

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Д. П. АНДРИАНОВ В. И. АФОНИН
Н. П. БАДАЛЯН

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-практическое пособие



Владимир 2018

УДК 621.3
ББК 31.2+32.85
А65

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
зав. кафедрой электротехники Ковровской государственной
технологической академии имени В. А. Дегтярева
Е. А. Чащин

Кандидат технических наук
доцент кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. В. Евграфов

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Андрианов, Д. П. Электротехника и электроника : учеб.-практ.
А65 пособие / Д. П. Андрианов, В. И. Афонин, Н. П. Бадалян ; Владим. гос.
ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. –
144 с. – ISBN 978-5-9984-0847-2.

Разработано в соответствии с программой курса «Электротехника и электроника» для неэлектротехнических специальностей высших учебных заведений. Изложены материалы по проведению лабораторных работ, практических занятий и самостоятельной работе при изучении дисциплины.

Предназначено для студентов дневной и контрактно-заочной форм обучения и составлено применительно к действующему учебному плану программы подготовки бакалавров направлений 22.03.01 – Материаловедение и технологии материалов, 27.03.04 – Управление в технических системах, 10.03.01 – Информационная безопасность, 10.05.04 – Информационно-аналитические системы безопасности, 20.03.01 – Техносферная безопасность, 23.03.01 – Технология транспортных процессов, 15.03.06 – Мехатроника и робототехника, 27.03.05 – Инноватика, 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 38. Ил. 122. Библиогр.: 26 назв.

УДК 621.3
ББК 31.2+32.85

ISBN 978-5-9984-0847-2

© ВлГУ, 2018

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.

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 – на 2 часа. При проведении занятий предпочтительно использование математического пакета MathCad. В книге представлены примеры решения задач с помощью пакета MathCad.

Теоретический материал к каждому разделу содержит краткие базисные сведения, позволяющие уяснить физический смысл процессов, протекающих в электрических и электронных элементах, устройствах и схемах.

Решение предлагаемых задач развивает 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 библиографическом списке приведены ссылки на электронные ресурсы как дополнительный материал для самостоятельного изучения.

РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Базовые понятия

Сила тока – количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника за единицу времени. Сила тока в 1 ампер (А) соответствует заряду в 1 кулон, протекающему через поперечное сечение за 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 $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

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).

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.

Проводимость – величина, обратная сопротивлению. Проводимость одного сименса (См) равна величине, обратной 1 Ом.

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

Работа электрического тока, Дж,

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

Мощность электрического тока, Вт,

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

Электрические цепи

Электрическая цепь – совокупность генерирующих, приемных и вспомогательных устройств, соединенных между собой электрическими проводами.

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.

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.

Активные элементы электрической цепи – те, в которых индуцируется ЭДС. Все прочие электроприемники и соединительные провода считаются пассивными элементами, где электрическая энергия рассеивается или накапливается. Примеры топологических элементов схемы приведены в табл. 1.1.

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.

Таблица 1.1

Топологические элементы схемы	Пример
Ветвь – участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток	
Узел – место соединения трех или большего числа ветвей	
Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям	<p data-bbox="805 952 1356 1025">Схема электрической цепи с шестью ветвями и тремя узлами</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 data-bbox="774 1272 1316 1310">Схема электрической цепи Граф</p>
Дерево графа – любая совокупность ветвей графа, соединяющих все узлы графа без образования контуров	

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. Для упрощения сложной электрической цепи применяют методы преобразований. Эквивалентное сопротивление в зависимости от типа соединений сопротивлений рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№ П/П	Тип соединения	Обобщенная схема	Формула
1	Последовательное		$R_{\text{э}} = \sum_{i=1}^n R_i$
2	Параллельное		$\frac{1}{R_{\text{э}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_j};$ $\frac{1}{R_{\text{э}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_j}}$
3	Смешанное		$R_{\text{э}} = \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_j}}$

Сумма сопротивлений последовательно соединенных участков цепи называется эквивалентным сопротивлением, или общим сопротивлением цепи. Для участка цепи с параллельным соединением сопротивлений $g_{\text{э}} = \frac{1}{R_{\text{э}}}$ – эквивалентная проводимость электрической цепи, $g_i = \frac{1}{R_i}$ – проводимость ветви электрической цепи.

Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда»

Типовые схемы соединений «звезда» и «треугольник» приведены на рис. 1.1.

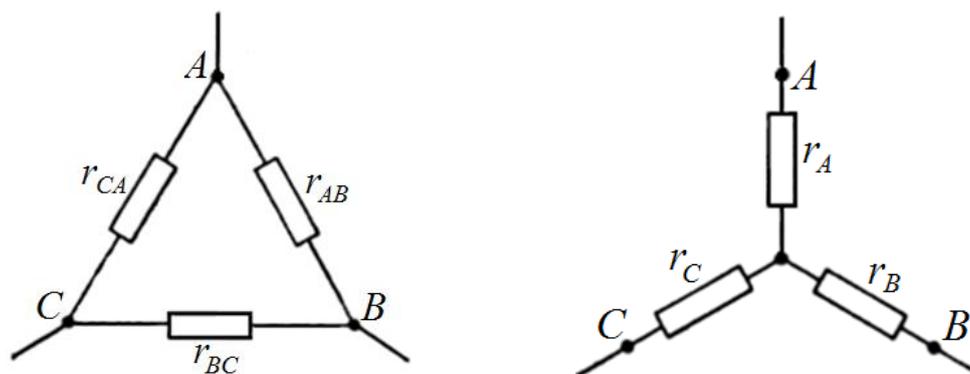


Рис. 1.1. Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда»

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

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

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

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

Последовательность эквивалентных преобразований схем представлена на рис. 1.2.

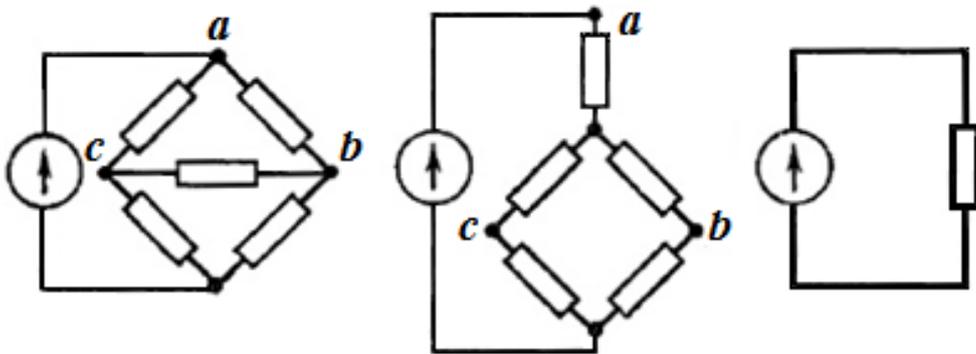


Рис. 1.2. Эквивалентные преобразования электрических схем

На практике используется схема, объединяющая соединения сопротивлений по схемам «звезда» и «треугольник» (рис. 1.3).

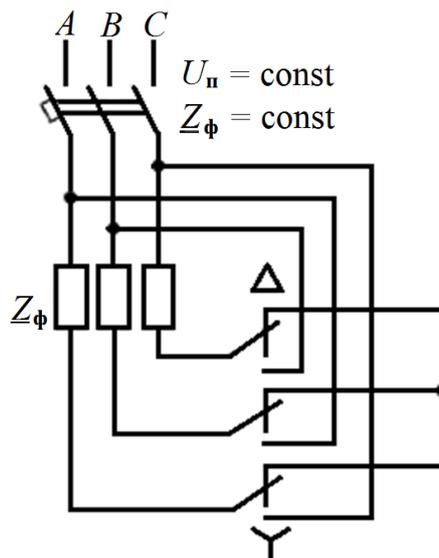
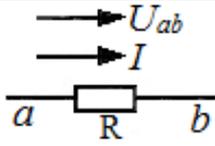
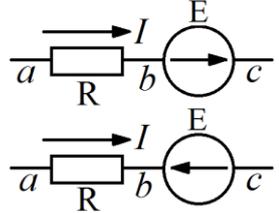


Рис. 1.3. Объединенная схема «треугольник – звезда»

Законы Ома и Кирхгофа

Закон Ома для участка цепи в зависимости от наличия ЭДС может иметь разную формулировку (табл. 1.3).

Таблица 1.3

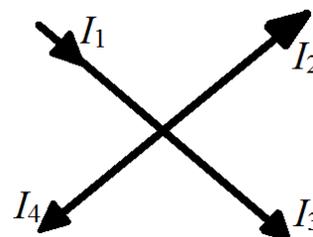
№ п/п	Участок цепи	Формулировка закона Ома	Схема
1	Не содержит ЭДС	$U_{ab} = IR,$ $I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}$	
2	Содержит ЭДС	$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{U_{ac} + E}{R}$ $I = \frac{\varphi_a - \varphi_c - E}{R} = \frac{U_{ac} - E}{R}$	
3	Обобщенный	$I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

Первый закон Кирхгофа (баланс токов): алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю $I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$ 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.



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

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. Рассчитать электрическую цепь

означает определить токи в ветвях при известных сопротивлениях всех элементов и источников. Если направление тока в источнике электрической энергии совпадает с ЭДС, то это означает, что источник отдает энергию в цепь и работает в режиме генератора.

На практике применяются следующие методы расчета сложных электрических цепей:

- по уравнениям, составленным по законам Кирхгофа;
- на основе принципа наложения;
- эквивалентного генератора;
- узловых потенциалов;
- метод контурных токов.

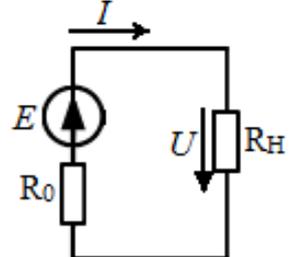
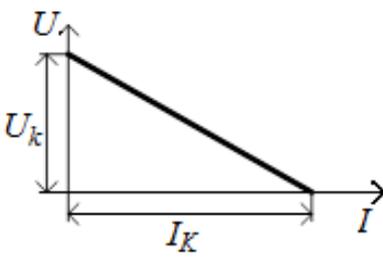
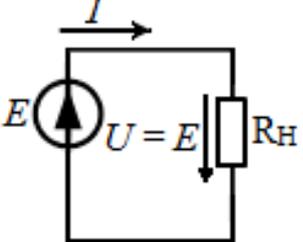
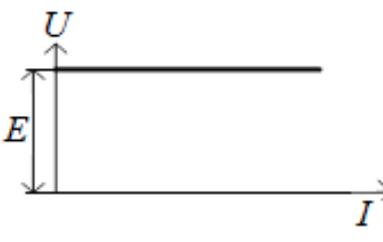
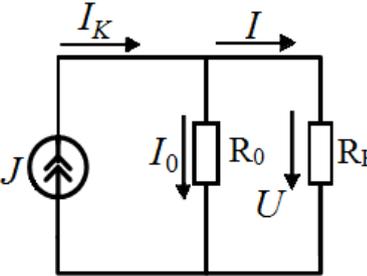
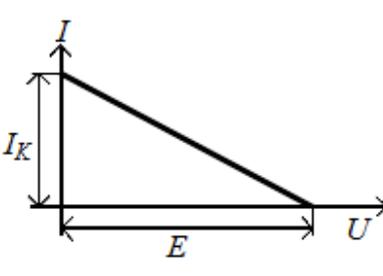
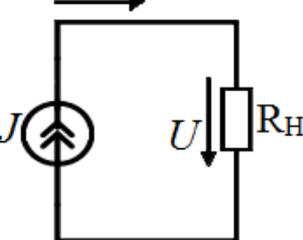
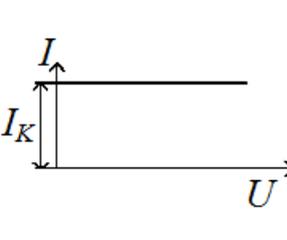
Система алгебраических уравнений, описывающих сложную электрическую цепь, включает в себя уравнения для баланса токов в узлах по первому закону Кирхгофа (количество уравнений меньше числа узлов на единицу) и уравнения для баланса падений напряжений замкнутых контуров по второму закону Кирхгофа (количество уравнений в сумме с уравнениями по первому закону Кирхгофа равно числу неизвестных).

В общем случае электрическая цепь имеет p ветвей и q узлов. Так как неизвестными являются токи в ветвях, то число неизвестных равно p , для нахождения которых необходимо иметь систему из p уравнений.

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. По второму закону Кирхгофа можно записать столько уравнений, сколько можно выделить замкнутых контуров в цепи. Независимый контур такой, в который входит хотя бы одна ветвь, не вошедшая в другие контуры. Число независимых контуров и независимых уравнений $n = p - q + 1$ зависит от конфигурации схемы.

По законам Кирхгофа можно записать $(q - 1) + (p - q + 1) = p$ независимых уравнений. Решив такую систему уравнений, можно найти все токи в ветвях. Примеры эквивалентных схем источников электрической энергии представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Источник энергии	Эквивалентная схема	Внешняя вольт-амперная характеристика
Источник ЭДС характеризуется ЭДС E и внутренним электрическим сопротивлением R_0		
Идеальный источник ЭДС 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

Периодический ток – ток, для которого выполняется равенство $I(t) = I(t + T)$, где T – постоянный промежуток времени (период).

Простейшим переменным током будет гармоническая синусоидальная функция. 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; Ψ – фаза гармонического тока, рад;

Частота – величина, обратная периоду, $f = \frac{1}{T}$ Гц.

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

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

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

Заряд конденсатора

$$q = UC = U_{\max} C \cos(\omega t),$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -U_{\max} C \omega \sin(\omega t),$$

$$I_{\max} = U_{\max} C \omega.$$

$$\text{Емкостное сопротивление } X_c = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \frac{1}{C \omega}.$$

Катушка индуктивности в цепи переменного тока. При расчете идеальной катушки индуктивности ее активным сопротивлением можно пренебречь. ЭДС самоиндукции $-L \frac{di}{dt} = U_{\max} \cos(\omega t)$.

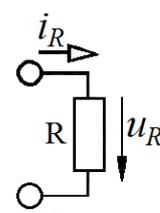
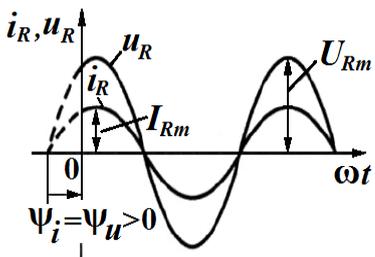
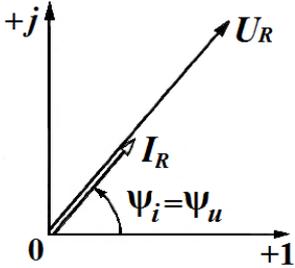
После интегрирования

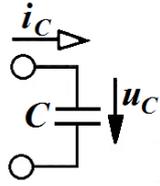
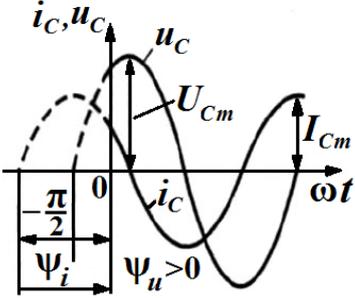
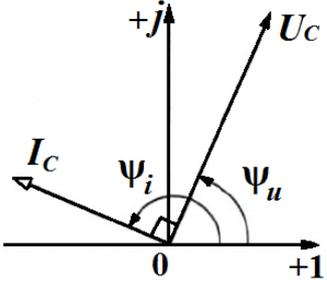
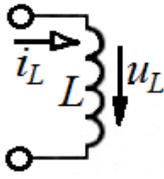
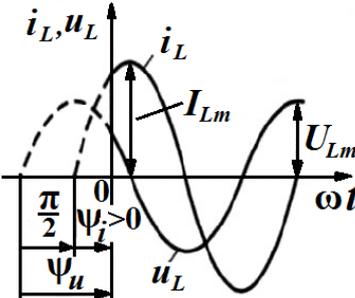
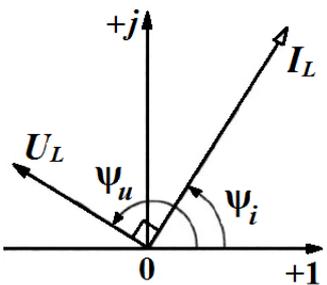
$$i = \left(\frac{U_{\max}}{\omega L} \right) \sin(\omega t) = \left(\frac{U_{\max}}{\omega L} \right) \cos\left(\frac{\omega t - \pi}{2} \right),$$

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

Сила тока в идеальной катушке индуктивности отстает по фазе на $\pi/2$ от приложенного напряжения. В сводной табл. 1.5 приведены графики изменения напряжения и силы тока и соответствующие им векторные диаграммы для вариантов протекания переменного электрического тока через резистор, ёмкость и индуктивность.

Таблица 1.5

Элемент	Схема	График	Диаграмма
Резистор			

Элемент	Схема	График	Диаграмма
Ёмкость			
Индуктивность			

Измерение емкостей и индуктивностей пассивных элементов цепи переменного тока

Для измерения емкостей и индуктивностей пассивных элементов цепи переменного тока используют *прямые* (мостовые) и *косвенные* (использование амперметра и вольтметра) методы измерения. Диапазон измеряемых емкостей – от пикофарад до сотен микрофарад, индуктивностей – от сотых долей микрогенри (высокочастотные цепи) до сотен и тысяч генри. Метод вольтметра-амперметра (косвенный) применяется для измерения сравнительно больших ёмкостей и индуктивностей от источника низкой частоты 50 ... 1000 Гц.

Для R-C-цепи переменного тока векторная диаграмма сопротивлений представляет собой прямоугольный треугольник, катетами которого являются вектор сопротивления резистора R и вектор сопротивления емкости \underline{X}_C

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

где $\underline{X}_C = 1 / (j\omega C)$ – сопротивление конденсатора, Ом; j – мнимая единица; ω – круговая частота, рад/с; C – ёмкость, Ф.

С учетом показаний приборов имеем $\frac{U}{I} = R + \frac{1}{j\omega C}$, где U и I – показания вольтметра и амперметра.

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

измерения емкостей (метод вольтметра-амперметра) (рис. 1.4).

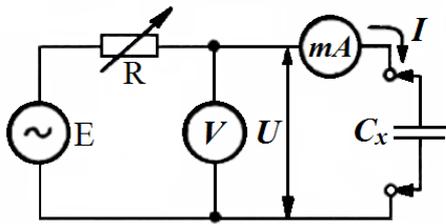


Рис. 1.4. Схема измерения ёмкости

Для R-L-цепи переменного тока векторная диаграмма сопротивлений представляет собой прямоугольный треугольник, катетами которого будет 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; U и I – показания вольтметра и амперметра соответственно; ω – круговая частота, рад/с; L – индуктивность, Гн.

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

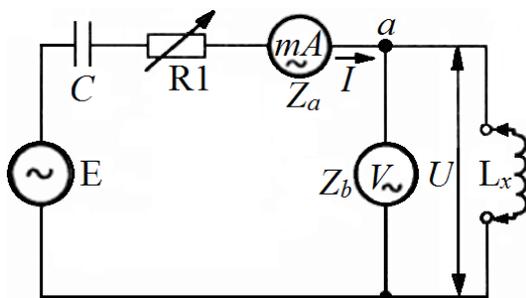


Рис. 1.5. Схема измерения индуктивности

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

Схема косвенного метода измерения индуктивностей (метод вольтметра-амперметра) приведена на рис. 1.5.

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.

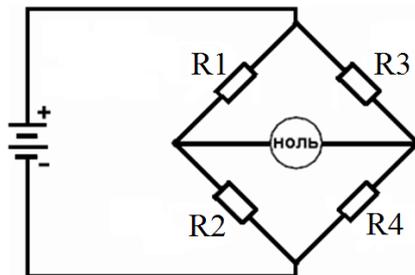


Рис. 1.6. Схема измерения с помощью моста сопротивлений

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. 1.6).

Когда мост находится в условиях баланса (индикатор показывает нулевой сигнал), отношение определяется как $\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4}$.

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.

Мостовые схемы балансируются регулированием калиброванных реактивных элементов (L_s или C_s) (рис. 1.7). 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).

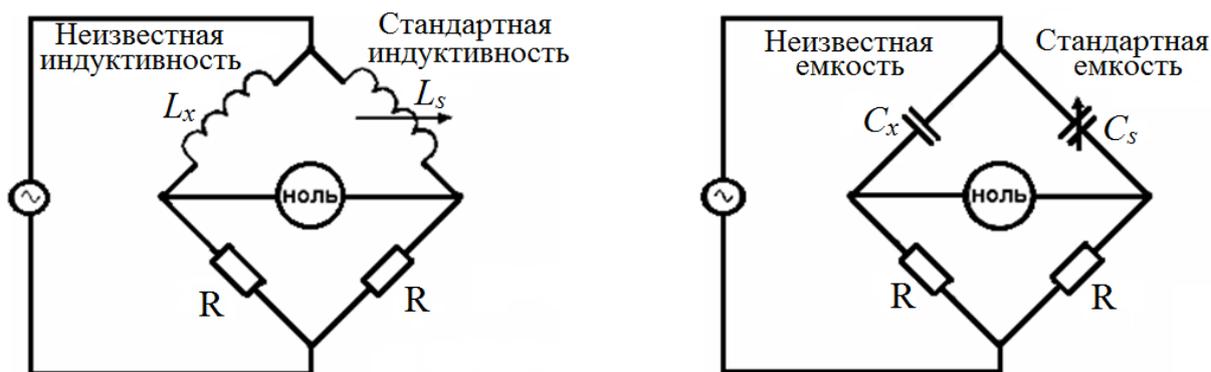


Рис. 1.7. Измерение симметричным мостом неизвестной индуктивности (емкости) путем сравнения ее со стандартной

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. 1.8). Все конденсаторы имеют некоторое внутреннее сопротивление, активное или эквивалентное (из-за потерь в диэлектрике).

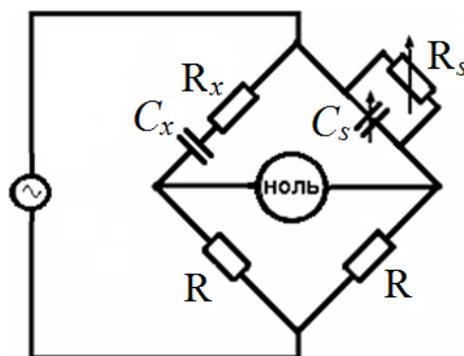


Рис. 1.8. Мост Вина

Мостовые схемы нашли широкое применение в измерительных приборах. Требуемая схема измерений формируется с помощью сложной системы коммутаций (рис. 1.9).

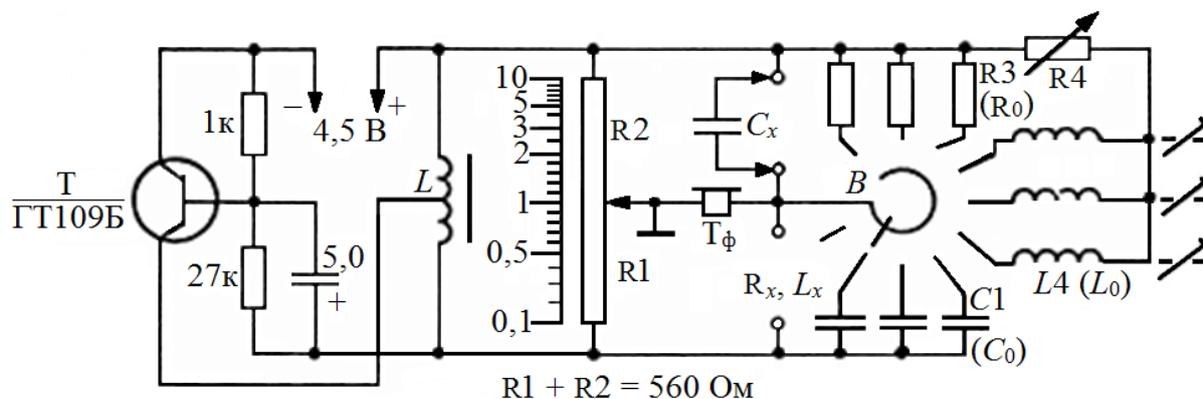


Рис. 1.9. Схема универсального реохордного моста для измерения сопротивлений, емкостей и индуктивностей

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

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. Фаза – отдельная электрическая цепь, входящая в состав трёхфазной электрической цепи, в которой может существовать один из токов трёхфазной 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 трёхфазной цепи.

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.

На практике используют трехфазные электрические цепи $\frac{U_{л}}{U_{ф}} = \frac{220}{127}, \frac{380}{220}, \frac{660}{380}$ В. Трехфазная система ЭДС (токов, напряжений) – совокупность ЭДС (токов, напряжений) в трехфазной цепи. Общепринятые обозначения начал и концов фаз для источников и приёмников приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Фаза	Источник		Приемник	
	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>A</i>	<i>A</i>	<i>X</i>	<i>a</i>	<i>x</i>
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Y</i>	<i>b</i>	<i>y</i>
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Z</i>	<i>c</i>	<i>z</i>

Симметричная система ЭДС (токов, напряжений) – амплитудные (действующие) значения ЭДС (токов, напряжений) во всех фазах равны и сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол $2\pi/3$. Выражения для ЭДС трехфазной симметричной системы приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

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

Трехфазные симметричные системы ЭДС удовлетворяют уравнениям $e_A + e_B + e_C = 0$; $E_A + E_B + E_C = 0$. 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.

Связанная трехфазная цепь – цепь, в которой все фазы электрически соединены. Основными способами соединения фаз считаются соединения звездой (рис. 1.10) и треугольником (рис. 1.11). Основные параметры трехфазных цепей связаны между собой в комплексной форме (табл. 1.8).

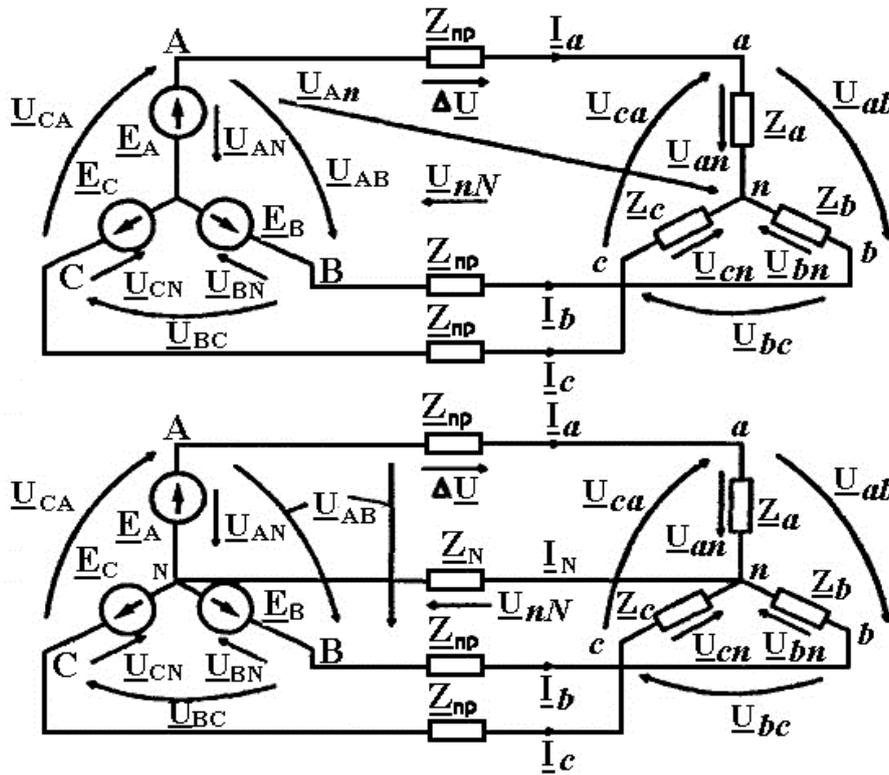


Рис. 1.10. Соединение фаз звездой без нейтрали и с нейтралью

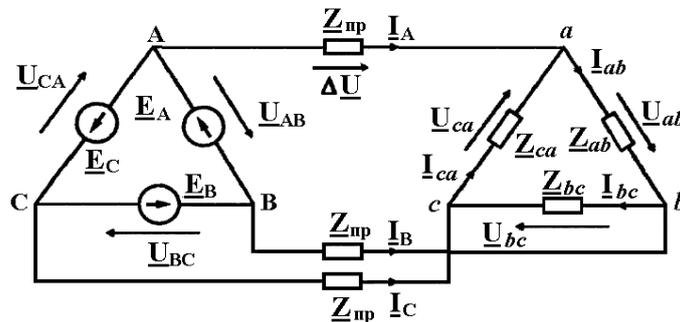


Рис. 1.11. Соединение фаз треугольником

Таблица 1.8

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

Зависимости, связывающие линейные и фазные параметры для симметричных систем, приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Система	Связь между токами	Связь между напряжениями
$\text{Y} - \text{Y}$	$I_{\text{Л}} = I_{\text{Ф}}$	$U_{\text{Л}} = \sqrt{3}U_{\text{Ф}}$
$\Delta - \Delta$	$I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\text{Ф}}$	$U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}$

В трехфазной цепи полную, активную и реактивную мощности определяют, как и в однофазных цепях. Формулы для определения мощности трехфазного источника или приемника приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

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

Переходные процессы в электрических цепях

Переходный процесс в электрической цепи – изменение энергетического состояния электрической цепи при переходе от одного установившегося состояния к другому вследствие инерционности ее индуктивных и емкостных элементов.

