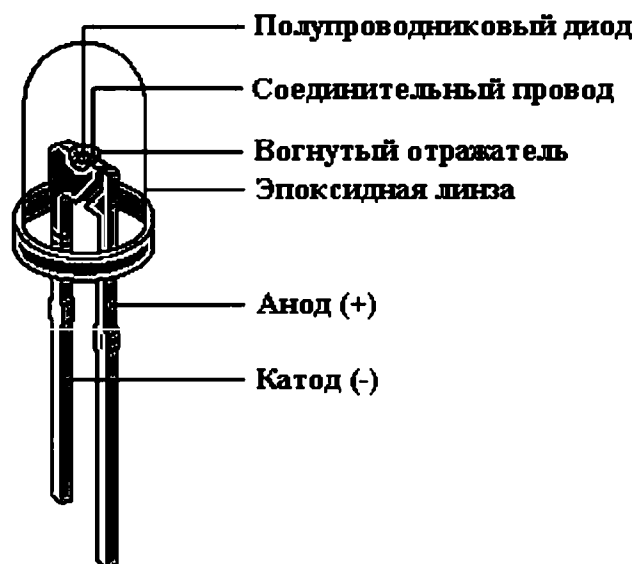


Рис. 2.10. Конструкция светодиода

5. Вольтамперная характеристика светодиодов в прямом направлении нелинейна. Диод начинает проводить ток, начиная с некоторого порогового напряжения. Это напряжение позволяет достаточно точно определить материал полупроводника.

Из-за круто возрастающей вольтамперной характеристики р-п-перехода в прямом направлении, светодиод должен подключаться к источнику напряжения через токостабилизирующую цепь (некоторые светодиоды могут содержать токостабилизирующую цепь внутри себя, в таком случае для них указывается диапазон допустимых напряжений питания).

6. По сравнению с другими электрическими источниками света (преобразователями электроэнергии в электромагнитное излучение видимого диапазона), светодиоды имеют следующие отличия:

- Высокая световая отдача. Современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 160 люмен на ватт.
- Высокая механическая прочность, вибростойкость (отсутствие нити накаливания и иных чувствительных составляющих).
- Длительный срок службы – от 30000 до 100000 часов.
- Спектр современных белых светодиодов – от тёплого белого = 2700 К до холодного белого = 6500 К. Спектральная чистота достигается не фильтрами, а принципом устройства прибора.
- Малая инерционность – включаются сразу на полную яркость, в то время как у ртутно-фосфорных (люминесцентных) ламп время включения от 1 с до 1 мин, а яркость увеличивается от 30 % до 100 % за 3–10 минут, в зависимости от температуры окружающей среды.
- Количество циклов включения-выключения не оказывают существенного влияния на срок службы светодиодов (в отличие от ламп накаливания, газоразрядных ламп).
- Различный угол излучения – от 15 до 180 градусов.
- Низкая стоимость индикаторных светодиодов.
- Безопасность – не требуются высокие напряжения, низкая температура светодиода или арматуры, обычно не выше 60 °С.
- Нечувствительность к низким и очень низким температурам.

- Экологичность – отсутствие ртути, фосфора и ультрафиолетового излучения в отличие от люминесцентных ламп.

## 7. Классификация светодиодов.

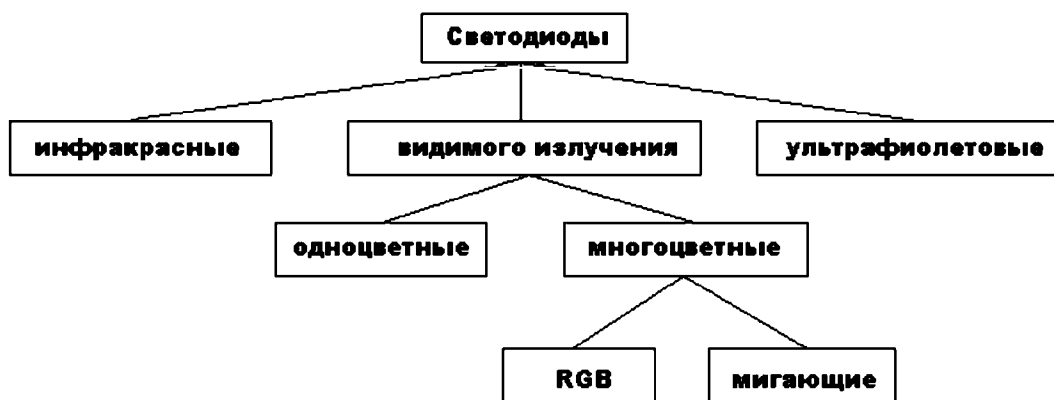


Рис. 2.11. Классификация светодиодов

- **Одноцветные светодиоды**

Одноцветные светодиоды излучают монохромный свет и требуют различного напряжения для работы – красный цвет берет наименьшее напряжение (около 2 вольт), синий цвет – большее напряжение (около 4 вольт). Типичные светодиоды требуют 20–30 миллиампер тока независимо от величины напряжения.

- **Инфракрасные светодиоды**

ИК-светодиоды (инфракрасные), излучают свет вне видимого диапазона (длина волны 850–940 нм).

- **Многоцветные светодиоды**

В корпусе одного светодиода устанавливается более одного полупроводникового кристалла, причем сами кристаллы сделаны из разных материалов и соответственно излучают разные цвета. Двухцветные светодиоды используют как индикаторы (обычно красный/зеленый цвет), трехцветные светодиоды используют для подсветки дисплеев и постройки светодиодных экранов.

- **RGB-светодиоды**

Полноцветный светодиод (RGB-светодиод – Red, Green, Blue).

Смешивая эти три цвета в разной пропорции можно отобразить любой цвет. RGB-светодиод состоит из трех кристаллов под одним корпусом и имеет 4 вывода: один общий и три цветовых вывода (рис. 2.12).

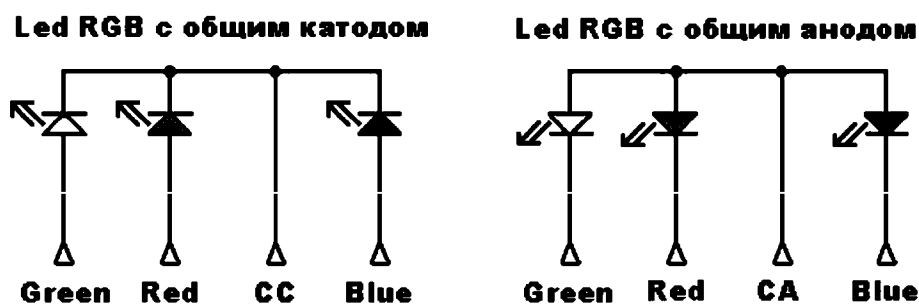


Рис. 2.12. Схема выводов RGB-светодиода

- **Мигающие светодиоды**

Мигающий светодиод (МСД) – светодиод со встроенным интегральным генератором импульсов с частотой вспышек 1,5–3 Гц. В мигающий светодиод входит полупроводниковый чип генератора и некоторые дополнительные элементы. Напряжение питания в пределах от 3 до 14 вольт – для высоковольтных, и от 1,8 до 5 вольт для низковольтных экземпляров.

В некоторых вариантах мигающих светодиодов могут быть встроены несколько (обычно 3) разноцветных светодиода с разной периодичностью вспышек. Применение мигающих светодиодов оправдано в компактных устройствах с высокими требованиями к габаритам радиоэлементов и электропитанию – мигающие светодиоды очень экономичны, т. к. электронная схема МСД выполнена на МОП структурах. Внутри МСД находятся две подложки одинакового размера. На первой из них располагается кристаллический кубик светового излучателя из редкоземельного сплава. Для увеличения светового потока, фокусировки и формирования диаграммы направленности применяется параболический алюминиевый отражатель (2). В МСД он немного меньше по диаметру, чем в обычном светодиоде, так как вторую часть корпуса занимает подложка с интегральной микросхемой (3). Электрически обе подложки связаны друг с другом двумя золотыми проволочными перемычками (4). Корпус МСД (5) выполняется из матовой светорассеивающей пластмассы или из прозрачного пластика.

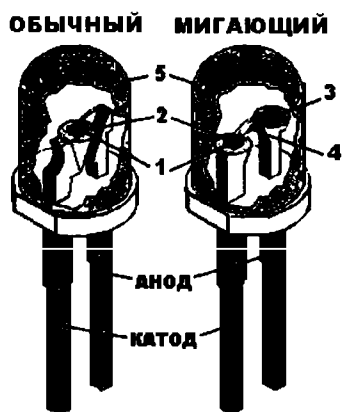


Рис. 2.13. Конструкция мигающего светодиода

- **Ультрафиолетовые светодиоды**

Общая длина волны света ультрафиолетовых светодиодов (400 нанометров) располагается на границе между фиолетовым и ультрафиолетовым диапазоном – часть испускаемого света невидима.

- **Органические светодиоды – OLED**

Многослойные тонкоплёночные структуры, изготовленные из органических соединений, которые эффективно излучают свет при пропускании через них электрического тока. Основное применение OLED находит при создании устройств отображения информации (дисплеев сотовых телефонов, GPS-навигаторов, приборов ночного видения).

### Фотодиоды и оптроны

1. Оптопара или оптрон (рис. 2.14) – электронный прибор, состоящий из излучателя света (обычно – светодиод, в ранних изделиях – миниатюрная лампа накаливания) и фотоприёмника (биполярных и полевых фототранзисторов, фотодиодов, фототиристоров, фоторезисторов), связанных оптическим каналом. Принцип работы оптрона заключается в преобразовании электрического сигнала в свет, его передаче по оптическому каналу и последующем преобразовании обратно в электрический сигнал.

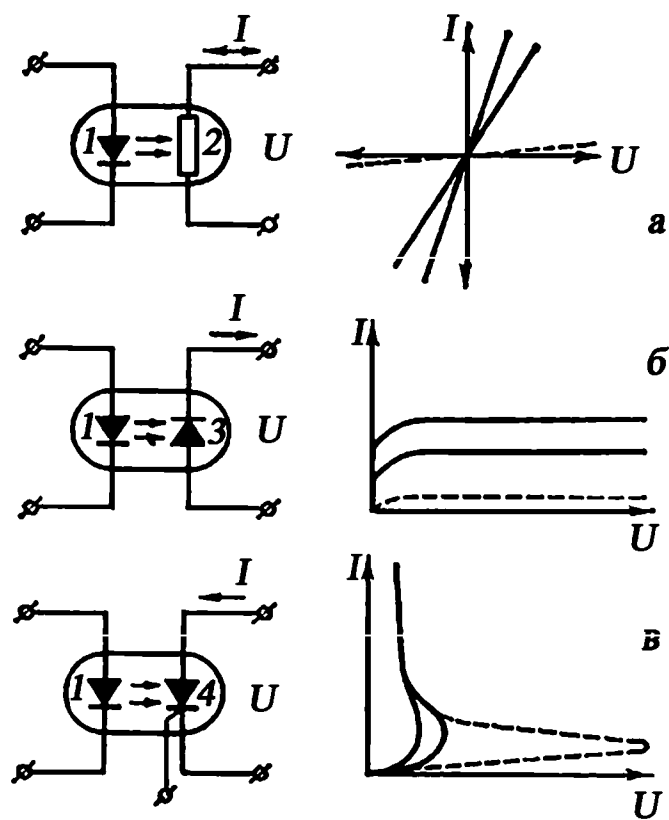


Рис. 2.14. Электрические схемы и выходные характеристики оптронов с фоторезистором (а), фотодиодом (б) и фототиристором (в):

1 – полупроводниковый светоизлучающий диод; 2 – фоторезистор;  
 3 – фотодиод; 4 – фототиристор;  $U$  и  $I$  – напряжение и ток в выходной цепи оптрона.

Пунктирные кривые соответствуют отсутствию тока во входной цепи оптрона, сплошные – двум разным значениям входных токов

2. Фотодиод (ФД) – приемник (рис. 2.15) оптического излучения, преобразующий падающий на его фоточувствительную область поток электромагнитного излучения в электрический заряд за счет процессов в р-п-переходе.
3. При освещении р-п-перехода монохроматическим излучением имеет место собственное поглощение квантов излучения и генерируются неравновесные фотоэлектроны и фотодыры. Под действием электрического поля перехода эти фотоносители перемещаются: электроны – в п-область, а дыры – в р-область, т. е. через переход течет дрейфовый ток неравновесных носителей. Ток фотодиода определяется током неосновных носителей.

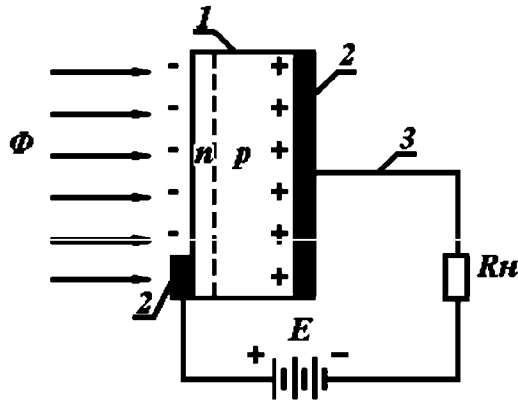


Рис. 2.15. Структурная схема фотодиода: 1 – кристалл полупроводника; 2 – контакты; 3 – выводы;  $\Phi$  – поток электромагнитного излучения;  $E$  – напряжение источника постоянного тока;  $R_n$  – сопротивление нагрузки

4. Семейство ВАХ фотодиода (рис. 2.16) расположено в квадрантах I, III и IV. Квадрант I – нерабочая область для ФД, в этом режиме фотоуправление током через диод невозможно.

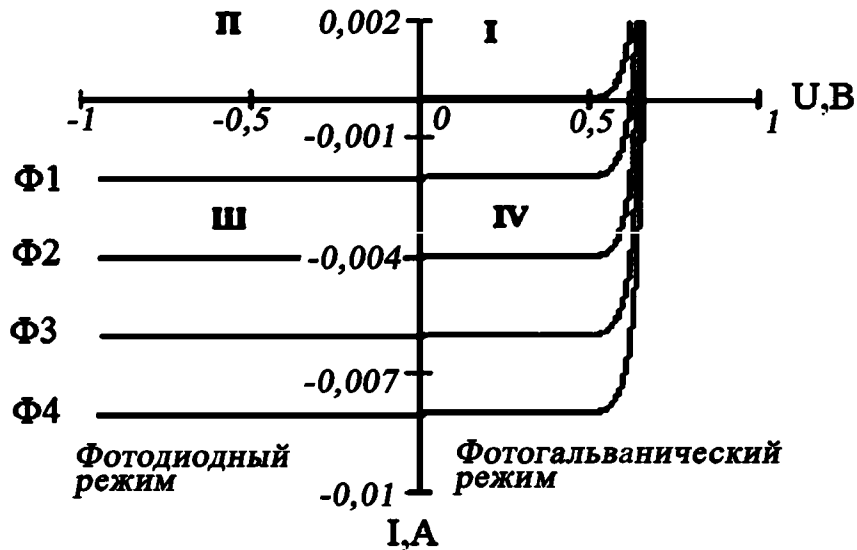


Рис. 2.16. Вольтамперная характеристика фотодиода

Квадрант IV семейства ВАХ фотодиода соответствует фотогальваническому режиму работы ФД. Если цепь разомкнута, то концентрация электронов в n-области и дыр в p-области увеличивается, поле объемного заряда атомов примеси в переходе частично компенсируется и потенциальный барьер снижается на величину фото-ЭДС (напряжение холостого хода фотодиода).

Если р- и п-области соединить внешним проводником, то в нем потечет ток короткого замыкания, образованный неравновесными фотоносителями.

Квадрант III – фотодиодная область работы ФД, при которой к р-п-переходу прикладывается обратное напряжение.

5. Основными световыми характеристиками фотодиода в фотогальваническом режиме являются зависимости тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжение холостого хода  $U_{хх}$  от светового потока (рис. 2.17).

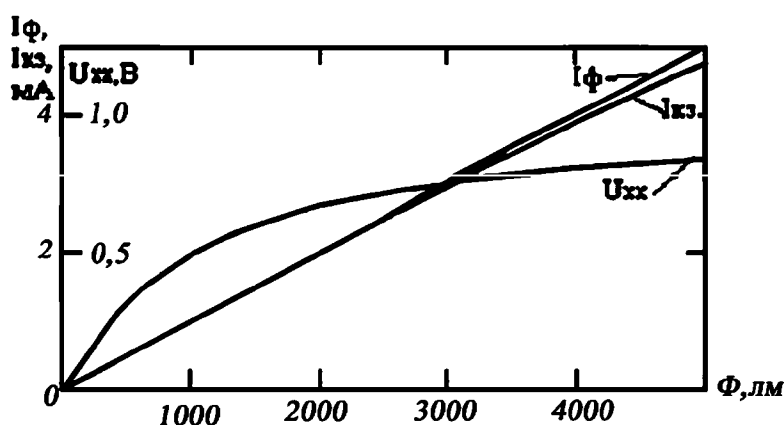


Рис. 2.17. Световые характеристики фотодиода

6. Фотодиод может работать в двух режимах:

- фотогальванический – без внешнего напряжения;
- фотодиодный – с внешним обратным напряжением.

Если фотодиод неосвещен, то через него проходит незначительный темновой ток. При освещении запирающего перехода, фотодиод открывается и через него проходит световой ток, величина которого зависит от значения светового потока.

7. Виды фотодиодов

- **р-і-п фотодиод**

В р-і-п структуре (рис. 2.18) средняя і-область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом напряжении оно пронизывает і-область, и свободные носители, появившиеся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем р-п переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности.



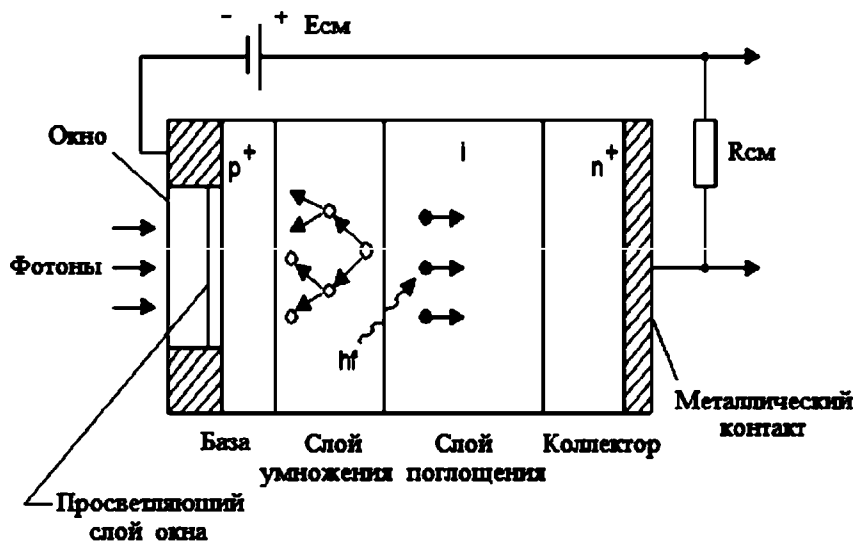


Рис. 2.18. Принцип действия p-i-n фотодиода

• **Фотодиод Шоттки**

Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник p-типа.

• **Лавинный фотодиод**

В структуре лавинного фотодиода (рис. 2.19) используется лавинный пробой, возникающий при превышении энергии фотоносителей относительно энергии образования электронно-дырочных пар. Чувствительность лавинных фотодиодов может быть на несколько порядков больше, чем у обычных фотодиодов (у германиевых – в 200–300 раз, у кремниевых – в 104–106 раз).

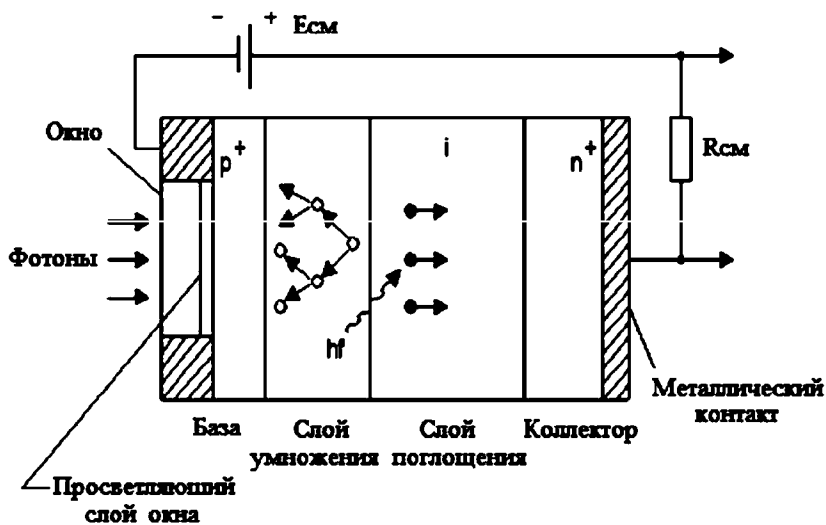


Рис. 2.19. Принцип действия лавинного фотодиода

• **Фотодиод с гетероструктурой**

Гетеропереход – слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещённой зоны. Один слой p+ играет роль «приёмного окна». Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещённой зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. Недостаток – сложность изготовления.