Переходный процесс в электрических цепях является динамическим и описывается дифференциальными уравнениями. 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 емкостном элементах не могут изменяться скачком. Для R-L-C-цепи режим синусоидального тока описывается уравнением $U = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_m \sin \omega t$.

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 служит таблица значений искомых величин, получаемая за счет применения специальных вычислительных алгоритмов.

Трансформаторы

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. 1.12). Первичная обмотка трансформатора – обмотка трансформатора, включаемая в электрическую сеть переменного тока. Вторичная обмотка трансформатора – обмотка трансформатора, к которой подключают приемники электрической энергии.

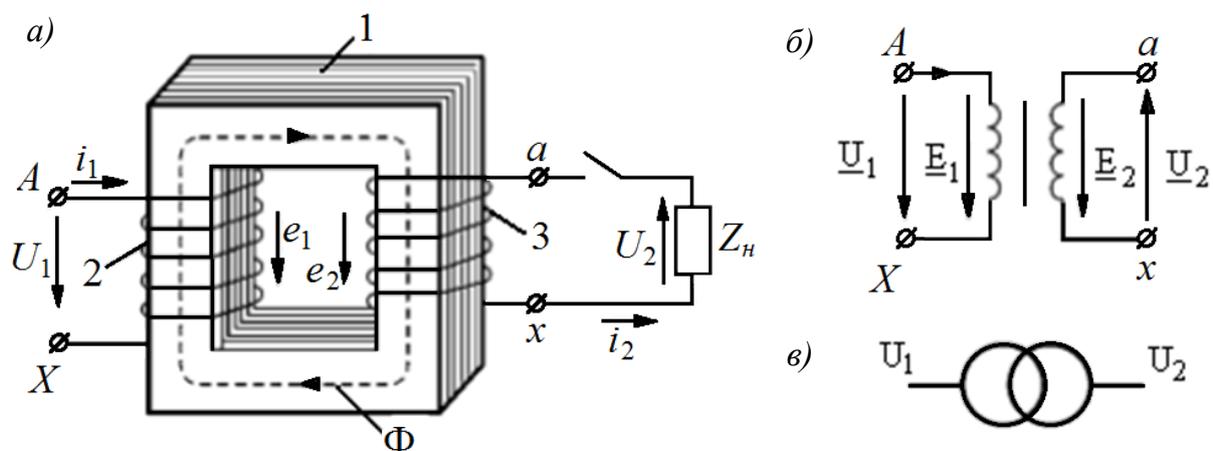


Рис. 1.12. Трансформатор: а – принципиальная схема; б, в – условные обозначения

Номинальные данные трансформатора: полная мощность $S_{\text{НОМ}}$, линейные напряжения первичной $U_{1\text{Л.НОМ}}$ и вторичной $U_{2\text{Л.НОМ}}$ обмоток, частота сети f . Паспортные данные: значения тока холостого хода I_0 в первичной обмотке (процент от $I_{\text{Л.НОМ}}$), напряжение испытательного короткого замыкания U_k (процент от $U_{1\text{Л.НОМ}}$). Для многофазных трансформаторов – схемы соединения обмоток и группа соединения.

Номинальная мощность трансформатора – это его полная мощность. 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 (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Фазность трансформатора	Линейный ток $I_{2\text{Л.НОМ}}$	Фазный ток $I_{2\text{НОМ}}$	Номинальная мощность $S_{\text{НОМ}}$
Однофазный	$\frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}}$	$\frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}}$	$U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}} = U_{1\text{Л.НОМ}} \cdot I_{1\text{Л.НОМ}}$
Трехфазный	$\frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}}$	$\frac{S_{\text{НОМ}}}{3U_{2\text{НОМ}}}$	$3U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{Л.НОМ}} \cdot I_{1\text{Л.НОМ}}$

Для трансформатора характерны ЭДС (табл. 1.12):

- 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 $E_{\text{рас}}$.

Основной магнитный поток $\Phi = \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$

Таблица 1.12

Электродвижущая сила	Первичная обмотка	Вторичная обмотка
Индуцированная	$-w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2}E_1 \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$	$-w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2}E_2 \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$
Действующая E	$4,44 f w_1 \Phi_m$	$4,44 f w_2 \Phi_m$
Рассеивания $E_{\text{рас}}$	$-j X_1 I_1$	$-j X_2 I_2$
Индуктивные сопротивления X	ωL_1	ωL_2

Коэффициент трансформации определяется отношением количества витков обмоток на выходе и входе $n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$. Схема замещения однофазного (одной фазы трехфазного) двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 1.13.

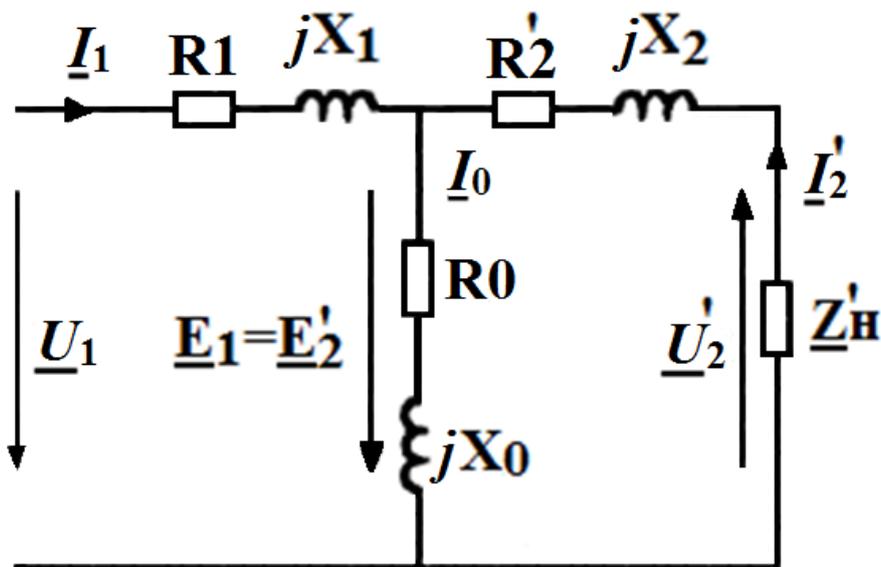


Рис. 1.13. Схема замещения одной фазы трансформатора: R_1 и X_1 – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; $Z_1 = R_1 + jX_1$ – сопротивление первичной обмотки; $Z_2 = R_2 + jX_2$ – сопротивление приведенной вторичной обмотки; R_0 и X_0 – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания; $Z_0 = R_0 + jX_0$ – сопротивление ветви намагничивания

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

$$E_2' = n \cdot E_2 = E_1, \quad U_2' = n \cdot U_2, \quad I_2' = I_2/n,$$

$$R_2' = n^2 \cdot R_2, \quad X_2' = n^2 \cdot X_2, \quad Z_k' = n^2 \cdot Z_k.$$

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.

Уравнения напряжений и токов приведенного трансформатора:

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

$$\underline{U}_2' = -\underline{E}_2' + \underline{I}_2' \underline{Z}_2' = -\underline{E}_2' + \underline{I}_2' (R_2' + jX_2'),$$

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

где I_0 – ток холостого хода; $-I_2' = -1/n I_2$ – составляющая тока I_1 , обусловленная током во вторичной обмотке.

Ток в нагрузке реального и приведенного трансформаторов

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

Коэффициент загрузки трансформатора $B = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}} = \frac{I'_2}{I_{1\text{НОМ}}}$.

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

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

Потеря напряжения в трансформаторе

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

Мощность потерь в режимах

- холостого хода

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

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

- испытательного короткого замыкания

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

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

Мощность потерь в трансформаторе $\Sigma P_n = P_0 + \beta^2 R_k$. КПД транс-

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

Максимальное значение КПД $\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{2P_0}{\beta_{\text{опт}} \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2 + 2P_0}$.

1.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

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, прил. 1).

В работе используется регулируемый источник постоянного напряжения 0-30 В, расположенный в блоке постоянных напряжений. Источник включается тумблером «Вкл./сеть», при этом над ним загорается светодиод. Напряжение регулируют поворотом ручки потенциометра «напряжение».

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

Напряжение измеряют вольтметром, встроенным в блок постоянных напряжений, силу тока – учебным миллиамперметром, а сопротивление наборных элементов – цифровым переносным мультиметром серии VC9808 (прил. 2).

Подготовка к работе

Ознакомиться с методами измерения тока, напряжения приборами непосредственной оценки.

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

Рабочее задание

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

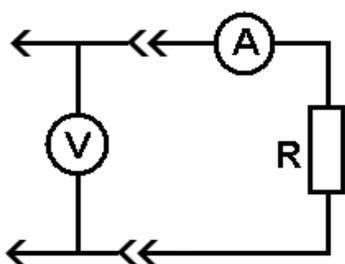


Рис. 1.14. Электрическая схема для определения сопротивления

2. Последовательно собрать схемы (рис. 1.14) с полученными для опытов сопротивлениями и, используя показания вольтметра и амперметра, рассчитать по закону Ома величины сопротивлений.

3. Определить процентное расхождение между величинами сопротивлений, измеренными мультиметром и приборами стенда по формуле

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

где R – величина сопротивления, рассчитанная по закону Ома согласно показаниям миллиамперметра и вольтметра; R_m – величина сопротивления, измеренная мультиметром.

Результаты внести в табл. 1.13.

4. Собрать схему с подключенным линейным двухполюсником из четырех сопротивлений согласно рис. 1.15.

Таблица 1.13

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

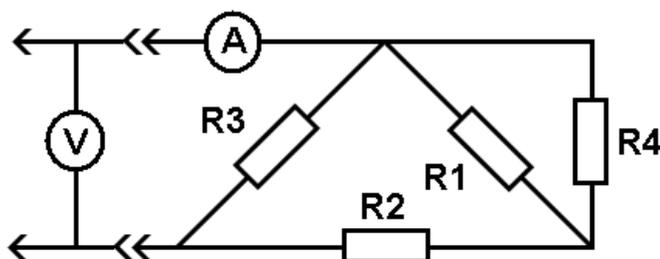


Рис. 1.15. Электрическая схема линейного двухполюсника

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

6. Вывести формулу эквивалентного сопротивления пассивного двухполюсника по схеме рис. 1.15 исходя из значений сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 . Рассчитать эквивалентное сопротивление с учетом измеренных величин сопротивлений по п. 1.

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

8. Собрать схему с подключенным линейным двухполюсником согласно рис. 1.16.

9. Повторить пп. 5 – 7 применительно к схеме рис. 1.16.

10. Снять вольт-амперную характеристику пассивного двухполюсника (см. рис. 1.15):

- принять начальное напряжение на входе 2,5 В, шаг приращения 2,5 В;
- зафиксировать 8 – 9 показаний;
- по полученным данным заполнить табл. 1.14.

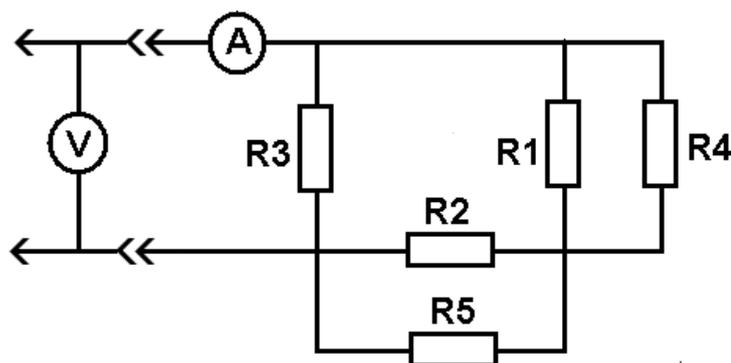


Рис. 1.16. Электрическая схема линейного двухполюсника

Таблица 1.14

$U, \text{В}$							
$I, \text{мА}$							

Построить на графике вольт-амперную характеристику пассивного двухполюсника согласно табл. 1.14.

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?

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. Источник включается тумблером «Вкл./сеть», при этом над ним загорается светодиод. Напряжение регулируется поворотом ручки потенциометра «напряжение». Настройка частоты колебаний переменного тока осуществляется тумблером и ручкой потенциометра «плавно».

Напряжение измеряется вольтметром, встроенным в блок постоянных напряжений, а сила тока – учебным миллиамперметром.

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

Подготовка к работе

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

Освоить методику построения векторных диаграмм для цепей переменного тока.

Рабочее задание

1. Определение емкости 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, а черный – 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. Определение сопротивлений резисторов с помощью мультиметра. Используя цифровой мультиметр, определить величины сопротивлений резисторов, задействованных в исследуемых схемах.

3. 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.

4. Измерение емкости методом вольтметра-амперметра:

- собрать R-C-цепь по схеме рис. 1.17, а;
- снять показания приборов при напряжении источника 10 В;
- построить векторную диаграмму сопротивлений, рассчитать значение емкости C , основываясь на показаниях приборов.

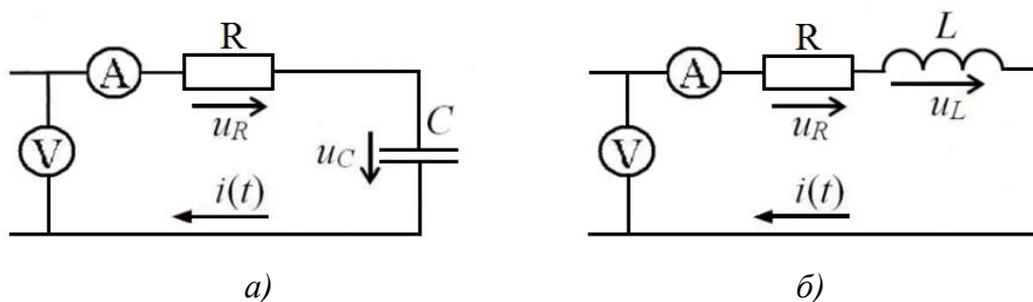


Рис. 1.17. Схемы R-C-цепи (а) и R-L-цепи (б)

5. Измерение индуктивности методом вольтметра-амперметра:

- собрать R-L-цепь по схеме рис. 1.17, б);

- построить векторную диаграмму сопротивлений, рассчитать значение индуктивности L , основываясь на показаниях приборов (напряжение источника 10 В).

6. Измерение емкости конденсатора по мостовой схеме.

Собрать мостовую схему по рис. 1.18.

Полные сопротивления плеч моста (см. рис. 1.18):

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

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

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

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

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.

7. Определение резонансной частоты колебательного контура:

- собрать R-L-C-цепь по схеме рис. 1.19;
- снять показания приборов при напряжении источника 10 В;
- рассчитать резонансную частоту R-L-C-цепи. Построить векторную диаграмму.

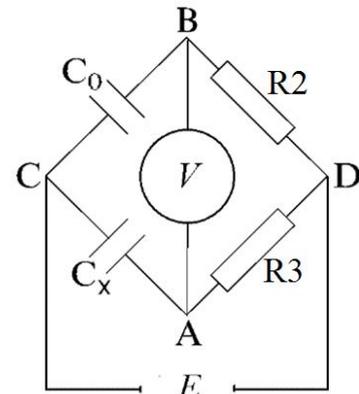


Рис. 1.18. Мостовая схема для измерения конденсаторов: R_3 и R_2 – магазины сопротивлений; C_0 – магазин емкостей; C_x – конденсатор, емкость которого требуется определить

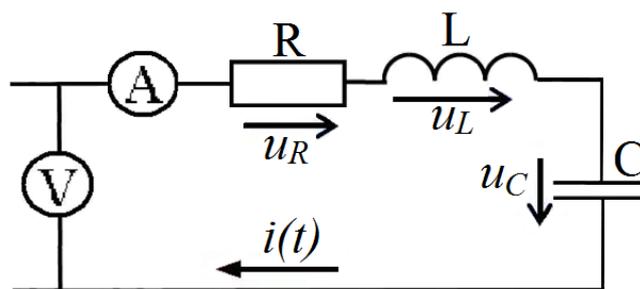


Рис. 1.19. Схема колебательного контура

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- исследуемые схемы (пп. 4 – 7);
- векторные диаграммы комплексных сопротивлений (пп. 1 – 2);

- значения измеренных приборами величин;
- значения рассчитанных величин (пп. 6 – 7);
- цель работы и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется 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?

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 трехконтурные электрические цепи постоянного тока, содержащие 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 содержит три линейных сопротивления (рис. 1.20).

Трехконтурная электрическая цепь содержит пять линейных сопротивлений (рис. 1.21).

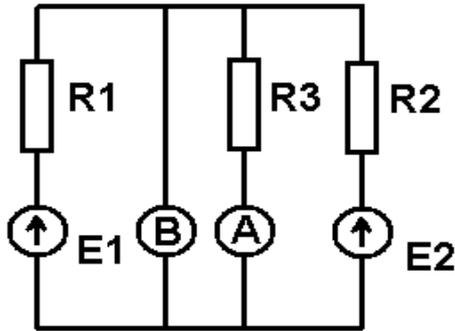


Рис. 1.20. Схема двухконтурной электрической схемы

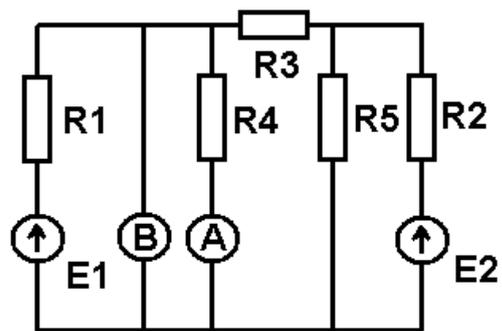


Рис. 1.21. Схема трехконтурной электрической схемы

Сопротивление соединительных проводов принимается равным нулю.

Подготовка к работе

Составить систему алгебраических уравнений по I и II законам Кирхгофа, описывающих электрические цепи, по рис. 1.20 и 1.21.

Задав значения $E_1 = 12 \text{ В}$ и $E_2 = 15 \text{ В}$, рассчитать показания амперметра А и вольтметра В.

Рабочее задание

1. Разместить на наборном поле стенда сопротивления, подсоединить их к измерительным приборам и источникам питания согласно схеме рис. 1.20. Настроить источники питания на $E_1 = 12 \text{ В}$ и $E_2 = 15 \text{ В}$. Снять показания приборов.

2. Сравнить результаты измерений с результатами расчетов для двухконтурной электрической цепи.

3. Разместить на наборном поле стенда сопротивления, соединить необходимыми проводами и подсоединить к измерительным приборам и источникам питания согласно схеме рис. 1.21. Настроить источники питания на $E_1 = 12 \text{ В}$ и $E_2 = 15 \text{ В}$. Снять показания приборов.

4. Сравнить результаты измерений с результатами расчетов для трехконтурной электрической цепи.

5. По согласованию с преподавателем выбрать схему рис. 1.20 или рис. 1.21. Задаться фиксированным значением $E_1 = 10 \text{ В}$. Снять показания приборов при изменении E_2 от 1 до 19 В с шагом 2 В. Заполнить табл. 1.15.

Таблица 1.15

$E_2, В$	1	3	...	17	19
$I, мА$					
$U, В$					

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

6. Задаться фиксированным значением $E_2 = 10 В$. Снять показания приборов при изменении E_1 от 1 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. 1, 3) и уравнения, описывающие их;
- значения измеренных приборами величин;
- графики зависимостей (п. 5);
- цель работы и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под независимым контуром?
2. Какое количество уравнений по I 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 отличие сложных цепей от простых?
7. Сколько узлов и ветвей содержит двухконтурная (трехконтурная) электрическая цепь?

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.

Токи и напряжения измеряют амперметрами и вольтметрами или цифровым переносным мультиметром серии VC9808, а сопротивления наборных элементов – цифровым переносным мультиметром серии VC9808.

Рабочее задание

1. Собрать несвязанную трехфазную электрическую цепь по схеме рис. 1.22. Настройка напряжения фаз блока питания трехфазной цепи осуществляется соответствующими тумблерами блока.

2. Измерить напряжения и токи во всех фазах цепи. Результаты записать в табл. 1.16. Определить величины сопротивлений нагрузки.

Таблица 1.16

Измеряемый параметр	Фаза <i>A</i>	Фаза <i>B</i>	Фаза <i>C</i>
Напряжение, В			
Сила тока, А			
Сопротивление, Ом			

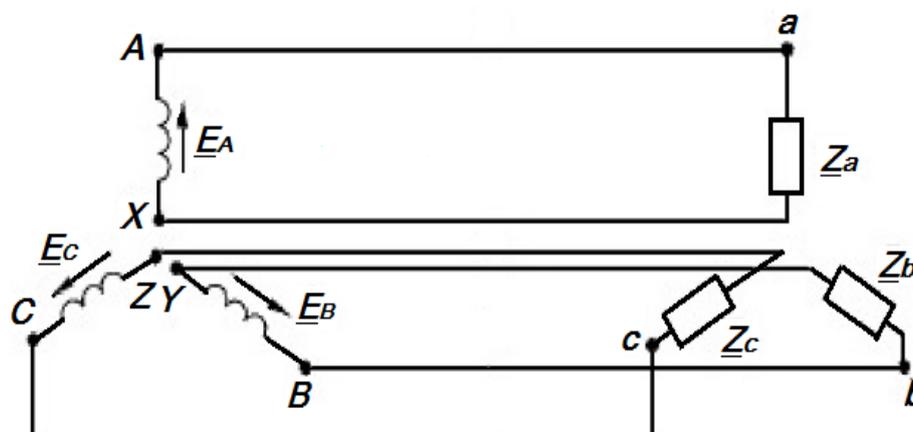


Рис. 1.22. Схема несвязанной трехфазной электрической цепи

3. Собрать связанную трехфазную электрическую цепь с нейтральным проводом по схеме рис. 1.23. Сопротивления Z_a , Z_b , Z_c выбирают из набора сопротивлений комплектующих лабораторного стенда УИЛС-1 исходя из обеспечения симметричной и несимметричной нагрузки. Узел N собирают на наборном поле лабораторного стенда присоединением одного из выходов каждой фазы блока питания трехфазной цепи.

4. Измерить фазные напряжения и токи во всех фазах цепи для вариантов схемы рис. 1.23 с симметричной и несимметричной нагрузкой. Результаты записать в табл. 1.17.

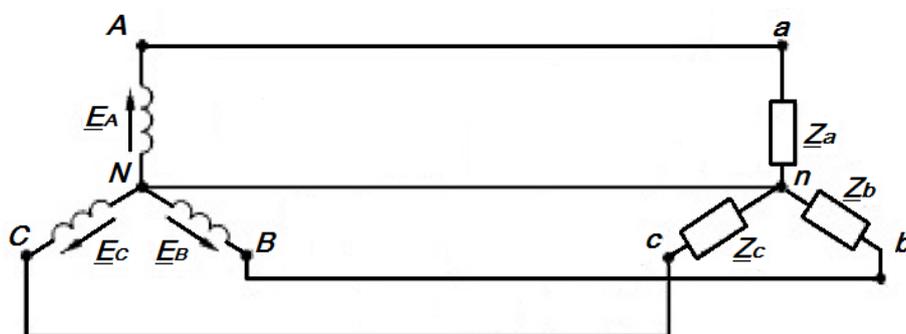


Рис. 1.23. Схема связанной трехфазной электрической цепи

5. Измерить линейные напряжения цепи для вариантов схемы рис. 1.23 с симметричной и несимметричной нагрузкой. Результаты записать в табл. 1.18.

6. Собрать связанную трехфазную электрическую цепь без нейтрального провода по схеме рис. 1.24.

Таблица 1.17

Элементы схемы	Измеряемый параметр	Нагрузка		Сопротивление нагрузки	
		Симмет- ричная	Несиммет- ричная	Симметричной	Несиммет- ричной
Фаза A	Напряжение				
	Сила тока				
Фаза B	Напряжение				
	Сила тока				
Фаза C	Напряжение				
	Сила тока				
Нейтральный провод	Сила тока				

Таблица 1.18

Фаза	Нагрузка	
	Симметричная	Несимметричная
AB		
BC		
AC		

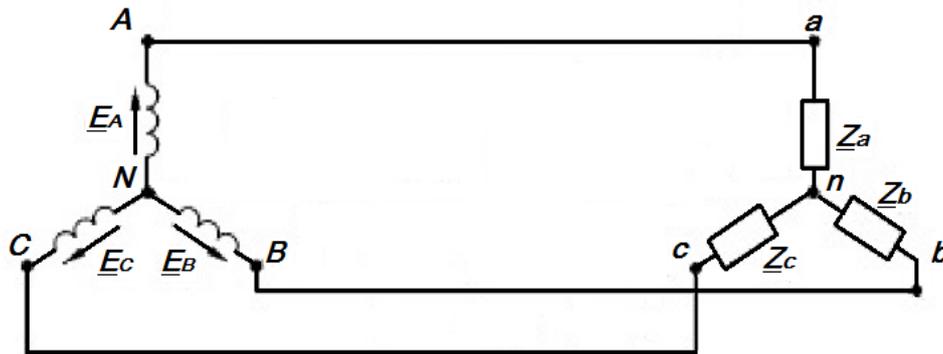


Рис. 1.24. Схема трехфазной электрической цепи без нейтрали

7. Измерить линейные напряжения цепи для вариантов схемы рис. 1.24 с симметричной и несимметричной нагрузкой. Результаты записать в табл. 1.19.

8. Построить векторные диаграммы токов (напряжений) для пп. 3 и 5.

9. Определить мощность трехфазного приемника для пп. 3 и 5.

Таблица 1.19

Фаза	Нагрузка	
	Симметричная	Несимметричная
AB		
BC		
AC		

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 выполняет 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

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

Решение примеров

Задание 1. Рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис. 1.25), если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$.

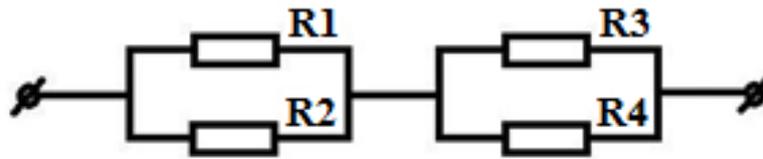


Рис. 1.25. Пример схемы электрической цепи

Решение: участок электрической цепи представляет собой два блока из двух параллельных сопротивлений, соединенных последовательно, соответственно $R_{\Sigma} = R1 \cdot R2 / (R1 + R2) + R3 \cdot R4 / (R3 + R4)$.

Задание 2. Рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи из четырех сопротивлений (табл. 1.20), если $R1 = R2 = R3 = R4 = 10 \text{ Ом}$.

Таблица 1.20

№ п/п	Варианты расчетных схем
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Задание 3. Рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис. 1.26) для случая включения ключа К и его выключения, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10 \text{ Ом}$.

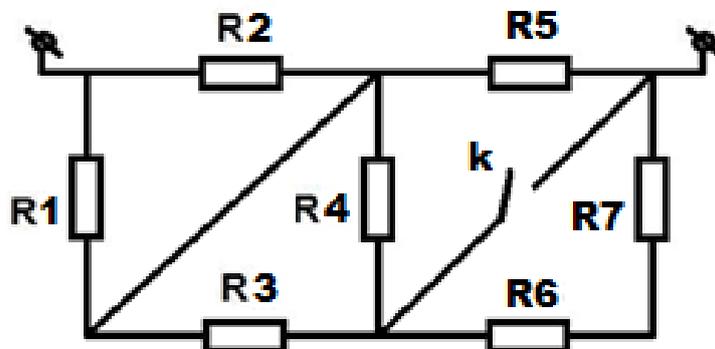


Рис. 1.26. Схема к заданию 3

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 вольт-амперная 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.

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. Повторение 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 1.27), если $E_1 = 8 \text{ В}$; $E_2 = 24 \text{ В}$; $E_3 = 12 \text{ В}$; $R_1 = 4 \text{ Ом}$; $R_2 = 6 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $R_4 = 12 \text{ Ом}$; $R_5 = 8 \text{ Ом}$. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

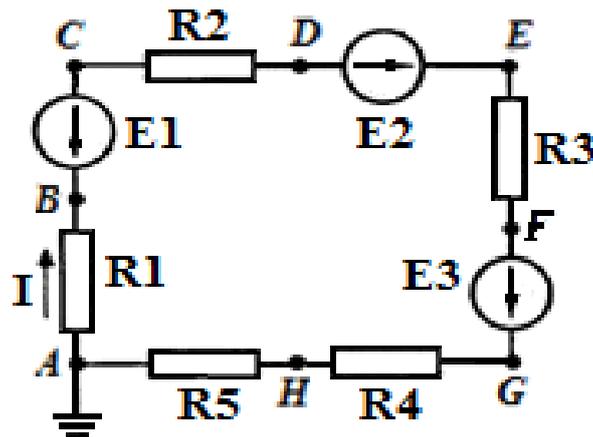


Рис. 1.27. Схема электрической цепи

Построение потенциальной диаграммы начинаем с точки A в обход контура по часовой стрелке (рис. 1.28).

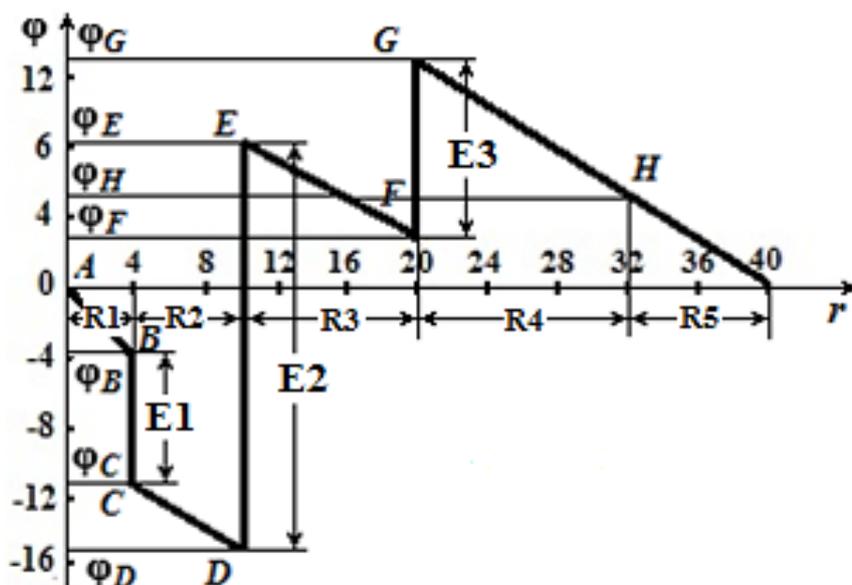


Рис. 1.28. Пример построения потенциальной диаграммы

Расчетные задания

Задание 1. Определить эквивалентное сопротивление цепи, если сопротивления 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. 1.29).

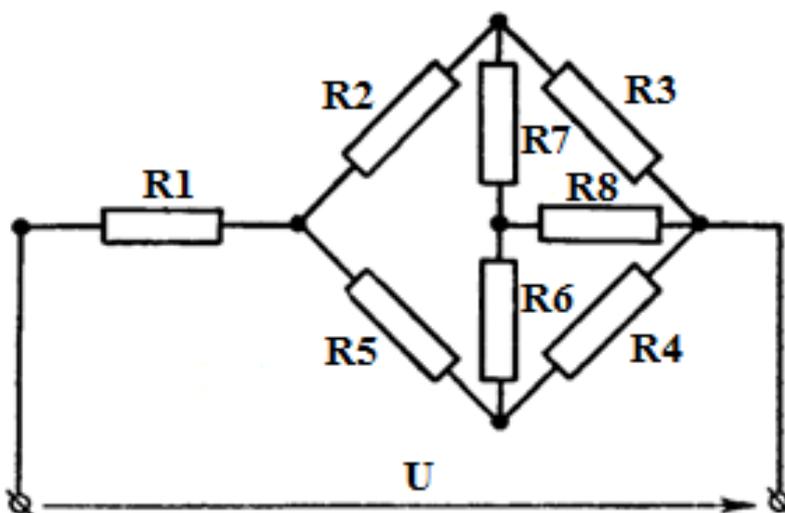


Рис. 1.29. Схема к расчетному заданию 1

Задание 2. Определить ток I_5 в диагонали схемы моста (рис. 1.30), 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 $r_B = 4 \text{ Ом}$.

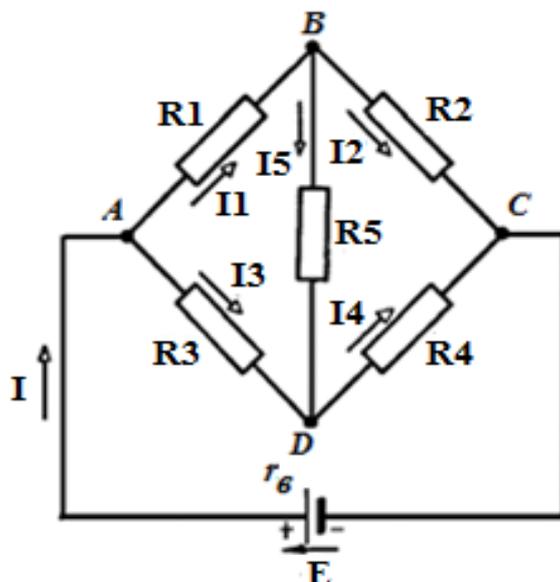


Рис. 1.30. Схема к расчетному заданию 2

Задание 3. Построить потенциальную диаграмму для цепи, если $E_1 = 125 \text{ В}$, $E_2 = 115 \text{ В}$, $R_{B1} = 0,4 \text{ Ом}$, $R_{B2} = 0,2 \text{ Ом}$, $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 2,4 \text{ Ом}$ (рис. 1.31).

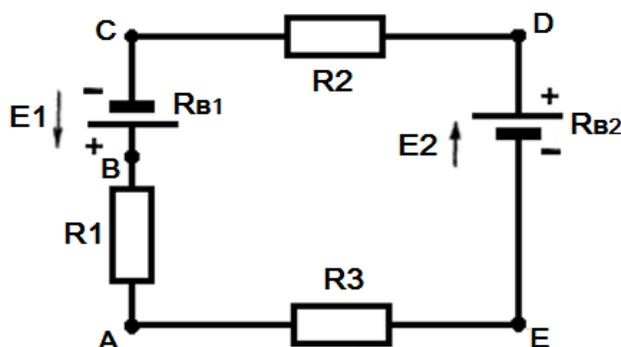


Рис. 1.31. Схема к расчетному заданию 3

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?

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. 1.32), 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.

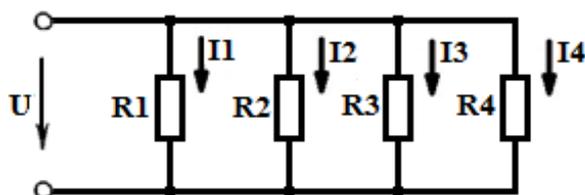


Рис. 1.32. Схема к заданию 1

Задание 2. Найти ток в цепи, если известно, что ЭДС каждого гальванического элемента $E = 1,45$ В, его внутреннее сопротивление $R_B = 1$ Ом, а внешнее $R = 4,8$ Ом (рис. 1.33).

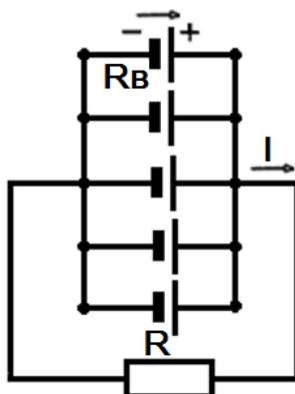


Рис. 1.33. Схема к заданию 2

Задание 3. Определить токи I , I_1 , I_2 в цепи, 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. 1.34).

Задание 4. Электрическая цепь имеет сопротивления $R_1 = 18$ Ом, $R_2 = 30$ Ом, $R_3 = 20$ Ом. Определить токи ветвей, если напряжение $U = 120$ В (рис. 1.35).

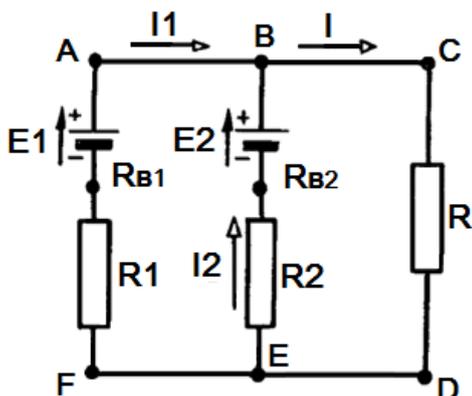


Рис. 1.34. Схема к заданию 3

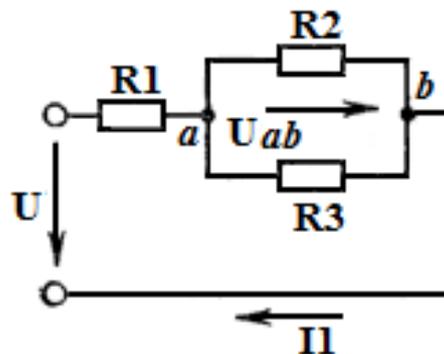


Рис. 1.35. Схема к заданию 4

Задание 5. Найти распределение токов в схеме, если $R_1 = R_2 = 0,5$ Ом, $R_3 = R_4 = 6$ Ом, $R_5 = R_6 = 1$ Ом, $R_7 = 2$ Ом. Напряжение на входе $U = 120$ В (рис. 1.36).

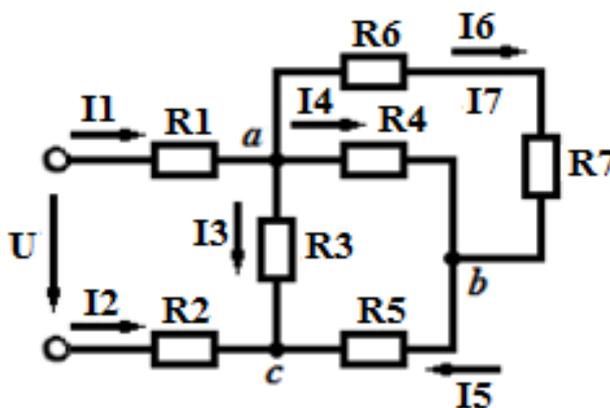


Рис. 1.36. Схема к заданию 5

Контрольные вопросы

1. Как изменится напряжение на участках R_2 и R_3 при замыкании ключа К ($U = \text{const}$) (рис. 1.37)?

2. Если сопротивление R и напряжение U увеличить в два раза, что произойдет с током I (рис. 1.38)?

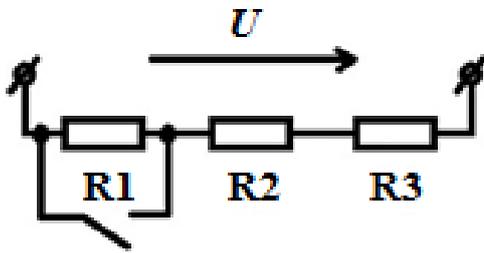


Рис. 1.37. Схема к контрольному вопросу 1

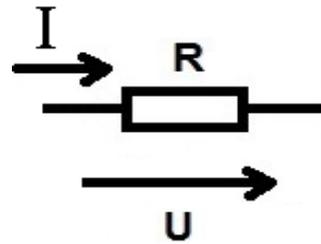


Рис. 1.38. Схема к контрольному вопросу 2

3. Как изменится напряжение на сопротивлении R_1 , если сопротивление R_3 уменьшилось при неизменном напряжении U (рис. 1.39)?
 4. Как изменятся токи I_1 и I_2 , если сопротивление R_3 уменьшится (рис. 1.40)?

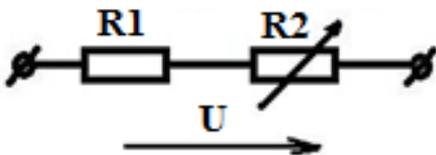


Рис. 1.39. Схема к контрольному вопросу 3

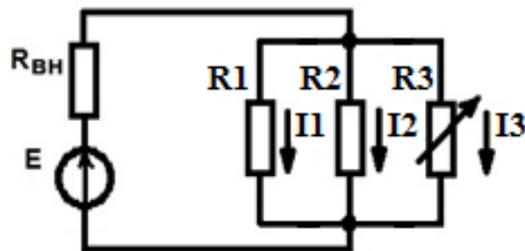


Рис. 1.40. Схема к контрольному вопросу 4

Практическое занятие № 4

Расчет цепей переменного тока

Цель занятия – освоение методов расчета электрических цепей переменного тока.

План проведения занятия

1. Повторение 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. 1.41) приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \cdot \sin \omega \cdot t$. 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. 1.41), система уравнений имеет вид

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

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

$$u_R - u_C = 0.$$

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

Полученной системе уравнений соответствует схема на рис. 1.42.

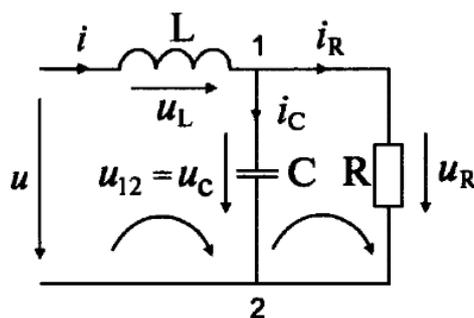


Рис. 1.41. Схема к задаче

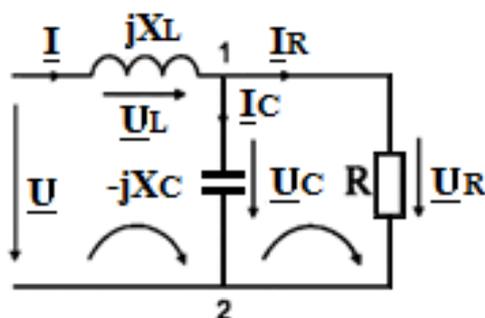


Рис. 1.42. Уточненная схема

Пример расчета электрической цепи переменного тока в математическом пакете MathCad приведен на рис. 1.43.

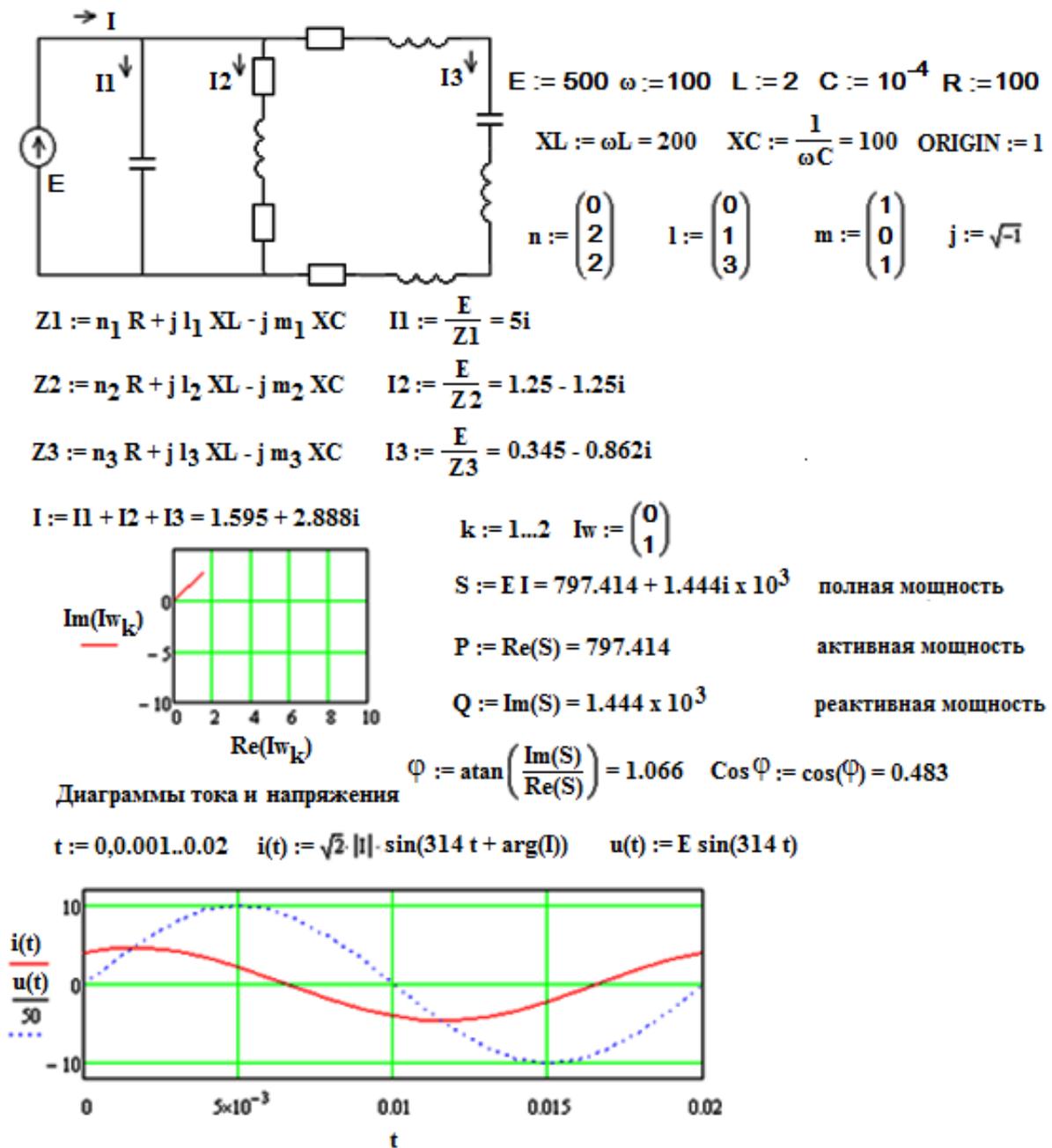


Рис. 1.43. Образец листинга выполнения задания

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для участка цепи с сопротивлением, индуктивностью и емкостью.
2. Как определяется комплексное сопротивление для индуктивности?

3. От каких параметров зависит комплексное сопротивление для емкости?
4. Привести формулу комплексного сопротивления для R-C-цепи.
5. Как определяется комплексное сопротивление для R-L-цепи?
6. Как рассчитать комплексное сопротивление для R-L-C-цепи?

Практическое занятие № 5

Расчет сложных цепей

Цель занятия – освоение методов расчета сложных электрических цепей.

План проведения занятия

1. Повторение 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. 1.44). Известны величины сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 , ЭДС источников напряжения E_1 и E_2 . Определить токи во всех ветвях.

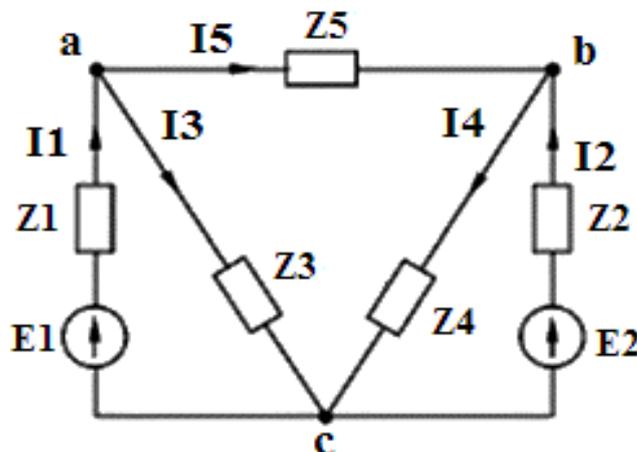


Рис. 1.44. Схема сложной электрической цепи

1. На схеме замещения выделяют узлы a , b , c и независимые контуры I, II, III (рис. 1.45).

2. Составляют систему 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) составляют по первому закону Кирхгофа для узлов a и b . Направления токов в ветвях принимаются условно и показаны на рис. 1.45.

4. Оставшиеся три уравнения (баланс падений напряжения в контуре) составляют по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III. Направления обхода контуров принимаются условно и показаны на рис. 1.45.

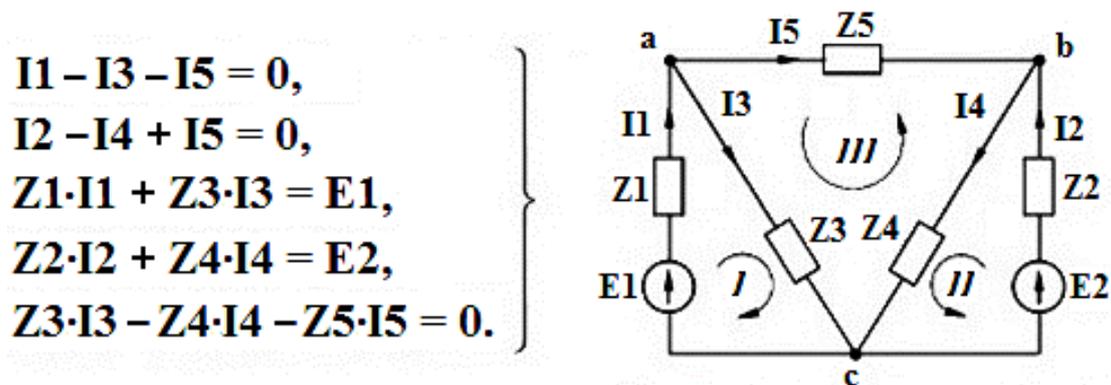


Рис. 1.45. Система расчетных уравнений для сложной электрической цепи

Задача 2. Пример расчета сложной электрической цепи, состоящей из 9 ветвей, в математическом пакете MathCad приведен в листинге на рис. 1.46.

Замечание. Для определения неизвестных токов используется матричное уравнение

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

где X – матрица-столбец неизвестных; A – матрица-определитель системы алгебраических уравнений; B – матрица-столбец правых частей уравнений.

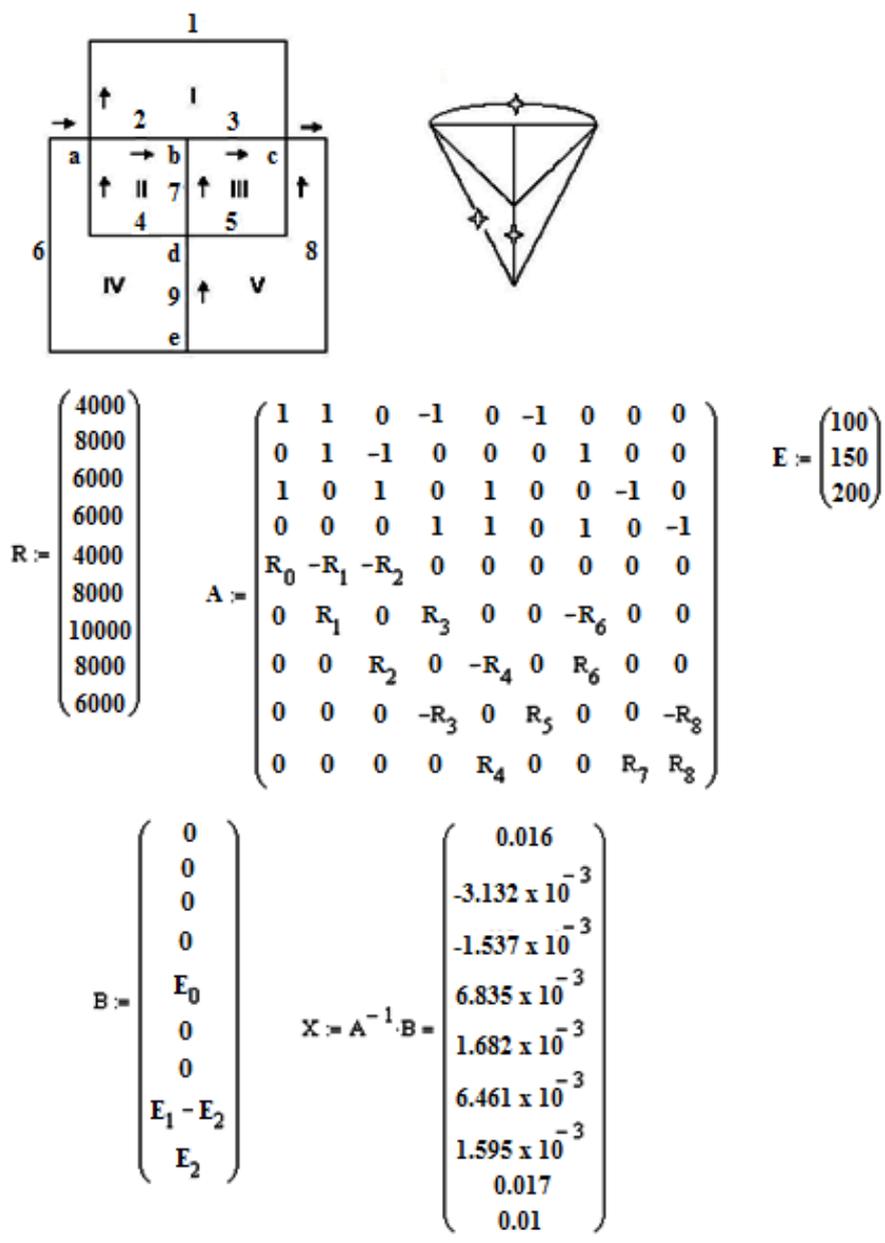


Рис. 1.46. Образец листинга выполнения задания

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?

Практическое занятие № 6

Трехфазные электрические цепи

Цель занятия – освоение методов расчета трехфазных электрических цепей.

План проведения занятия

1. Повторение 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 (см. рис. 1.23). Линейное напряжение генератора $U_{л} = 220$ В, сопротивление проводов $Z_{пр} = (0,5 + j1)$, 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 $U_{н} = 0$.

Фазное напряжение

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

Система комплексных фазных напряжений

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

Комплексные фазные сопротивления и проводимости

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

$$\underline{Y}_{\phi} = 1 / \underline{Z}_{\phi} = 1 / 12,6 \cdot e^{j34} = 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34} = (6,6 - j4,4) \cdot 10^{-2}.$$

Фазные напряжения

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

Фазные токи приемника

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

$$I_b = I_a \cdot e^{-j120} = 10 \cdot e^{-j154}, \quad I_c = I_a \cdot e^{j120} = 10 \cdot e^{-j86}.$$

Действующие значения фазных токов

$$I_a = I_b = I_c = 10 \text{ А}.$$

Система фазных напряжений приемника

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

$$\underline{U}_b = \underline{U}_a \cdot e^{-j120} = 117 \cdot e^{-j123}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_a \cdot e^{j120} = 117 \cdot e^{j117}.$$

Действующие значения фазных напряжений приемника

$$U_a = U_b = U_c = 117 \text{ В.}$$

Система линейных напряжений приемника

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = 117 \cdot e^{-j3} - 117 \cdot e^{-j123} =$$

$$= (116,8 - j6,1) - (-64,8 - j98,1) = 180 + j92 = 202 \cdot e^{j27};$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{ab} \cdot e^{-j120} = 202 \cdot e^{-j93}; \quad \underline{U}_{ac} = \underline{U}_{ab} \cdot e^{j120} = 202 \cdot e^{j147}.$$

Падения напряжений в линейных проводах

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

$$\Delta \underline{U}_b = \underline{U}_a \cdot e^{-j120} = 11,2 \cdot e^{-j91}; \quad \Delta \underline{U}_c = \underline{U}_a \cdot e^{j120} = 11,2 \cdot e^{j149}.$$

Фазные полная, активная и реактивная мощности приемника

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

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

Полная, активная и реактивная мощности приемника

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

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

Векторная диаграмма напряжений и токов приведена на рис. 1.47.