8. Кремниевые фотодиоды ФД.

Фотодиоды ФД-320 структуры p-n с квадратным фоточувствительным элементом площадью 25 мм<sup>2</sup> оформлены в пластмассовом корпусе с жесткими штампованными лужеными выводами. Входное окно выполнено в виде линзы. Чувствительность прибора максимальна, когда падающее на него излучение направлено вдоль оптической оси. Предназначены для применения в качестве датчиков инфракрасного излучения в системах дистанционного управления радиоэлектронной аппаратурой.

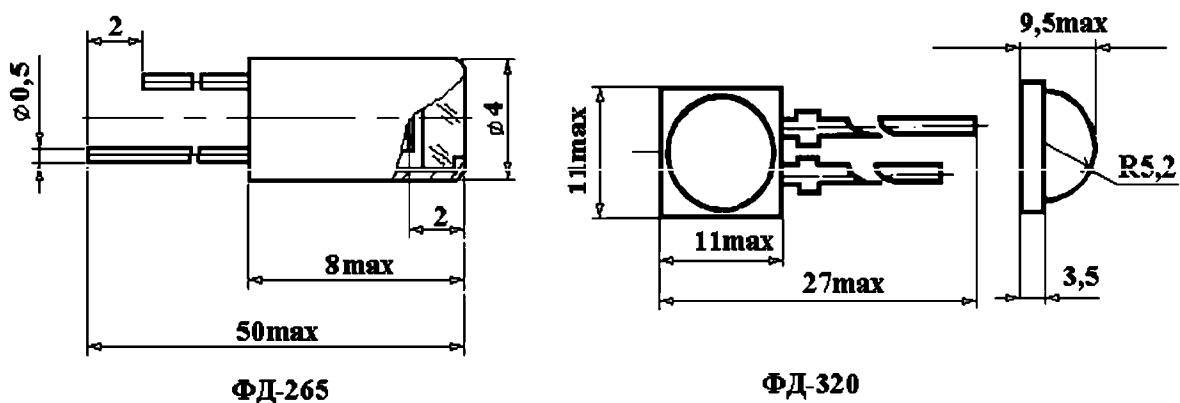


Рис. 2.20. Конструкции фотодиодов ФД-265 и ФД-320

**Характеристики фотодиода ФД-320**

Максимальный темновой ток при 25 °С	5×10 <sup>-8</sup> А
Токовая импульсная чувствительность	0,12 А/В
Рабочее напряжение	12 В
Емкость	80 пФ
Максимальное допустимое напряжение	30 В
Освещенность	100 лк

Максимальная длина волны в максимуме чувствительности, мкм.	0,87...0,96
Температурный диапазон	-10...+60 °С
<b>Характеристики фотодиода ФД-265</b>	
Размер чувствительной площадки	1,45×1,45 мм
Спектральный диапазон	0,4...1,1 мкм
Длина волны в максимуме чувствительности	0,85 мкм
Рабочее напряжение	5 В
Темновой ток при 20 °С	< 0,1 мкА
Интегральная чувствительность (Тцв=2850 К, Т=20 °С)	> 5 мА/лм
Рабочая температура	-60...+85 °С

Непосредственное подключение светодиода к источнику напряжения может вызвать протекание через него тока, превышающего допустимый, перегрев и мгновенный выход из строя. В простейшем случае (для маломощных индикаторных светодиодов) ограничение тока осуществляется резистором, последовательно включенным со светодиодом. Для мощных светодиодов применяются схемы с широтно-импульсной модуляцией, которые поддерживают средний ток через светодиод на заданном уровне.

Недопустимо подавать на светодиоды напряжение обратной полярности. Светодиоды имеют невысокое (несколько вольт) обратное пробивное напряжение. В схемах, где возможно появление обратного напряжения, светодиод должен быть защищен параллельно включенным обычным диодом в противоположной полярности.

Обычно светодиоды рассчитаны на силу тока в 20 мА. Рабочее напряжение светодиода зависит от полупроводникового материала, из которого он сделан, есть зависимость между цветом свечения светодиода и его рабочим напряжением (таблица 2.2).

Как правило, светодиоды имеют разброс параметров, требуют различные напряжения каждый. При параллельном соединении светодиодов один из них будет светиться ярче и брать на себя тока больше, пока не выйдет из строя. Параллельное подключение светодиодов многократно ускоряет естественную деградацию кристалла светодиода.

Таблица 2.2

## Примерные напряжения светодиодов в зависимости от цвета

Цветовая характеристика	Длина волны, нм	Напряжение, В
инфракрасные	от 760	До 1,9
красные	610–760	1,6–,03
оранжевые	590–610	2,1–2,3
желтые	570–590	2,1–2,2
зеленые	500–570	2,2–3,5
синие	450–500	2,5–3,7
фиолетовые	400–450	2,8–4
ультрафиолетовые	до 400	3,1–4,4
белые	широкий спектр	3–3,7

При параллельном соединении светодиодов каждый из них должен иметь свой собственный ограничительный резистор (рис. 2.21)

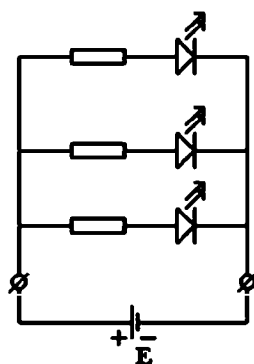


Рис. 2.21. Пример правильного параллельного подключения светодиодов

Если имеются светодиоды разных марок, то они комбинируются таким образом, чтобы в каждой ветви были светодиоды только одного типа (либо с одинаковым рабочим током), для каждой ветви рассчитывается свое собственное сопротивление.

Величина сопротивления защитного резистора

$$R = \frac{U_{\text{питания}} - U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}},$$

где  $R$  – значение резистора в Омах,

$U_{\text{диода}}$  – падение напряжения через светодиод,

$U_{\text{питания}}$  – напряжение от источника,

$I_{\text{диода}}$  – сила тока светодиода.

## Биполярные транзисторы

Транзистор – радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналам управлять током в электрической цепи. Используется для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Управление током в выходной цепи осуществляется за счет изменения входного напряжения или тока. Условные обозначения и упрощенная схема поперечного разреза биполярного транзистора приведены на рис. 2.22. Схемы возможных включений транзисторов приведены на рис. 2.23.

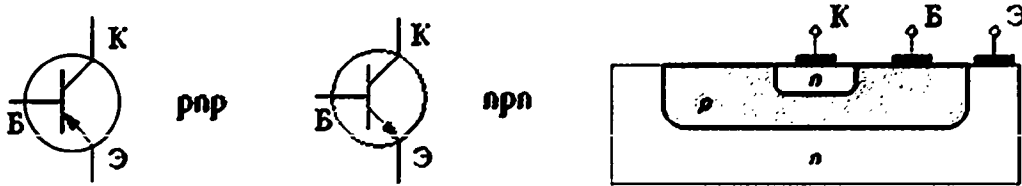


Рис. 2.22. Условные обозначения и схема поперечного разреза транзистора

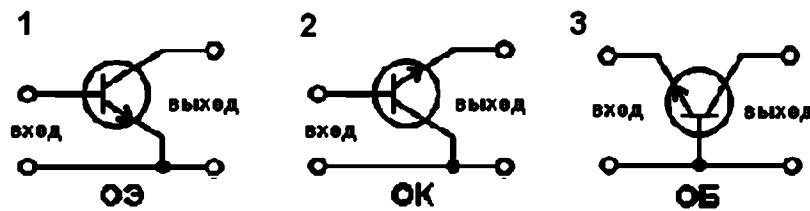


Рис. 2.23. Схемы включения биполярных транзисторов: 1 – с общим эмиттером, 2 – с общим коллектором, 3 – с общей базой

Включение транзистора n-p-n типа по схеме с общим эмиттером и его схема замещения.

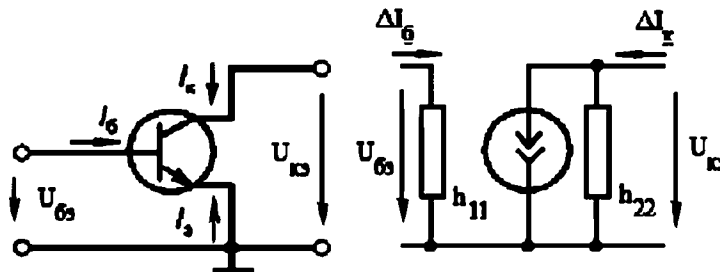


Рис. 2.24. Включение транзистора n-p-n типа

Ток базы:  $I_b = I_\varepsilon - I_k = (1 - a) I_\varepsilon - I_{k\varepsilon} \ll I_\varepsilon \sim I_k$ .

## Полевые транзисторы

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, ток в котором управляется электрическим полем (ток определяется только движением основных носителей заряда одного типа – электронов или дырок).

В зависимости от электропроводности исходного материала транзисторы бывают с р-каналом и n-каналом (рис. 2.25 и рис. 2.26).

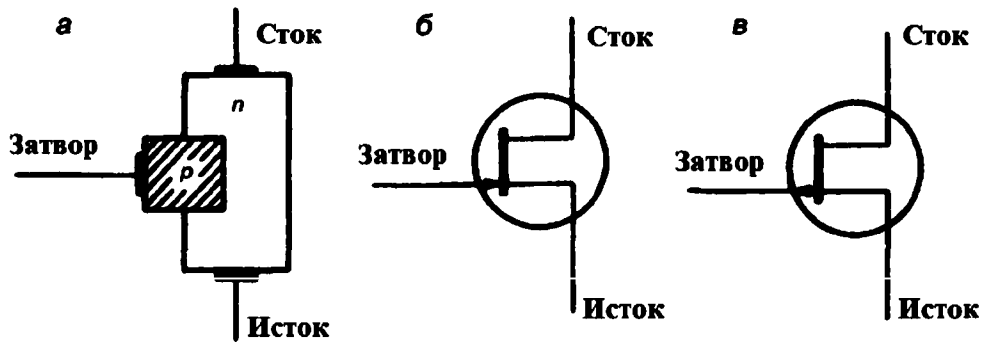


Рис. 2.25. Полевой транзистор с р-п-переходом: а – схематическое изображение конструкции транзистора с каналом n-типа; б, в – обозначение транзисторов с каналом n-типа и р-типа

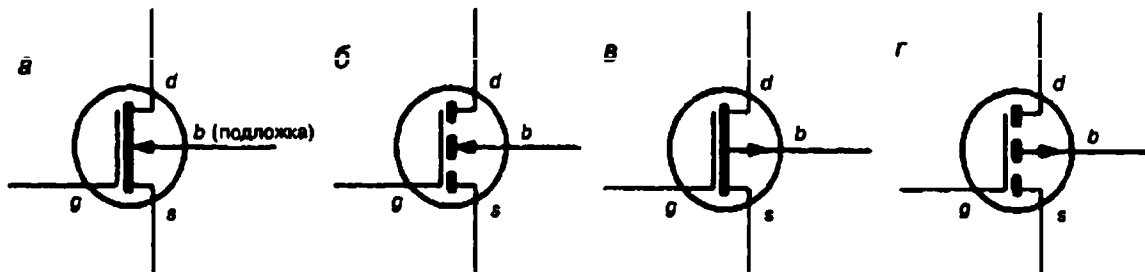


Рис. 2.26. Условные обозначения полевых транзисторов:

- а – n-канальный транзистор со встроенным каналом (с обеднением);
- б – n-канальный транзистор с индуцируемым каналом (с обогащением);
- в – p-канальный транзистор со встроенным каналом (с обеднением);
- г – p-канальный транзистор с индуцируемым каналом (с обогащением)

Носители заряда перемещаются по каналу от истока к стоку (рис. 2.27). С помощью затвора создается управляющее электрическое поле, позволяющее регулировать электрическую проводимость канала (ток в канале).

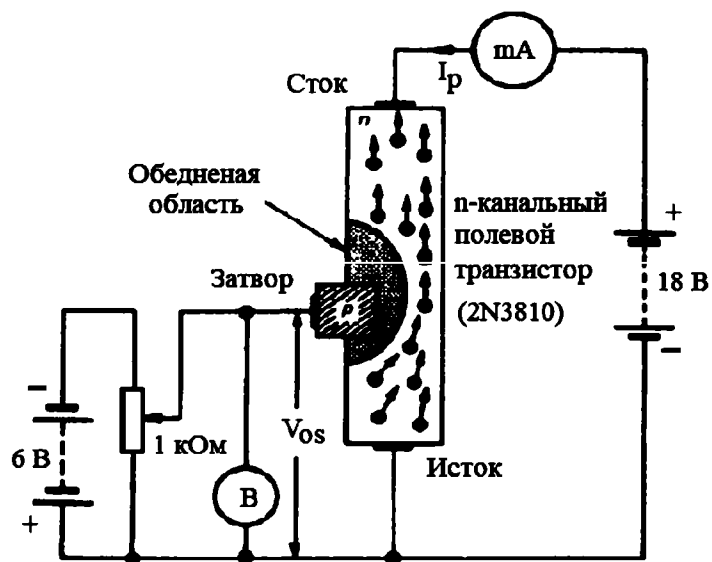


Рис. 2.27. Принцип работы полевого транзистора

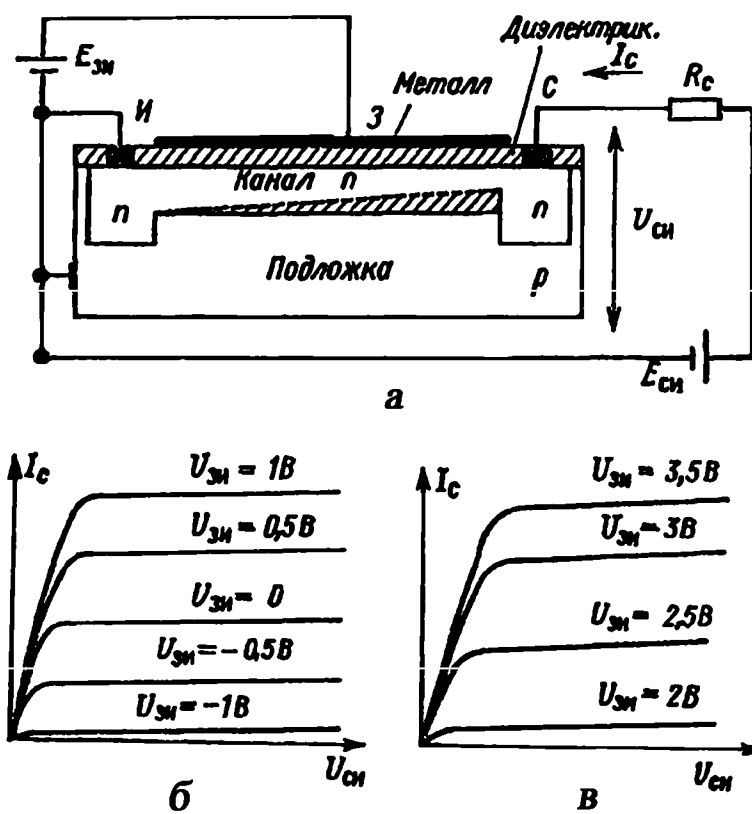


Рис. 2.28. Структура (а) и стоковые характеристики МДП-транзисторов: б – со встроенным каналом, в – с индуцированным каналом

## Расчет охлаждения транзисторов

Во время работы полупроводникового прибора в его кристалле выделяется мощность, которая приводит к разогреву последнего. Если тепла выделяется больше, чем рассеивается в окружающем пространстве, то температура кристалла будет расти и может превысить максимально допустимую. При этом его структура будет необратимо разрушена.

Эффективность охлаждения полупроводниковых приборов определяет надежность их работы. Чем больше охлаждаемая поверхность, тем эффективнее охлаждение, и поэтому мощные полупроводниковые приборы нужно устанавливать на металлические радиаторы, имеющие развитую охлаждаемую поверхность. Наиболее эффективным является конвективный механизм охлаждения, при котором тепло уносит поток газообразного или жидкого теплоносителя, омывающего охлаждаемую поверхность. В качестве теплоносителя обычно используется окружающий воздух.

По способу перемещения теплоносителя различают:

- естественную вентиляцию;
- принудительную вентиляцию.

В случае естественной вентиляции перемещение теплоносителя осуществляется за счет тяги, возникающей возле нагретого радиатора. В случае принудительной вентиляции перемещение теплоносителя осуществляется с помощью вентилятора. Во втором случае можно получить большие скорости потока и, соответственно, лучшие условия охлаждения.

Широкое распространение получил тепловой расчет элементов электроники, основанный на тепловой модели охлаждения (приложение теории подобия). Структурная схема процесса охлаждения представлена на рис. 2.29.

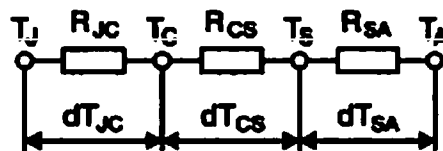


Рис. 2.29. Тепловая модель охлаждения

Разница между температурой кристалла  $T_J$  и температурой среды  $T_A$  вызывает тепловой поток, движущийся от кристалла к окружающей среде,



через тепловые сопротивления  $R_{JC}$  (кристалл – корпус),  $R_{CS}$  (корпус – радиатор) и  $R_{SA}$  (радиатор – окружающая среда).

Тепловое сопротивление имеет размерность  $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . Суммарное максимальное тепловое сопротивление  $R_{JA}$  на участке кристалл – окружающая среда:

$$R_{JA} \leq \frac{T_J - T_A}{P_{ПП}}$$

где  $P_{ПП}$  – мощность, рассеиваемая на кристалле полупроводникового прибора, Вт.

Тепловое сопротивление радиатора

$$R_{SA} = R_{JA} - R_{JC} - R_{CS}$$

На рис. 2.30 приведены графические зависимости между периметром сечения алюминиевого радиатора и его тепловым сопротивлением для естественного и принудительного охлаждения воздушным потоком.

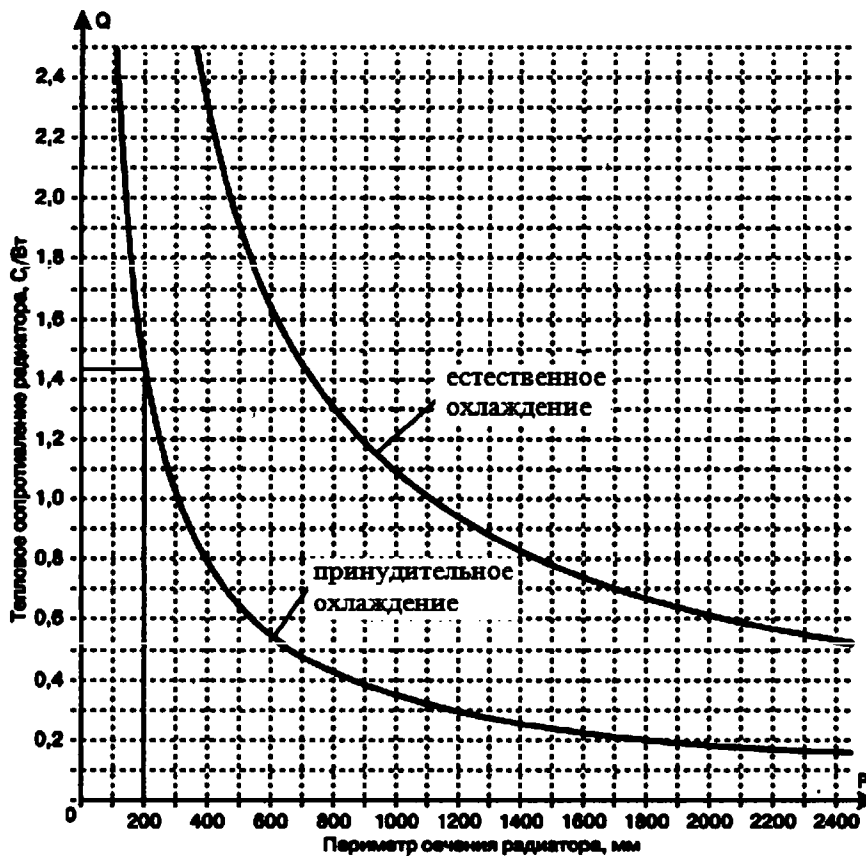


Рис. 2.30. Зависимости между сечением алюминиевого радиатора и его тепловым сопротивлением

По умолчанию считается, что:

- радиатор имеет длину 150 мм;
- разница между температурой радиатора  $T_S$  и температурой окружающей среды  $T_a$  равна:  $\Delta T = T_S - T_a = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- скорость потока принудительного охлаждения равна 2 м/с.