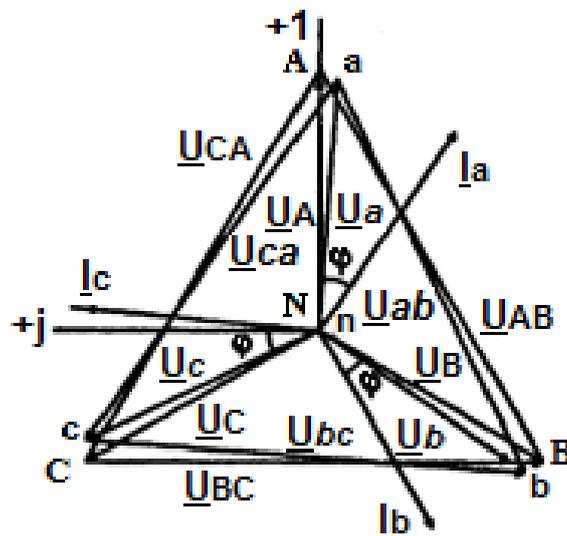


Рис. 1.47. Векторная диаграмма

Задачи

1. Три одинаковые индуктивные катушки, соединенные звездой, включены в трехфазную сеть с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Ак-

тивное сопротивление каждой катушки $R = 16$ Ом, реактивное $X = 12$ Ом. Найти токи в катушках, активную, реактивную и полную мощности.

2. Взять данные задачи 1 при условии, что катушки соединены треугольником.

3. В трехфазную четырехпроводную сеть с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220$ 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.

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. Какая трехфазная электрическая цепь считается связанной?
5. Как определить линейное напряжение в трехфазной электрической цепи?
6. Необходим ли нейтральный провод при несимметричной (симметричной) нагрузке трехфазных электрических цепей?

Практическое занятие № 7

Переходные процессы в электрических цепях

Цель занятия – освоение методов расчета переходных процессов электрических цепей.

План проведения занятия

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

Пример решения типовой задачи

Задача 1. Рассчитать переходные токи во всех ветвях схемы после замыкания выключателя во второй ветви (рис. 1.48). $E = 150$ В; $R_1 = R_2 = R_3 = 100$ Ом; $L = 0,1$ Гн.

Уравнения по законам Кирхгофа для схемы после коммутации

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 &= 0; \\ R_1 \cdot I_1 + R_3 \cdot I_3 &= E; \\ R_2 \cdot I_2 + L \frac{di_2}{dt} - R_3 \cdot I_3 &= 0. \end{aligned}$$

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 .

$$L \frac{di_2}{dt} + \left(R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \right) I_2 = E \frac{R_3}{R_1 + R_3}.$$

Решение

$$I_1 = I_{1\text{св}} + I_{1\text{пр}}; \quad I_2 = I_{2\text{св}} + I_{2\text{пр}}; \quad I_3 = I_{3\text{св}} + I_{3\text{пр}}.$$

Уравнение для свободного режима

$$L \frac{di_{2\text{св}}}{dt} + \left(R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \right) I_{2\text{св}} = 0.$$

Характеристическое уравнение

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

имеет один корень

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

где r – постоянная времени цепи.

Свободные составляющие токов

$$I_{1\text{св}} = Ae^{pt}; \quad I_{2\text{св}} = Be^{pt}; \quad I_{3\text{св}} = Ce^{pt}.$$

В установившемся режиме принужденные токи

$$I_{1\text{пр}} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{150}{100 + \frac{100 \cdot 100}{100 + 100}} = 1 \text{ А.}$$

$$I_{2\text{пр}} = I_{1\text{пр}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1 \frac{100}{200} = 0,5 \text{ А,}$$

$$I_{3\text{пр}} = I_{1\text{пр}} - I_{2\text{пр}} = 0,5 \text{ А.}$$

Токи во время переходного процесса

$$I_1 = Ae^{pt} + 1; \quad I_2 = Be^{pt} + 0,5; \quad I_3 = Ce^{pt} + 0,5.$$

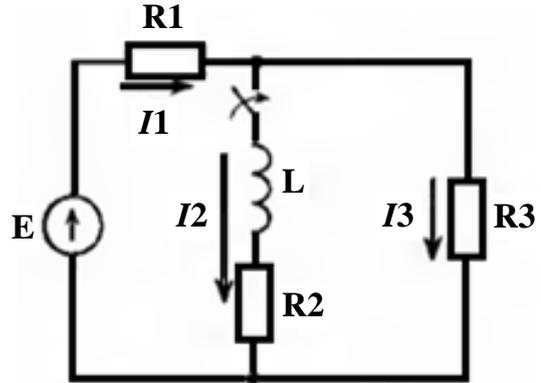


Рис. 1.48. Схема к задаче 1

По 1-му закону коммутации

$$I_2(0) = I_2(0_-) = 0.$$

Из уравнения для второго тока при $t = 0$ получаем $0 = B + 0,5$;
 $B = -0,5$ А.

Начальные значения токов $I_1(0)$ и $I_3(0)$ (зависимые начальные условия) определяются из уравнений Кирхгофа для момента времени $t = 0$.

$$I_1(0) - I_2(0) - I_3(0) = 0,$$

$$R_1 I_1(0) + R_3 I_3(0) = E,$$

$$I_1(0) = I_3(0) = \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{150}{200} = 0,75 \text{ А.}$$

Постоянные интегрирования

$$0,75 = A + 1; A = -0,25; 0,75 = C + 0,5; C = 0,25.$$

Переходные токи (рис. 1.49)

$$I_1 = 1 - 0,25e^{-1500t} \text{ А}; I_2 = 0,5 - 0,5e^{-1500t} \text{ А}; I_3 = 0,5 + 0,25e^{-1500t} \text{ А.}$$

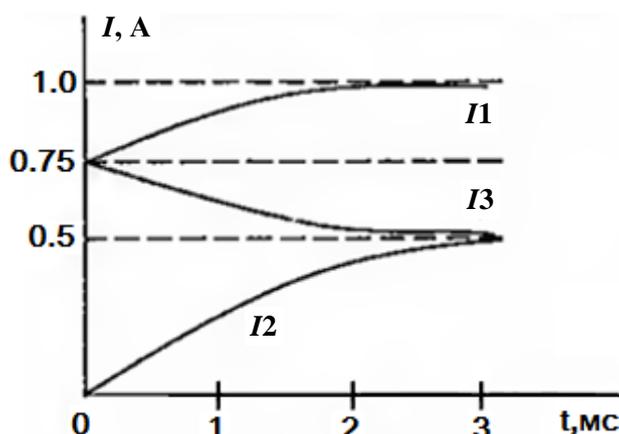


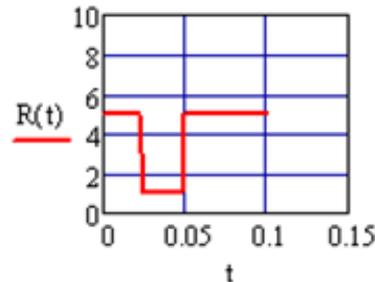
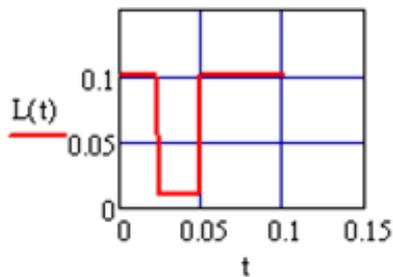
Рис. 1.49. График изменения тока

Задача 2. В последовательном RLC-контуре в катушке индуктивности в момент времени t_1 произошло частичное короткое замыкание витков. В момент времени t_2 параметры катушки восстановлены. Определить ток в цепи, напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности. Величина емкости не изменяется.

На рис. 1.50 приведен листинг кода решения задачи численными методами в математическом пакете MathCad. Решение задачи проводится методом Рунге – Кутты с постоянным шагом интегрирования (функция *rkfixed*). Дифференциальные уравнения переходного процесса представлены в форме Коши с выделением производных в левых частях уравнений.

$$R1 := 5 \quad C := 100 \cdot 10^{-6} \quad L1 := 0.1 \quad L2 := 0.01 \quad R2 := 1 \quad E := 10 \quad t1 := 0.025 \quad t2 := 0.05$$

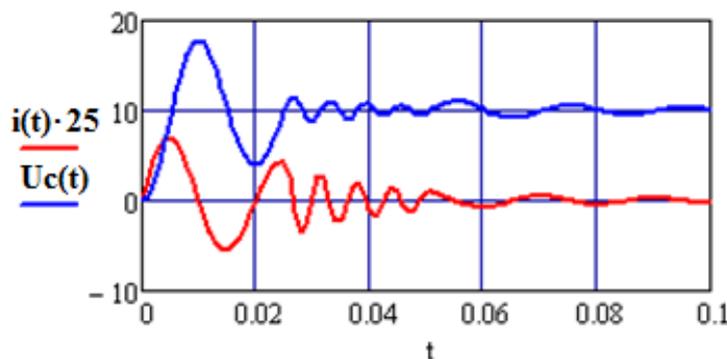
$$L(t) := \begin{cases} L1 & \text{if } 0 \leq t \leq t1 \\ L2 & \text{if } t1 \leq t \leq t2 \\ L1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad R(t) := \begin{cases} R1 & \text{if } 0 \leq t \leq t1 \\ R2 & \text{if } t1 \leq t \leq t2 \\ R1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad t := 0, 0.1 \cdot t1 \dots 2 \cdot t2$$



$$A(t) := \begin{pmatrix} \frac{-R(t)}{L(t)} & \frac{-1}{L(t)} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \quad B(t) := \begin{pmatrix} \frac{E}{L(t)} \\ 0 \end{pmatrix} \quad T := 2 \cdot t2 \quad N := 100$$

$$D(t,x) := A(t) \cdot x + B(t) \quad x := \text{rkfixed} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, 0, T, N, D \right] \quad i := 0..N$$

$$t := x^{(0)} \quad i(t) := x^{(1)} \quad U_c(t) := x^{(2)}$$



$$U_k(t) := E - x^{(2)} \quad \text{Напряжение на катушке индуктивности}$$

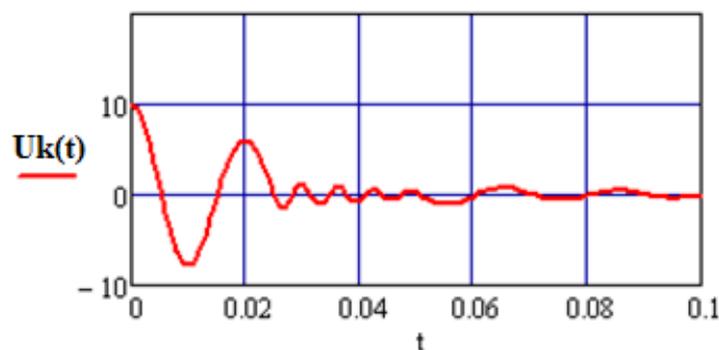


Рис. 1.50. Образец листинга выполнения задания

Практическое занятие № 8

Трансформаторы

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

План проведения занятия

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

Решение примеров

Задача. 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 задачи

1. В режиме холостого хода
 $U_d = E_d, U_2 = E_2, U_1 = E_1$.
2. ЭДС, индуцируемая в одном витке:
 $E_{d,1} = E_d / \omega_d = 140 / 20 = 7$ 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
 $\Phi_m = E_d / (4,44 \cdot f \cdot \omega_d) = 140 / (4,44 \cdot 50 \cdot 20) = 0,0315$ Вб.

1.4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

Задание № 1. Расчет цепей постоянного тока

Дано: схема электрической цепи постоянного тока, содержащая источник ЭДС и пять сопротивлений (рис. 1.51). $U_{ab} = 120$ В. Рассчитать показания вольтметра, присоединенного к точкам c и d : U_{cd} . Значения сопротивлений указаны в табл. 1.21.

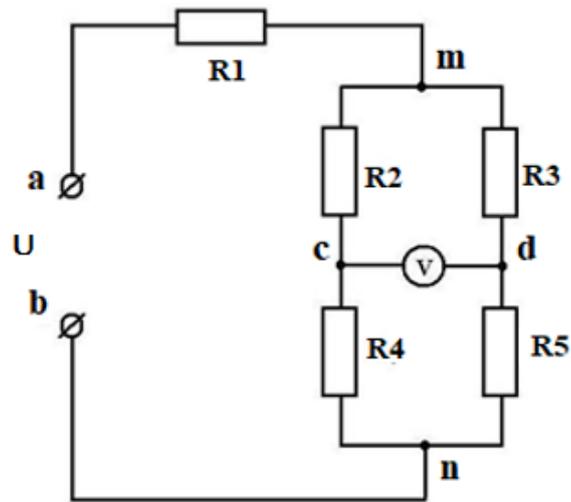


Рис. 1.51. Схема электрической цепи

Таблица 1.21

Номер варианта	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, 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

Задание 2. Расчет параллельных цепей с одним гармоническим источником

Дано: на рис. 1.52 приведены неориентированные графы схемы цепей с одним гармоническим источником. Номер графа для каждого варианта выбирают по колонке 2 табл. 1.22. Номер индуктивных и емкостных элементов указан в колонках 3 и 4. Остальные элементы являются сопротивлениями.

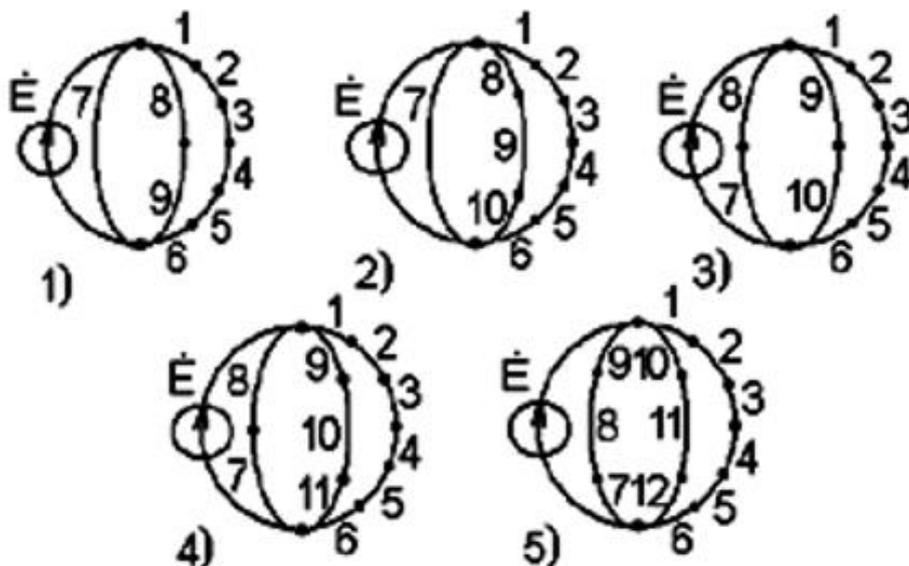


Рис. 1.52. Неориентированные графы схемы цепей с одним гармоническим источником

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

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

Мгновенное значение ЭДС источника

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

где $E_m = \sqrt{2500} \text{ В}$; $\omega = 2\pi f = 10^3 \text{ рад / с}$; φ – 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 1.22

Номер варианта	Номер графа схемы	Номер реактивных элементов	
		L_i	C_i
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
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

1.5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

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.

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. 1.53).

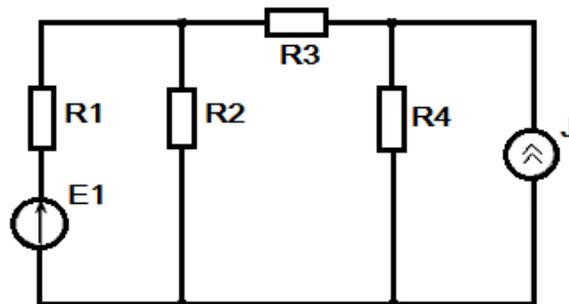


Рис. 1.53. Схема к задаче 2

3. Определить ток I_3 , если $R_1 = R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 5$ Ом, $R_4 = 12$ Ом, $R_5 = R_6 = 6$ Ом, $E_1 = 100$ В, $E_2 = 92$ В (рис. 1.54).

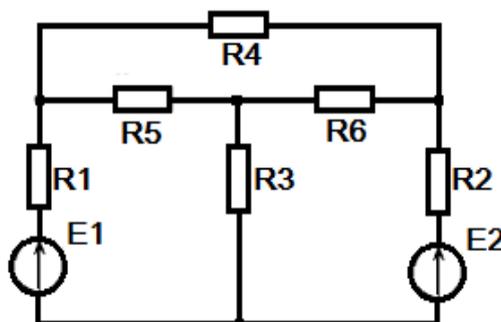


Рис. 1.54. Схема к задаче 3

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. 1.55).

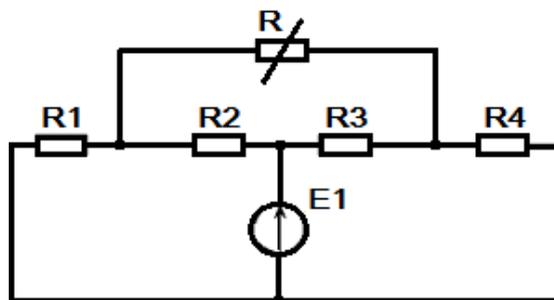


Рис. 1.55. Схема к задаче 4

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 электровазе, проходящем эту точку сети и потребляющем 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 $E_r = 14 \text{ В}$; $E_{\text{ак}} = 12 \text{ В}$; $R_r = 0,2 \text{ Ом}$; $R_{\text{ак}} = 0,1 \text{ Ом}$ (рис. 1.56)?

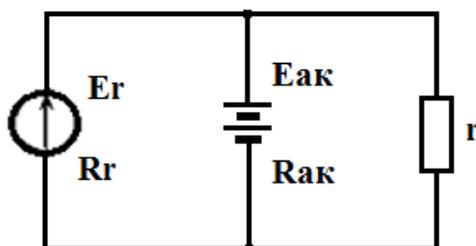


Рис. 1.56. Схема к задаче 6

7. Какую ЭДС должен иметь генератор с внутренним сопротивлением $0,2 \text{ Ом}$, чтобы он, работая на зарядке аккумулятора, имеющего ЭДС 240 В и внутреннее сопротивление $0,25 \text{ Ом}$, мог отдавать ток 100 А ?

8. Определить ток I и потенциалы точек b, c, d, e, f, g, h , считая потенциалы φ_a и φ_k неизменными; определить ток, который потечет по сопротивлению $R = 100 \text{ Ом}$, если его подключить к точкам c и g , $\varphi_a = -50 \text{ В}$, $\varphi_k = 25 \text{ В}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $R_{\text{вн1}} = 1 \text{ Ом}$, $E_2 = 30 \text{ В}$, $R_{\text{вн2}} = 8 \text{ Ом}$, $E_3 = 20 \text{ В}$, $R_{\text{вн3}} = 10 \text{ Ом}$, $E_4 = 15 \text{ В}$, $R_{\text{вн4}} = 6 \text{ Ом}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 50 \text{ Ом}$, $R_4 = 20 \text{ Ом}$ (рис. 1.57).

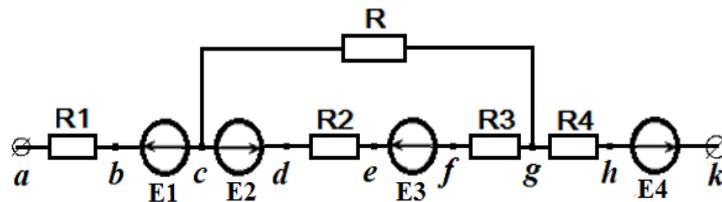


Рис. 1.57. Схема к задачам 7 и 8

9. Определить показание вольтметра и все токи, 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. 1.58).

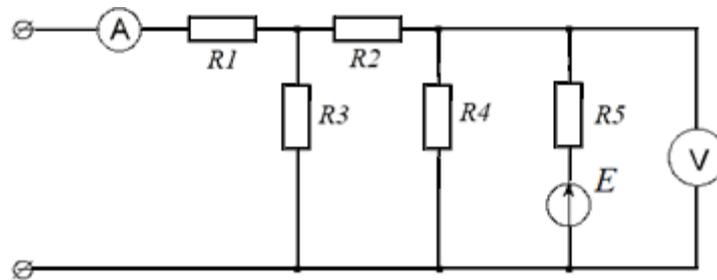


Рис. 1.58. Схема к задаче 9

10. Вольтметр показывает 120 В (рис. 1.59). Что покажет ваттметр, если $R = 30 \text{ Ом}$, $X_{c1} = 20 \text{ Ом}$, $X_{c2} = 40 \text{ Ом}$, $X_{c3} = 60 \text{ Ом}$, $X_{c4} = 80 \text{ Ом}$?

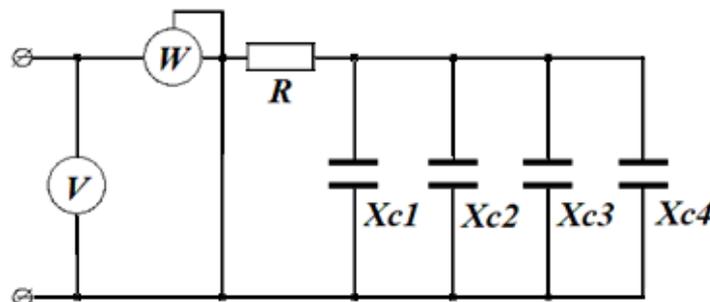


Рис. 1.59. Схема к задаче 10

11. Активная мощность, отдаваемая генератором, $P = 31,25$ кВт, $Q = 0$, $R = 2$ Ом, $X_c = 100$ Ом, $R_1 = 75$ 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. $R_1 = 1000$ Ом, $R_k = 5$ Ом, $L = 100$ мГн.

13. Три приемника питаются от трехфазного генератора, соединенного звездой. Сопротивления приемников одинаковы. Определить показания второго и третьего амперметров, если известно, что показание первого равно 4 А.

14. Определить действующее значение линейных токов и построить векторную диаграмму, если $R_1 = 11$ Ом, $R_k = 6$ Ом, $\omega L = 8$ 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

$$U = 40 + 12 \sin(100 \cdot t) + 6 \sin(200 \cdot t - \pi/6) + 5 \sin(500 \cdot t - \pi/3).$$

17. Найти действующее значение тока в R-L-C-цепи и напряжение на емкости, активную мощность, потребляемую цепью, если $R = 50$ Ом, $L = 0,05$ Гн, $C = 5$ мкФ. Действующее значение напряжения от источника ЭДС $U = 20$ В.

18. Активное сопротивление каждого из приемников энергии равно 24 Ом. Последовательно с одним включен конденсатор 143 мкФ, последовательно с другим – катушка с $R_L = 2$ Ом. Сравнить токи приемников, если на входе напряжение $U = 130 + 170 \sin(\omega \cdot t)$, где $\omega = 1000$ 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 p - n -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.

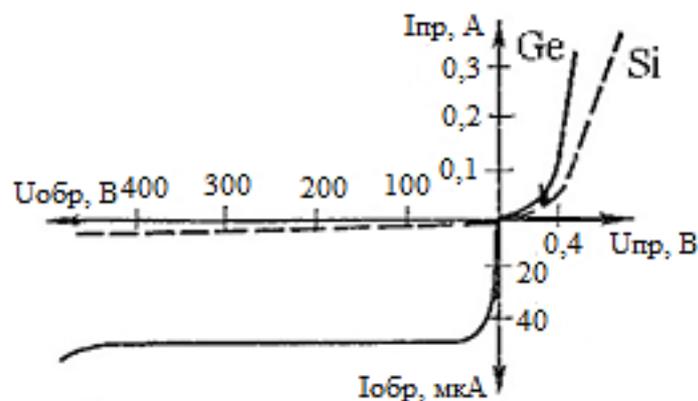


Рис. 2.1. Сравнительные характеристики германиевых и кремниевых диодов

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). Классификация выпрямителей приведена на рис. 2.2.

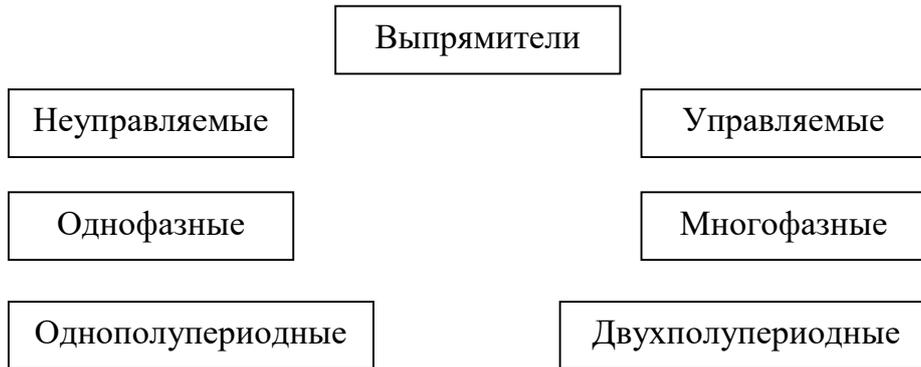
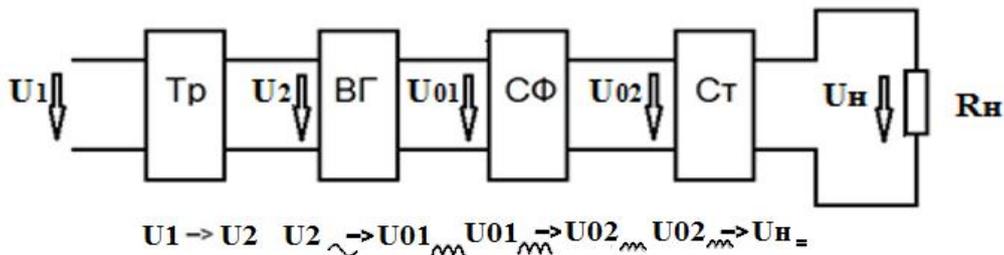


Рис. 2.2. Классификация выпрямителей

2. Виды нагрузок: активная, активно-индуктивная, активно-емкостная и с противоэлектродвижущей силой. Выпрямители малой мощности – активная и активно-емкостная нагрузки. Выпрямители средней и большой мощности – активно-индуктивная нагрузка. Выпрямитель имеет нагрузку с противоЭДС при питании двигателя постоянного тока или при зарядке аккумулятора.

3. Однофазный выпрямитель представлен на (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 состоит из трансформатора и четырех диодов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме (рис. 2.4). К одной из диагоналей моста подсоединяется вторичная обмотка трансформатора, а к другой – нагрузочный резистор R_H . Каждая пара диодов (Д1 – Д3 и Д2 – Д4) работает поочередно.