Если условия охлаждения отличаются от принятых по умолчанию, то необходимую поправку можно внести с помощью поправочных коэффициентов, учитывающих

- разницу температуры радиатора и окружающей среды (рис. 2.31)
- скорость воздушного потока (рис. 2.32),
- длину радиатора (рис. 2.33).

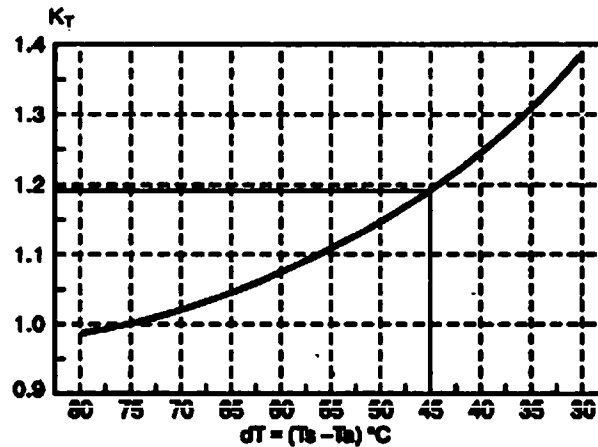


Рис. 2.31. Поправочный коэффициент на разницу температуры радиатора и окружающей среды

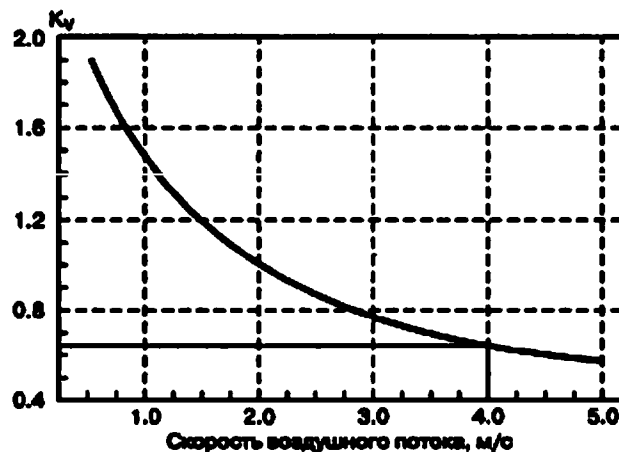


Рис. 2.32. Поправочный коэффициент на скорость воздушного потока

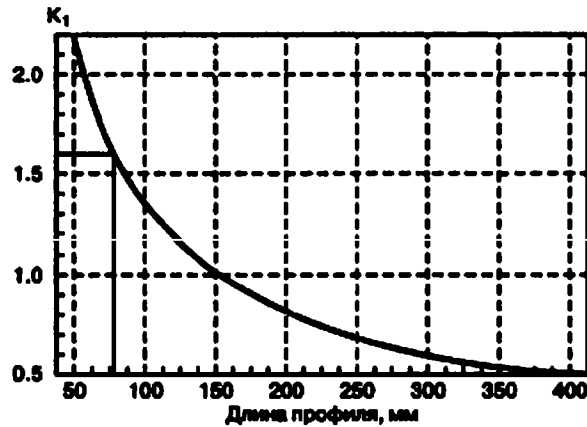


Рис. 2.33. Поправочный коэффициент на длину радиатора

### Усилители

Простейшим усилителем является усилительный каскад, содержащий нелинейный управляемый элемент УЭ (как правило, биполярный или полевой транзистор), резистор R и источник электрической энергии E (рис. 2.34).

Усилительный каскад имеет входную цепь, к которой подводится входное напряжение  $U_{вх}$  (усиливаемый сигнал), и выходную цепь для получения выходного напряжения  $U_{вых}$  (усиленный сигнал). Усиленный сигнал имеет значительно большую мощность по сравнению с входным сигналом. Увеличение мощности сигнала происходит за счет источника электрической энергии E. Процесс усиления осуществляется посредством изменения сопротивления нелинейного управляемого элемента УЭ и тока выходной цепи под воздействием входного напряжения или тока. Выходное напряжение снимается с управляемого элемента УЭ или резистора R.

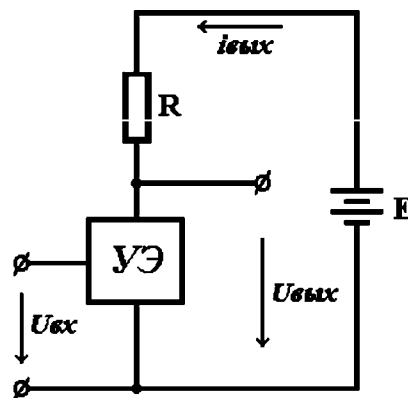


Рис. 2.34. Структурная схема усилительного каскада

Усиление основано на преобразовании электрической энергии постоянной ЭДС  $E$  в энергию выходного сигнала за счет изменения сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом.

Усилительные свойства усилителя зависят от степени влияния входного сигнала на ток управляемого элемента: чем больше это влияние, тем больше будет падение напряжения от тока УЭ на резисторе. Выходное напряжение зависит от сопротивления резистора  $R$ .

Основные параметры усилительного каскада:

- коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}};$$

- коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}};$$

- коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}/ U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}} = K_u \cdot K_i.$$

Многокаскадный усилитель представляет собой последовательно соединенные усилительные каскады (рис. 2.35).

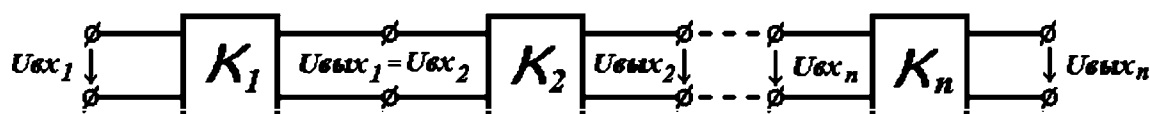


Рис. 2.35. Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления по напряжению каскадного усилителя

$$K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n.$$

При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника (рис. 2.36).

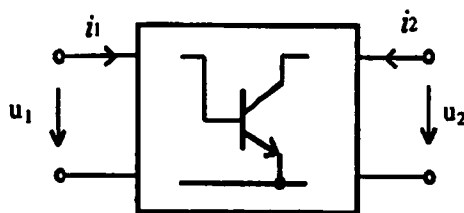


Рис. 2.36. Транзистор в виде четырехполюсника

Часто транзистор описывают с помощью h-параметров (таблица 2.3).

Таблица 2.3

№	Описание	Обозначение
1	Входное сопротивление транзистора для переменного сигнала (при закороченном выходе: $u_2 = 0$ )	$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}$ при $u_2 = 0$
2	Коэффициент обратной связи по напряжению	$h_{12} = \frac{u_1}{u_2}$ при $i_2 = 0$
3	Коэффициент передачи тока	$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}$ при $u_2 = 0$
4	Выходная проводимость	$h_{22} = \frac{i_2}{u_2}$ при $i_1 = 0$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}; \quad u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2; \quad i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2.$$

Параметры, соответствующие схеме с общим эмиттером, обозначаются буквой «э», а схеме с общей базой – буквой «б».

## 2.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### 2.2.1. Лабораторная работа № 1

#### Исследование однофазных выпрямительных устройств

**Цель работы:** изучить принцип действия и практически ознакомиться со свойствами выпрямителей однофазного переменного напряжения, фильтрами.

#### Объект и средства исследования

Объектом исследования служит однополупериодный и двухполупериодный мостовой и с нулевым выводом выпрямителя без фильтров и с емкостными фильтрами.

При исследованиях используются источник переменного напряжения (ИП). Осциллограф и измерительные приборы: ампервольтметры АВМ1, АВМ2, милливольтметр МВ. Сборка исследуемой цепи осуществляется

коммутацией гнезд платы и рабочего комплекта и гнезд источника, измерительных приборов, осциллографа при помощи проводников с однополюсными вилками и установкой в гнезда платы рабочего комплекта дискретных элементов лабораторного стенда 87Л-01.

### Домашнее задание

1. Изучить принцип действия выпрямительных устройств. Зарисовать формы выпрямленного напряжения для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

2. Рассчитать, каким должно быть действующее значение переменного напряжения на входе выпрямителя (на вторичной обмотке трансформатора), чтобы получить среднее значение выпрямленного напряжения равным 12 В.

3. По каким параметрам выбирается тип диода для выпрямителей?

4. Записать выражения для параметров, оценивающих степень пульсации выпрямленного напряжения и сглаживающее действие фильтров.

### Рабочее задание

#### *Исследование двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя*

1. Установить на лабораторном стенде 87Л-01 плату № 9 и собрать схему (рис. 2.37) с помощью съемных элементов V1-V4 (диоды КД103А), резистор R2 (300 Ом), перемычка; подключить миллиамперметр АВМ1, вольтметр АВМ2. Получив разрешение преподавателя, подключить питание к схеме.

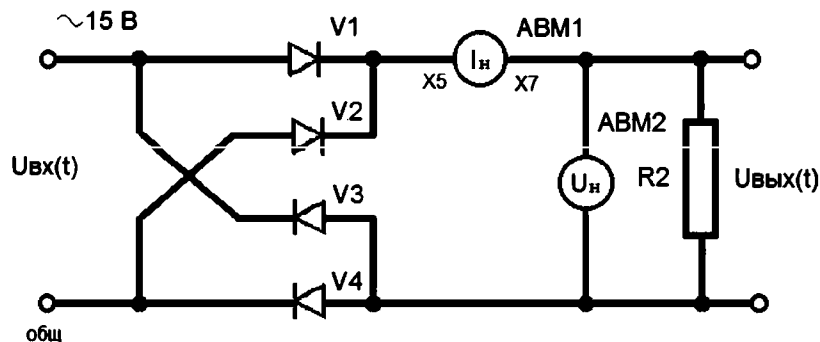


Рис. 2.37. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

2. Зарисовать осциллограммы входного напряжения, подаваемого на схему от источника переменного напряжения ИП и выпрямленного напряжения  $U_n(t)$  в режиме холостого хода и максимального тока нагрузки ( $R_2 = 51 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 300 \text{ Ом}$ ), и оценить степень пульсации выпрямленного напряжения.

Установить удобный для зарисовки осциллограммы размер изображения. В дальнейшем для исключения количественных ошибок снятие всех осциллограмм производить при выбранном в данном опыте масштабе.

3. Установить зависимость постоянного напряжения выпрямителя от тока нагрузки – снять внешнюю характеристику  $U_{н.ср} = f(I_{н.ср})$ , изменяя сопротивление нагрузки  $R_2$  ( $51 \text{ кОм} - 300 \text{ Ом}$ ).

4. Для режима холостого хода выпрямителя рассчитать соотношение между средним значением выпрямленного напряжения  $U_{н.ср}$  с переменным входным напряжением  $U_{ип}$ , измерив эти значения напряжения.

5. Построить внешнюю характеристику  $U_{н.ср} = f(I_{н.ср})$ . На характеристике указать точки, к которым относятся снятые осциллограммы.

6. Исследовать действие емкостного фильтра на выпрямленное напряжение (соблюдать полярность конденсатора!).

Емкостным фильтром является конденсатор  $C_1$ , подключенный параллельно нагрузке  $R_2$  (рис. 2.38).

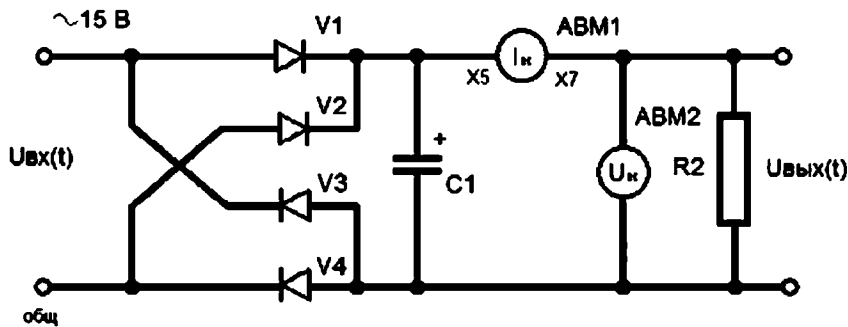


Рис. 2.38. Схема выпрямителя с емкостным фильтром

а) для выпрямленного устройства с однофазной мостовой схемой и емкостными фильтрами ( $C_1 = 20 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 50 \text{ мкФ}$ ) снять осциллограммы напряжения на нагрузке  $U_n(t)$  при максимальном токе нагрузки и на холостом ходу;

б) рассчитать коэффициент сглаживания – отношение коэффициентов пульсации на входе и на выходе устройства:

$$q = \frac{k_{ПВХ}}{k_{ПВЫХ}},$$

в) снять внешнюю характеристику  $U_{н.ср} = f(I_{н.ср})$  с емкостными фильтрами от режима холостого хода до максимального тока нагрузки.

7. Построить внешние характеристики выпрямителя без фильтра (п. 3.1) и с фильтрами (п. 3.6) в единой системе координат.

*Исследование двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя с нулевым выводом*

8. Установить на лабораторном стенде плату № 8 и собрать схему (рис. 2.39) с помощью съемных элементов: V1, V2 (диоды КД103А), R2 (300 Ом).

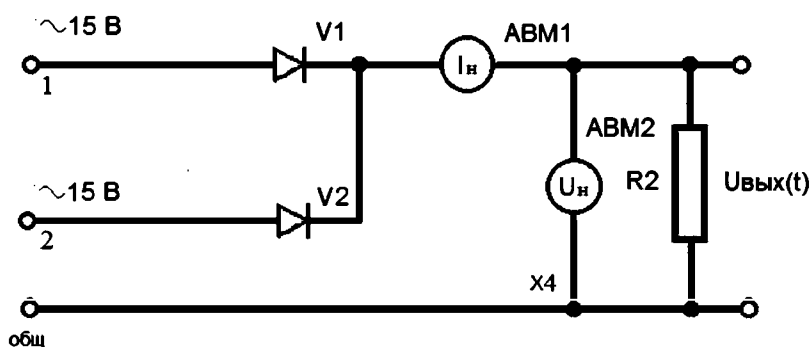


Рис. 2.39. Схема двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом

9. Подключить осциллограф и зарисовать осциллограммы входного напряжения  $U_{вх}(t)$ , напряжения на каждом из диодов и выпрямленного напряжения  $U_{н}(t)$ . Осциллограммы снимать при максимальном токе нагрузки R2 (300 Ом).

На осциллограмме выпрямленного напряжения  $U_{н}(t)$  показать среднее значение выпрямленного напряжения.

10. Снять внешнюю характеристику  $U_{нср}(t)$  для двухполупериодного выпрямительного устройства с нулевым выводом, изменяя сопротивление нагрузки R2 (300 Ом – 51 кОм).

11. Построить внешнюю характеристику  $U_{нср}(I_{нср})$  и обозначить точку, к которой относится снятая осциллограмма  $U_{н}(t)$  в п. 9.



12. Исследовать действие емкостного, Г-образного и П-образного фильтров на выпрямленное напряжение.

Для выпрямительных устройств с емкостным фильтром (рис. 2.40, а), с Г-образным RC фильтром (рис. 2.40, б), с П-образным (рис. 2.40, в), состоящим из емкостного и Г-образного фильтров, снять осциллограммы напряжения на нагрузке  $U_n(t)$  при максимальном токе и нагрузке  $R_2 = 300 \text{ Ом}$  и в режиме холостого хода  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ .

Рассчитать коэффициент сглаживания.

13. Сравнить постоянные составляющие выпрямленного напряжения и степень пульсации в однополупериодном и двухполупериодном выпрямителях.

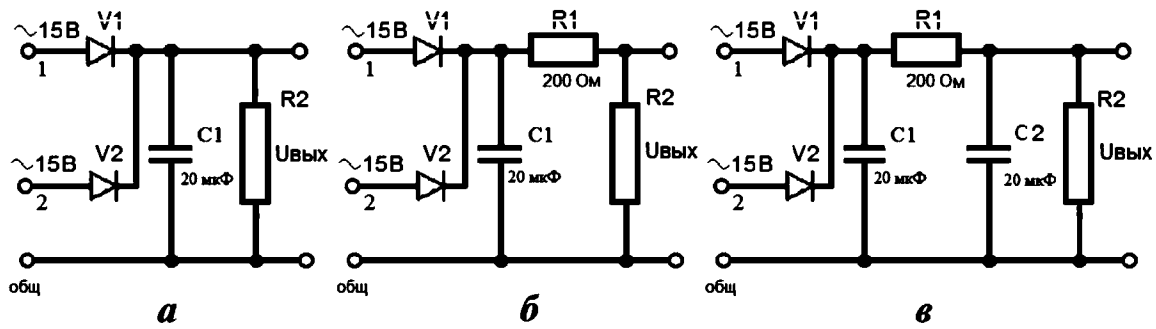


Рис. 2.40. Схемы выпрямителя: а – с емкостным фильтром, б – с Г-образным RC-фильтром, в – с П-образным RC-фильтром

### Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия каждой из рассмотренных схем выпрямления и фильтров.
2. Сравнить свойства рассмотренных схем выпрямления и фильтров.
3. Объяснить характер и взаимное расположение полученных в опытах внешних характеристик.
4. Какова пульсация напряжений на нагрузке для каждого из рассмотренных в лабораторной работе выпрямительных устройств?

## 2.2.2. Лабораторная работа № 2

### Исследование светодиодов

**Цель работы:** ознакомиться с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия светодиодов.

#### Объект и средства исследования

Объект исследования – полупроводниковые приборы: одно-, двух- и трехцветные светодиоды.

При исследованиях используются источники постоянного тока (ГТ), постоянного напряжения (ГН2, ГН3), ампервольтметры АВМ1, АВМ2 и АВ0, расположенные на лабораторном стенде 87Л-01. Сборка исследуемой цепи осуществляется коммутацией гнезд платы из рабочего комплекта и гнезд измерительных приборов и источников при помощи проводников с однополюсными вилками и установкой в гнезда платы рабочего комплекта дискретных элементов.

#### Рабочее задание

##### *Исследование характеристик одноцветных светодиодов*

1. Установить на лабораторном стенде плату № 10 из рабочего комплекта, произвести сборку электрической схемы с помощью соединительных проводов (рис. 2.41), подключив источник напряжения ГН, и измерительные приборы АВМ1, АВМ2.

Примечание: в качестве источника напряжения можно использовать автономный источник постоянного тока POWERDC.

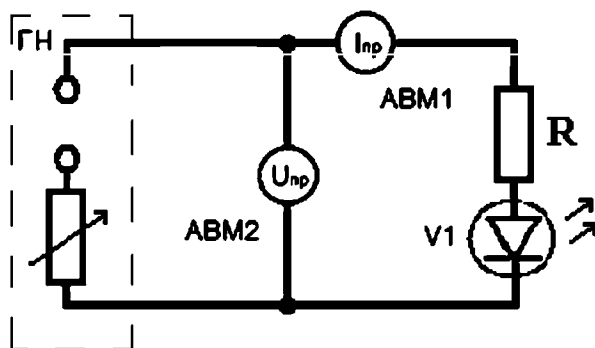


Рис. 2.41. Схема для снятия характеристик светодиода

2. Снять вольтамперные характеристики одноцветных (синий, зеленый) светодиодов. Верхний предел напряжения в цепи – 15 В.

Примечание: при построении ВАХ следует учесть наличие в цепи защитного сопротивления  $R$ , величину которого можно определить тестером.

3. Рассчитать сопротивление  $R_D$  и падение напряжения на светодиоде  $U_D$ , используя уравнение для контура на рис. 2.41:

$$U = U_D + IR,$$

$$U_D = IR_D,$$

где  $R$  – сопротивление защитного резистора,

$R_D$  – сопротивление светодиода,

$I$  – сила тока в контуре,

$U_D$  – падение напряжения на светодиоде.

4. Заполнить таблицу 2.4.

5. Построить ВАХ для синего и зеленого светодиодов.

Таблица 2.4

Напряжение U	Сила тока I		$R_D$		$U_D$	
	Синий	Зеленый	Синий	Зеленый	Синий	Зеленый
2В						
4В						
...						
10В						
12 В						

*Исследование характеристик двухцветных светодиодов*

6. Собрать схему с двухцветным светодиодом (рис. 2.41).

7. Зафиксировать показания приборов в цепи для обоих режимов работы двухцветного светодиода (красный и синий цвета).

Примечание: двухцветный светодиод работает в мигающем режиме, время длительности свечения каждой из частей определяется встроенным в кристалл генератором импульсов.

8. Рассчитать сопротивления и падения напряжения для обоих режимов работы (красный и синий цвета) двухцветного светодиода.

### *Исследование характеристик трехцветных светодиодов*

9. Собрать схему с трехцветным светодиодом (рис. 2.41).
10. Зафиксировать показания приборов в цепи для всех режимов работы трехцветного светодиода (зеленый, красный и синий цвета).
11. Рассчитать сопротивления и падения напряжения для всех режимов работы трехцветного светодиода.