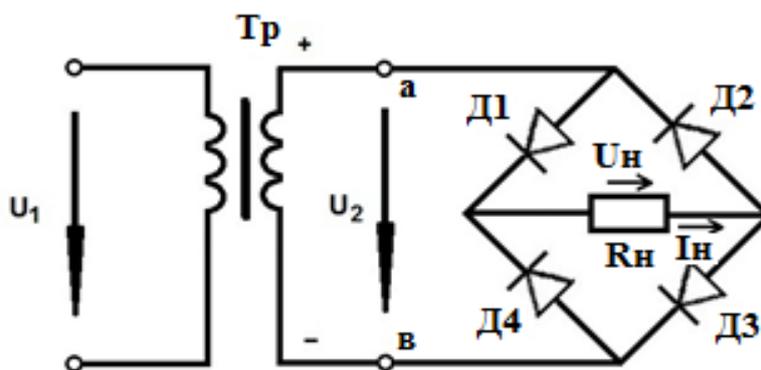


Рис. 2.4. Двухполупериодный мостовой выпрямитель.
 Первый полупериод: $0-0,5T$; диоды Д2 и Д4 закрыты.
 Второй полупериод: $0,5T-T$; диоды Д1 и Д3 закрыты.
 В оба полупериода ток через нагрузочный резистор R_H
 имеет одно и то же направление

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

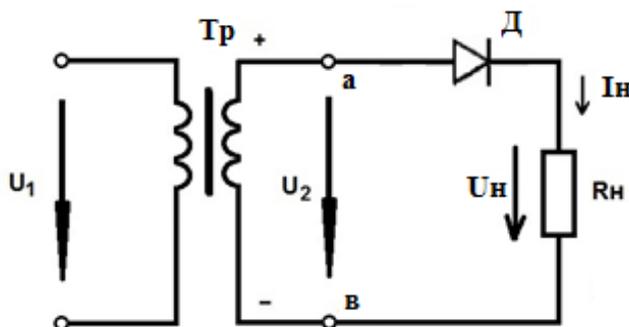


Рис. 2.5. Однополупериодный выпрямитель.
 Первый полупериод: $0-0,5T$; диод открыт.
 Второй полупериод: $0,5T-T$; диод закрыт

6. Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включенных на один и тот же нагрузочный резистор R_H (рис. 2.6). Недостатки: габаритные размеры, масса и стоимость трансформатора больше, чем в однополупериодных и мостовых выпрямителях.

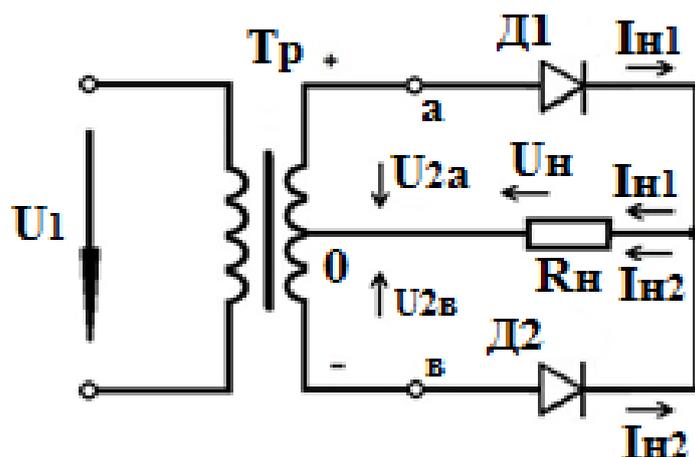


Рис. 2.6. Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки. Первый полупериод: $0-0,5T$; диод Д1 открыт, Д2 закрыт. Второй полупериод: $0,5T-T$; диод Д1 закрыт, Д2 открыт

Моделирование работы выпрямительных устройств

Одно- и двухполупериодные 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, т. е. выровнять в определенных пределах пульсацию электрического тока. Величина остаточной пульсации определяется соотношением параметров колебательной системы.

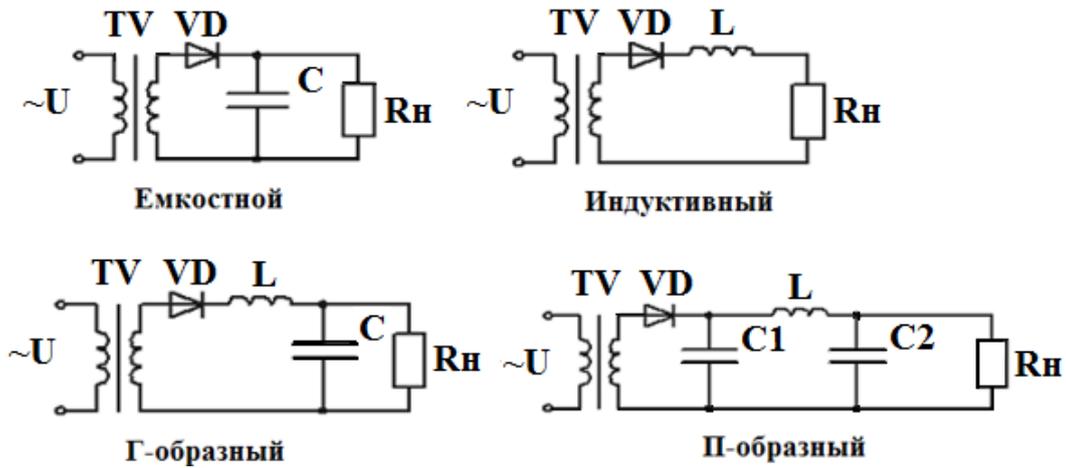


Рис. 2.7. Схемы однополупериодных выпрямителей

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

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)

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

где U_m – амплитудное значение напряжения от источника; ω – круговая частота; t – время; φ – начальная фаза.

Диод пропускает ток только в одном направлении. В результате на выходе из диода напряжение

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

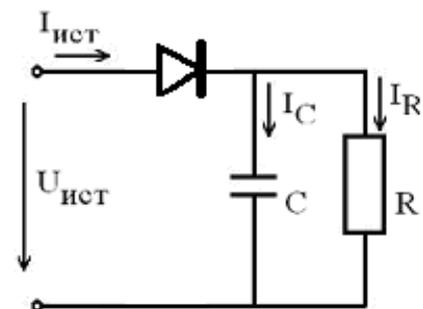


Рис. 2.8. Схема замещения емкостного фильтра

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

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

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



Рис. 2.9. Диаграмма пульсаций напряжения при использовании емкостного фильтра

На практике значение емкости фильтра выбирается из соотношения $R > X_C$, или с учетом $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ емкость конденсатора фильтра $C > \frac{1}{\omega R}$.

Оптические приборы

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 (табл. 2.1).

При пропускании электрического тока через *p-n*-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.

Таблица 2.1

Цветовая характеристика	Длина волны, нм	Материал*
Инфракрасный	До 760	GaAs, AlGaAs
Красный	610 – 760	AlGaInP, GaP
Оранжевый	590 – 610	GaAsP, AlGaInP, GaP
Желтый	570 – 590	GaAsP, AlGaInP, GaP
Зеленый	500 – 570	InGaN, GaN, AlGaInP,
Синий	450 – 500	InGaN, SiC
Фиолетовый	400 – 450	InGaN,
Ультрафиолетовый	До 400	AlN, AlGaN, AlGaInN
Белый	Широкий спектр	–

* – обозначения химических элементов Периодической системы Менделеева: Al – алюминий, As – мышьяк, C – углерод, Ga – галлий, In – индий, N – азот, P – фосфор, Si – кремний.

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.

Светоизлучающий диод, как и обычный, представляет собой кристалл из полупроводникового материала, легированного различными примесями для создания *p-n*-перехода. Ток протекает через переход между полупроводником *p*-типа (анод) и полупроводником *n*-типа (катод), но не в обратном, а в прямом направлении (рис. 2.10).

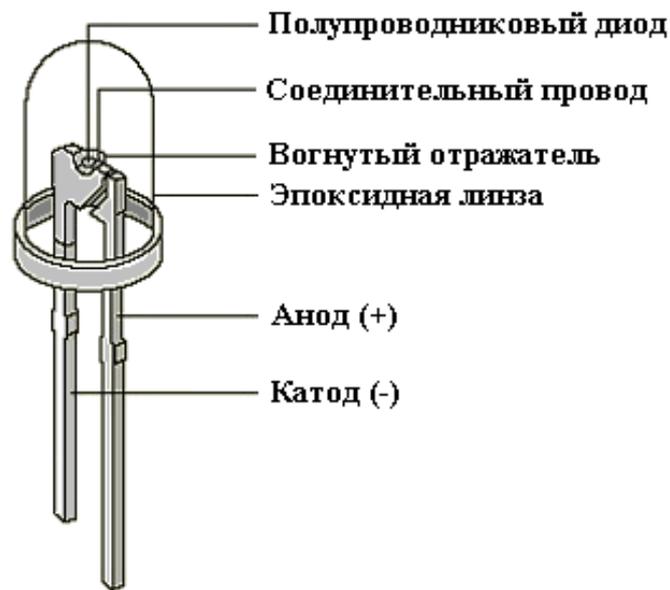


Рис. 2.10. Конструкция светодиода

Вольт-амперная характеристика светодиодов в прямом направлении нелинейна. Диод начинает проводить ток с некоторого порогового напряжения, которое позволяет достаточно точно определить материал полупроводника. Из-за круто возрастающей вольт-амперной характеристики $p-n$ -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).

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

- высокую световую отдачу. Современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 160 лм/Вт;
- высокую механическую прочность, вибростойкость (отсутствие нити накаливания и иных чувствительных составляющих);
- длительный срок службы – от 30000 до 100000 ч;
- спектр современных белых светодиодов – от тёплого белого, равного 2700 К, до холодного белого, равного 6500 К. Спектральная чистота достигается не фильтрами, а принципом устройства прибора;

- малую 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 мин в зависимости от температуры окружающей среды;
- количество циклов включения – выключения не оказывает существенного влияния на срок службы светодиодов (в отличие от ламп накаливания, газоразрядных ламп);
- различный угол излучения – от 15 до 180°;
- низкую 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.

Классификация светодиодов приведена на рис. 2.11.

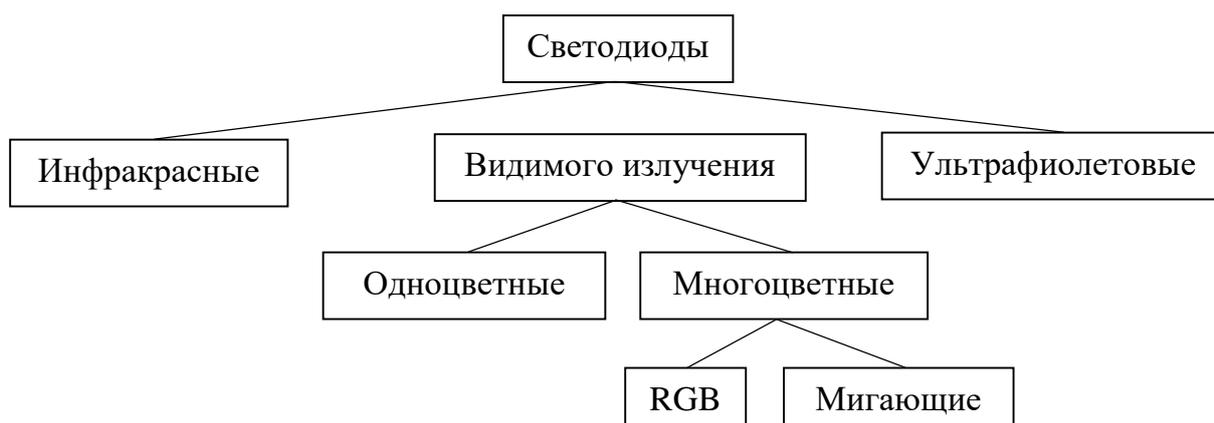


Рис. 2.11. Классификация светодиодов

• **Одноцветные светодиоды**

Одноцветные светодиоды излучают монохромный свет и требуют различного напряжения для работы – красный цвет берет наименьшее напряжение (около 2 В), синий цвет – большее напряжение (около 4 В). Типичные светодиоды требуют 20 – 30 мА 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 – 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 четыре вывода: один общий и три цветовых (рис. 2.12).

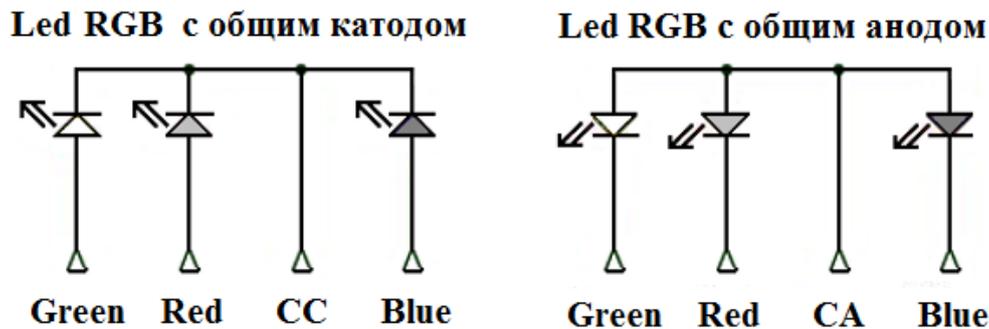


Рис. 2.12. Схема выводов RGB-светодиода

- **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 В – для высоковольтных и от 1,8 до 5 В – 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 габаритным размерам радиоэлементов и электропитанию. Мигающие светодиоды очень экономичны, так как электронная схема МСД выполнена на МОП структурах.

Внутри МСД находятся две подложки одинакового размера. На первой располагается кристаллический кубик светового излучателя из редкоземельного сплава. Для увеличения светового потока, фокусировки и формирования диаграммы направленности применяется параболический алюминиевый отражатель 2 (рис. 2.13). 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 перемычками 4. Корпус МСД 5 выполняется из матовой светорассеивающей пластмассы или прозрачного пластика.

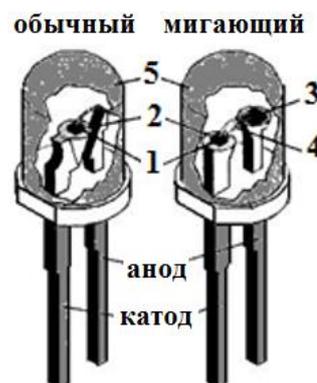


Рис. 2.13. Конструкция мигающего светодиода: 1 – излучатель; 2 – отражатель; 3 – интегральная микросхема; 4 – перемычки; 5 – корпус

- **Ультрафиолетовые светодиоды**

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

- **Органические светодиоды – OLED**

Многослойные тонкоплёночные структуры изготовлены 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

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

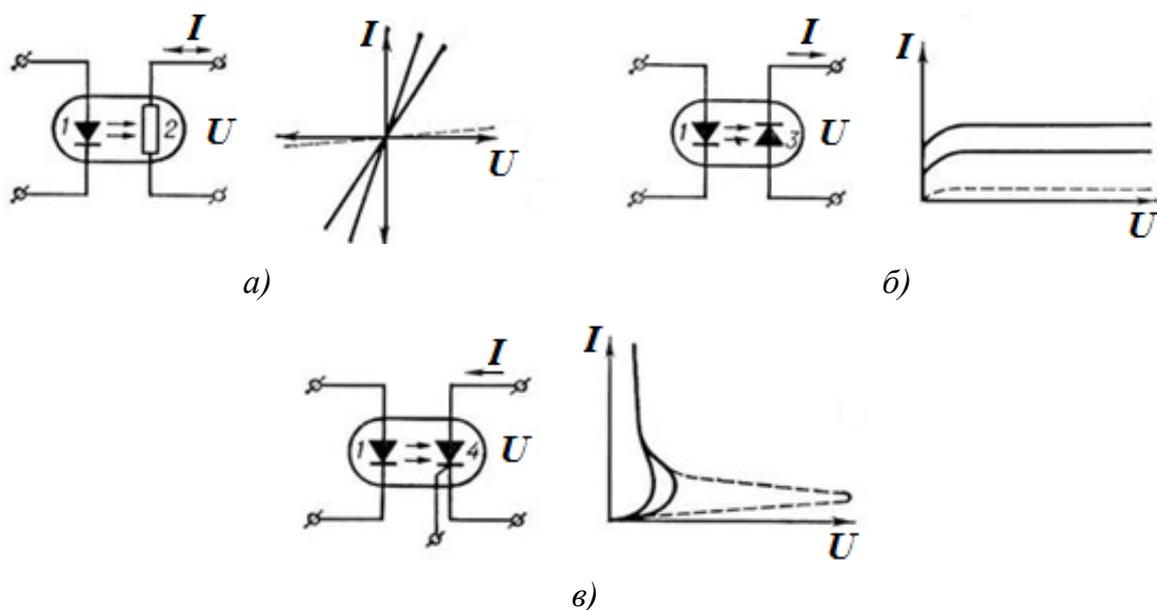


Рис. 2.14. Электрические схемы и выходные характеристики оптронов с фоторезистором (а), фотодиодом (б) и фототиристором (в): 1 – полупроводниковый светоизлучающий диод; 2 – фоторезистор; 3 – фотодиод; 4 – фототиристор; U и I – напряжение и ток в выходной цепи оптрона. Пунктирные кривые соответствуют отсутствию тока во входной цепи оптрона, сплошные – двум разным значениям входных токов

Фотодиод (ФД) – приемник оптического излучения, преобразующий падающий на его фоточувствительную область поток электромагнитного излучения в электрический заряд за счет процессов в p - n -переходе (рис. 2.15). При освещении p - n -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 n -область, а дыры – в p -область, т. е. через переход течет дрейфовый ток неравновесных носителей. Ток фотодиода определяется током неосновных носителей.

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

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 компен-

сируется и потенциальный барьер снижается на величину фотоЭДС (напряжение холостого хода фотодиода).

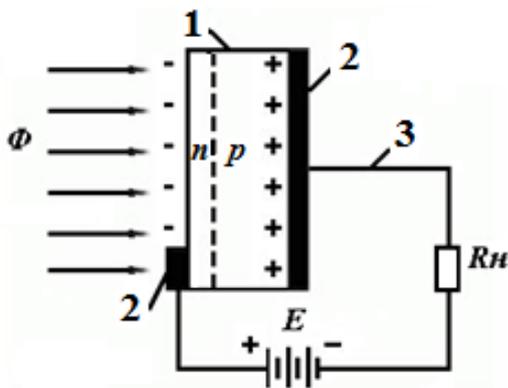


Рис. 2.15. Структурная схема фотодиода: 1 – кристалл полупроводника; 2 – контакты; 3 – выводы; Φ – поток электромагнитного излучения; E – напряжение источника постоянного тока; R_n – сопротивление нагрузки

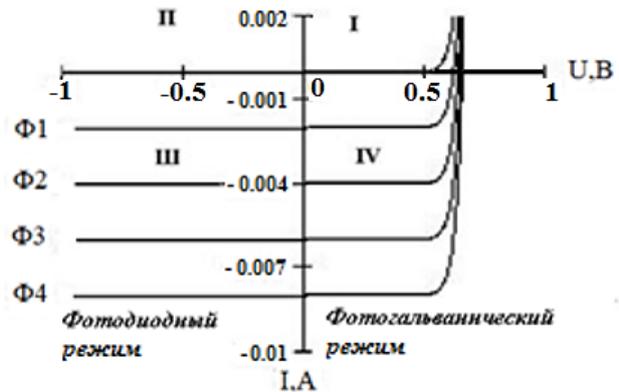


Рис. 2.16. Вольт-амперная характеристика фотодиода

Если p - и n -области соединить внешним проводником, то в нем потечет ток короткого замыкания, образованный неравновесными фотоносителями. Квадрант III – фотодиодная область работы ФД, при которой к p - n -переходу прикладывается обратное напряжение.

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

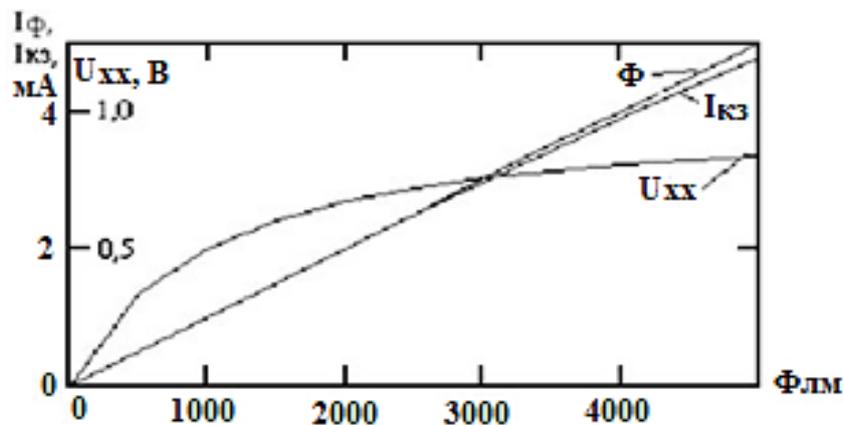


Рис. 2.17. Световые характеристики фотодиода

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.

Виды фотодиодов:

- *p-i-n фотодиод*

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

- *Фотодиод Шоттки*

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

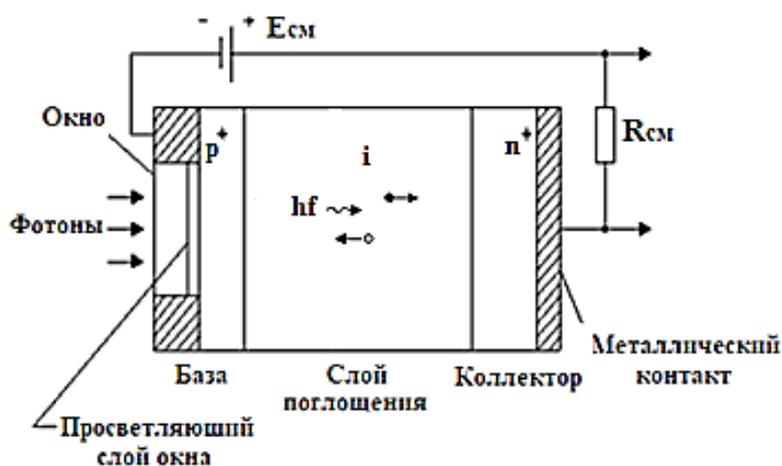


Рис. 2.18. Принцип действия *p-i-n* фотодиода

- *Лавинный фотодиод*

В структуре лавинного фотодиода используется лавинный пробой, возникающий при превышении энергии фотоносителей относительно энергии образования электронно-дырочных пар (рис. 2.19). 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).

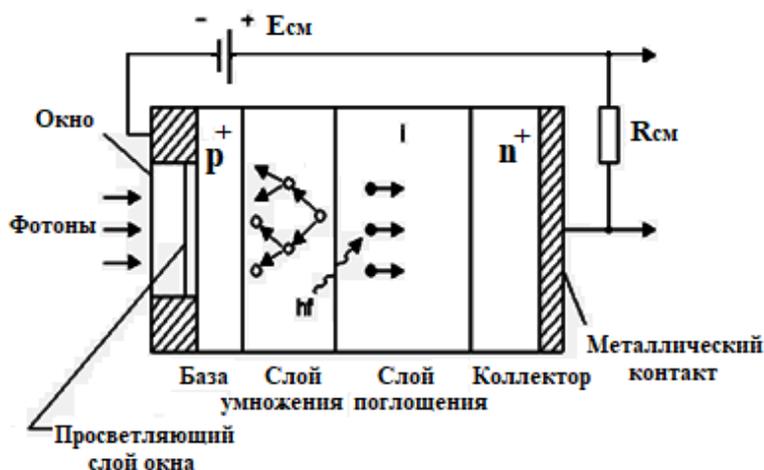


Рис. 2.19. Принцип действия лавинного фотодиода

- *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.

- *Кремниевые фотодиоды*

Фотодиоды ФД-320 структуры $p-n$ с квадратным фоточувствительным элементом площадью 25 мм^2 оформлены в пластмассовом корпусе с жесткими штампованными лужеными выводами (рис. 2.20). 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.

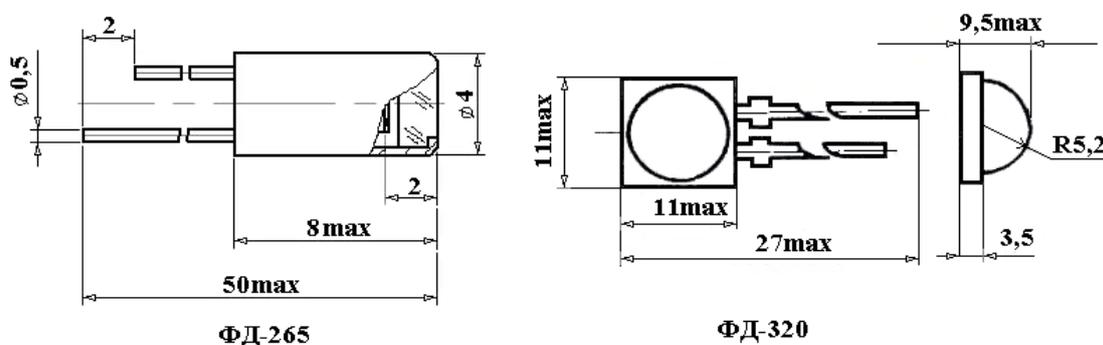


Рис. 2.20. Конструкции фотодиодов ФД-265 и ФД-320

Характеристики фотодиода ФД-320:

максимальный темновой ток при 25 °С	$5 \cdot 10^{-8}$ А
токовая импульсная чувствительность	0,12 А/В
рабочее напряжение	12 В
емкость	80 пФ
максимально допустимое напряжение	30 В
освещенность	100 лк
максимальная длина волны в максимуме чувствительности	0,87 ... 0,96 мкм
температурный диапазон	-10 ... +60 °С

Характеристики фотодиода ФД-265:

размер чувствительной площадки	$1,45 \times 1,45$ 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 ($T_{\text{цв}} = 2850$ К, $T = 20$ °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 (табл. 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

Цветовая характеристика	Напряжение, В
Инфракрасный	До 1,9
Красный	1,6 – 2,03
Оранжевый	2,1 – 2,3
Желтый	2,1 – 2,2
Зеленый	2,2 – 3,5
Синий	2,5 – 3,7
Фиолетовый	2,8 – 4
Ультрафиолетовый	3,1 – 4,4
Белый	3 – 3,7

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

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, Ом; $U_{\text{питания}}$ – напряжение от источника; $U_{\text{диода}}$ – падение напряжения через светодиод; $I_{\text{диода}}$ – сила тока светодиода.

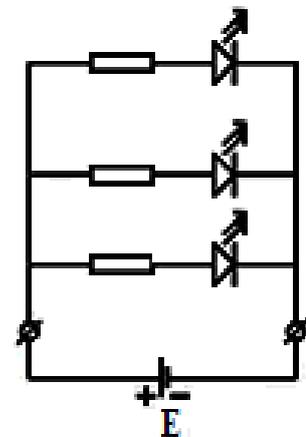


Рис. 2.21. Пример правильного параллельного подключения светодиодов

Биполярные транзисторы

Транзистор – радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала обычно с тремя выводами, позволяющий входным сиг-

налам 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 – на рис. 2.23.

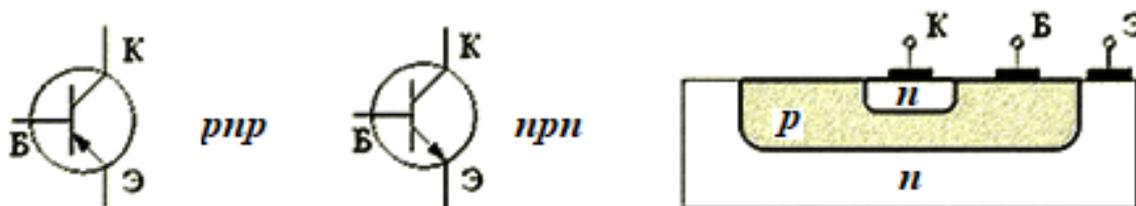


Рис. 2.22. Условные обозначения и схема поперечного разреза транзистора

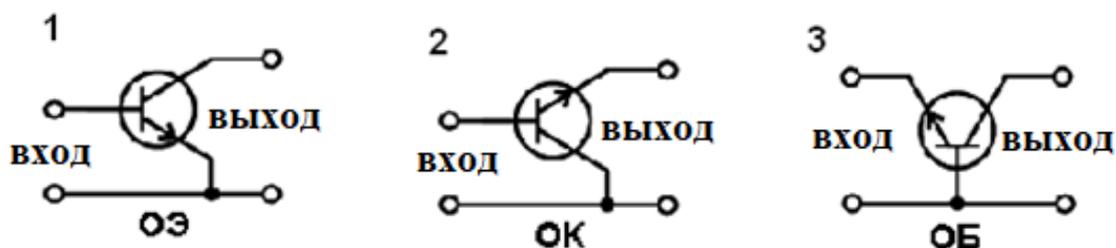


Рис. 2.23. Схемы включения биполярных транзисторов:
1 – с общим эмиттером; 2 – с общим коллектором; 3 – с общей базой

Включение транзистора *n-p-n*-типа по схеме с общим эмиттером и схема его замещения представлены на рис. 2.24.