#### **Контрольные вопросы**

1. Какие факторы определяют цвет испускаемого света светодиода?
2. В чем заключается принципиальное различие между светом, испускаемым обычной лампой накаливания, и от светодиода?
3. Как получить светодиод, испускающий белый свет?
4. Как рассчитать величину сопротивления защитного резистора, устанавливаемого в цепь со светодиодом?
5. От каких параметров зависит долговечность светодиода?

### **2.2.3. Лабораторная работа № 3**

#### **Исследование оптической пары**

**Цель работы:** ознакомиться с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия оптической пары, состоящей из инфракрасного светодиода и фотодиода.

#### **Объект и средства исследования**

Объект исследования – полупроводниковые приборы: оптическая пара из фотодиода и ИК-светодиода.

При исследованиях используются источники постоянного тока (ГТ), постоянного напряжения (ГН2, ГН3), ампервольтметры АВМ1, АВМ2 и АВ0, расположенные на лабораторном стенде 87Л-01. Сборка исследуемой цепи осуществляется коммутацией гнезд платы из рабочего комплекта и гнезд измерительных приборов и источников при помощи проводников с однополюсными вилками и установкой в гнезда платы рабочего комплекта дискретных элементов.

## Рабочее задание

1. Установить на лабораторном стенде плату № 10 из рабочего комплекта, произвести сборку электрической схемы (рис. 2.42) оптической пары с помощью соединительных проводов. Инфракрасный светодиод устанавливается на дополнительную колодку с коммутационными гнездами. Фотодиод устанавливается на плату стенда.

Необходимо собрать два независимых контура, питаемых от отдельных источников: ГН стенда и POWERDC автономного источника постоянного тока.

2. Включить 2 контур, содержащий фотодиод, установить напряжение в контуре 6 В.

3. Включить 1 контур, содержащий ИК-светодиод, установить начальное напряжение 2 В. Установить колодку с ИК-светодиодом относительно фотодиода так, чтобы оптические оси приборов совпадали.

Примечание: для отладки работы оптической пары вместо сопротивления  $R_2$  можно использовать светодиод с защитным сопротивлением. По интенсивности свечения светодиода можно сделать вывод об оптимальном расположении элементов оптопары.

Зафиксировать показания приборов обоих контуров и записать в таблицу 17.1.

4. С помощью рукоятки настройки блока питания ГТ увеличить напряжение в 1 контуре на 1 В. Записать показания приборов в таблицу 2.5.

5. Повторить п. 4, пошагово увеличивая напряжение питания 1-го контура с шагом 1В до 12 В.

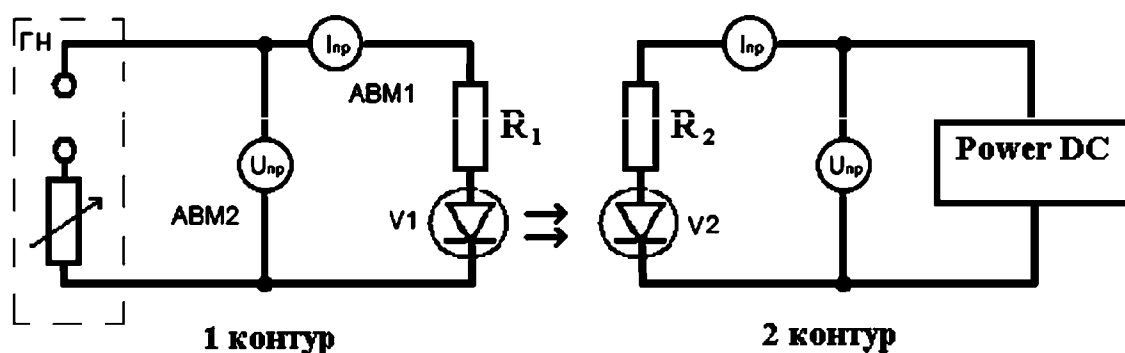


Рис. 2.42. Схема для исследования оптической пары

6. Построить вольтамперные характеристики для 1 и 2 контура.

Таблица 2.5

V1	A1	V2	A2
2В		6В	
3В		6В	
...		6В	
12В		6В	

7. Установить напряжение питания 2-го контура 10 В. Повторить пункты 4, 5 и 6.

### Контрольные вопросы

1. Пояснить принцип действия оптической пары.
2. Пояснить принцип действия фотодиода
3. Чем отличается р-і-п-фотодиод от р-п-фотодиода?
4. Что такое темновой ток фотодиода?
5. В каких формах может проявиться внутренний фотоэффект фотодиода?
6. Каковы основные требования к фотоприемнику?
7. Перечислить основные характеристики фотодиода.

### 2.2.4. Лабораторная работа № 4

#### Исследование усилителя напряжения

**Цель работы:** ознакомиться с практическими схемами усилителей, исследовать влияние элементов схемы на параметры усилителя переменного напряжения, получить навыки экспериментального исследования параметров и усилителя.

#### Объект и средства исследования

Объект исследования – усилитель напряжения. При исследовании используются источник постоянного напряжения (ГН2), генератор низкой частоты (ГНЧ), милливольтметр (МВ), частотомер (ЧМ), измеритель выхода

(ИВ) и осциллограф. Сборка исследуемой цепи осуществляется коммутацией гнезд платы из рабочего комплекта и гнезд измерительных приборов и источников стенда 87Л-01 при помощи проводников с однополюсными вилками и установкой в гнезда платы рабочего комплекта дискретных элементов. Измеритель выхода (ИВ) подключается установкой переключателя в положения ГН2, ГНЧ, ЧМ.

### Домашнее задание

1. Изучить принцип работы усилителя напряжения.
2. Разработать методику определения основных параметров и характеристик усилителя переменного напряжения (коэффициента усиления, амплитудной и частотной характеристик, нелинейных, частотных и фазовых искажений).

### Рабочее задание

1. Получить допуск к выполнению работы
2. Установить на лабораторном стенде 87Л-01 плату № 14 из рабочего комплекта, произвести сборку электрической схемы (рис. 2.43), подключив источник питания ГН2, генератор низкой частоты ГНЧ, измерительные приборы ИВ, МВ, ЧМ, осциллограф.

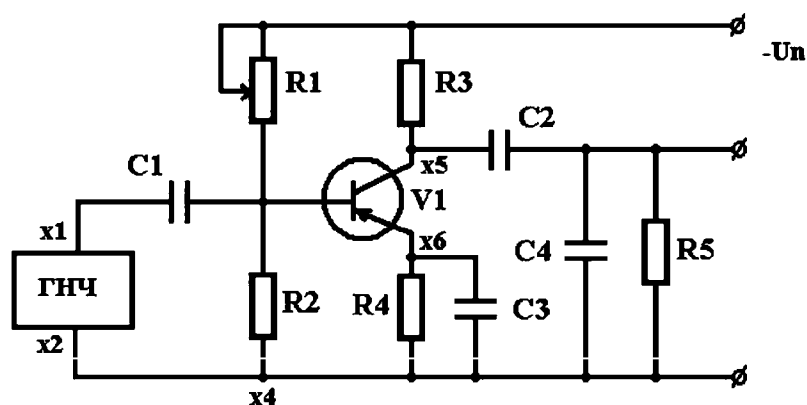


Рис. 2.43. Принципиальная схема усилителя

3. Установить рабочую точку усилителя на линейном участке:
  - с выхода ГНЧ (1:10) подать максимальный сигнал (ручку «амплитуда» вывести в крайнее правое положение). Частоту сигнала установить  $f_c = 1\text{кГц}$ ;

- подключить осциллограф к выходу усилителя;
- плавно вращая ручку регулятора добиться равномерного ограничения усиленного сигнала «сверху» и «снизу».

4. Снять амплитудную характеристику усилителя

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}) \text{ при } f = 1000 \text{ Гц.}$$

Входное напряжение усилителя измерять мВ, подключив его к гнездам Х3, напряжение на выходе контролировать и измерять осциллографом С1-73. Произвести 10–12 измерений, результаты измерений записать в таблице 2.6 и построить амплитудную характеристику усилителя. Выходное напряжение изменять в пределах 2 мВ...60 мВ.

Таблица 2.6

U <sub>вх</sub> (В)				
U <sub>вых</sub> (В)				

5. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя (АЧХ)

$$U_{\text{вых}} = f(F) \text{ при } U_{\text{вх}} = 30 \text{ мВ.}$$

Произвести измерение выходного напряжения на частотах: 20, 50, 80, 100, 200, 500, 1000, 5000, 10000, 30000, 50000, 80000, 100000 Гц. Результаты измерений записать в таблице 2.7.

Таблица 2.7

F, *100 Гц	0,2	0,5	0,8	1	2	5	10	50	100	500	800	1000
U <sub>вых</sub>												
K <sub>U</sub>												
K <sub>U</sub> , (дБ)												

По результатам измерений построить АЧХ усилителя в логарифмическом масштабе:

$$K_U, (\text{дБ}) = 20 \lg (U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}).$$

Примечания:

- входной сигнал U<sub>вх</sub> = 30 мВ в процессе измерения АЧХ должен быть постоянным;



- частоту входного сигнала измерять ИВ в положении ЧМ, подключив его к гнездам  $\times 5$ ,  $\times 7$ ;
- амплитуду выходного сигнала измерять МА, подключив его к гнездам  $\times 1$ ,  $\times 8$ .

3.5. Исследовать влияние элементов схемы на коэффициент усиления  $K_U$  усилителя:

- Емкость обратной связи  $C_3$ .

На вход усилителя подать сигнал 30 мВ с частотой  $f_c = 5$  кГц. Определить коэффициент усиления усилителя при значениях емкости = 0 (отключена), 5, 20, 50 мкФ. Результаты измерений записать в таблице 2.8.

Таблица 2.8

R2 (Ом)	C3=0 мкФ	C3=5 мкФ	C3=20 мкФ	C3=50 мкФ
U <sub>вх</sub> (мВ)				
U <sub>вых</sub> (В)				
K <sub>U</sub>				

- Разделительные конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ .

На вход усилителя подать сигнал 30 мВ с частотой  $f_c = 20$  Гц. Поочередно установить на стенде емкости разделительных конденсаторов  $C_1 = C_2 = 0,1; 5; 20; 50$  мкФ. Измерить выходное напряжение мВ, результаты измерений записать в таблице 2.9.

Повторить опыт для частоты входного сигнала  $f_c = 50$  кГц.

Таблица 2.9

		C1,C2 = 0,1 мкФ	C1,C2 = 5 мкФ	C1,C2 = 20 мкФ	C1,C2 = 50 мкФ
$f_c = 20$ Гц	U <sub>вых</sub> (В)				
	K <sub>U</sub>				
$f_c = 50$ кГц	U <sub>вых</sub> (В)				
	K <sub>U</sub>				

- Коллекторное сопротивление  $R_3$ .

На вход усилителя подать сигнал 30 мВ с частотой  $f_c = 5$  кГц. Установить на плате сопротивление  $R_3 = 300$  Ом.

Контроль формы выходного напряжения производить осциллографом, подключенным к гнездам  $\times 5$ ,  $\times 7$ .

Выходное напряжение измерять МВс подключением к  $\times 1$ ,  $\times 8$ .

Плавно изменяя величину резистора R1, добиться максимального выходного напряжения, результат измерения записать в таблице 18.5. Форма выходного напряжения должна быть синусоидальной.

Снять осциллограмму выходного напряжения.

Повторить опыт для резисторов R3 = 620 Ом, 1 кОм, 2 кОм.

• Нагрузка R5.

На вход усилителя подать сигнал 30 мВ с частотой  $f_c = 5$  кГц.

Произвести измерение выходного напряжения усилителя при следующих величинах сопротивления нагрузки R5 = 330, 620 Ом, 2,4; 5; 10 кОм. Результаты измерений записать в таблице 2.10.

Таблица 2.10

R5 (Ом)	330	620	2400	5000	10000
U <sub>вых</sub> (В)					
K <sub>u</sub>					

### Контрольные вопросы

1. Почему коэффициент усиления зависит от частоты сигнала, подаваемого на вход усилителя?
2. Как оцениваются нелинейные и частотные искажения сигнала и усилителя?
3. Почему увеличивается коэффициент усиления при подключении конденсатора параллельно резистору R4?
4. Назовите и объясните основные показатели усилителя.

## 2.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### 2.3.1. Практическое занятие № 1

#### Расчет светодиодов

**Цель:** освоение методики расчета светодиодов.

**План проведения занятия:**

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### Пример решения типовой задачи

Дано: светодиод с рабочим напряжением 3 вольта и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить его к источнику с напряжением 5 В (рис. 2.44).

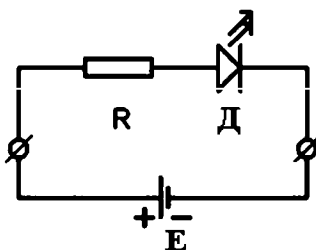


Рис. 2.44. Схема к решению задачи

#### Решение

Требуемая долговечность работы светодиода (17000 часов непрерывной работы) обеспечивается номинальным режимом его эксплуатации и, соответственно, необходимой силой тока, протекающего через него, что достигается подбором величины защитного резистора, последовательно встраиваемого в цепь со светодиодом.

По второму закону Кирхгофа составляется баланс падений напряжения на элементах замкнутого контура. Для схемы на рис. 2.44

$$E = U_{\text{питания}} = U_{\text{диода}} + U_{\text{резистора}}$$

Из закона Ома для резистора следует

$$U_{\text{резистора}} = I_{\text{диода}} R.$$

Величина сопротивления защитного резистора

$$R = \frac{U_{\text{питания}} - U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}}.$$

Листинг решения задачи в математическом пакете MathCad выглядит достаточно просто:

```
U_питания := 5
U_диода := 3
I_диода := 20 · 10-3
R := (U_питания - U_диода) / I_диода = 100
```

Дано: 3 светодиода (рис. 2.45) с рабочим напряжением 3 В и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить их к источнику с напряжением 15 В.

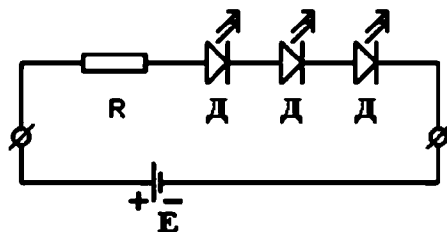


Рис. 2.45. Схема к решению задачи

### Решение

Простое последовательное соединение светодиодов к источнику питания не обеспечивает номинального режима их работы. Действительно, падение напряжения на трех последовательно соединенных светодиодах дает 9 В. Напряжение источника питания 15 В требует компенсировать раз-

ницу  $15 - 9 = 6$  В за счет последовательного присоединения дополнительного резистора, величина сопротивления  $R$  которого определяется с учетом желательной величины силы тока в цепи  $I_{\text{диода}}$ :

$$R = \frac{U_{\text{питания}} - N_{\text{д}} \cdot U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}},$$

где  $N_{\text{д}}$  – количество светодиодов.

Листинг решения задачи:

$N_{\text{д}} := 3$ $U_{\text{питания}} := 15$ $U_{\text{диода}} := 3$ $I_{\text{диода}} := 20 \cdot 10^{-3}$ $R := \frac{U_{\text{питания}} - N_{\text{д}} \cdot U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}} = 300$
--

В случае большого количества светодиодов, т. е. когда

$$N_{\text{д}} \cdot U_{\text{диода}} > U_{\text{питания}}$$

следует вводить в цепь дополнительные параллельные ветви со светодиодами и рассчитывать защитные сопротивления для каждой из ветвей.

Количество светодиодов в каждой из параллельных ветвей выбирается из условия

$$n_{\text{д}} \cdot U_{\text{диода}} \leq U_{\text{питания}},$$

где  $n_{\text{д}}$  – количество светодиодов в отдельной ветви.

В случае  $n_{\text{д}} \cdot U_{\text{диода}} = U_{\text{питания}}$  защитный резистор в рассматриваемой ветви не требуется.

### Решение примеров

#### Задача 1

Рассчитать сопротивление и рассеиваемую на сопротивлении мощность для цепи, содержащей источник ЭДС  $E$ , светодиод  $D$  и резистор  $R$  (рис. 2.45). Данные для вариантов взять из таблицы 2.11.

Таблица 2.11

№	Напряжение источника, В	Среднее напряжение на светодиоде при $I=20$ мА		
		2 В	2,5 В	3 В
		Номера вариантов		
1	6	1	11	21
2	8	2	12	22
3	9	3	13	23
4	10	4	14	24
5	12	5	15	25
6	15	6	16	26
7	16	7	17	27
8	18	8	18	28
9	20	9	19	29
10	24	10	20	30

**Задача 2**

Имеются светодиоды с рабочими напряжением 3 В и током 20 мА.

Необходимо подключить  $N$  светодиодов к источнику  $U$ . Данные для вариантов взять из таблицы 2.12.

Таблица 2.12

вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	11	12	13	14
N	9	3	4	5	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8
U	24	8	7	12	14	16	16	18	6	10	12	14	14	14
вариант	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
N	9	3	4	5	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8
U	20	7	11	14	16	16	16	22	5	11	10	12	18	20

**Контрольные вопросы**

1. Чувствительны ли светодиоды к высоким температурам?
2. Какими факторами определяется время непрерывной работы светодиода?
3. Назовите основные характеристики светодиодов.
4. От чего зависит рабочее напряжение светодиода?
5. От каких факторов зависит цвет, излучаемый светодиодом?
6. Справедлив ли закон Ома для режима работы светодиода?

## 2.3.2. Практическое занятие № 2

### Расчет параметров диодов

**Цель:** освоение методов расчета параметров диодов.

**План проведения занятия:**

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### **Пример решения типовой задачи**

*Задача 1.*

Дано: схема включения и ВАХ диода даны на рис. 2.46.

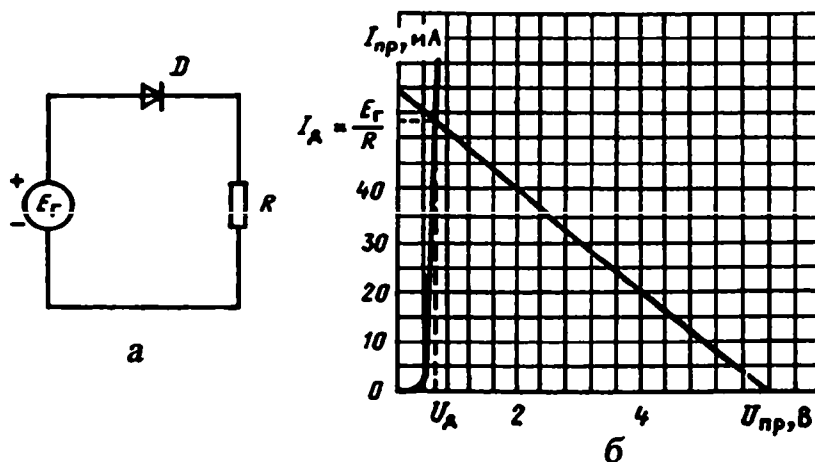


Рис. 2.46. Схема включения (а) и ВАХ (б) диода

Сопротивление нагрузки  $R = 100$  Ом, ЭДС источника  $E_{\Gamma} = 6$  В.  
Необходимо рассчитать ток и напряжение на диоде.

*Решение графо-аналитическим методом*

Совместно решаются уравнения вольтамперной характеристики и нагрузочной прямой.

$$I = f(U_{\Delta}),$$

$$E = U_{\Delta} + R \cdot I.$$

Точки для построения нагрузочной прямой

$$U_D = 0; I = E / R = 6 / 100 = 60 \text{ мА};$$

$$I = 0; U_D = E = 6 \text{ В}.$$

Пересечение ВАХ и нагрузочной прямой дает точку

$$U_D = 0,6 \text{ В}; I = 54 \text{ мА}.$$

Решение аналитическим методом

Аналитическое выражение ВАХ

$$I = I_0 (e^{U_D / \varphi_T} - 1),$$

где  $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ А}$ ;  $\varphi_T = 25 \text{ мВ}$ .

Из предположения, что  $U_D \ll E$  следует

$$I \approx E / R = 6 / 100 = 0,06 \text{ А} = 60 \text{ мА}.$$

$$U_D = \varphi_T \ln \frac{I}{I_0} = 0,025 \ln \frac{60 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}} = 0,59 \text{ В}.$$

Ток диода

$$I = (E - U_D) / R = (6 - 0,59) / 100 = 54,1 \text{ мА}.$$

Задача 2.

Дано: ВАХ диода (рис. 2.47).

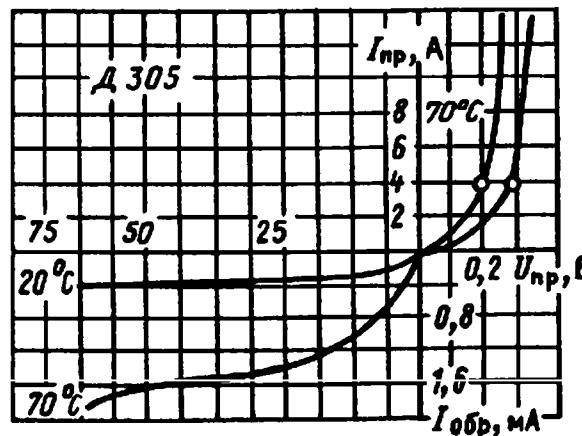


Рис. 2.47

Задание.

Определить:

1. Как при напряжении на диоде  $+0,2 \text{ В}$  с ростом температуры изменяются сопротивление постоянному току  $R_0$  и дифференциальное сопротивление диода  $r_{\text{диф}}$ .



2. Температурный коэффициент по напряжению (ТКН) при токе 4 мА.
3. Как изменяются с ростом температуры сопротивление постоянному току  $R_0$  и обратное сопротивление  $r_{обр}$  при напряжении 50 В.
4. Температуру удвоения  $T_{удв}$  для теплового тока  $I_0$ .

*Решение*

Параметр	Зависимость	Температура + 20 °С	Температура + 70 °С
φ <sub>Т</sub>		0,025 В	$\frac{343}{11600} = 0,03$ В
сопротивление $r_{диф}$	$r_{диф} = \frac{\varphi_T}{I_{пр}}$	$\frac{0,025}{2} = 0,0125$ Ом	$\frac{0,03}{4} = 0,075$ Ом
сопротивление $R_0$	$R_0 = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$	$\frac{0,2}{2} = 0,1$ Ом	$\frac{0,2}{4} = 0,05$ Ом
обратное сопротивление	$r_{обр} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$	$\frac{25}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 250$ кОм	$\frac{25}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 125$ кОм
сопротивление постоянному току	$R_0 = \frac{U}{I}$	$\frac{50}{(0,4 \cdot 10^{-3})} \approx 125$ кОм;	$\frac{50}{(1,6 \cdot 10^{-3})} \approx 33,3$ кОм.

Температурный коэффициент по напряжению

$$TKH = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{0,1}{70-20} = 2 \text{ мВ/}^\circ\text{С.}$$

Обратное сопротивление диода с возрастанием температуры на 50° уменьшается в 2 раза.

Сопротивление диода постоянному току уменьшается в 3,7 раза. Из аналитического выражения ВАХ диода следует

$$I_0(T_2) = I_0(T_1) \cdot 2^{\Delta T / T_{удв}},$$

где  $\Delta T = T_2 - T_1$ ,

$T_{удв}$  – изменение температуры, при котором обратный тепловой ток удваивается.

$$I_0(+20^\circ\text{С}) = 0,4 \text{ mA}; I_0(+70^\circ\text{С}) = 1,6 \text{ mA}; \Delta T = 50^\circ\text{С.}$$

$$1,6 \cdot 10^{-3} = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2^{50/T_{удв}};$$

$$T_{удв} = 50 / \log_2 4 = 25^\circ\text{С.}$$

## Контрольные задания

1. Для заданного диода (таблица 2.13) подобрать оптимальную нагрузку. Предварительно ознакомиться со справочными данными, представленными на сайтах:

<http://www.radiolibrary.ru/reference/diod.html>,

<http://5v.ru/ds/diod/kd105.htm>

Таблица 2.13

№ вар	Обозначение диода	Обратное напряжение, В	Ток, мА
1	Д101	75	30
2	Д1011	500	300
3	Д101А	75	30
4	Д102	50	30
5	Д102А	50	30
6	Д103	30	30
7	Д103А	30	30
8	Д104	100	30
9	АД110А	30	10
10	АД112А	50	300

## Контрольные вопросы

1. В чем отличие свойств и параметров кремниевых и германиевых выпрямительных диодов?
2. Как обозначаются диоды на электрических схемах?
3. Как проверить диод мультиметром?
4. К чему приводит увеличение приложенного к диоду обратного напряжения?
5. Назовите области применения диодов.
6. По каким признакам можно различать диоды?

### *2.3.3. Практическое занятие № 3*

#### **Расчет параметров биполярных транзисторов**

**Цель:** освоение методов расчета параметров биполярных транзисторов.

### План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

### Решение типовой задачи

#### Задача 1.

Дано: входная и выходная вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора (рис. 2.49).

Определить тип транзистора и основные параметры его Т-образной схемы замещения (рис. 2.48), обратный ток коллекторного перехода.

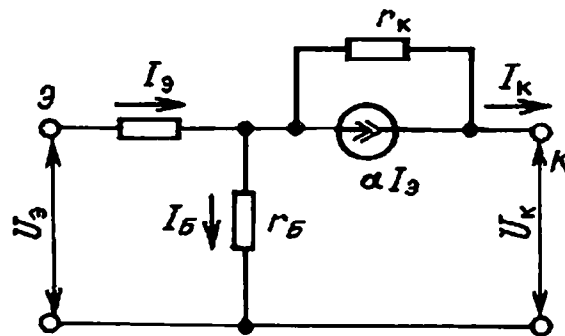


Рис. 2.48. Т-образная схема замещения биполярного транзистора

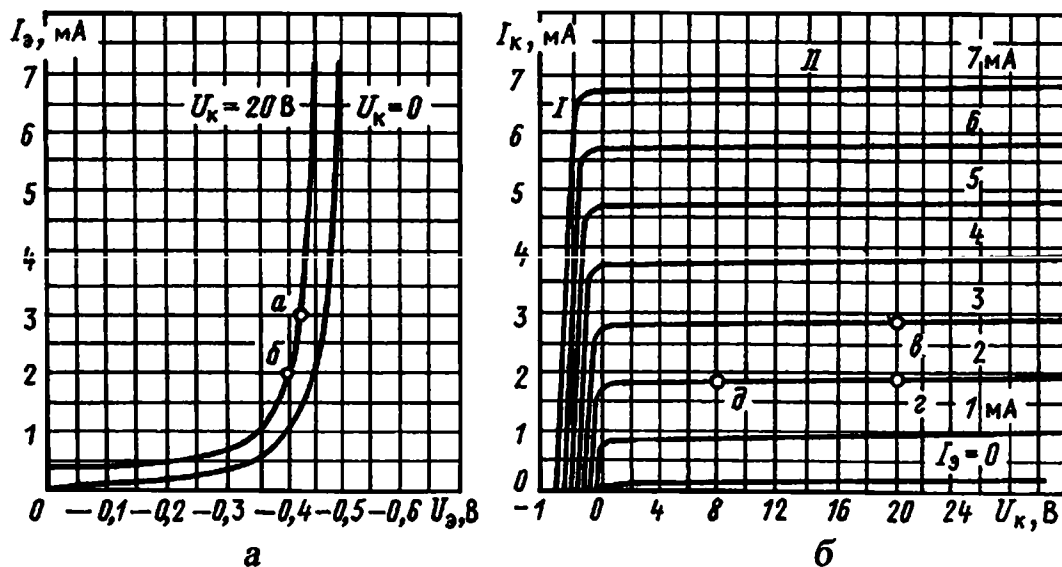


Рис. 2.49. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора

*Решение*

Полярность внешних напряжений ( $U_{Э} < 0$  и  $U_{К} > 0$ ) соответствует транзистору типа n-p-n. Входная и выходная ВАХ соответствуют включению транзистора с общей базой.

Параметры эквивалентной T-образной схемы:

$\alpha$  – дифференциальный коэффициент прямой передачи по току ( $U_{К} = \text{const}$ )

$$\alpha = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Э}}$$

$r_{К}$  – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода ( $I_{Э} = \text{const}$ )

$$r_{К} = \frac{\Delta U_{К}}{\Delta I_{К}}$$

$r_{Э}$  – дифференциальное сопротивление;

$r_{Б}$  – объемное сопротивление базы.

1. Коэффициент прямой передачи  $\alpha$  определяется по выходной ВАХ при  $U_{К} = 20$  В.

$$\alpha = (2,8 - 1,85) / (3,0 - 2,0) = 0,95 / 1,0 = 0,95.$$

2. Дифференциальное сопротивление  $r_{Э}$

$$r_{Э} \approx \frac{\varphi_{Т}}{I_{Э\text{ср}}} = \frac{0,025}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ Ом.}$$

3. Входное сопротивление транзистора для рабочей точки на участке аб ВАХ ( $U_{К} = \text{const}$ ):

$$r_{ВХ} = r_{Э} + r_{Б} \cdot (1 - \alpha) = \Delta U_{Э} / \Delta I_{Э} = 0,025 / 1 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ Ом.}$$

4. Дифференциальное сопротивление на участке ГД выходной ВАХ

$$r_{К} = 12 / 0,05 \cdot 10^{-3} = 240 \text{ кОм.}$$

5.  $I_{К} = \alpha \cdot I_{Э} + I_{К0} + U_{К} / r_{К}.$

При  $I_{Э} = 0$  и  $U_{К} = 20$  В с учетом малости  $U_{К} / r_{К}$  при включении с общей базой

$$I_{К0} = I_{К} - U_{К} / r_{К} = 0,2 \text{ мА.}$$

*Задача 2.*

Параметры транзистора, включенного в схему на рис. 2.50

$$\alpha = 0,995; I_{Э0} = I_{К0} = 10^{-12} \text{ А.}$$

Найти токи транзистора и напряжение между коллектором и эмиттером.

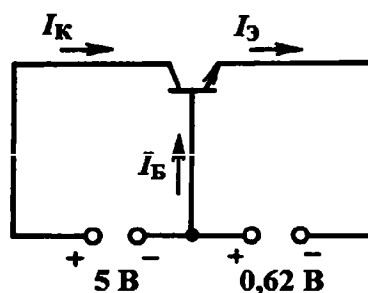


Рис. 2.50. Схема замещения транзистора

Транзистор типа n-p-n с прямо смещенным эмиттерным переходом и обратным смещением коллекторного перехода,  $U_Э > 0$  и  $U_K < 0$ .

1. Ток эмиттера

$$I_Э = I_{Э0} (e^{U_Э / \varphi_T} - 1) = 10^{-12} (e^{0,62/0,025} - 1) \approx 58,95 \text{ мА.}$$

2. Ток коллектора

$$\begin{aligned} I_K &= \alpha I_Э - I_{K0} (e^{U_Э / \varphi_T} - 1) = \\ &= 0,995 \cdot 58,95 \cdot 10^{-3} - 10^{-12} (e^{0,62/0,025} - 1) \approx 58,66 \text{ мА.} \end{aligned}$$

3. Ток базы

$$I_Б = (1 - \alpha) I_Э = (1 - 0,995) 58,95 = 0,29 \text{ А.}$$

При  $\alpha = 0,995$ ;  $I_{Э0} = I_{K0} = 10^{-12} \text{ А}$ ,

4. Напряжение  $U_{КЭ}$

$$U_{КЭ} = U_K - U_Э = 5 - (-0,62) = 5,62 \text{ В.}$$

*Задача 3.*

Дано: транзистор в Т-образной схеме замещения (рис. 2.51) имеет параметры

$$\alpha = 0,993; r_k = 1,5 \text{ МОм}; r_B = 200 \text{ Ом}; r_Э = 20 \text{ Ом.}$$

Определить h-параметры для схемы с общей базой

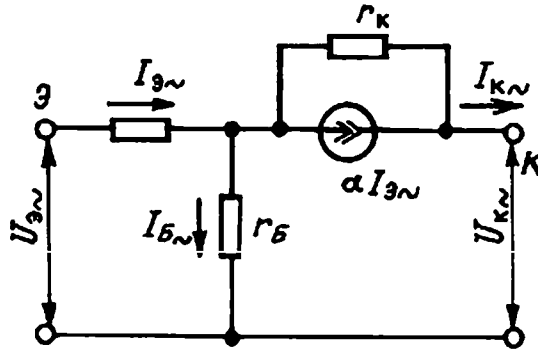


Рис. 2.51. Схема замещения транзистора

Решение

$$h_{11Б} \approx r_Э + r_Б (1 - \alpha) = 20 + 200 (1 - 0,993) = 21,4 \text{ Ом};$$

$$h_{21Б} \approx \alpha = 0,993; \quad 1 / r_К = 1 / 1,5 \cdot 10^6$$

$$h_{22Б} \approx = 0,67 \text{ мксм};$$

$$h_{12Б} \approx \frac{r_Б}{r_К} = \frac{200}{1,5 \cdot 10^6} = 1,33 \cdot 10^{-6}.$$

Задача 4.

Дано: ВАХ транзистора с общим эмиттером (рис. 2.52). Рабочая точка с напряжением  $U_{кэ} = 25 \text{ В}$  и током базы  $300 \text{ мкА}$ .

Определить параметры  $h_{21э}$  и  $h_{22э}$ .

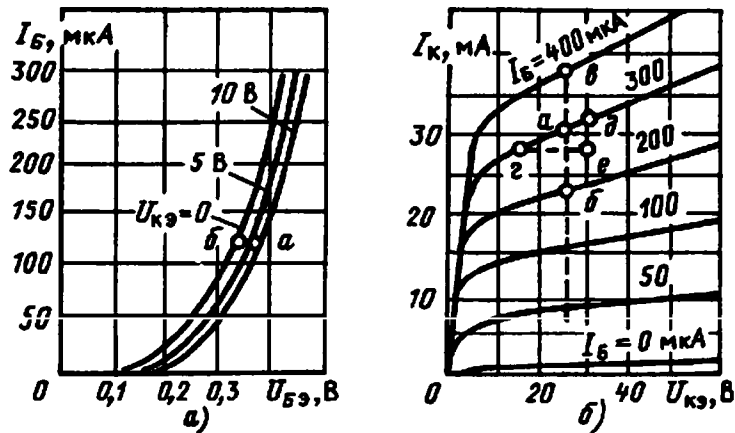


Рис. 2.52. ВАХ транзистора с общим эмиттером

1. Параметр  $h_{21э}$  находится из расстояния между выходными характеристиками

$$h_{21э} = I_{2\sim} / I_{1\sim} |_{U_{2\sim}=0} = \Delta I_k / \Delta I_B |_{U_{кэ} = const.}$$

Подставляя значения коллекторного тока в точках б и в, находим

$$h_{21Э} = (37 - 23) 10^{-3} / ((400 - 200) 10^{-6}) = 70.$$

2. Параметр  $h_{22Э}$  находится из наклона выходных характеристик

$$h_{22Э} = I_{2\sim} / U_{2\sim} |I_{1\sim}=0 = \Delta I_k / \Delta U_{кЭ} | I_{б} = const.$$

Приращения тока  $\Delta I_k$  и напряжения  $\Delta U_{кЭ}$  при фиксированном значении тока базы  $I_B = 300$  мкА (треугольник где)

$$h_{22Э} = 5 10^{-3} / 15 = 0,33 10^{-3} \text{ мОм.}$$

### Контрольные вопросы

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением биполярного транзистора?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.
3. Изобразите условное графическое изображение р-п-р и п-р-п-транзисторов.
4. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и направление протекания токов.
5. Какие характеристики являются входными и выходными?
6. Укажите соотношения между током эмиттера, коллектора и базы.
7. Объясните физический смысл h-параметров транзистора.
8. Назовите и охарактеризуйте режимы работы транзистора.
9. Изобразите схему замещения биполярного транзистора.
10. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

### 2.3.4. Практическое занятие № 4

#### Расчет параметров полевых транзисторов

**Цель:** освоение методов расчета параметров полевых транзисторов.

#### План проведения занятия

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.

3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

### Решение типового примера

Задача 1.

Дано: ВАХ полевого транзистора (рис. 2.53).

Определить тип канала и основные характеристики транзистора.

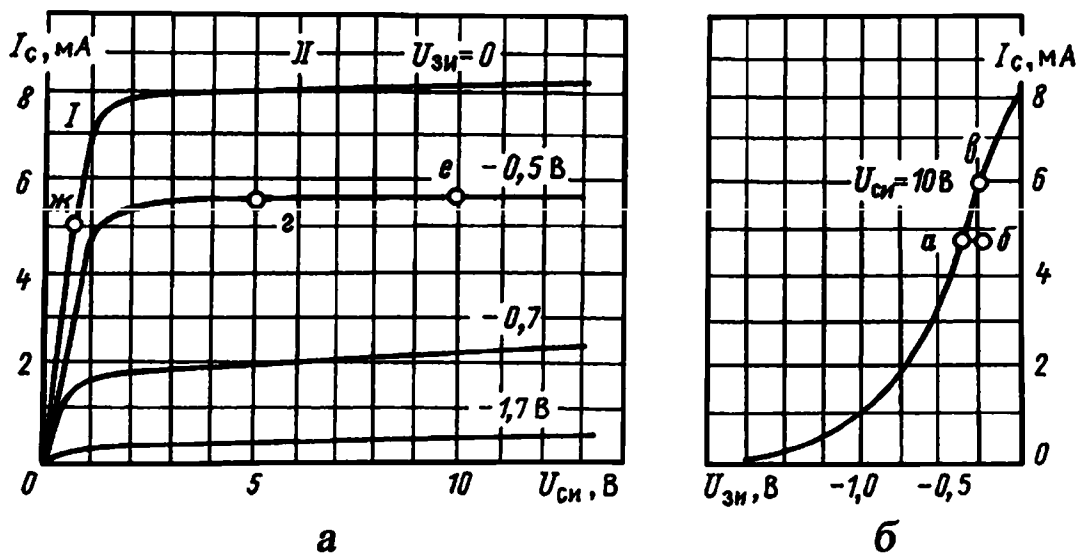


Рис. 2.53. ВАХ полевого транзистора

1. Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом имеет канал n-типа, так как ток стока управляется отрицательным напряжением  $U_{зи}$ , приложенным к затвору (минус – к области затвора, плюс – к каналу n-типа). Канал перекрывается полностью ( $I_c=0$ ) при напряжении  $U_{зи} = -1,75$  В (напряжение отсечки  $U_{отс}$ ). При  $U_{зи} = 0$  и  $U_{си} > 1,75$  В (участок насыщения II) в транзисторе течет максимальный ток стока  $I_{снас} = 8,2$  мА.
2. Эквивалентная схема полевого транзистора показана на рис. 2.54. Крутизна стокзатворной характеристики для  $U_{си} = \text{const} = 10$  В

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} = 1,2 \cdot 10^{-3} / 0,12 = 10 \text{ мА / В.}$$

3. Дифференциальное сопротивление канала на участке насыщения для  $U_{зи} = \text{const}$

$$r_c = \Delta U_{си} / \Delta I_C = 5 / 0,1 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ кОм.}$$



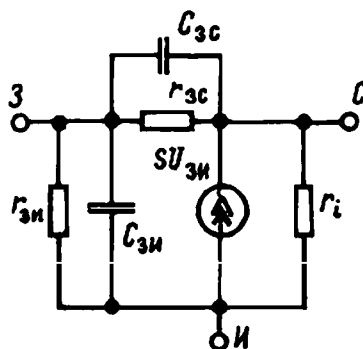


Рис. 2.54. Эквивалентная схема полевого транзистора

4. Сопротивление открытого канала (участок I ВАХ)  
при  $U_{зи} = 0$  (точка ж)

$$R_0 = U_{си} / I_c = 0,5 / 5 \cdot 10^{-3} = 100 \text{ Ом.}$$

Задача 2.

Дано: полевой транзистор с р-п-переходом имеет

$$I_{cmax} = 5 \text{ мА и } U_{омс} = -2 \text{ В.}$$

Определить ток стока  $I_{ст}$  и крутизну  $S$  при напряжениях затвора  $-2, 0, -1 \text{ В}$ .

1. Ток стока

$$I_c = I_{cmax}(1 - |U_{зи}| / U_{омс})^2.$$

При  $U_{зи} = -2 \text{ В}$

$$I_c = 5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 2/2)^2 = 0;$$

при  $U_{зи} = 0 \text{ В}$

$$I_c = I_{cmax} = 5 \text{ мА};$$

при  $U_{зи} = -1 \text{ В}$

$$I_c = 5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 1/2)^2 = 1,25 \text{ мА.}$$

2. Крутизна полевого транзистора

$$S = 2I_{cmax} / U_{омс}(1 - |U_{зи}| / U_{омс}).$$

При  $U_{зи} = -2 \text{ В}$

$$S = 0;$$

при  $U_{зи} = 0 \text{ В}$

$$S = S_{max} = 2 \cdot I_{cmax} / U_{омс} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 2 = 5 \text{ мА / В};$$

при  $U_{зи} = -1 \text{ В}$

$$S = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot (1 - 1/2) = 2,5 \text{ мА / В.}$$

## **Контрольные вопросы**

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением полевого транзисторов?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.
3. Изобразите условное графическое изображение р-п-р и п-р-п-транзисторов.
4. Изобразите условные графическое изображения МЭП-транзисторов и транзисторов с управляемым переходом.
5. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и направление протекания токов.
6. Какие характеристики являются входными и выходными?
7. Какие параметры характеризуют свойства полевого транзистора?
8. В чем отличие статических характеристик передачи МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами?
9. Назовите и охарактеризуйте режимы работы транзистора.
10. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

### ***2.3.5. Практическое занятие № 5***

#### **Расчет радиатора**

**Цель работы:** освоение методики расчета охлаждающих устройств полупроводниковых приборов.

#### **План проведения занятия**

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.
3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### **Пример расчета**

Тепловое сопротивление  $R_{JC}$  и  $R_{CS}$  указывается в справочных данных на полупроводниковые приборы. Например, согласно справочным данным

(<http://tec.org.ru/board/irfp250n/49-1-0-1135>), на транзистор IRFP250N, его тепловое сопротивление на участке кристалл-радиатор:

$$R_{JC} + R_{CS} = 0,7 + 0,24 = 0,94 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.7	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

Это означает, что если на кристалле выделяется мощность 10 Вт, то его температура будет на 9,4  $^\circ\text{C}$  больше температуры радиатора.