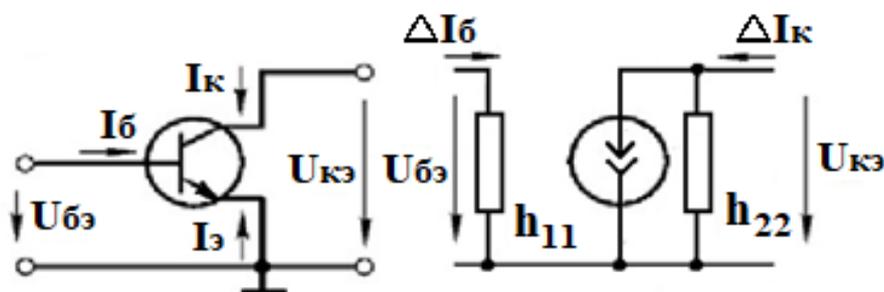


Рис. 2.24. Включение транзистора *n-p-n*-типа

$$\text{Ток базы } I_6 = I_3 - I_k = (1 - a) I_3 - I_{к3} \ll I_3 \sim I_k.$$

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 p -каналом и n -каналом (рис. 2.25 и 2.26).

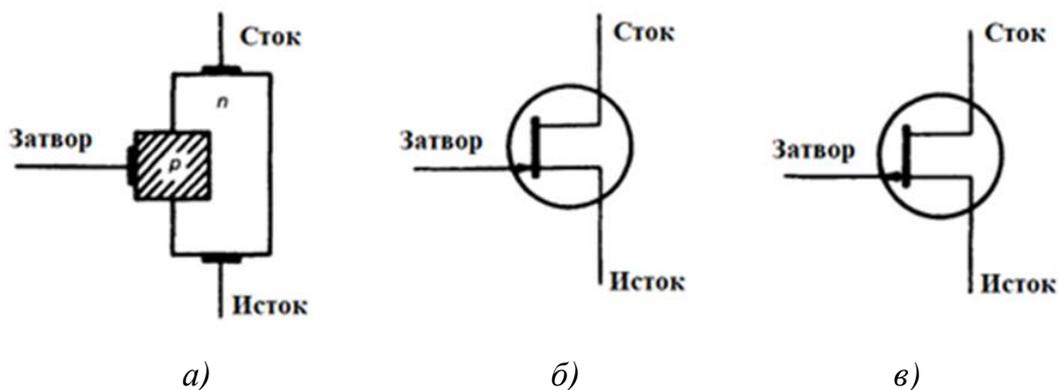


Рис. 2.25. Полевой транзистор с p - n -переходом: а – схематическое изображение конструкции транзистора с каналом n -типа; б, в – обозначение транзисторов с каналом n -типа и p -типа

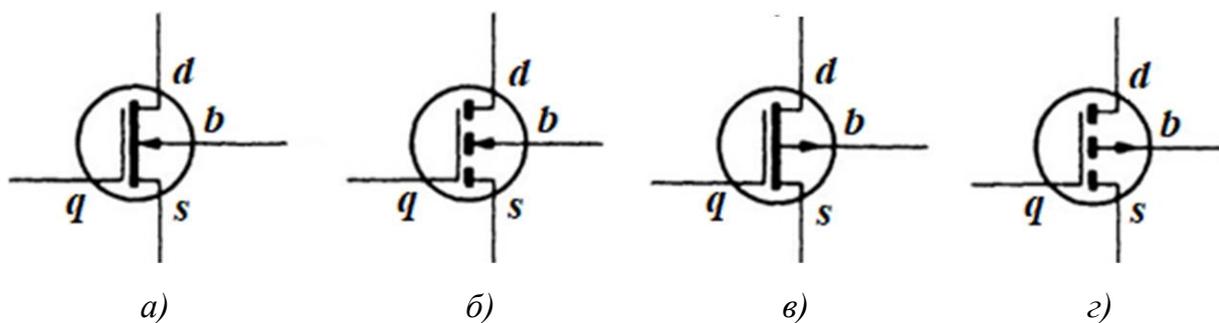


Рис. 2.26. Условные обозначения полевых транзисторов: а – n -канальный транзистор со встроенным каналом (с обеднением); б – n -канальный транзистор с индуцируемым каналом (с обогащением); в – p -канальный транзистор со встроенным каналом (с обеднением); г – p -канальный транзистор с индуцируемым каналом (с обогащением)

Носители заряда перемещаются по каналу от истока к стоку (рис. 2.27, 2.28). С помощью затвора создается управляющее электрическое поле, позволяющее регулировать электрическую проводимость канала (ток в канале).

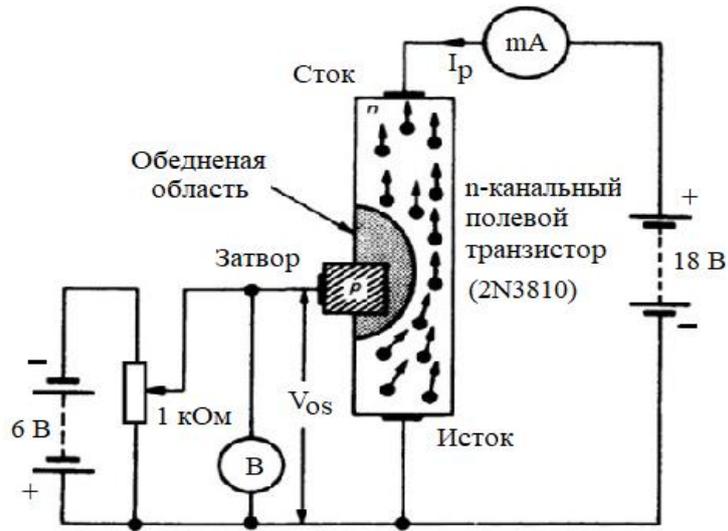


Рис. 2.27. Принцип работы полевого транзистора

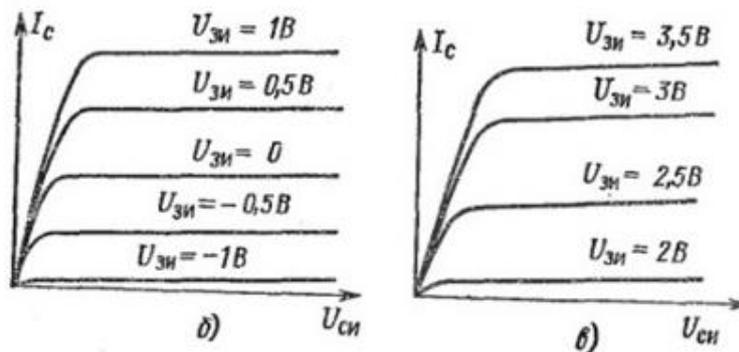
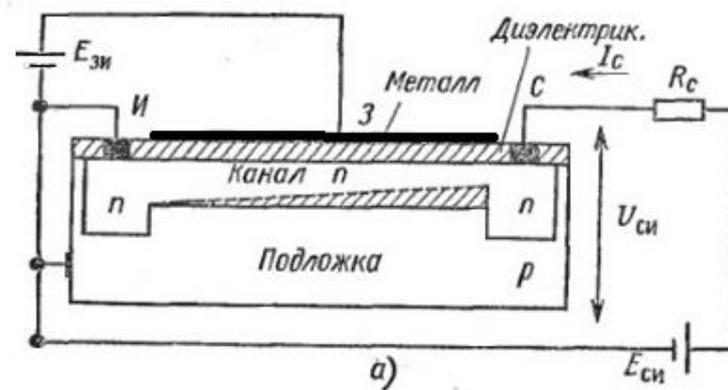


Рис. 2.28. Структура (а) и стоковые характеристики МДП-транзисторов: б – со встроенным каналом; в – с индуцированным каналом

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 и принудительную вентиляцию.

В случае естественной вентиляции теплоноситель перемещается за счет тяги, возникающей возле нагретого радиатора, в случае принудительной вентиляции – 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.

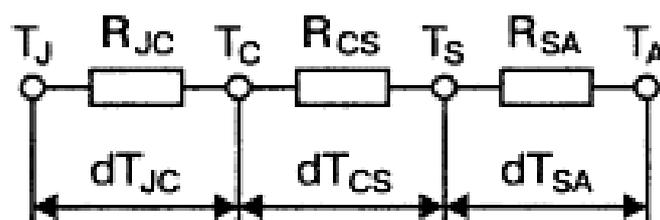


Рис. 2.29. Тепловая модель охлаждения

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 измеряется в градусах Цельсия на ватт. Суммарное максимальное тепловое сопротивление R_{JA} на участке кри-

сталл – окружающая среда $R_{JA} \leq \frac{T_J - T_A}{P_{\text{п.п}}}$, где $P_{\text{п.п}}$ – 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. По умолчанию считается

- 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 2 м/с.

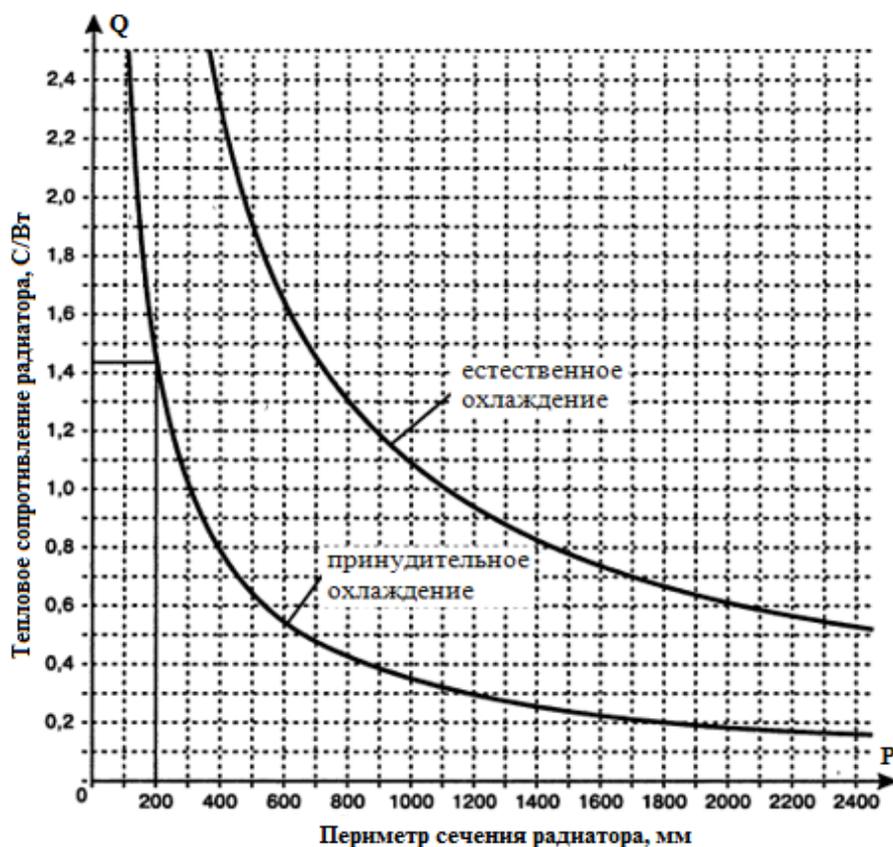


Рис. 2.30. Зависимости между сечением алюминиевого радиатора и его тепловым сопротивлением

Если условия охлаждения отличаются от принятых по умолчанию, то поправка вносится с помощью коэффициентов, учитывающих:

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

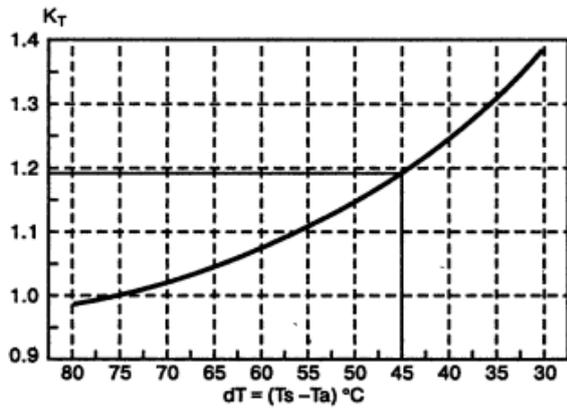


Рис. 2.31. Поправочный коэффициент на разницу температур радиатора и окружающей среды

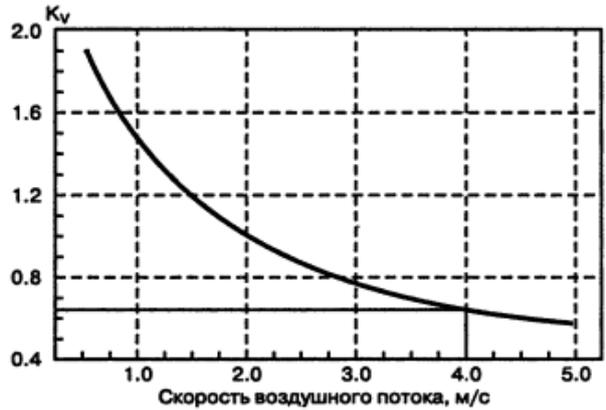


Рис. 2.32. Поправочный коэффициент на скорость воздушного потока

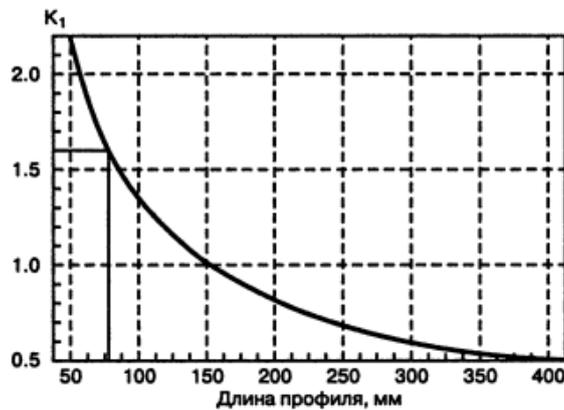


Рис. 2.33. Поправочный коэффициент на длину радиатора

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 бóльшую мощность по сравнению с входным сигналом. Увеличение мощности сигнала проис-

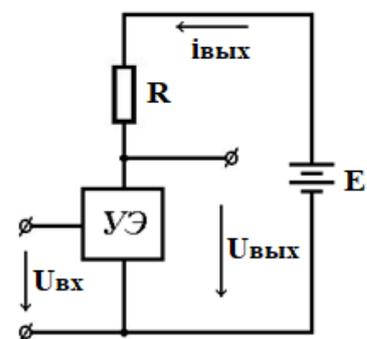


Рис. 2.34. Структурная схема усилительного каскада

ходит за счет источника электрической энергии E . Процесс усиления осуществляется при изменении сопротивления нелинейного управляемого элемента и тока выходной цепи под воздействием входного напряжения или тока. Выходное напряжение снимается с управляемого элемента или резистора.

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.

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).

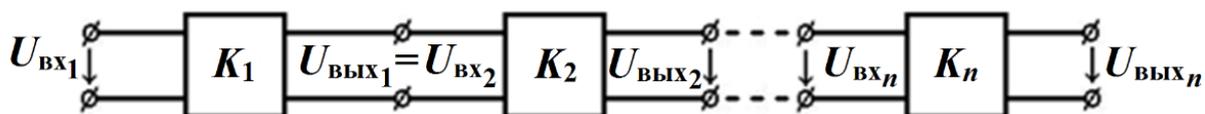


Рис. 2.35. Структурная схема многокаскадного усилителя

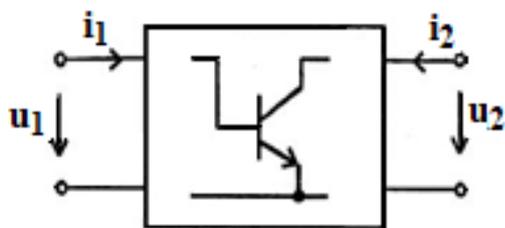


Рис. 2.36. Транзистор в виде четырехполюсника

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).

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

Таблица 2.3

№ п/п	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 $i_1 = 0$

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

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

2.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

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 выпрямители 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 (прил. 3).

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 равное 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 по 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.

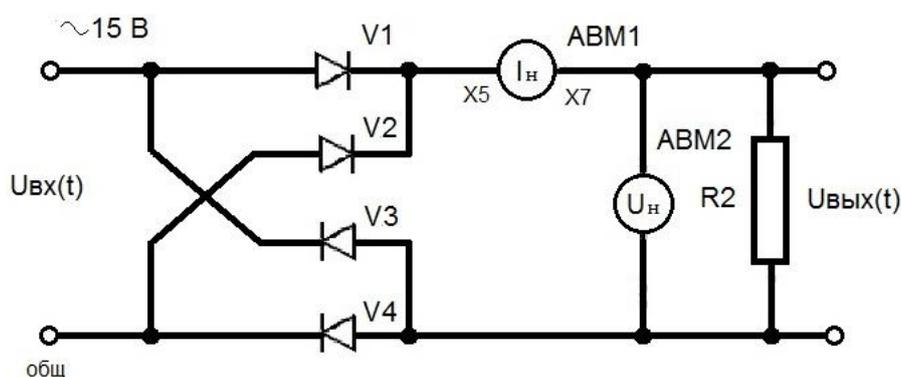


Рис. 2.37. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

2. Зарисовать осциллограммы входного напряжения, подаваемого на схему от источника переменного напряжения ИП и выпрямленного напряжения $U_{н(t)}$ в режиме холостого хода и максимального тока нагрузки ($R2 = 51 \text{ кОм}$ и $R2 = 300 \text{ Ом}$), 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 R2 (51 кОм – 300 Ом).

4. Для режима холостого хода выпрямителя рассчитать соотношение между средним значением выпрямленного напряжения $U_{н.ср}$ с переменным входным напряжением $U_{вх}$, 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 будет конденсатор C1, подключенный параллельно нагрузке R2 (рис. 2.38):

а) для выпрямленного устройства с однофазной мостовой схемой и емкостными фильтрами ($C1 = 20$ мкФ, $C2 = 50$ мкФ) снять осциллограммы напряжения на нагрузке $U_{н}(t)$ при максимальном токе нагрузки и на холостом ходу;

б) рассчитать коэффициент сглаживания – отношение коэффициентов пульсации на входе и выходе устройства $q = \frac{k_{п.вх}}{k_{п.вых}}$,

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. 1) и с фильтрами (п. 6) в единой системе координат.

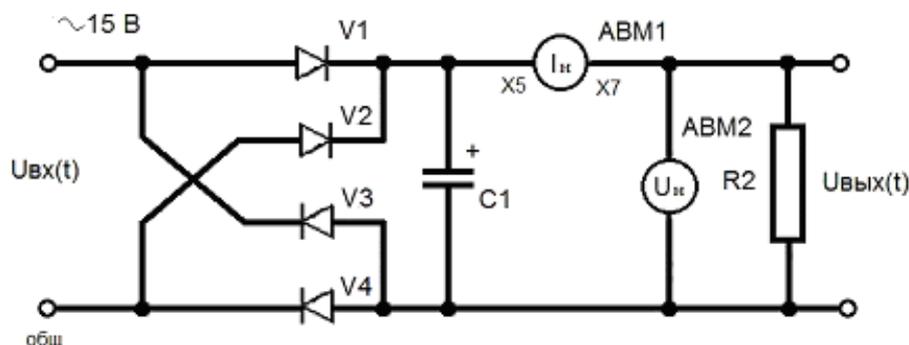


Рис. 2.38. Схема выпрямителя с емкостным фильтром

Исследование двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя с нулевым выводом

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

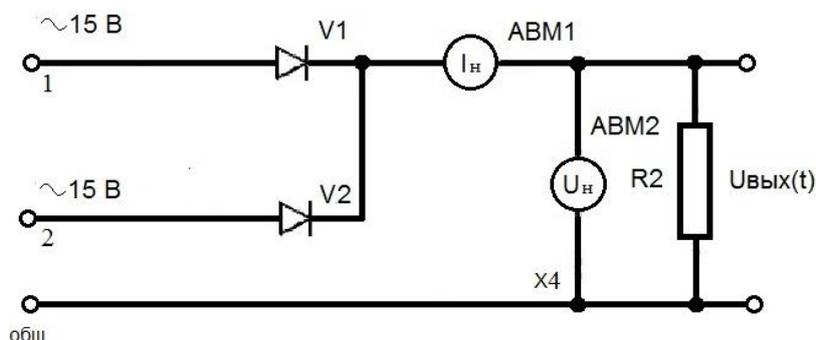


Рис. 2.39. Схема двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом

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

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

11. Построить внешнюю характеристику $U_{н.ср}(I_{н.ср})$ и обозначить точку, к которой относится снятая осциллограмма $U_n(t)$ 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 R2 = 300 Ом и в режиме холостого хода R2 = 1 кОм.

Рассчитать коэффициент сглаживания.

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

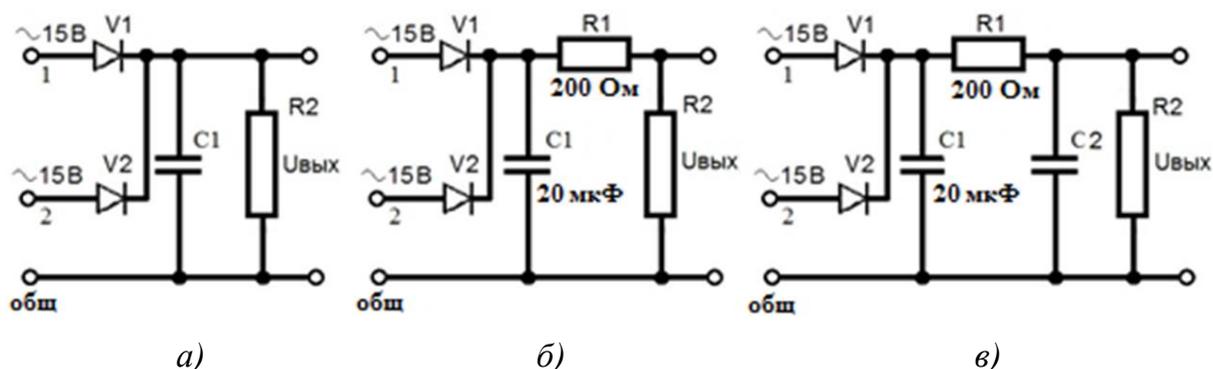


Рис. 2.40. Схемы выпрямителя: а – с емкостным фильтром; б – с Г-образным RC-фильтром; в – с П-образным RC-фильтром

Контрольные вопросы

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

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, собрать электрическую схему 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.

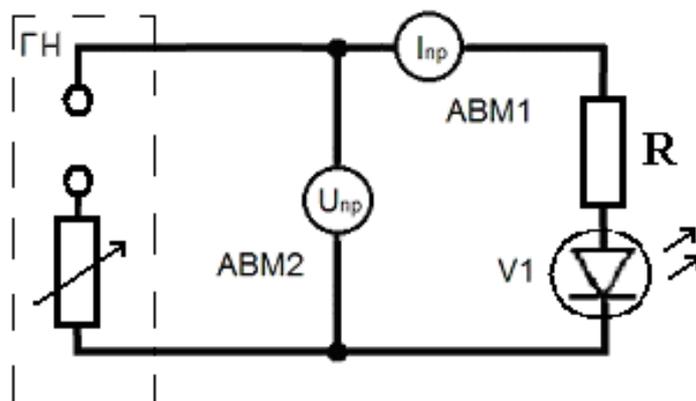


Рис. 2.41. Схема для снятия характеристик светодиода

2. Снять вольт-амперные 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 (см. рис. 2.41):

$$U = U_d + I \cdot R,$$

$$U_d = I \cdot R_d,$$

где U_d – падение напряжения на светодиоде; R – сопротивление защитного резистора; I – сила тока в контуре; R_d – сопротивление светодиода.

4. Заполнить табл. 2.4.

5. Построить ВАХ для синего и зеленого светодиодов.

Таблица 2.4

Напряжение U , В	Светодиод					
	I		R_d		U_d	
	Синий	Зеленый	Синий	Зеленый	Синий	Зеленый
2						
4						
...						
10						
12						

Исследование характеристик двухцветных светодиодов

6. Собрать схему с двухцветным светодиодом (см. 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 (см. 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 светодиодом?
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?

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, собрать электрическую схему оптической пары с помощью соединительных проводов (рис. 2.42). Инфракрасный светодиод устанавливается на дополнительную колодку с коммутационными гнездами, фотодиод – на плату стенда.

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

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

3. Включить 1-й контур, содержащий ИК-светодиод, выставить 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 R2 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 табл. 2.5.

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

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

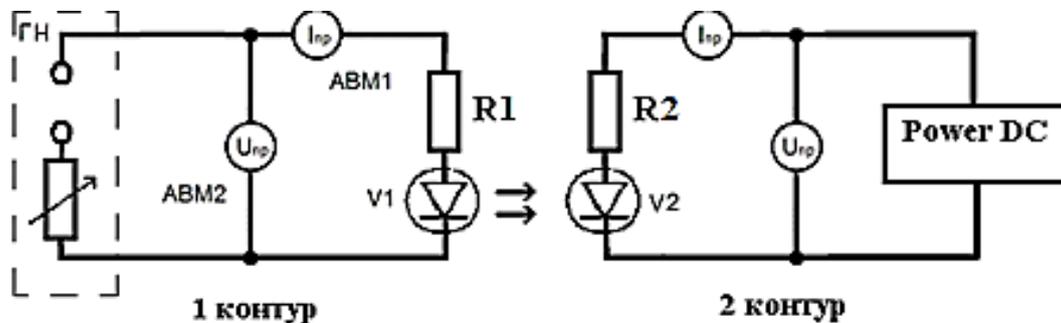


Рис. 2.42. Схема для исследования оптической пары

6. Построить вольт-амперные характеристики для 1-го и 2-го контуров.

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

Таблица 2.5

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

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия оптической пары?
2. Каков принцип действия фотодиода?
3. Чем отличается *p-i-n*-фотодиод от *p-n*-фотодиода?
4. Что такое темновой ток фотодиода?
5. В каких формах может проявиться внутренний фотоэффект фотодиода?
6. Каковы основные требования к фотоприемнику?
7. Какие основные характеристики фотодиода вы можете перечислить?

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, собрать электрическую схему, подключив источник питания ГН2, генератор низкой частоты ГНЧ, измерительные приборы ИВ, МВ, частотомер, осциллограф (рис. 2.43).

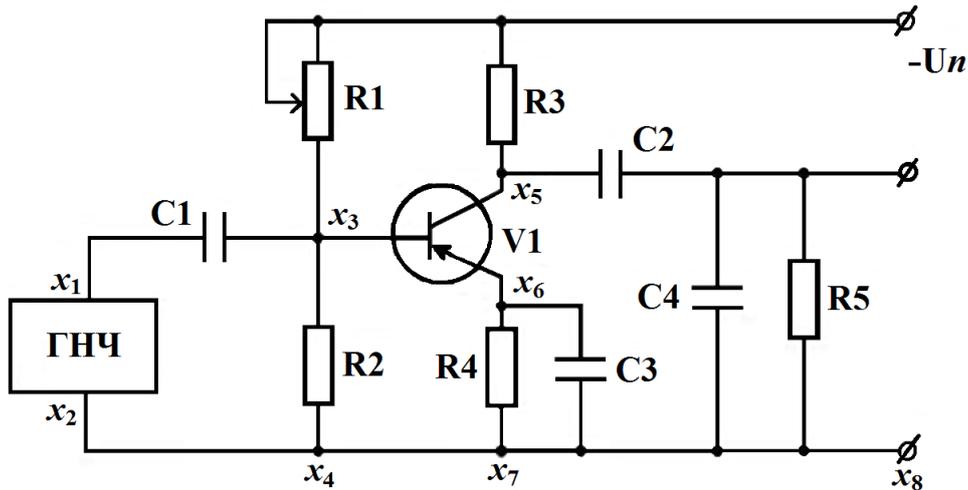


Рис. 2.43. Принципиальная схема усилителя

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 $f_c = 1$ 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 милливольтметром, подключив его к гнездам x_3 , напряжение на выходе контролировать и измерять осциллографом С1-73. Произвести 10 – 12 измерений, результаты записать в табл. 2.6 и построить амплитудную характеристику усилителя. Выходное напряжение изменять в пределах 2...60 мВ.