Задача. Рассчитать радиатор, обеспечивающий охлаждение транзистора ЭРСТ, состоящего из 20-ти транзисторов типа IRFP250N. Расчет радиатора можно вести для одного транзистора, а затем полученный размер увеличить в 20 раз.

Так как на ключевом транзисторе рассеивается суммарная мощность 528 Вт, то на каждом транзисторе IRFP250N рассеивается мощность  $528/20 = 26,4$  Вт. Радиатор должен обеспечивать максимальную температуру кристалла транзистора не более  $+110$   $^\circ\text{C}$  при максимальной температуре окружающей среды  $+40$   $^\circ\text{C}$ .

Тепловое сопротивление  $R_{JA}$  для одного транзистора IRFP250N:

$$R_{JA} \leq \frac{T_J - T_A}{P_{\text{III}}} = \frac{110 - 40}{26,4} = 2,65 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

Тепловое сопротивление радиатора:

$$R_{SA} = R_{JA} - R_{JC} - R_{CS} = 2,65 - 0,7 - 0,24 = 1,71 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

Исходя из максимальной температуры кристалла и теплового сопротивления на участке кристалл-радиатор максимальная температура радиатора:

$$T_S = T_J - P_{\text{III}} (R_{JC} + R_{CS}) = 110 - 26,4 \cdot (0,7 + 0,24) = 85 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

С учетом графика (рис. 2.30) и разницы температуры радиатора и окружающей среды поправочный коэффициент  $K_T$ :

$$T_S - T_A = 85 - 40 = 45 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$K_T = 1,11.$$

Для охлаждения радиатора используется вентилятор типа 1,25ЭВ-2,8-6-3270У4 с производительностью 280 м<sup>3</sup>/ч. Чтобы вычислить скорость потока, нужно разделить производительность на сечение воздуховода, продуваемого вентилятором.

Если воздуховод имеет площадь поперечного сечения

$$0,14 \cdot 0,14 = 0,0196 \text{ м}^2,$$

то скорость воздушного потока будет равна:

$$280 / (0,0196 \cdot 3600) = 4 \text{ м/с}.$$

По графику (рис. 2.31) поправочный коэффициент  $K_V$  на реальную скорость воздушного потока:

$$K_V = 0,63.$$

Имеется большое количество готовых радиаторов, имеющих периметр сечения 1050 мм и длину 80 мм. По графику (рис. 2.32) определим поправочный коэффициент  $K_L$  на длину радиатора:

$$K_L = 1,6.$$

Общая поправка:

$$K = K_T K_V K_L = 1,19 \cdot 0,63 \cdot 1,6 = 1,2.$$

С учетом поправок, радиатор должен обеспечивать тепловое сопротивление:

$$R_{SA} = 1,71 / 1,2 = 1,425 \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Из графика (рис. 2.33) следует, что для одного транзистора требуется радиатор с периметром сечения 200 мм. Для группы из 20-ти транзисторов IRFP250N радиатор должен иметь периметр сечения не менее 4000 мм. Так как имеющиеся в распоряжении радиаторы имеют периметр 1050 мм, то придется объединить 4 радиатора.

На диоде ЭРСТ рассеивается меньшая мощность, но из конструктивных соображений для него можно использовать аналогичный радиатор.

Задание. Рассчитать радиатор, обеспечивающий охлаждение блока, состоящего из N транзисторов марки, указанной в таб. 2.14 для вариантов задания. Справочные данные взять из сайта <http://tec.org.ru/board/irfp250n/49-1-0-1135>.

Таблица 2.14

№ варианта	Марка транзистора	Кол-во в блоке
1	IRF4905	10
2	IRF3205 Pbf	20
3	IRF5305	10
4	IRF610	20
5	IRF7303	10
6	IRF730	20
7	IRF640N	10
8	IRF540N	20
9	IRF4905	15
10	IRF540N	15
11	IRF730	15
12	IRF610	15

### Контрольные вопросы

1. Как определить мощность, рассеиваемую на кристалле полупроводникового прибора?
2. В чем заключается сущность теории подобия?
3. Как определить тепловое сопротивление радиатора?
4. Какие поправочные коэффициенты учитываются при расчете охлаждающего радиатора электронной аппаратуры?
5. В чем заключается разница между тепловым сопротивлением транзистора и радиатора?

### *2.3.6. Практическое занятие № 6*

#### **Моделирование работы сглаживающего емкостного фильтра в цепи переменного тока**

**Цель работы:** получение практических навыков по моделированию переходных процессов в электрических схемах с элементами электроники.

#### **План проведения занятия**

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примера решения типовой задачи.

3. Решение примеров.
4. Ответы на контрольные вопросы

### Пример решения типовой задачи

Для сглаживания пульсаций тока на выходе однополупериодного выпрямителя (рис. 2.5) применяется ёмкостной фильтр. Пример расчетного модуля пакета MathCad, моделирующего работу транзистора и ёмкости в цепи переменного тока, приведен в листинге на рис. 2.55.

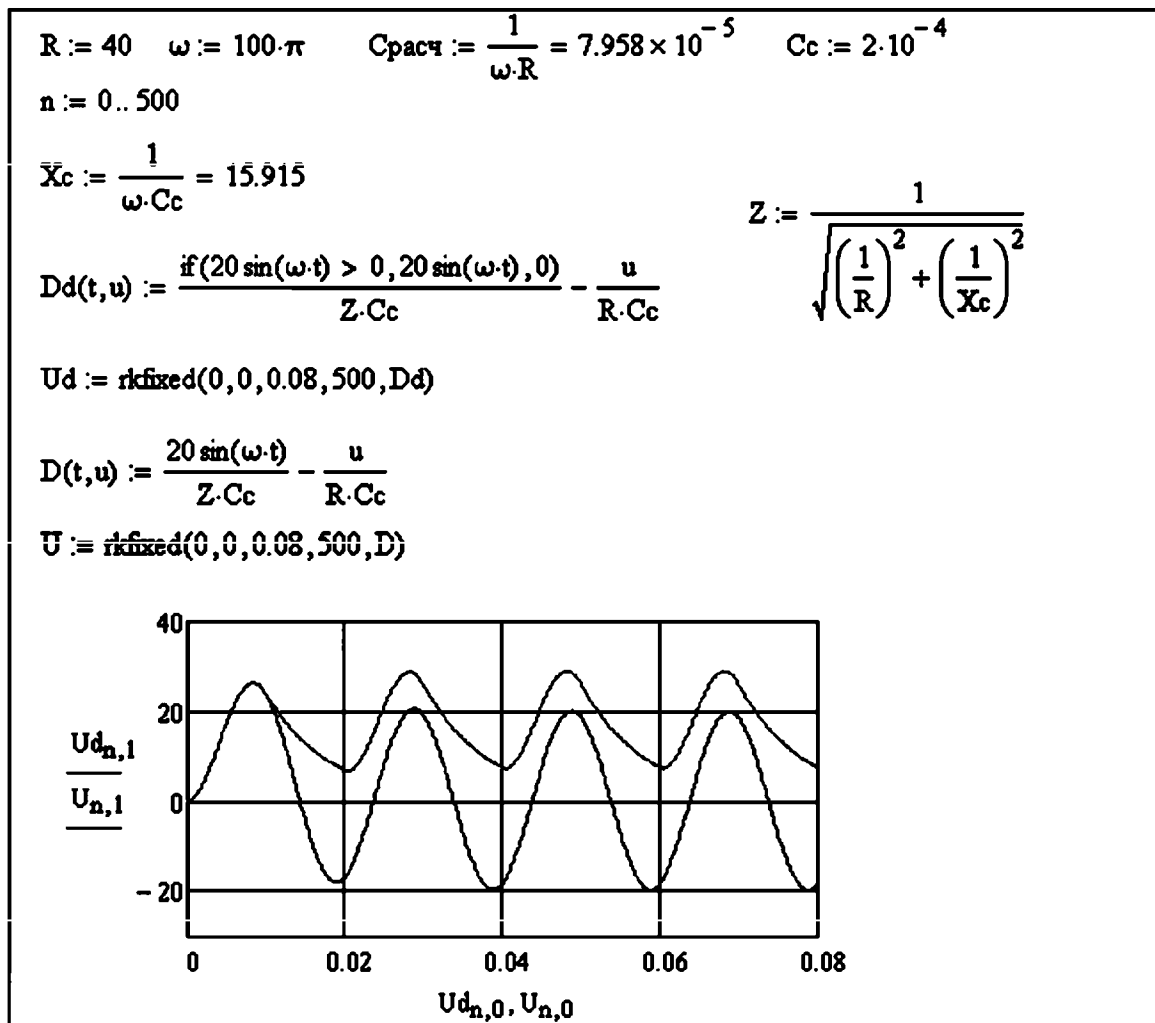


Рис. 2.55. Листинг выполняемого расчетного модуля пакета MathCad

Выпрямление от диода учитывается выражением функции с условием для однополупериодного выпрямления:

$$if (20 \sin(\omega \cdot t) > 0, 20 \sin(\omega t), 0),$$

где  $20 \sin(\omega t)$  – мгновенное выражение для напряжения источника переменного тока с амплитудой 20 вольт и нулевой фазой. Моделирование переходного процесса проводится численным методом Рунге – Кутты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования с помощью функции *rkfixed* пакета MathCad. Список параметров, передаваемых в функцию *rkfixed* (запись через запятую):

- начальное условие,
- начальная и конечная точки интервала интегрирования,
- число точек без учета начальной,
- матрица первой производной искомой функции.

На графике представлены две функции:

$U_d$  – изменение напряжения при наличии в схеме выпрямительного диода,

$U$  – изменение напряжения без выпрямительного диода в схеме.

### Решение задач

Дано: схема замещения емкостного фильтра с сопротивлением нагрузки  $R$ , частотой переменного тока  $f$  и амплитудой колебаний напряжения  $U_m$  (рис. 2.5).

Промоделировать численными методами в математическом пакете MathCad переходный процесс при разных значениях емкости  $C$ , начиная со значения меньшего расчетного, последующие варианты берутся с шагом приращения в сторону увеличения (шаг приращения и начальное значение согласовывается с преподавателем). Отобразить характер изменения пульсаций выпрямленного напряжения на совмещенном графике.

Варианты для заданий приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15

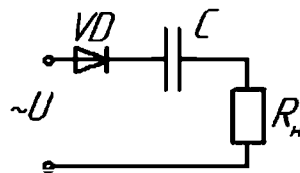
Номер варианта	Сопротивление нагрузки, Ом	Частота, Гц	Амплитудное напряжение источника, В
1	10	60	20
2	20	50	30
3	30	60	40
4	40	50	50

Номер варианта	Сопротивление нагрузки, Ом	Частота, Гц	Амплитудное напряжение источника, В
5	50	60	60
6	60	50	50
7	70	100	40
8	80	200	30
9	90	100	20
10	100	200	10
11	110	100	10
12	120	200	20
13	130	60	30
14	140	50	40
15	150	100	50
16	160	60	40
17	170	50	30
18	180	100	20
19	190	60	10
20	200	50	6

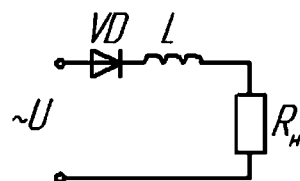
### Контрольные вопросы

1. При каких значениях нагрузки наиболее эффективно применение емкостных фильтров?

2. Составить исходную систему расчетных уравнений схемы замещения цепи переменного тока, когда конденсатор поставлен последовательно с нагрузкой.



3. Составить исходную систему расчетных уравнений для схемы замещения цепи переменного тока индуктивного однополупериодного выпрямителя.





4. Для каких целей ставится трансформатор на входе в выпрямитель?
5. Изобразить векторную диаграмму для эквивалентного сопротивления схемы емкостного выпрямителя?
6. Как выглядит диаграмма изменения напряжения для емкостного фильтра в случае, если  $R < X_C$ ?
7. Как рассчитывается коэффициент пульсаций?

### ***2.3.7. Практическое занятие № 7***

#### **Проектирование выпрямительного устройства с фильтром**

**Цель работы:** привитие навыков анализа и синтеза выпрямительных устройств со сглаживающими фильтрами, освоение методик их расчета и оценки энергетических показателей.

#### **Краткие теоретические сведения**

Выпрямитель с фильтром рассчитывается так, чтобы напряжение  $U_0$  и коэффициент пульсации на выходе соответствовали заданным в техническом задании (ТЗ) при токе потребления  $I_0$ .

При работе выпрямителя на нагрузку с емкостной реакцией коэффициент пульсации схемы зависит как от емкости конденсатора  $C_0$ , стоящего на входе фильтра, так и от соотношения между сопротивлениями фаз выпрямителя  $r_\phi$  и нагрузки  $R_n$ . Поэтому целесообразно сначала рассчитать выпрямитель, задавшись примерным падением напряжения на фильтре, а затем и фильтр. Если же на выходе выпрямителя стоит стабилизатор напряжения, то сначала следует рассчитать стабилизатор напряжения, затем фильтр и схему выпрямления.

При работе выпрямителя на индуктивную нагрузку его коэффициент пульсации не зависит от отношения  $r_\phi/R_n$ . Зная коэффициент пульсации схемы выпрямления и требуемый коэффициент пульсации на выходе фильтра, можно найти параметры фильтра (коэффициент сглаживания, падение напряжения на его сопротивлении), а затем рассчитать выпрямитель.

Напряжение на выходе схемы выпрямления находится сложением падения напряжения на фильтре с заданным выпрямленным напряжением. Аналогичный метод применяется и при расчете транзисторных фильтров.

## Примеры расчета выпрямителя и фильтров

**Пример 1.** Рассчитать выпрямитель, обеспечивающий следующие показатели: напряжение на нагрузке  $U_0 = 27$  В; ток нагрузки  $I_0 = 1$  А; коэффициент пульсации выпрямленного напряжения  $k_{\text{пввых}} = 0,02$ ; напряжение питающей сети  $U_c = 220$  В; частота сети  $f_c = 400$  Гц; температура окружающей среды  $t_{\text{окр}} = 40$  °С.

Порядок расчета.

Определяем сопротивление нагрузки

$$R_H = U_0 / I_0 = 27/1 = 27 \text{ Ом.}$$

Определяем выходную мощность выпрямителя

$$P_0 = U_0 I_0 = 27 \cdot 1 = 27 \text{ Вт.}$$

Выбираем мостовую схему выпрямления, так как требования к пульсациям не жесткие и выходная мощность небольшая [15]. В мостовой схеме используется простой понижающий трансформатор и достигается симметрия плеч выпрямителя. Ток нагрузки 1 А, поэтому в соответствии с рекомендациями [16], выбираем Г-образный LC-фильтр. Схема для расчета приведена на рис. 2.56.

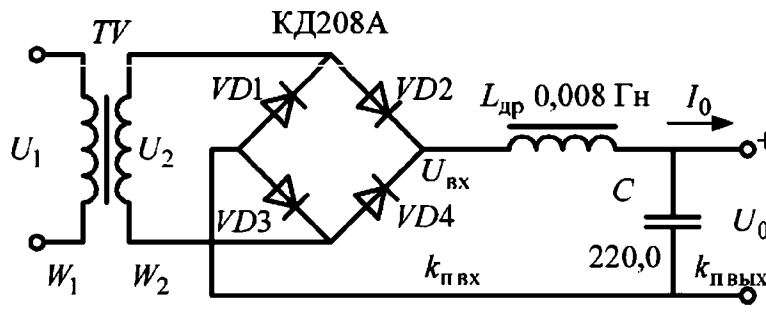


Рис. 2.56. Схема выпрямителя с фильтром

Характер нагрузки схемы выпрямления – индуктивный. В мостовой схеме на выходе выпрямителя коэффициент пульсаций  $k_{\text{пвх}} = 0,67$ , число фаз выпрямления  $m = 2$ .

Требуемый коэффициент сглаживания фильтра

$$q = k_{\text{пвх}} / k_{\text{ввых}} = 0,67 / 0,02 = 33,5.$$

Находим произведение LC для частоты сети 400 Гц

$$LC = 0,16 \cdot (q+1) / m^2 = 0,16 \cdot (33,5+1) / 2^2 = 1,38 \text{ Гн} \cdot \text{мкФ.}$$

Находим минимальную индуктивность дросселя фильтра, при которой характер нагрузки еще будет индуктивным

$$L_{min} = \frac{2R_H}{(m^2-1)m2\pi f_c} = \frac{2 \cdot 27}{(2^2-1) \cdot 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 400} = 0,0036 \text{ Гн.}$$

По [17] выбираем унифицированный дроссель фильтра Д68 с индуктивностью  $L_{др} = 0,008$  Гн и активным сопротивлением обмотки  $r_{др} = 1,1$  Ом. Дроссель рассчитан на ток  $I_0 = 1$  А и собран на магнитопроводе ШЛ6 X 12,5.

Находим емкость конденсатора фильтра

$$C = LC / L_{др} = 1,38 / 0,008 = 172 \text{ мкФ.}$$

Из [17] выбираем ближайший по емкости конденсатор типа К50-35-220, 50 В.

Рабочее напряжение конденсатора должно быть больше значения выпрямленного напряжения, так как на холостом ходу этот конденсатор оказывается заряженным до напряжения, равного амплитуде  $U_{2m}$ . Полагая предварительно  $U_2 = 1,11U_0$ , находим

$$U_{Сраб} = U_{2m} = 1,4 \cdot U_2 = 1,4 \cdot 1,11 \cdot 27 = 41,6 \text{ В.}$$

Конденсатор имеет рабочее напряжение 50 В, превышающее рабочее напряжение выпрямителя.

Уточняем коэффициент сглаживания фильтра с дросселем Д68 и конденсатором К50-35-220, 50 В.

$$q = (m \cdot \omega_c)^2 \cdot L \cdot C - 1 = (2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 400)^2 \cdot 0,008 \cdot 220 \cdot 10^{-6} = 43.$$

Коэффициент пульсаций на выходе фильтра

$$K_{ВЫХ} = k_{ПВХ} / q = 0,67 / 43 = 0,015,$$

что лучше заданного.

Допустимый для выбранного конденсатора коэффициент пульсации на частоте 1000 Гц  $k_{пдоп} = 1,3$  % от номинального напряжения. Допустимая амплитуда переменной составляющей  $U_{Стдоп} = 1,3 \cdot 50 / 100 = 0,65$  В. В схеме получаются пульсации с амплитудой  $U_m = k_{ПВЫХ} \cdot U_{0ср} = 0,015 \cdot 27 = 0,41$  В, что меньше допустимого. Если бы  $U_m$  получилось больше  $U_{Ст доп}$ , то пришлось бы перейти к другому конденсатору с большим допустимым напряжением или большей емкостью.

Напряжение на входе фильтра

$$U_{вх} = U_0 + r_{дп} \cdot I_0 = 27 + 1,1 \cdot 1 = 28,1 \text{ В.}$$

Расчет схемы выпрямления.

Исходные данные:  $U_{вх} = 28,1 \text{ В}$ ,  $I_0 = 1 \text{ А}$ ,  $U_c = 220 \text{ В}$ ,  $f_c = 400 \text{ Гц}$ . Схема выпрямления выбрана мостовая ( $m = 2$ ), работает на индуктивность.

Максимальное обратное напряжение на вентиле (табл. 3.1 [16])

$$U_{обрmax} = 1,57 \cdot U_{вх} = 1,57 \cdot 28,1 = 44,1 \text{ В.}$$

Доля выпрямленного тока, приходящаяся на вентиль

$$I_{ср} = 0,5 \cdot I_0 = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ А.}$$

Выбираем из справочника [17] вентиль КД208А. Его данные: допустимый выпрямленный ток  $I_{дон} = 3 \text{ А}$ ; допустимое обратное напряжение  $U_{обр доп} = 100 \text{ В}$ ;  $t_{окр доп} = 130 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $U_{np} = 1 \text{ В}$ .