Таблица 2.6

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$				
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$				

5. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя (АЧХ) $U_{\text{ВЫХ}} = f(F)$ при $U_{\text{ВХ}} = 30$ мВ. Измерить выходное напряжение на частотах 20, 50, 80, 100, 200, 500, 1000, 5000, 10000, 30000, 50000, 80000, 100000 Гц. Результаты измерений записать в табл. 2.7.

Таблица 2.7

$F \cdot 100$ Гц	0,2	0,5	0,8	1	2	5	10	50	100	500	800	1000
$U_{\text{вых}}$, В												
K_U												
K_U , дБ												

По результатам измерений построить АЧХ усилителя в логарифмическом масштабе $K_U = 20 \lg (U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}})$, дБ.

Примечания:

1) входной сигнал $U_{\text{вх}} = 30$ мВ в процессе измерения АЧХ должен быть постоянным;

2) частоту входного сигнала измерять ИВ в положении ЧМ, подключив его к гнездам x_5, x_7 ;

3) амплитуду выходного сигнала измерять МА, подключив его к гнездам x_1, x_8 .

6. 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, равных 0 (отключена), 5, 20, 50 мкФ. Результаты измерений записать в табл. 2.8.

Таблица 2.8

R_2 , Ом	$C_3 = 0$ мкФ	$C_3 = 5$ мкФ	$C_3 = 20$ мкФ	$C_3 = 50$ мкФ
$U_{\text{вх}}$, мВ				
$U_{\text{вых}}$, В				
K_U				

- 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 табл. 2.9. Повторить опыт для частоты входного сигнала $f_c = 50$ кГц.

Таблица 2.9

Выходные параметры		C1, C2=0,1 мкФ	C1, C2=5 мкФ	C1, C2=20 мкФ	C1, C2=50 мкФ
$f_c = 20$ Гц	$U_{\text{вых}}, \text{В}$				
	K_U				
$f_c = 50$ кГц	$U_{\text{вых}}, \text{В}$				
	K_U				

- Коллекторное сопротивление R3

На вход усилителя подать сигнал 30 мВ с частотой $f_c = 5$ кГц. Установить на плате сопротивление $R3 = 300$ Ом.

Контроль формы выходного напряжения производить осциллографом, подключенным к гнездам x_5, x_7 .

Выходное напряжение измерять мВ с подключением к гнездам x_1, x_8 .

Плавно изменяя величину резистора R1, добиться максимального выходного напряжения, результат измерения записать в табл. 2.10. 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.

Измерить выходное напряжение усилителя при следующих величинах сопротивления нагрузки: $R5 = 330, 620$ Ом; 2, 4, 5, 10 кОм. Результаты измерений записать в табл. 2.10.

Таблица 2.10

R5, Ом	330	620	2400	5000	10000
$U_{\text{вых}}, \text{В}$					
K_U					

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

Практическое занятие № 1

Расчет светодиодов

Цель – освоение методики расчета светодиодов.

План проведения занятия

1. Повторение 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 В и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить его к источнику с напряжением 5 В (рис. 2.44).

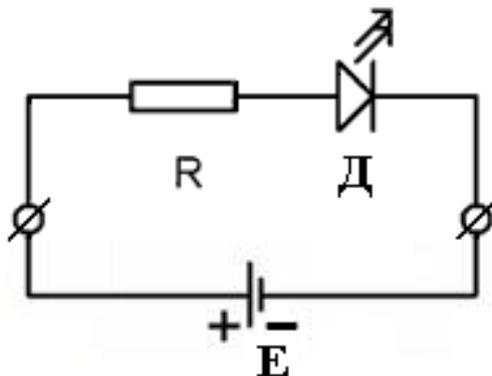


Рис. 2.44. Схема к решению задачи

Решение

$$U_{\text{питания}} := 5,$$

$$U_{\text{диода}} := 3,$$

$$I_{\text{диода}} := 20 \cdot 10^{-3},$$

$$R := \frac{U_{\text{питания}} - U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}} = 100.$$

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

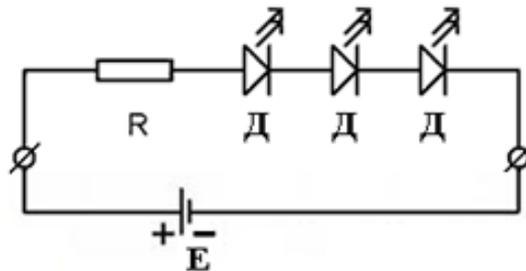


Рис. 2.45. Схема к решению задачи

Решение

$$N_d := 3,$$

$$U_{\text{питания}} := 15,$$

$$U_{\text{диода}} := 3,$$

$$I_{\text{диода}} := 20 \cdot 10^{-3},$$

$$R := \frac{U_{\text{питания}} - N_d \cdot U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}} = 300.$$

Решение примеров

Задача 1

Необходимо рассчитать сопротивление и рассеиваемую на сопротивлении мощность для цепи, содержащей источник ЭДС E , светодиод D и резистор R (см. рис. 2.45). Данные для вариантов взять из табл. 2.11.

Таблица 2.11

№ п/п	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 рабочим напряжением 3 В и током 20 мА.

Необходимо подключить N светодиодов к источнику U . Данные для вариантов взять из табл. 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?

Практическое занятие № 2

Расчет параметров диодов

Цель – освоение методов расчета параметров диодов.

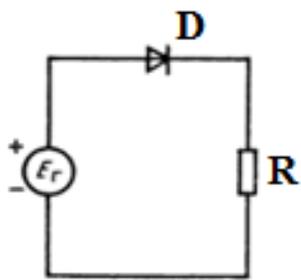
План проведения занятия

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

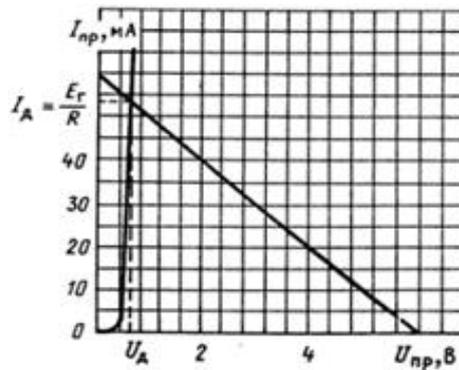
Пример решения типовой задачи

Задача 1

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



а)



б)

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

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

Решение графоаналитическим методом

Совместно решаются уравнения вольт-амперной характеристики и нагрузочной прямой.

$$I = f(U_{д}),$$

$$E = U_{д} + R \cdot I.$$

Точки для построения нагрузочной прямой

$$U_{д} = 0, \quad I = E / R = 6 / 100 = 60 \text{ мА},$$

$$I = 0, \quad U_{д} = E = 6 \text{ В}.$$

Пересечение ВАХ и нагрузочной прямой дает точку $U_{д} = 0,6 \text{ В}$, $I = 54 \text{ мА}$.

Решение аналитическим методом

Аналитическое выражение ВАХ

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

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

Из предположения, что $U_{д} \ll E$ следует

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

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

Ток диода

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

Задача 2

Дано: ВАХ диода (рис. 2.47).

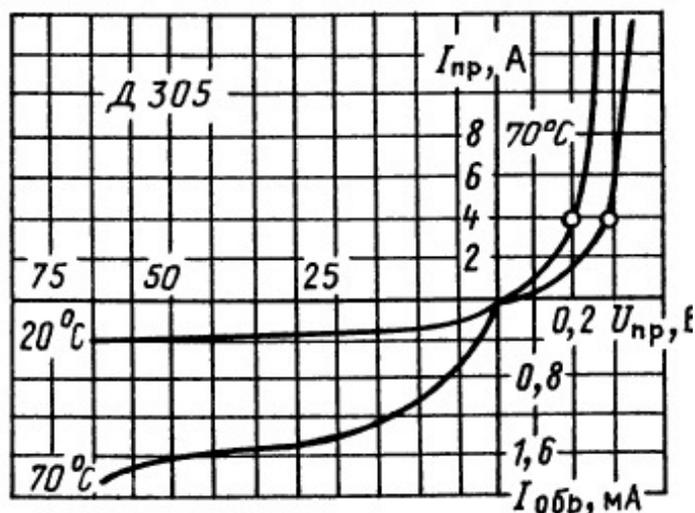


Рис. 2.47. Вольт-амперные характеристики диода

Задание.

Определить:

1. Как при напряжении на диоде $+0,2$ 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 с ростом температуры изменяются сопротивление постоянному току R_0 и обратное сопротивление $r_{\text{обр}}$ при напряжении -50 В.
4. Температуру удвоения $T_{\text{удв}}$ для теплового тока I_0 .

Решение (табл. 2.13)

Таблица 2.13

Параметр диода	Зависимость	Температура $+20^\circ\text{C}$	Температура $+70^\circ\text{C}$
φ_T	—	$0,025$ В	$\frac{343}{11600} = 0,03$ В
Сопротивление $r_{\text{диф}}$	$r_{\text{диф}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{пр}}}$	$\frac{0,025}{2} = 0,0125$ Ом	$\frac{0,03}{4} = 0,075$ Ом
Сопротивление R_0	$R_0 = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}$	$\frac{0,2}{2} = 0,1$ Ом	$\frac{0,2}{4} = 0,05$ Ом
Обратное сопротивление	$r_{\text{обр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$	$\frac{25}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 250$ 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

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

Обратное сопротивление диода с возрастанием температуры на 50 °С уменьшается в 2 раза. Сопротивление диода постоянному току уменьшается в 3,7 раза.

Из аналитического выражения ВАХ диода следует

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

где $\Delta T = T_2 - T_1$; $T_{\text{удв}}$ – изменение температуры, при котором обратный тепловой ток удваивается.

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

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

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

Контрольные задания

1. Для заданного диода подобрать оптимальную нагрузку (табл. 2.14). Предварительно ознакомиться со справочными данными, представленными на сайтах <http://www.radiolibrary.ru/reference/diod.html>, <http://5v.ru/ds/diod/kd105.htm>.

Таблица 2.14

Номер варианта	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?

Практическое занятие № 3

Расчет параметров биполярных транзисторов

Цель – освоение методов расчета параметров биполярных транзисторов.

План проведения занятия

1. Повторение 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 вольт-амперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора.

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

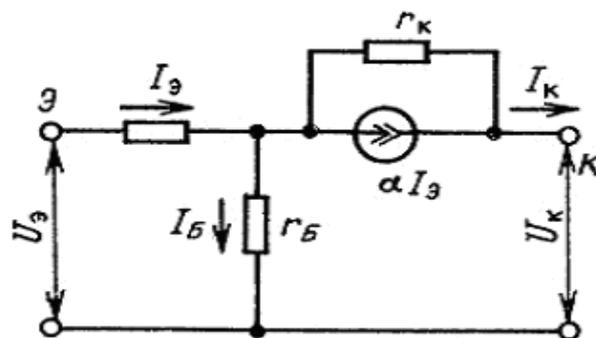


Рис. 2.48. Т-образная схема замещения биполярного транзистора

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 (рис. 2.49).

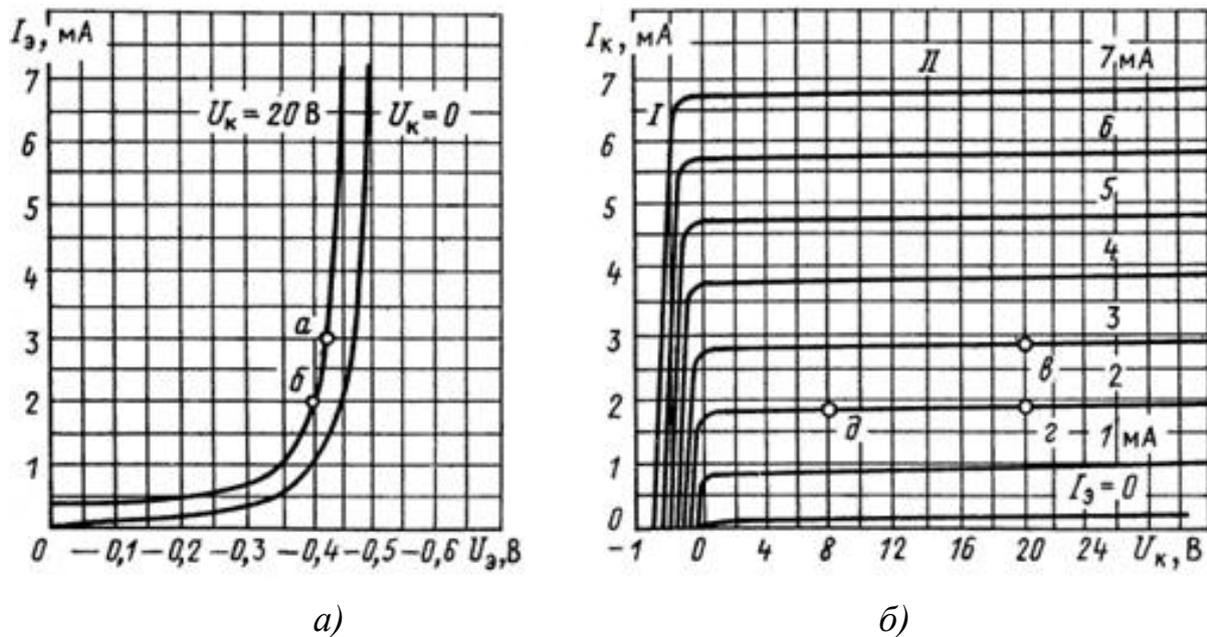


Рис. 2.49. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора

Параметры эквивалентной Т-образной схемы:

α – дифференциальный коэффициент прямой передачи по току

$$(U_k = \text{const}) \alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b},$$

r_k – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

$$(I_b = \text{const}) r_k = \frac{\Delta U_k}{\Delta I_k},$$

$r_э$ – дифференциальное сопротивление;

$r_б$ – объемное сопротивление базы.

1. Коэффициент прямой передачи α определяется по выходной ВАХ при $U_k = 20$ В.

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

2. Дифференциальное сопротивление $r_э$

$$r_э \approx \frac{\varphi_T}{I_{б\text{ ср}}} = \frac{0,025}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ Ом}.$$

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

$$r_{вх} = r_э + r_б(1 - \alpha) = \Delta U_э / \Delta I_э = 0,025 / 1 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ Ом}.$$

4. Дифференциальное сопротивление на участке гд выходной ВАХ

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

5. $I_k = \alpha \cdot I_b + I_{к0} + U_k / r_k$. При $I_b = 0$ и $U_k = 20$ В с учетом малости U_k / r_k при включении с общей базой $I_{к0} = I_k - U_k / r_k = 0,2$ мА.

Задача 2

Параметры транзистора, включенного в схему, приведенную на рис. 2.50, $\alpha = 0,995$; $I_{\text{э}0} = I_{\text{к}0} = 10^{-12}$ А. Найти токи транзистора и напряжение между коллектором и эмиттером.

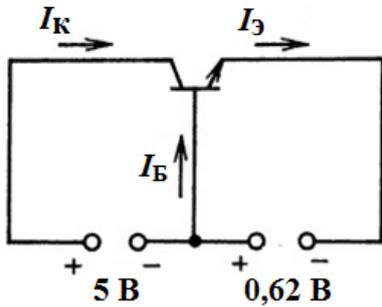


Рис. 2.50. Схема замещения транзистора

Транзистор типа $n-p-n$ с прямо смещенным эмиттерным переходом и обратным смещением коллекторного перехода $U_{\text{э}} > 0$ и $U_{\text{к}} < 0$.

1. Ток эмиттера

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}0} (e^{U_{\text{э}}/\varphi_{\text{T}}} - 1) = 10^{-12} (e^{\frac{0,62}{0,025}} - 1) \approx 58,95 \text{ мА.}$$

2. Ток коллектора

$$I_{\text{к}} = \alpha \cdot I_{\text{э}} - I_{\text{к}0} (e^{U_{\text{э}}/\varphi_{\text{T}}} - 1) = 0,995 \cdot 58,95 \cdot 10^{-3} - 10^{-12} (e^{0,62/0,025} - 1) \approx 58,66 \text{ мА.}$$

3. Ток базы

$$I_{\text{б}} = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{э}} = (1 - 0,995) \cdot 58,95 = 0,29 \text{ А.}$$

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

4. Напряжение $U_{\text{кэ}}$

$$U_{\text{кэ}} = U_{\text{к}} - U_{\text{э}} = 5 - (-0,62) = 5,62 \text{ В.}$$

Задача 3

Дано: транзистор в Т-образной схеме замещения имеет параметры $\alpha = 0,993$; $r_{\text{к}} = 1,5$ МОм; $r_{\text{б}} = 200$ Ом; $r_{\text{э}} = 20$ Ом (рис. 2.51).

Определить h -параметры для схемы с общей базой

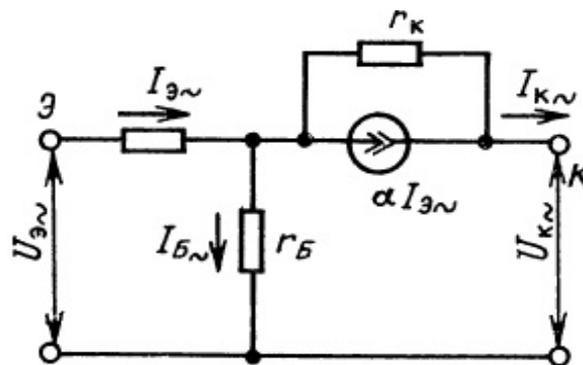


Рис. 2.51. Схема замещения транзистора

Решение

$$h_{11\text{б}} \approx r_{\text{э}} + r_{\text{б}} (1 - \alpha) = 20 + 200(1 - 0,993) = 21,4 \text{ Ом;}$$

$$h_{21\text{б}} \approx \alpha = 0,993; \quad 1 / r_{\text{к}} = 1 / 1,5 \cdot 10^6;$$

$$h_{22\delta} \approx = 0,67 \text{ мкСм};$$

$$h_{12\delta} \approx \frac{r_{\delta}}{r_{\kappa}} = \frac{200}{1,5 \cdot 10^6} = 1,33 \cdot 10^{-6}.$$

Задача 4

Дано: ВАХ транзистора с общим эмиттером (рис. 2.52). Рабочая точка с напряжением $U_{\kappa\varepsilon} = 25 \text{ В}$ и током базы 300 мкА .

Определить параметры $h_{21\varepsilon}$ и $h_{22\varepsilon}$.

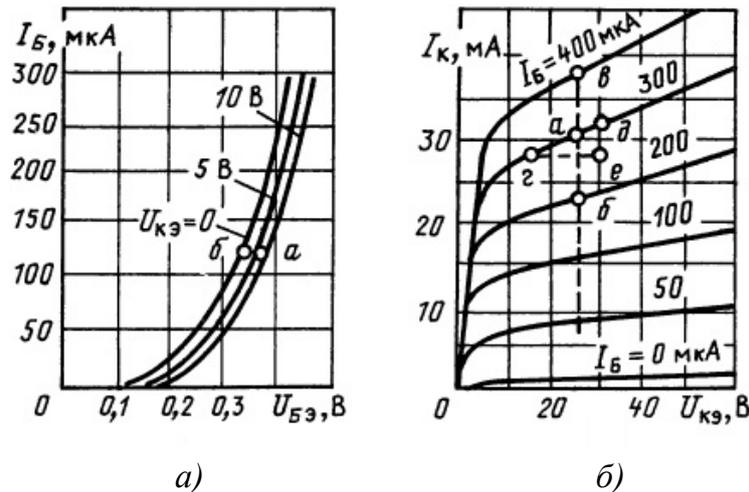


Рис. 2.52. ВАХ транзистора с общим эмиттером

1. Параметр $h_{21\varepsilon}$ находится из расстояния между выходными характеристиками (рис. 2.52, а).

$$h_{21\varepsilon} = I_{2\sim} / I_{1\sim} | U_{2\sim=0} = \Delta I_{\kappa} / \Delta I_{\text{Б}} | U_{\kappa\varepsilon} = \text{const.}$$

Подставляя значения коллекторного тока в точках б и в, находим $h_{21\varepsilon} = (37 - 23)10^{-3} / ((400 - 200)10^{-6}) = 70$.

2. Параметр $h_{22\varepsilon}$ находится из наклона выходных характеристик $h_{22\varepsilon} = I_{2\sim} / U_{2\sim} | I_{1\sim=0} = \Delta I_{\kappa} / \Delta U_{\kappa\varepsilon} | I_{\text{Б}} = \text{const.}$

Приращения тока ΔI_{κ} и напряжения $\Delta U_{\kappa\varepsilon}$ при фиксированном значении тока базы $I_{\text{Б}} = 300 \text{ мкА}$ (треугольник cde) (рис. 2.52, б).

$$h_{22\varepsilon} = 5 \cdot 10^{-3} / 15 = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ мОм.}$$

Контрольные вопросы

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением биполярного транзистора?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.
3. Изобразите условное графическое изображение $p-n-p$ и $n-p-n$ -транзисторов.

4. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и направление протекания токов.
5. Какие характеристики являются входными и выходными?
6. Какие соотношения между током эмиттера, коллектора и базы вы можете отметить?
7. В чем физический смысл h -параметров транзистора?
8. Какие режимы работы транзистора вам известны? Охарактеризуйте их.
9. Изобразите схему замещения биполярного транзистора.
10. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

Практическое занятие № 4

Расчет параметров полевых транзисторов

Цель – освоение методов расчета параметров полевых транзисторов.

План проведения занятия

1. Повторение 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.

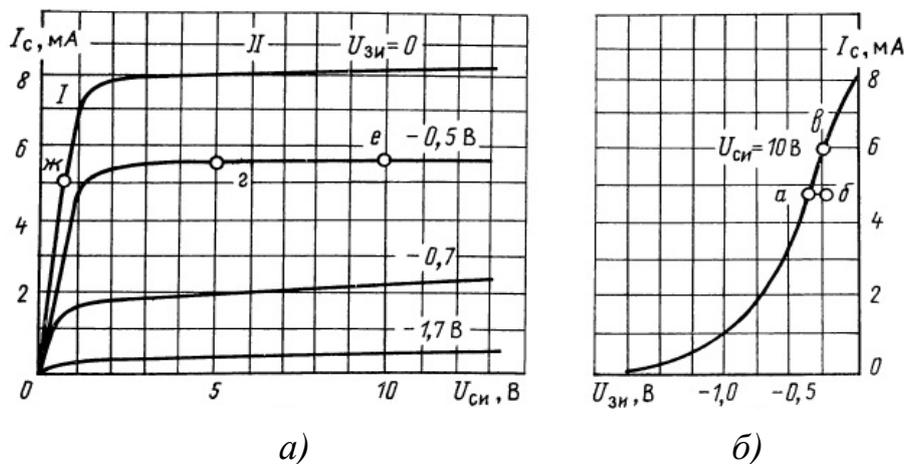


Рис. 2.53. ВАХ полевого транзистора

1. Полевой транзистор с управляющим p - n -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 $I_{с.нас} = 8,2$ мА.

2. Эквивалентная схема полевого транзистора показана на рис. 2.54.

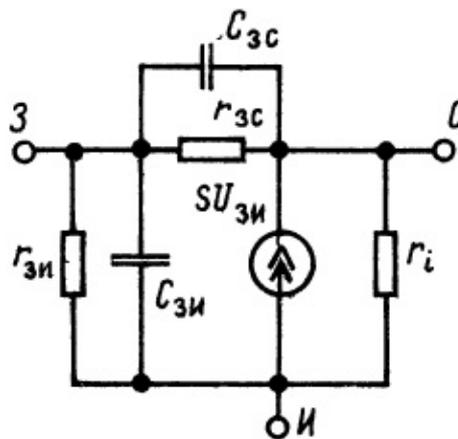


Рис. 2.54. Эквивалентная схема полевого транзистора

Крутизна стокзатворной характеристики для $U_{си} = \text{const} = 10$ В
 $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи} = 1,2 \cdot 10^{-3} / 0,12 = 10$ мА / В.

3. Дифференциальное сопротивление канала на участке насыщения для $U_{зи} = \text{const}$

$$r_c = \Delta U_{си} / \Delta I_c = 5 / 0,1 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ кОм.}$$

4. Сопротивление открытого канала (участок I ВАХ) при $U_{зи} = 0$ (точка ж на рис. 2.53).

$$R_0 = U_{си} / I_c = 0,5 / 5 \cdot 10^{-3} = 100 \text{ Ом.}$$

Задача 2

Дано: полевой транзистор с p - n -переходом имеет $I_{с \text{ max}} = 5$ мА и $U_{отс} = -2$ В.

Определить ток стока $I_{ст}$ и крутизну S при напряжениях затвора $-2, 0, -1$ В.

1. Ток стока

$$I_c = I_{с \text{ max}} (1 - |U_{зи}| / U_{отс})^2.$$

При $U_{зи} = -2 \text{ В}$ $I_c = 5 \cdot 10^{-3}(1 - 2/2)^2 = 0$;
при $U_{зи} = 0 \text{ В}$ $I_c = I_{c \text{ max}} = 5 \text{ мА}$;
при $U_{зи} = -1 \text{ В}$ $I_c = 5 \cdot 10^{-3}(1 - 1/2)^2 = 1,25 \text{ мА}$.

2. Крутизна полевого транзистора

$$S = 2I_{c \text{ max}} / U_{отс}(1 - |U_{зи}| / U_{отс}).$$

При $U_{зи} = -2 \text{ В}$ $S = 0$;

при $U_{зи} = 0 \text{ В}$ $S = S_{\text{max}} = 2 \cdot I_{c \text{ max}} / U_{отс} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 2 = 5 \text{ мА/В}$;

при $U_{зи} = -1 \text{ В}$ $S = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 2 (1 - 1/2) = 2,5 \text{ мА/В}$.

Контрольные вопросы

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением полевого транзистора?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.
3. Приведите условное графическое изображение *p-n-p*- и *n-p-n*-транзисторов.
4. Каковы условные графические 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. Какие режимы работы транзистора вы знаете? Охарактеризуйте их.
10. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

Практическое занятие № 5

Расчет радиатора

Цель – освоение методики расчета охлаждающих устройств полупроводниковых приборов.

План проведения занятия

1. Повторение 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 $R_{JC} + R_{CS} = 0,7 + 0,24 = 0,94$ °C/ Вт.

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
R_{JC}	Junction-to-Case	—	0.7	°C/W
R_{CS}	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
R_{JA}	Junction-to-Ambient	—	40	

Это означает, что если на кристалле выделяется мощность 10 Вт, то его температура будет на 9,4 °C больше температуры радиатора.

Задача. Рассчитать радиатор, обеспечивающий охлаждение транзистора ЭРСТ, состоящего из 20 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 °C при максимальной температуре окружающей среды +40 °C.

Тепловое сопротивление R_{JA} для одного транзистора IRFP250N

$$R_{JA} \leq \frac{T_J - T_A}{P_{\text{шт}}} = \frac{110 - 40}{26,4} = 2,65 \text{ °C/Вт.}$$

Тепловое сопротивление радиатора

$$R_{SA} = R_{JA} - R_{JC} - R_{CS} = 2,65 - 0,7 - 0,24 = 1,71 \text{ °C/Вт.}$$

Исходя из максимальной температуры кристалла и теплового сопротивления на участке кристалл – радиатор максимальная температура радиатора

$$T_S = T_J - P_{\text{шт}}(R_{JC} + R_{CS}) = 110 - 26,4(0,7 + 0,24) = 85 \text{ °C.}$$

С учетом графика и разницы температуры радиатора и окружающей среды поправочный коэффициент K_T (см. рис. 2.30)

$$T_S - T_A = 85 - 40 = 45 \text{ °C;}$$

$$K_T = 1,11.$$

Для охлаждения радиатора используется вентилятор типа 1,25ЭВ-2,8-6-3270У4 с производительностью 280 м³/ч. Чтобы вычис-

лить 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 $280 / (0,0196 \cdot 3600) = 4 \text{ м/с}$.