Как видно из данных, ни по одному из параметров у выбранного вентиля не достигается предельный режим. В схеме моста используются четыре вентиля. Тепловой режим каждого из вентиля оценивается отдельно.

Определяем дифференциальное сопротивление вентиля. Значения  $U_{np}$ , приведенные в таблицах, измерены на пульсирующем токе и меньше падения напряжения при постоянном токе приблизительно в 1,2 раза, поэтому сопротивление одного вентиля

$$r_m \approx 1,2(U_{np}/I_{np доп}) = 1,2 \cdot (1/3) = 0,4 \text{ Ом.}$$

В плечо моста включены два вентиля последовательно, сопротивление плеча моста  $r_{пл} = 0,8 \text{ Ом}$ .

Находим ориентировочные значения омического сопротивления фазы выпрямителя  $r_\phi$  и индуктивности рассеяния трансформатора  $L_s$ .

Для трансформатора с  $P = 27 \text{ Вт}$  и  $f_c = 400 \text{ Гц}$  целесообразна бронева конструкция трансформатора, поэтому число стержней, на которых размещены обмотки,  $S = 1$ . Рекомендуемая [18] максимальная индукция в стали сердечника  $B_m = 1,4 \text{ Тл}$  (холоднокатаная сталь).

$$r_\phi = r_{пл} + r_{mp} = r_{пл} + \frac{k_r R'_H}{f_c B_m} \sqrt{\frac{S f_c R'_H}{I_0 B_m}}$$

$$r_\phi = 0,8 + \frac{5,1 \cdot 28,1}{400 \cdot 1,4} \sqrt{\frac{1 \cdot 400 \cdot 1,4}{1 \cdot 28,1}} = 1,34 \text{ Ом.}$$

$$L_S = k_L 10^{-3} \frac{R'_H}{f_c B_m} \sqrt[4]{\frac{S^3 \cdot U_{BX} \cdot I_0}{f_c B_m}}$$

$$L_S = 6,4 \cdot 10^{-3} \frac{28,1}{400 \cdot 1,4} \sqrt[4]{\frac{13^3 \cdot 28,1 \cdot 1}{400 \cdot 1,4}} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

В этих формулах  $k_r$  и  $k_L$  – коэффициенты, зависящие от схемы выпрямления и характера нагрузки, приведены в таблице 3.2 [16]. Реактивное сопротивление индуктивности рассеяния трансформатора

$$x_{mp} = 2 \pi f_c \cdot L_S = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 0,376 \text{ Ом.}$$

$R'_H = U_{BX} / I_0 = 28,1 \text{ Ом}$  – нагрузка выпрямителя.

Расчетное выпрямленное напряжение при холостом ходе

$$U_{BX\text{ХХ}} = U_{BX} + I_0 (r_\phi + x_{mp}) = 28,1 + 1 \cdot (1,34 + 0,376) = 29,8 \text{ В.}$$

Уточняем  $U_{\text{обр max}} = 1,57 U_{BX\text{ХХ}} = 1,57 \cdot 29,8 = 46,8 \text{ В.}$

Вентили по обратному напряжению выбраны правильно.

Параметры трансформатора

$$U_2 = E_2 = 1,11 U_{0\text{ХХ}} = 1,11 \cdot 29,8 = 33 \text{ В.}$$

$$I_2 = I_0 = 1 \text{ А.}$$

$$I_1 = I_0 W_2 / W_1 = I_0 \cdot U_2 / U_1 = 1 \cdot 33 / 220 = 0,15 \text{ А.}$$

Габаритные мощности первичной и вторичной обмоток одинаковы и габаритная мощность трансформатора

$$P_{\text{ТРГ}} = 1,11 P_{\text{ВХ}} = 1,11 \cdot U_{\text{ВХ}} \cdot I_{\text{ВХ}} = 1,11 \cdot 28,1 \cdot 1 = 31,2 \text{ В·А.}$$

Находим угол перекрытия фаз

$$1 - \cos \gamma = I_0 \cdot x_{\text{тр}} / U_{\text{ВХ}} = I_0 \cdot 0,376 / 28,1 = 0,00134 \approx 0.$$

$$\cos \gamma = 1; \gamma = 0.$$

Коэффициент пульсации из-за малости угла перекрытия не изменится, также не изменится и напряжение на нагрузке.

Находим внутреннее сопротивление выпрямителя

$$r_0 \approx (U_{\text{ВХХХ}} - U_{\text{ВХ}}) / I_0 = (29,8 - 28,1) / 1 = 1,7 \text{ Ом.}$$

Определяем КПД выпрямителя

$$\eta = P_0 / (P_{\text{ВХ}} + P_{\text{ТР}} + P_{\text{Д}}) = 27 / (28,1 + 2,18 + 2) = 83,6 \text{ \%}.$$

Потери в трансформаторе

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{тр}}(1 - \eta_{\text{тр}}) = 31,2(1 - 0,93) = 2,18 \text{ Вт.}$$

В соответствии с рекомендациями [18] для расчетной мощности КПД трансформатора  $\eta_{\text{тр}}$  принят равным 0,93.

Потери в вентилях  $P_{\text{д}} = I_0 U_{\text{пр}} N = 1 \cdot 1 \cdot 2 = 2 \text{ Вт}$  ( $N$  – количество вентилях в плече).  $P_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} I_0 = 28,1 \cdot 1 = 28,1 \text{ Вт}$  – мощность, поступающая на вход фильтра.

Рассчитанный выпрямитель с фильтром имеет невысокий КПД и разработчику нужно предложить меры для его повышения.

**Пример 2.** Рассчитать выпрямитель, работающий на транзисторный фильтр. Исходные данные: напряжение на входе фильтра  $U_0 = 45,4 \text{ В}$ ; амплитуда пульсации первой гармоники  $U_{m1} = 2,4 \text{ В}$ ; нагрузка  $I_0 = 0,25 \text{ А}$ ; напряжение сети  $U_c = U_1 = 220 \text{ В}$  с частотой  $f_c = 50 \text{ Гц}$ .

*Порядок расчета*

Выбираем схему выпрямления.

Мощность нагрузки  $P_0 = U_0 \cdot I_0 = 45,4 \cdot 0,25 = 11,35 \text{ Вт}$ .

Соппротивление нагрузки  $R_{\text{н}} = U_0 / I_0 = 45,4 / 0,25 = 181 \text{ Ом}$ .

Коэффициент пульсации на выходе выпрямителя

$$k_n = U_{m1} / U_0 = 2,4 / 45,4 = 0,053; k_n = 5,3 \%$$

Исходя из рекомендаций по выбору схемы выпрямителя [16] и полученных значений мощности и коэффициента пульсаций, выбираем мостовую схему выпрямления. Транзисторный фильтр не может работать при сильно пульсирующем входном напряжении, поэтому нагрузка выпрямителя должна быть емкостной.

Дальнейшие расчеты проводим по номограммам [16]. Параметры вентилях определяются исходя из  $B \approx 1$ . Обратное напряжение на вентиле, работающем на емкостную нагрузку

$$U_{\text{ОБР}} = 1,41 B U_0 = 1,41 \cdot 1 \cdot 45,4 = 64 \text{ В.}$$

Выпрямленный ток, приходящийся на один вентиль

$$I_{\text{СР}} = 0,5 I_0 = 0,5 \cdot 0,25 = 0,125 \text{ А.}$$

По среднему току вентилях и обратному напряжению выбираем вентиль КД109А с параметрами

$$I_{\text{пр ср max}} = 0,3 \text{ А}; U_{\text{обрmax}} = 100 \text{ В}; U_{\text{пр}} = 1 \text{ В.}$$

Дифференциальное сопротивление вентиля

$$r_{\Gamma} = 1,2 U_{\text{пр}} / I_{\text{прдоп}} = 1,2 \cdot 1 / 0,3 = 4 \text{ Ом.}$$

Расчет трансформатора

Активное сопротивление трансформатора

$$r_{\text{тп}} = k_r \frac{R_{\text{н}}}{f_c B_m} \sqrt{\frac{S f_c B_m}{I_0 U_0}} = 3,5 \frac{181}{50 \cdot 1,25} \sqrt{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,25}{0,25 \cdot 45,4}} = 11,6 \text{ Ом.}$$

Индукция в сердечнике трансформатора для частоты 50 Гц  $B_m = 1,25$  Тл; трансформатор выбираем броневой, поэтому  $S = 1$ .

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора

$$L_S = k_L 10^{-3} \frac{R_{\text{н}}'}{f_c B_m} \sqrt{\frac{S^3 U_{\text{вх}} I_0}{f_c B_m}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{181}{50 \cdot 1,25} \sqrt{\frac{1^3 \cdot 45,4 \cdot 0,25}{50 \cdot 1,25}} = 9,4 \text{ мГн.}$$

Значения  $k_r$  и  $k_L$  выбираем по тем же таблицам, что и в примере 1, но для емкостной нагрузки.

Реактивное сопротивление трансформатора

$$x_{\text{мп}} = 2 \pi f_c L_S = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} = 2,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивление фазы выпрямления для мостовой схемы

$$r_{\phi} = 2r_m + r_{\text{мп}} = 2 \cdot 4 + 11,6 = 19,6 \text{ Ом.}$$

Параметр  $A$

$$A = I_0 \pi r_{\phi} / m U_0 = 0,25 \pi 19,6 / (2 \cdot 45,4) = 0,21.$$

Угол  $\varphi$ , учитывающий влияние индуктивности рассеяния трансформатора [16]

$$\varphi = \arctg(x_{\text{мп}}/r_{\phi}) = \arctg 2,9/19,6 = 8^{\circ} 30'.$$

Из графиков [10, страница 45]  $B = f(A)$ ,  $D = f(A)$ ,  $H = f(A)$  находим коэффициенты  $B$ ,  $D$ ,  $H$ :  $B = 0,96$ ;  $D = 2,22$ ;  $H = 360$ .

Уточненные значения тока и обратного напряжения вентиля:

$$I_{\text{пр ср}} = 0,5 D I_0 = 0,5 \cdot 2,22 \cdot 0,25 = 0,275 \text{ А} < 1,57 I_{\text{пр ср max}} = 1,57 \cdot 0,3 = 0,471 \text{ А.}$$

$$U_{\text{обр}} = 1,41 B U_0 = 1,41 \cdot 0,96 \cdot 45,4 = 61,5 \text{ В} < U_{\text{обр max}} = 100 \text{ В.}$$

Вентили КД109А пригодны для работы в выпрямителе.

Параметры трансформатора:

напряжение вторичной обмотки  $U_2 = BU_0 = 0,96 \cdot 45,4 = 43,2$  В.

ток вторичной обмотки  $I_2 = 0,707DI_0 = 0,707 \cdot 2,22 \cdot 0,25 = 0,39$  А.

напряжение первичной обмотки  $U_1 = 220$  В.

Ток первичной обмотки

$$I_1 = 0,707DI_0U_0/U_1 = 0,707 \cdot 2,22 \cdot 0,25 \cdot 45,4/220 = 0,08 \text{ А.}$$

Габаритные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора одинаковы:

$$P_1 = P_2 = 0,707BDP_0 = 0,707 \cdot 0,96 \cdot 2,22 \cdot 11,35 = 17,1 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Габаритная мощность трансформатора  $P_{\text{трг}} = 17,1$  В·А.

Ёмкость конденсатора  $C$

$$C = H \cdot 10^{-6} / (k_n \cdot r_\phi) = 360 \cdot 10^{-6} / (0,053 \cdot 21,2) = 320 \text{ мкФ.}$$

Ближайший по каталогу конденсатор имеет емкость 330 мкФ.

$$k_n = 360 \cdot 10^{-6} / (330 \cdot 10^{-6} \cdot 21,2) = 0,051,$$

переменная составляющая выходного напряжения

$$U_{0m} = k_n U_0 = 0,051 \cdot 45,4 = 2,31 \text{ В.}$$

На холостом ходу конденсатор заряжается до напряжения

$$U_{2m} = U_2 \sqrt{2} = 43,2 \cdot 1,41 = 62 \text{ В.}$$

Необходимо выбрать конденсатор с рабочим напряжением, большим 60 В. По справочным данным выбираем на выход выпрямителя конденсатор К50-35 с емкостью 330 мкФ, 100 В. Схема выпрямителя приведена на рис. 2.57.

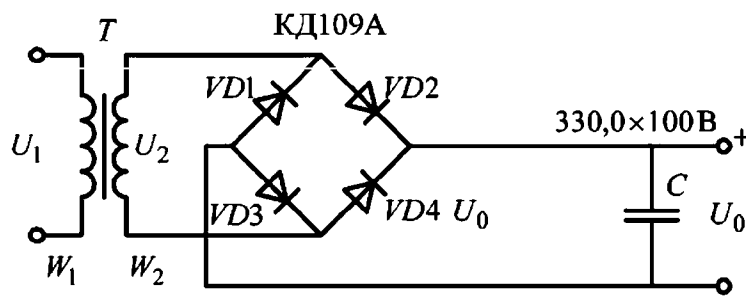


Рис. 2.57. Схема выпрямителя для транзисторного фильтра



У конденсатора К50-35 допустимый коэффициент пульсаций на частоте 100 Гц составляет  $k_{п\ доп} = 4,2 \%$ , допустимая амплитуда пульсаций  $U_{м\ доп} = U_{раб} \cdot k_{п} = 100 \cdot 0,042 = 4,2 \text{ В}$ , что больше рассчитанной. Так как рабочее напряжение выбранного конденсатора заметно больше выпрямленного, то проверку на максимум напряжения можно не проводить.

## **2.4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

### ***2.4.1. Вопросы для самостоятельного изучения***

#### **2.4.1.1. Электровакуумные устройства**

Электровакуумные лампы.

Электронная эмиссия.

Многоэлектродные лампы

Газоразрядные лампы.

СВЧ-устройства.

Акустические усилители на вакуумных лампах.

#### **2.4.1.2. Полупроводниковые приборы**

Диоды специального назначения.

Тиристоры

Комбинированные транзисторы.

#### **2.4.1.3. Выпрямители**

Сглаживающие фильтры.

Управляемые выпрямители.

Трехфазные выпрямители.

#### **2.4.1.4. Усилители**

Импульсные усилители.

Многокаскадные усилители.

Динамические характеристики усилителей.

#### **2.4.1.5. Преобразователи**

Инверторы.

Компенсаторы реактивной мощности.

Переключатели.

#### **2.4.1.6. Импульсная техника**

Импульсные устройства.

Логические элементы.  
Триггеры. Счетчики. Регистры.  
Шифраторы и дешифраторы. Сумматоры.  
Микропроцессоры.

### 2.4.2. Контрольные задачи

1. Обратный ток насыщения полупроводникового диода  $I_0 = 10^{-6}$  А при 300 К. Определить сопротивление диода постоянному и переменному токам при прямом напряжении 0,15 В.

2. Полупроводниковый диод имеет прямой ток 0,8 А при напряжении 0,3 В и температуре 310 К. Определить обратный ток насыщения, дифференциальные сопротивления при прямом напряжении 0,2 В и обратном 1 В.

3. Определить ток идеализированного диода, текущий в цепи, содержащей последовательно соединенные источник ЭДС, резистор и диод (рис. 2.58), если  $E = 5$  В,  $R = 1$  кОм, обратный ток насыщения  $I_0 = 10^{-12}$  А при 300 К.

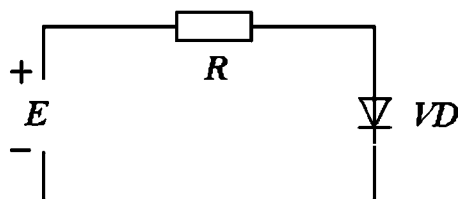


Рис. 2.58. Схема к задаче 3

4. Идеализированный диод включен в схему на рис. 2.59.

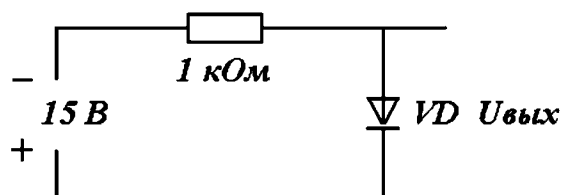


Рис. 2.59. Схема к задаче 4

Определить выходное напряжение.

5. Определить выходное напряжение в схеме на рис. 2.60, если кремниевый диод с обратным током насыщения  $I_0 = 10^{-5}$  А работает при 300 К.

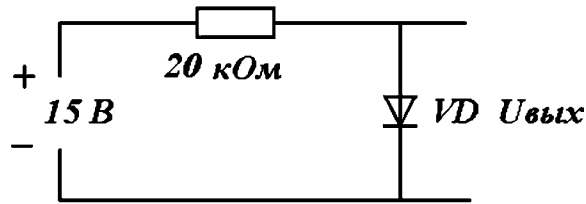


Рис. 2.60. Схема к задаче 5

6. Можно ли использовать диод Д109 для выпрямления синусоидального напряжения с амплитудой 85 В? (Для ответа использовать справочник)

7. Транзистор *n-p-n*- типа включен по схеме на рис. 2.61.

$R_Э = 5 \text{ к}$ ,  $R_К = 10 \text{ к}$ ,  $E_Э = 10 \text{ В}$ ,  $E_К = 30 \text{ В}$ . Считая, что транзистор работает в активном режиме, определить напряжение  $U_{КБ}$  для случаев

- $\alpha = 1$ ;  $I_{К0} = 0$ .
- $\alpha = 0,98$ ;  $I_{К0} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ .

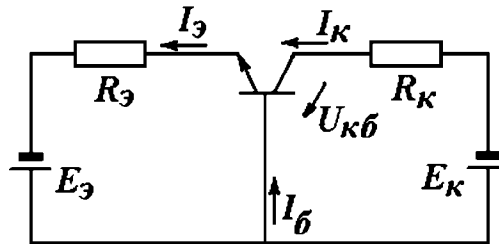


Рис. 2.61. Схема к задаче 7

8. Кремниевый транзистор *p-n-p*- типа включен по схеме на рис. 2.62 и работает в активном режиме.  $R_Э = 0,5 \text{ кОм}$ ,  $R_Б = 25 \text{ кОм}$ ,  $R_К = 4 \text{ кОм}$ ,  $E_Э = 2 \text{ В}$ ,  $E_К = 16 \text{ В}$ ;  $\alpha = 0,98$ ;  $I_{К0} = 0$ .

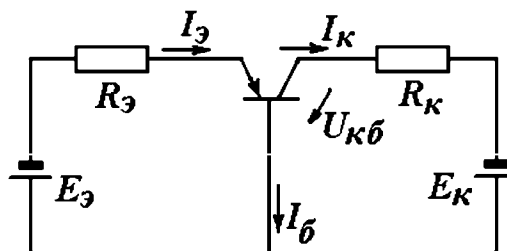


Рис. 2.62. Схема к задаче 8

Определить ток коллектора, напряжение  $U_{КБ}$  и уточнить режим работы транзистора.

9. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора  $I_K = 1$  мА, ток базы  $I_B = 20$  мкА, обратный ток коллектора  $I_{КБ0} = 10^{-8}$  А. Определить коэффициенты передачи по постоянному току  $\alpha$ ,  $\beta$  и обратный ток коллектора  $I_{КЭ0}$ .

10. Кремниевый транзистор р-п-р-типа включен в схему на рис. 2.63.

Определить коллекторный ток, если коэффициент передачи тока  $\alpha = 0,98$ , обратный ток коллектора  $I_{КБ0} = 10$  мкА.

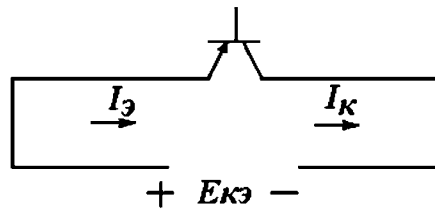


Рис. 2.63. Схема к задаче 10

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Освоение дисциплины «Электротехника и электроника» способствует формированию у обучающихся научно-технического мировоззрения, способности решать конкретные технические задачи, связанные с использованием электротехнического оборудования, электроизмерительных устройств.

В процессе освоения раздела «Электротехника» обучающийся получает начальные знания об элементной базе электротехники, структуре и принципах построения электрических схем.

Раздел «Электроника» знакомит обучающихся с физическими основами процессов электронных компонентов и устройств.

Правильный выбор и эксплуатация оборудования не возможны без овладения основами физических процессов, расчетными методиками и информационными технологиями.

Несмотря на обилие научно-технической литературы, возникает потребность в компактных источниках информации, дающих общее представление об изучаемом предмете не только с теоретических, но и с практических позиций. В предлагаемом учебно-практическом пособии нашли отражение методики обучения бакалавров неэлектротехнических направлений, реализованные на кафедре «Электротехника и электроэнергетика» Владимирского государственного университета с использованием имеющегося лабораторного оборудования и вычислительных средств.

## ЛИТЕРАТУРА

### Л.1. Литература по электротехнике

1. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин – М.: ДМК Пресс, 2011.  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785940746881.html>.
2. Немцов М. В. Электротехника и электроника. – М.: Абрис, 2012.  
<http://www.student-library.ru/book/ISBN9785437200551.html>.
3. Корякин-Черняк С. Л. и др. Справочник электрика. – СПб.: Наука и техника, 2011.  
<http://www.student-library.ru/book/ISBN9785943878480.html>.
4. Ванюшин М. Первые шаги в электротехнику. Просто о сложном. – СПб.: Наука и техника, 2011.  
<http://www.student-library.ru/book/ISBN9785940746881.html>.
5. Рекус Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники. – М.: Абрис, 2012.  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200667.html>.
6. Савченко В. И. Электротехника и электроника. – М.: Изд-во АСВ, 2012.  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930938845.html>.
7. Электротехника и электроника / т. 1, Электротехника / Ю. Г. Подкин и др. – М.: Изд. центр «Академия», (Сер. Бакалавриат), 2011.
8. Справочник по основам теоретической электротехники: Учебное пособие / Под ред. Ю. А. Бычкова и др. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012.
9. Иванов И. И. и др. Электротехника и основы электроники. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012.
10. Касаткин А. С. Электротехника: учебник для вузов. – М.: Академия, 2005.
11. Исаев И. Н., Купцов А. М. Практика использования системы Mathcad в расчетах электрических и магнитных цепей. Учебное пособие. – М.: Солон-Пресс, 2014.
12. Маркелов С. Н., Сазанов Б. Н. Электротехника и электроника: учебное пособие / С. Н. Маркелов, Б. Я. Сазанов. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2014.
13. Общая электротехника: учебное пособие / Н. А. Кривоногов [и др.]; под ред. Л. А. Потапова. – Ростов на Дону: Феникс, 2016.

14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2007.
15. Рекус Г. Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Рекус. – М.: Высшая школа, 2005.
16. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах / В. А. Прянишников [и др.] – СПб.: Корона принт, 2001.
17. Родионов А. И. Элементы расчета электрических цепей однофазного и трехфазного переменного тока. – М.: МГПУ, 2011.

#### Л.2. Литература по электронике

18. Промышленная электроника [Электронный ресурс] / Рег Дж. – М.: ДМК Пресс, 2011.  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785940744788.html>.
19. Андрианов Д. П. Мет. указания к лаб. работам по дисциплине «Электроника» [Электронный ресурс]: / Д. П. Андрианов, В. И. Афонин; – Владимир: ВлГУ, 2014  
<http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/3785/1/00509.doc>.
20. Андрианов Д. П. Мет. указания к лаб. работам по дисциплине «Электроника» Часть 2 / Д. П. Андрианов, В. И. Афонин. – Владимир: ВлГУ, 2014  
<http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4086/1/00562.doc>.
21. Мелешин В. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005.
22. Артамонов Б. И., Бокуняев А. А. Источники электропитания радиоустройств. – М.: Энергоиздат, 1982.
23. Электронные компоненты. Каталоги фирмы «Платан». <http://platan.ru/>
24. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Справочник / Под ред. Г. С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1985.
25. Борисов П. А. Расчет и моделирование выпрямителей / П. А. Борисов, В. С. Томасов. – СПб: Университет ИТМО, 2009.
26. Шошин Е. Л. Электроника. Полупроводниковые приборы. – М.: Ай Пи Ар Медиа, 2021.

#### Л.3. Электронные ресурсы

1. <http://chemometrics.ru/materials/textbooks/matlab.htm>
2. <http://www.iprbookshop.ru>

3. <https://obuchalka.org/knigi-po-elektronike-i-elektrotehnike/>
4. <http://www.exponenta.ru/soft/mathcad/usersguide/0.asp>
5. <http://electrichelp.ru/elektrotexnika-i-elektronika-konspekt-lekcij>
6. <http://www.radioingener.ru/elektronika-polnyj-kurs-lekcij>
7. <http://window.edu.ru/resource/855/36855>
8. <http://vunivere.ru/work14845>
9. <http://tec.org.ru/board/irfp250n/49-1-0-1135>
10. <http://www.radiolibrary.ru/reference/diod.html>
11. <http://5v.ru/ds/diod/kd105.htm>



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Краткие сведения о лабораторном стенде УИЛС-1

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд УИЛС-1 представляет собой конструкцию (рис. П.1), состоящую из корпусов активных и пассивных блоков, соединенных наборным полем.

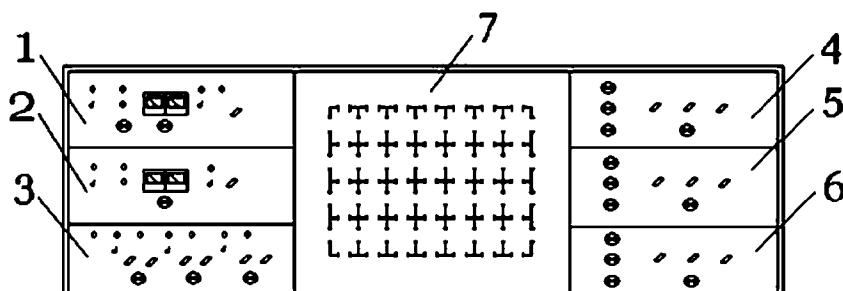


Рис. П.1. Общий вид стенда УИЛС-1:

- 1 – блок постоянных напряжений; 2 – блок переменного напряжения;
- 3 – блок трехфазного напряжения; 4 – блок переменного сопротивления;
- 5 – блок переменной индуктивности; 6 – блок переменной емкости;
- 7 – наборное поле

#### **Блок постоянных напряжений** содержит:

- регулируемый источник постоянного стабилизированного напряжения, с напряжением на выходе от 2 до 30 В;
- нерегулируемый источник постоянного напряжения с напряжением на выходе 20 В;
- измерительные приборы (вольтметр и амперметр) для контроля величины тока и напряжения регулируемых источников напряжения. Регулирование осуществляют с помощью потенциометра.

Оба источника напряжения снабжены схемой защиты от короткого замыкания и перегрузок.

**Блок переменного напряжения** представляет собой источник однофазного переменного напряжения регулируемой частоты синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы.

Схема снабжена электронной защитой от короткого замыкания и перегрузок.

**Блок трехфазного напряжения** является источником трехфазного напряжения промышленной частоты. Каждая фаза электрически не зависит друг от друга.

**Наборная панель** представляет собой панель с 67 парами определенным образом соединенных гнезд, предназначенных для подключения и установки наборных элементов (элементов исследуемых цепей). Наборные элементы выполнены в виде прозрачных пластмассовых коробочек, в торце которых имеется вилка, а внутри впаяны радиоэлементы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Цифровой мультиметр VC9808

Мультиметр является портативным профессиональным измерительным инструментом, выполняющим следующие функции: измерение постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, сопротивлений, ёмкости конденсаторов, частоты, температуры, звуковая прозвонка.

Внешний вид мультиметра представлен на рис. П.2.

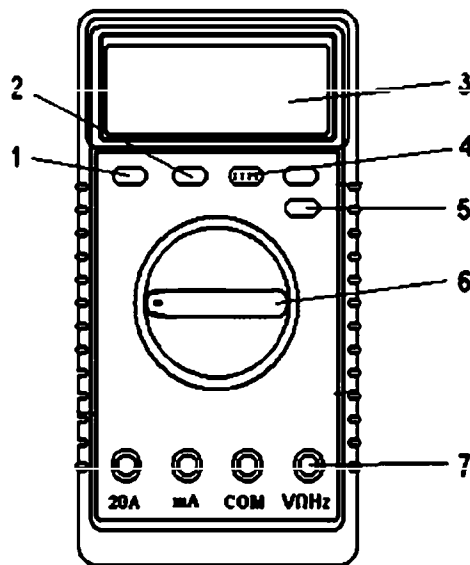


Рис. П.2. Внешний вид цифрового мультиметра:

- 1 – кнопка включения; 2 – кнопка V/L; 3 – ж-к дисплей;
- 4 – разъем для проверки транзисторов; 5 – кнопка DC/AC;
- 6 – переключатель функций; 7 – входные гнезда

Выбор функций и пределов обеспечивается вращением переключателя 6.

Мультиметр имеет четыре входных гнезда, защищенных от перегрузки, превышающей указанные пределы. Во время работы черный щуп должен быть установлен в гнездо «СОМ», красный щуп устанавливается в гнездо, соответствующее режиму измерения.

## Технические характеристики мультиметра

### 1. Постоянное напряжение

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
200 мВ	0,1 мВ	$\pm 0,5 \% \pm 1 D$
2 В	1 мВ	$\pm 0,5 \% \pm 1 D$
20 В	10 мВ	$\pm 0,5 \% \pm 1 D$
200 В	0,1 В	$\pm 0,5 \% \pm 1 D$
1000 В	1 В	$\pm 0,8 \% \pm 2 D$

### 2. Переменное напряжение

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
200 мВ	0,1 мВ	$\pm 1,2 \% \pm 1 D$
2 В	1 мВ	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
20 В	10 мВ	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
200 В	0,1 В	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
1000 В	1 В	$\pm 1,2 \% \pm 2 D$

### 3. Постоянный ток

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
2 мА	1 мА	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
2 мА	10 мА	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
200 мА	0,1 мА	$\pm 1,5 \% \pm 1 D$
10 А	10 мА	$\pm 2,0 \% \pm 5 D$

### 4. Переменный ток

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
2 мА	1 мА	$\pm 1,0 \% \pm 3 D$
2 мА	10 мА	$\pm 1,0 \% \pm 3 D$
200 мА	0,1 мА	$\pm 1,8 \% \pm 3 D$
10 А	10 мА	$\pm 3,0 \% \pm 7 D$

### 5. Сопротивление

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
200 Ом	0,1 Ом	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
2 кОм	1 Ом	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
20 кОм	10 Ом	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
200 кОм	100 Ом	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
2 МОм	1 кОм	$\pm 0,8 \% \pm 1 D$
20 МОм	10 кОм	$\pm 1,0 \% \pm 1 D$
200 МОм	100 кОм	$\pm 5,0 \% \pm 10 D$

6. Частота

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
2 кГц	1 Гц	$\pm 2,0 \% \pm 5 D$
20 кГц	10 Гц	$\pm 1,5 \% \pm 5 D$

7. Температура

Диапазон, °C	Разрешающая способность	Точность, °C		
		-20...0	0...400	400...1000
-20...1000	1 °C	$\pm 5,0\% \pm 4D$	$\pm 1,0\% \pm 3D$	$\pm 2,0\%$

8. Измерение емкости

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
2 nF	1 pF	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
20 nF	10 pF	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
200 nF	0,1 nF	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
2 μF	1 nF	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
20 μF	10 nF	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Краткие сведения о лабораторном стенде 87Л-01

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд 87Л-01 предназначен для проведения лабораторно-практических работ по электронике и представляет собой конструкцию (рис. П.3), состоящую из четырех блоков:

- генераторный блок – комплект генераторных устройств, обеспечивающих выработку синусоидальных и прямоугольных сигналов,
- измерительный блок – комплект измерительных приборов,
- блок питания – комплект источников питания,
- блок коммутирующих плат – комплект сменных коммутирующих плат, шаблонов электрических схем и наборов съемных элементов.

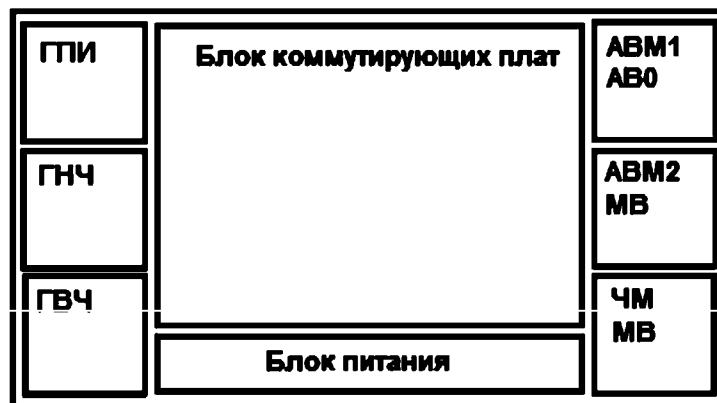


Рис. П.3. Общий вид стенда 87Л-01

На рис. П.3 обозначены:

ГПИ – генератор прямоугольных импульсов 20 Гц...100 кГц,

ГНЧ – генератор низкой частоты 20 Гц...100 кГц,

ГВЧ – генератор высокой частоты  $465 \pm 30$  кГц,

АВМ, АВМ2, АВ0 – ампервольтметр,

МВ – милливольтметр 0...500 мВ,

ЧМ – частотомер 0...100 кГц.

Лабораторный стенд 87Л-01 потребляет мощность не более 50 В·А, питается от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжения 220В. Имеет массу 50 кг, габаритные размеры 970×237×478 мм.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА.....	4
1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	4
Базовые понятия .....	4
Электрические цепи .....	9
Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда» .....	12
Законы Ома и Кирхгофа .....	14
Сложные цепи постоянного тока.....	15
Расчет цепей переменного тока .....	17
Измерение ёмкостей и индуктивностей пассивных элементов цепи переменного тока.....	21
Трёхфазные электрические цепи .....	25
Переходные процессы в электрических цепях.....	29
Трансформаторы.....	29
1.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ .....	34
1.2.1. Лабораторная работа № 1. Исследование пассивных линейных двухполюсников в цепях постоянного тока .....	34
1.2.2. Лабораторная работа № 2. Определение параметров пассивных элементов в цепях переменного тока .....	37
1.2.3. Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы сложных цепей постоянного тока.....	41
1.2.4. Лабораторная работа № 4. Исследование трёхфазной электрической цепи при присоединении приемников звездой .....	44
1.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	48
1.3.1. Практическое занятие № 1. Параллельно-последовательное соединение сопротивлений .....	48
1.3.2. Практическое занятие № 2. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Потенциальные диаграммы.....	50
1.3.3. Практическое занятие № 3. Законы Ома и Кирхгофа .....	53
1.3.4. Практическое занятие № 4. Расчет цепей переменного тока .....	57
1.3.5. Практическое занятие № 5. Расчет сложных цепей .....	62
1.3.6. Практическое занятие № 6. Трёхфазные электрические цепи .....	65
1.3.7. Практическое занятие № 7. Переходные процессы в электрических цепях .....	70
1.3.8. Практическое занятие № 8. Трансформаторы.....	75
1.4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ .....	80
1.4.1. Расчетно-графическое задание по электротехнике № 1. Расчет цепей постоянного тока .....	80
1.4.2. Расчетно-графическое задание по электротехнике № 2. Расчет параллельных цепей с одним гармоническим источником .....	81
1.5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА .....	83
1.5.1. Вопросы для самостоятельного изучения .....	83

1.5.2. Контрольные задачи.....	84
<b>РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОНИКА.....</b>	<b>89</b>
<b>2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....</b>	<b>89</b>
Диоды.....	89
Вторичные источники питания.....	89
Моделирование работы выпрямительных устройств.....	92
Оптические приборы.....	95
Фотодиоды и оптроны.....	100
Биполярные транзисторы.....	108
Полевые транзисторы.....	109
Расчет охлаждения транзисторов.....	111
Усилители.....	114
<b>2.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....</b>	<b>116</b>
2.2.1. Лабораторная работа № 1. Исследование однофазных выпрямительных устройств.....	116
2.2.2. Лабораторная работа № 2. Исследование светодиодов.....	121
2.2.3. Лабораторная работа № 3. Исследование оптической пары.....	123
2.2.4. Лабораторная работа № 4. Исследование усилителя напряжения.....	125
<b>2.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....</b>	<b>130</b>
2.3.1. Практическое занятие № 1. Расчет светодиодов.....	130
2.3.2. Практическое занятие № 2. Расчет параметров диодов.....	134
2.3.3. Практическое занятие № 3. Расчет параметров биполярных транзисторов.....	137
2.3.4. Практическое занятие № 4. Расчет параметров полевых транзисторов.....	142
2.3.5. Практическое занятие № 5. Расчет радиатора.....	145
2.3.6. Практическое занятие № 6. Моделирование работы сглаживающего емкостного фильтра в цепи переменного тока.....	148
2.3.7. Практическое занятие № 7. Проектирование выпрямительного устройства с фильтром.....	152
<b>2.4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА.....</b>	<b>160</b>
2.4.1. Вопросы для самостоятельного изучения.....	160
2.4.2. Контрольные задачи.....	161
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>164</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>165</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Краткие сведения о лабораторном стенде УИЛС-1.....</b>	<b>168</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Цифровой мультиметр VC9808.....</b>	<b>170</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Краткие сведения о лабораторном стенде 87Л-01.....</b>	<b>173</b>







# Книги почтой

Заказ можно сделать на сайте издательства

[www.infra-e.ru](http://www.infra-e.ru)

№ п/п	Наименование книги
1	Бесконтактные устройства пуска и торможения электродвигателей
2	Внедрение современных технологий на ТЭС
3	Внутренние электромонтажные работы
4	Вторичные энергоресурсы и энергосберегающие технологии в промышленности
5	Волоконно-оптическая техника. <i>Практическое руководство</i>
6	Волоконно-оптические линии связи и их защита от внешних влияний
7	Вопросы электробезопасности при эксплуатации воздушных линий электропередачи
8	Выпрямительные устройства в силовой электронике
9	Главные электрические схемы и схемы собственных нужд электростанций и подстанций
10	Диагностика и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики
11	Задачи надёжности современного электроснабжения
12	Защита электрических сетей напряжением 380 В при однофазных коротких замыканиях
13	Источники вторичного электропитания
14	Источники и системы теплоснабжения
15	Качество электроэнергии и энергоэффективность систем электроснабжения потребителей
16	Классическая электродинамика
17	Конструирование источников питания усилителей мощности звуковой частоты
18	Котельные установки
19	Котельные установки ( <i>Бойко Е. А.</i> )
20	Котельные установки и парогенераторы
21	Методы проектирования электронных устройств
22	Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети
23	Механика жидкости и газа в промышленной теплотехнике и теплоэнергетике
24	Микроконтроллеры для систем автоматики
25	Микропроцессорные реле защиты. <i>Устройство, проблемы, перспективы</i>
26	Микроконтроллеры и микропроцессорные устройства в электроэнергетике
27	Моделирование и оптимизация промышленных теплоэнергетических установок
28	Начало электроэнергетики Российской Империи и СССР, как проблема техноценоза
29	Надёжность цифровых устройств релейной защиты. <i>Показатели. Требования. Оценки</i>

30	Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса
31	Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов
32	Обслуживание электрических подстанций
33	Обслуживание электрических подстанций: теория и практика
34	Общая энергетика
35	Основы классической электродинамики
36	Основы микросенсорики
37	Основы рационального потребления электроэнергии
38	Основы электроники
39	Основы электротехники и электроники. Практикум
40	Поиск дефектов в релейно-контакторных схемах
41	Проектирование силовых высокочастотных трансформаторов
42	Производство гибридных интегральных схем
43	Релейная защита в системах электроснабжения напряжением 0,38–110 кВ
44	Релейная защита электроэнергетических систем
45	Сжигание и термическая переработка твердых топлив
46	Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем
47	Справочник цехового энергетика
48	Справочник инженера по КИПиА
49	Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей
50	Термодинамический и эксергетический анализ в теплотехнологии
51	Тепловые двигатели и нагнетатели
52	Теоретические основы электротехники
53	Технологические процессы в микро- и нанoeлектронике
54	Устройства электропитания релейной защиты. <i>Проблемы и решения</i>
55	Устройство и конструкционные характеристики паротурбинных энергетических установок
56	Устройство и конструкционные характеристики энергетических котельных агрегатов
57	Уязвимости микропроцессорных реле защиты. <i>Проблемы и решения</i>
58	Цифровое моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электрических системах
59	Электробезопасность. <i>Теория и практика</i>
60	Электродинамика, радиоволновые процессы и технологии
61	Электроника
62	Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него
63	Электроснабжение промышленных предприятий
64	Электротехническое материаловедение
65	Электротехнологические установки
66	Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций
67	Электрооборудование энергетических систем
68	Системы интеллектуального электропривода переменного тока с релейными регуляторами и адаптивными корректирующими устройствами

Учебное издание

Дмитрий Петрович Андрианов  
Валерий Иванович Афонин  
Норайр Петикович Бадалян

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.  
ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

ISBN 978-5-9729-0810-3



Подписано в печать 30.06.2021  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Таймс».

Издательство «Инфра-Инженерия»  
160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63  
Тел.: 8 (800) 250-66-01  
E-mail: [booking@infra-e.ru](mailto:booking@infra-e.ru)  
<https://infra-e.ru>

Издательство приглашает  
к сотрудничеству авторов  
научно-технической литературы