По графику рис. 2.31 поправочный коэффициент K_V на реальную скорость воздушного потока $K_V = 0,63$.

Большое количество готовых радиаторов имеют 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: $K = K_T \cdot K_V \cdot K_L = 1,19 \cdot 0,63 \cdot 1,6 = 1,2$.

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 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 табл. 2.15 для вариантов задания. Справочные данные взять на сайте <http://tec.org.ru/board/irfp250n/49-1-0-1135>.

Таблица 2.15

Номер варианта	Марка транзистора	Количество 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?

Практическое занятие № 6

Моделирование работы сглаживающего емкостного фильтра в цепи переменного тока

Цель – получение практических навыков по моделированию переходных процессов в электрических схемах с элементами электроники.

План проведения занятия

1. Повторение 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 (см. рис. 2.5) применяется емкостный фильтр. Пример расчетного модуля пакета MathCad, моделирующего работу транзистора и ёмкости в цепи переменного тока, приведен в листинге на рис. 2.55.

Выпрямление от диода учитывается выражением функции с условием для однополупериодного выпрямления

$$if(20 \cdot \sin(\omega \cdot t) > 0, 20 \cdot \sin(\omega \cdot t), 0),$$

где $20 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ – мгновенное выражение для напряжения источника переменного тока с амплитудой 20 В и нулевой фазой. Моделирование переходного процесса проводится численным методом Рунге – Кутта 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;
- функция первых производных искомой функции.

$$R := 40 \quad \omega := 100 \cdot \pi \quad C_{\text{расч}} := \frac{1}{\omega \cdot R} = 7,958 \cdot 10^{-5}$$

$$C_c := 2 \cdot 10^{-4} \quad n := 0 \dots 500$$

$$X_c := \frac{1}{\omega \cdot C_c} = 15,915, \quad Dd(t, u) := \frac{\text{if}(20 \sin(\omega \cdot t) > 0, 20 \sin(\omega \cdot t), 0)}{Z \cdot C_c} - \frac{u}{R \cdot C_c}$$

$$Z := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_c}\right)^2}},$$

$$Ud := \text{rkfixed}(0, 0, 0,08, 500, Dd)$$

$$D(t, u) := \frac{20 \sin(\omega \cdot t)}{Z \cdot C_c} - \frac{u}{R \cdot C_c}$$

$$U := \text{rkfixed}(0, 0, 0,08, 500, D)$$

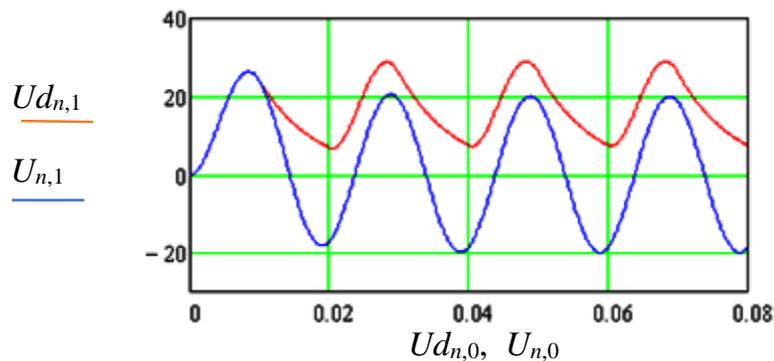


Рис. 2.55. Листинг выполняемого расчетного модуля пакета MathCad

На графике представлены две функции:

Ud – изменение напряжения при установке в схему 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 (см. рис. 2.5).

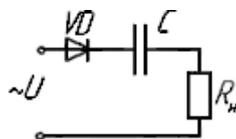
Промоделировать численными методами в математическом пакете MathCad переходный процесс при разных значениях емкости C , начиная со значения меньшего расчетного, последующие варианты берутся с шагом приращения в сторону увеличения (шаг приращения и начальное значение согласовываются с преподавателем). Отобразить характер изменения пульсаций выпрямленного напряжения на совмещенном графике. Варианты для заданий приведены в табл. 2.16.

Таблица 2.16

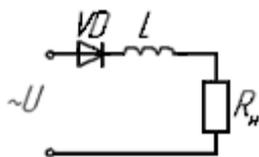
Номер варианта	Сопротивление нагрузки, Ом	Частота, Гц	Амплитудное напряжение источника, В
1	10	60	20
2	20	50	30
3	30	60	40
4	40	50	50
5	50	60	60
6	60	50	50
7	70	100	40
8	80	200	30
9	90	100	20
10	100	200	10
11	110	100	10
12	120	200	20
13	130	60	30
14	140	50	40
15	150	100	50
16	160	60	40
17	170	50	30
18	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. Составьте исходную систему расчетных уравнений для схемы замещения цепи переменного тока индуктивного однополупериодного выпрямителя.



4. Для каких целей ставится трансформатор на входе в выпрямитель?
5. Как 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?

Практическое занятие № 7

Проектирование выпрямительного устройства с фильтром

Цель – 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_ϕ 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_ϕ/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 $k_{п.вых} = 0,02$; напряжение питающей сети $U_c = 220$ В; частота сети $f_c = 400$ Гц; температура окружающей среды $t_{окр} = 40$ °С.

Порядок расчета.

Определяем сопротивление нагрузки

$$R_n = U_0 / I_0 = 27/1 = 27 \text{ Ом.}$$

Находим выходную мощность выпрямителя

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 = 27 \cdot 1 = 27 \text{ Вт.}$$

Выбираем мостовую схему выпрямления, так как требования к пульсациям нежесткие 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.

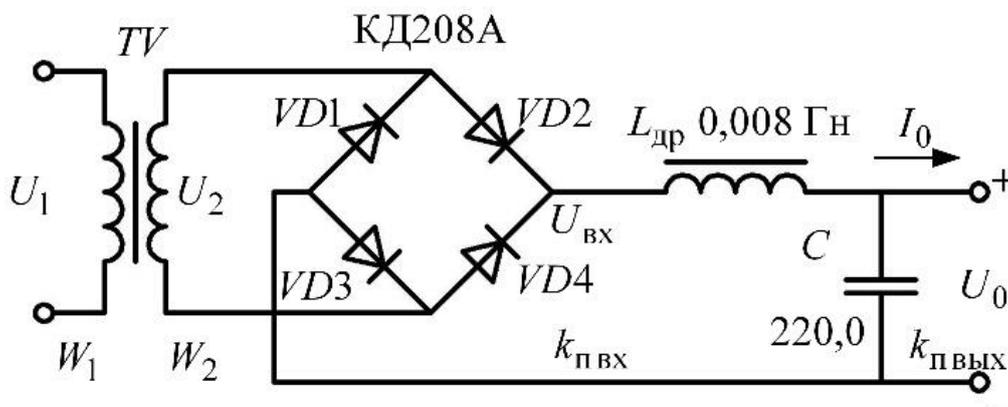


Рис. 2.56. Схема выпрямителя с фильтром

Характер нагрузки схемы выпрямления – индуктивный. В мостовой схеме на выходе выпрямителя коэффициент пульсаций $k_{п.вх} = 0,67$, число фаз выпрямления $m = 2$.

Требуемый коэффициент сглаживания фильтра

$$q = k_{п.вх} / k_{вых} = 0,67 / 0,02 = 33,5.$$

Находим произведение LC для частоты сети 400 Гц

$$L \cdot C = 0,16 (q + 1) / m^2 = 0,16 (33,5 + 1) / 2^2 = 1,38 \text{ Гн} \cdot \text{мкФ}.$$

Рассчитываем минимальную индуктивность дросселя фильтра, при которой характер нагрузки еще будет индуктивным

$$L_{\min} = \frac{2R_H}{(m^2-1) m 2\pi f_c} = \frac{2 \cdot 27}{(2^2-1)2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 400} = 0,0036 \text{ Гн}.$$

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

$$C = L \cdot C / L_{др} = 1,38 / 0,008 = 172 \text{ мкФ}.$$

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 $U_2 = 1,11 \cdot U_0$, 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.

$$q = (m \cdot \omega c)^2 LC - 1 = (2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 400)^2 0,008 \cdot 220 \cdot 10^{-6} - 1 = 43.$$

Коэффициент пульсаций на выходе фильтра

$$k_{вых} = k_{п.вх} / q = 0,67 / 43 = 0,015,$$

что лучше заданного.

Допустимый для выбранного конденсатора коэффициент пульсации на частоте 1000 Гц $k_{п.доп} = 1,3$ % от номинального напряжения. Допустимая амплитуда переменной составляющей $U_{Сm доп} = 1,3 \cdot 50/100 = 0,65$ В. В схеме получаются пульсации с амплитудой $U_m = k_{п.вых} \cdot U_{0ср} = 0,015 \cdot 27 = 0,41$ В, что меньше допустимого. Если бы U_m получилось больше $U_{Сm доп}$, то пришлось бы перейти к другому конденсатору с большим допустимым напряжением или большей емкостью.

Напряжение на входе фильтра

$$U_{\text{вх}} = U_0 + r_{\text{др}} \cdot I_0 = 27 + 1,1 \cdot 1 = 28,1 \text{ В.}$$

Расчет схемы выпрямления. Исходные данные: $U_{\text{вх}} = 28,1 \text{ В}$, $I_0 = 1 \text{ А}$, $U_c = 220 \text{ В}$, $f_c = 400 \text{ Гц}$. Схема выпрямления выбрана мостовая ($m = 2$), работает на индуктивность.

Максимальное обратное напряжение на вентиле (табл. 3.1 [16])

$$U_{\text{обр.мах}} = 1,57 \cdot U_{\text{вх}} = 1,57 \cdot 28,1 = 44,1 \text{ В.}$$

Доля выпрямленного тока, приходящаяся на вентиль:

$$I_{\text{ср}} = 0,5 \cdot I_0 = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ А.}$$

Выбираем из справочника [17] вентиль КД208А. Его данные: допустимый выпрямленный ток $I_{\text{доп}} = 3 \text{ А}$; допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр.доп}} = 100 \text{ В}$; $t_{\text{окр.доп}} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$; $U_{\text{пр}} = 1 \text{ В}$.

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 них оценивается отдельно.

Определяем дифференциальное сопротивление вентиля. Значения $U_{\text{пр}}$, приведенные в таблицах [17], измерены на пульсирующем токе и меньше падения напряжения при постоянном токе приблизительно в 1,2 раза, поэтому сопротивление одного вентиля $r_{\text{т}} \approx 1,2 \cdot U_{\text{пр}} / I_{\text{пр доп}} = 1,2 \cdot 1/3 = 0,4 \text{ Ом}$. В плечо моста включены два вентиля последовательно, сопротивление плеча моста $r_{\text{пл}} = 0,8 \text{ Ом}$.

Находим ориентировочные значения омического сопротивления фазы выпрямителя r_{ϕ} и индуктивности рассеяния трансформатора L_S .

Для трансформатора с $P = 27 \text{ Вт}$ и $f_c = 400 \text{ Гц}$ целесообразна броневая конструкция трансформатора, поэтому число стержней, на которых размещены обмотки, $S = 1$. Рекомендуемая максимальная индукция в стали сердечника $B_m = 1,4 \text{ Тл}$ (холоднокатаная сталь) [18].

$$r_{\phi} = r_{\text{пл}} + r_{\text{тр}} = r_{\text{пл}} + \frac{k_r \cdot R'_H}{f_c \cdot B_m} \sqrt{\frac{S f_c \cdot R'_H}{I_0 \cdot B_m}},$$

$$r_{\phi} = 0,8 + \frac{5,1 \cdot 28,1}{400 \cdot 1,4} \sqrt{\frac{1 \cdot 400 \cdot 1,4}{1 \cdot 28,1}} = 1,34 \text{ Ом.}$$

$$L_S = k_L 10^{-3} \frac{R'_H}{f_c \cdot B_m} \sqrt{\frac{S^3 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0}{f_c \cdot B_m}},$$

$$L_S = 6,4 \cdot 10^{-3} \frac{28,1}{400 \cdot 1,4} \sqrt{\frac{1^3 \cdot 28,1 \cdot 1}{400 \cdot 1,4}} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

В этих формулах k_r и k_L – коэффициенты, зависящие от схемы выпрямления и характера нагрузки, приведены в табл. 3.2 [16]. Реактивное сопротивление индуктивности рассеяния трансформатора

$$x_{\text{тр}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot L_S = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 0,376 \text{ Ом.}$$

$$R'_n = U_{\text{вх}} / I_0 = 28,1 \text{ Ом} \text{ – нагрузка выпрямителя.}$$

Расчетное выпрямленное напряжение при холостом ходе

$$U_{\text{вх.хх}} = U_{\text{вх}} + I_0 (r_{\Phi} + x_{\text{тр}}) = 28,1 + 1(1,34 + 0,376) = 29,8 \text{ В.}$$

$$\text{Уточняем } U_{\text{обр.мах}} = 1,57 \cdot U_{\text{вх.хх}} = 1,57 \cdot 29,8 = 46,8 \text{ В.}$$

Вентили по обратному напряжению выбраны правильно.

Параметры трансформатора

$$U_2 = E_2 = 1,11 \cdot U_{0\text{хх}} = 1,11 \cdot 29,8 = 33 \text{ В.}$$

$$I_2 = I_0 = 1 \text{ А.}$$

$$I_1 = I_0 \cdot W_2 / W_1 = I_0 \cdot U_2 / U_1 = 1 \cdot 33 / 220 = 0,15 \text{ А.}$$

Габаритные мощности первичной и вторичной обмоток одинаковы и габаритная мощность трансформатора

$$P_{\text{тр.г}} = 1,11 \cdot P_{\text{вх}} = 1,11 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}} = 1,11 \cdot 28,1 \cdot 1 = 31,2 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Находим угол перекрытия фаз

$$1 - \cos \gamma = I_0 \frac{x_{\text{тр}}}{U_{\text{вх}}} = I_0 \frac{0,376}{28,1} = 0,00134 \approx 0.$$

$$\cos \gamma = 1; \gamma = 0.$$

Коэффициент пульсации из-за малости угла перекрытия не изменится, также не изменится и напряжение на нагрузке.

Находим внутреннее сопротивление выпрямителя

$$r_0 \approx \frac{(U_{\text{вх.хх}} - U_{\text{вх}})}{I_0} = \frac{(29,8 - 28,1)}{1} = 1,7 \text{ Ом.}$$

$$\text{Определяем КПД выпрямителя } \eta = \frac{P_0}{(P_{\text{вх}} + P_{\text{тр}} + P_{\text{д}})} = \frac{27}{(28,1 + 2,18 + 2)} = 83,6 \text{ \%}.$$

Потери в трансформаторе

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{тр.г}} (1 - \eta_{\text{тр}}) = 31,2(1 - 0,93) = 2,18 \text{ Вт.}$$

В соответствии с рекомендациями [18] для расчетной мощности КПД трансформатора $\eta_{\text{тр}}$ принят равным 0,93. Потери в вентилях $P_{\text{д}} = I_0 \cdot U_{\text{пр}} \cdot N = 1 \cdot 1 \cdot 2 = 2 \text{ Вт}$ (N – количество вентилях в плече). $P_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cdot I_0 = 28,1 \cdot 1 = 28,1 \text{ Вт}$ – мощность, поступающая на вход фильтра.

Расчитанный 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 $U_{m1} = 2,4$ В; нагрузка $I_0 = 0,25$ А; напряжение сети $U_c = U_1 = 220$ В с частотой $f_c = 50$ Гц.

Порядок расчета

Выбираем схему выпрямления.

Мощность нагрузки $P_0 = U_0 \cdot I_0 = 45,4 \cdot 0,25 = 11,35$ Вт.

Сопротивление нагрузки $R_H = U_0 / I_0 = 45,4 / 0,25 = 181$ Ом.

Коэффициент пульсации на выходе выпрямителя

$$k_n = U_{m1} / U_0 = 2,4 / 45,4 = 0,053; \quad k_n = 5,3 \%$$

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 вентиля определяются исходя из $B \approx 1$. Обратное напряжение на вентиле, работающем на емкостную нагрузку:

$$U_{обр} = 1,41 \cdot B \cdot U_0 = 1,41 \cdot 1 \cdot 45,4 = 64 \text{ В.}$$

Выпрямленный ток, приходящийся на один вентиль:

$$I_{cp} = 0,5 \cdot I_0 = 0,5 \cdot 0,25 = 0,125 \text{ А.}$$

По среднему току вентиля и обратному напряжению выбираем вентиль КД109А с параметрами

$$I_{пр.ср. max} = 0,3 \text{ А; } U_{обр. max} = 100 \text{ В; } U_{пр} = 1 \text{ В.}$$

Дифференциальное сопротивление вентиля

$$r_T = 1,2 \cdot U_{пр} / I_{пр. доп} = 1,2 \cdot 1 / 0,3 = 4 \text{ Ом.}$$

Расчет трансформатора

Активное сопротивление трансформатора

$$r_{тр} = k_r \frac{R_H}{f_c B_m} \sqrt[4]{\frac{S f_c \cdot B_m}{I_0 \cdot U_0}} = 3,5 \frac{181}{50 \cdot 1,25} \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,25}{0,25 \cdot 45,4}} = 11,6 \text{ Ом.}$$

Индукция в сердечнике трансформатора для частоты 50 Гц $B_m = 1,25$ Тл; трансформатор выбираем броневой, поэтому $S = 1$.

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора

$$L_S = k_L \cdot 10^{-3} \frac{R_H'}{f_c \cdot B_m} \sqrt[4]{\frac{S^3 \cdot U_{вх} \cdot I_0}{f_c \cdot B_m}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{181}{50 \cdot 1,25} \sqrt[4]{\frac{1^3 \cdot 45,4 \cdot 0,25}{50 \cdot 1,25}} = 9,4 \text{ мГн.}$$

Значения k_r и k_L выбираем по тем же таблицам, что и в примере 1, но для емкостной нагрузки.

Реактивное сопротивление трансформатора

$$x_{\text{тр}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot L_S = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} = 2,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивление фазы выпрямления для мостовой схемы

$$r_{\phi} = 2 \cdot r_{\Gamma} + r_{\text{тр}} = 2 \cdot 4 + 11,6 = 19,6 \text{ Ом.}$$

Параметр A

$$A = I_0 \cdot \pi \cdot r_{\phi} / (m \cdot U_0) = 0,25 \cdot \pi \cdot 19,6 / (2 \cdot 45,4) = 0,21.$$

Угол φ , учитывающий влияние индуктивности рассеяния трансформатора [16]:

$$\varphi = \arctg(x_{\text{тр}} / r_{\phi}) = \arctg(2,9 / 19,6) = 8^{\circ}30'.$$

Из графиков [10, с. 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

$$I_{\text{пр.ср}} = 0,5 \cdot D \cdot I_0 = 0,5 \cdot 2,22 \cdot 0,25 = 0,275 \text{ А,}$$

$$1,57 \cdot I_{\text{пр.ср.мах}} = 1,57 \cdot 0,3 = 0,471 \text{ А. } I_{\text{пр.ср}} < 1,57 \cdot I_{\text{пр.ср.мах}}.$$

$$U_{\text{обр}} = 1,41 \cdot B \cdot U_0 = 1,41 \cdot 0,96 \cdot 45,4 = 61,5 \text{ В} < U_{\text{обр.мах}} = 100 \text{ В.}$$

Вентили КД109А пригодны для работы в выпрямителе.

Параметры трансформатора:

$$\text{напряжение вторичной обмотки } U_2 = B \cdot U_0 = 0,96 \cdot 45,4 = 43,2 \text{ В;}$$

$$\text{ток вторичной обмотки } I_2 = 0,707 \cdot D \cdot I_0 = 0,707 \cdot 2,22 \cdot 0,25 = 0,39 \text{ А;}$$

$$\text{напряжение первичной обмотки } U_1 = 220 \text{ В.}$$

Ток первичной обмотки

$$I_1 = 0,707 \cdot D \cdot I_0 \cdot U_0 / U_1 = 0,707 \cdot 2,22 \cdot 0,25 \cdot 45,4 / 220 = 0,08 \text{ А.}$$

Габаритные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора одинаковы

$$P_1 = P_2 = 0,707 \cdot B \cdot D \cdot P_0 = 0,707 \cdot 0,96 \cdot 2,22 \cdot 11,35 = 17,1 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

$$\text{Габаритная мощность трансформатора } P_{\text{тр г}} = 17,1 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Емкость 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

$$U_{0m} = k_n \cdot U_0 = 0,051 \cdot 45,4 = 2,31 \text{ В.}$$

На холостом ходу конденсатор заряжается до напряжения

$$U_{2m} = U_2 \cdot \sqrt{2} = 43,2 \cdot 1,41 = 62 \text{ В.}$$

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.

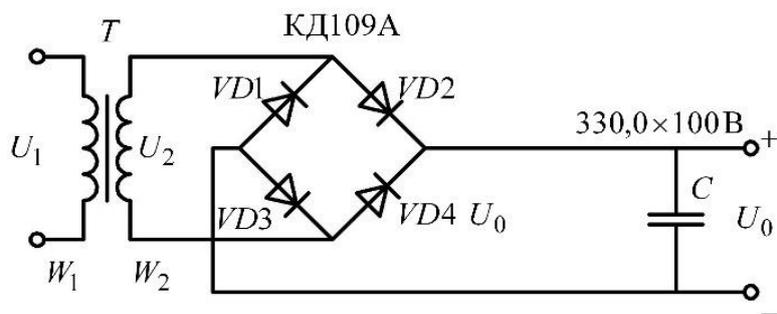


Рис. 2.57. Схема выпрямителя для транзисторного фильтра

У конденсатора К50-35 допустимый коэффициент пульсаций на частоте 100 Гц составляет $k_{п.доп} = 4,2 \%$, допустимая амплитуда пульсаций $U_{m доп} = U_{раб} \cdot k_{п} = 100 \cdot 0,042 = 4,2 \text{ В}$, что больше рассчитанной. Так как рабочее напряжение выбранного конденсатора заметно больше выпрямленного, то проверку на максимум напряжения можно не проводить.

2.4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Темы для самостоятельного изучения

1. Электровакуумные устройства

Электровакуумные лампы.

Электронная эмиссия.

Многоэлектродные лампы.

Газоразрядные лампы.

СВЧ-устройства.

Акустические усилители на вакуумных лампах.

2. Полупроводниковые приборы

Диоды специального назначения.

Тиристоры

Комбинированные транзисторы.

3. Выпрямители

Сглаживающие фильтры.

Управляемые выпрямители.

Трёхфазные выпрямители.

4. Усилители

Импульсные усилители.

Многокаскадные усилители.

Динамические характеристики усилителей.

5. Преобразователи

Инверторы.

Компенсаторы реактивной мощности.

Переключатели.

6. Импульсная техника

Импульсные устройства.

Логические элементы.

Триггеры. Счетчики. Регистры.

Шифраторы и дешифраторы. Сумматоры.

Микропроцессоры.

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.

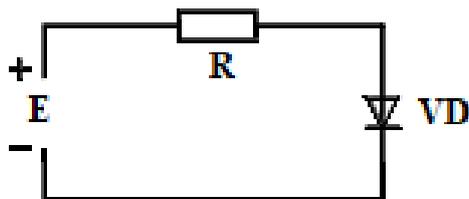


Рис. 2.58. Схема к задаче 3

4. Идеализированный диод включен в схему (рис. 2.59). Определить выходное напряжение при обратном токе насыщения 10^{-12} А.

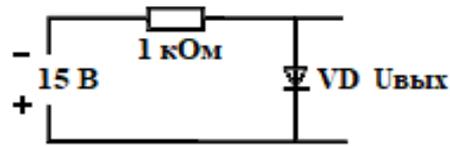


Рис. 2.59. Схема к задаче 4

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.

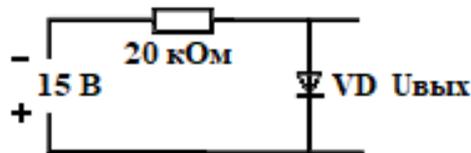


Рис. 2.60. Схема к задаче 5

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 рис. 2.61.

$R_3 = 5$ к, $R_k = 10$ к, $E_3 = 10$ В, $E_k = 30$ В. Считая, что транзистор работает в активном режиме, определить напряжение $U_{кб}$ для случаев

- $\alpha = 1$; $I_{к0} = 0$.
- $\alpha = 0,98$; $I_{к0} = 2 \cdot 10^{-4}$ А.

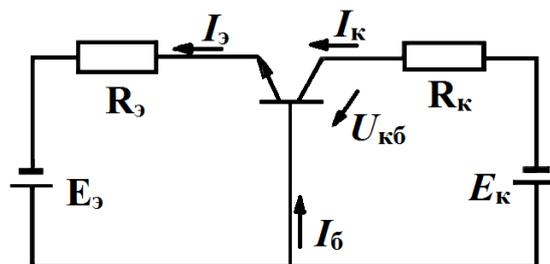


Рис. 2.61. Схема к задаче 7

8. Кремниевый транзистор $p-n-p$ -типа включен по схеме рис. 2.62 и работает в активном режиме. $R_3 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_6 = 25 \text{ кОм}$, $R_K = 4 \text{ кОм}$, $E_3 = 2 \text{ В}$, $E_K = 16 \text{ В}$; $\alpha = 0,98$; $I_{K0} = 0$.

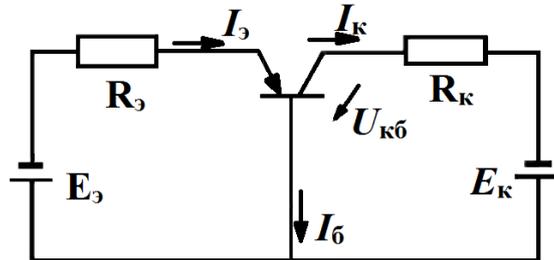


Рис. 2.62. Схема к задаче 8

Определить ток коллектора, напряжение $U_{КБ}$ и уточнить режим работы транзистора.

9. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора $I_K = 1 \text{ мА}$, ток базы $I_6 = 20 \text{ мкА}$, обратный ток коллектора $I_{К60} = 10^{-8} \text{ А}$. Определить коэффициенты передачи по постоянному току α , β и обратный ток коллектора $I_{КЭ0}$.

10. Кремниевый транзистор $p-n-p$ -типа включен по схеме рис. 2.63.

Определить коллекторный ток, если коэффициент передачи тока $\alpha = 0,98$, обратный ток коллектора $I_{К60} = 10 \text{ мкА}$.

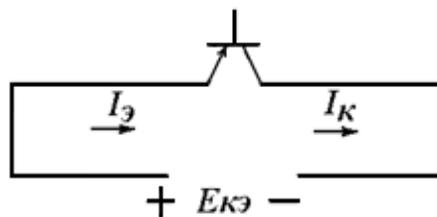


Рис. 2.63. Схема к задаче 10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Освоение дисциплины «Электротехника и электроника» позволяет сформировать у обучающихся научно-техническое мировоззрение, способность решать конкретные технические задачи, связанные с использованием электротехнического оборудования и электроизмерительных устройств.

В процессе освоения раздела «Электротехника» студенты получают начальные знания об элементной базе электротехники, структуре и принципах построения электрических схем.

Раздел «Электроника» знакомит учащихся с физическими основами процессов электронных компонентов и устройств.

Правильный выбор и эксплуатация оборудования невозможны 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 практических позиций. В предлагаемом учебно-практическом пособии нашли отражение методики обучения бакалавров неэлектротехнических направлений, реализованные на кафедре электротехники и электроэнергетики Владимирского государственного университета с использованием имеющегося лабораторного оборудования и вычислительных средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Литература по электротехнике

1. Ермуратский, П. В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин – М. : Пресс, 2011. – 416 с. – ISBN 978-5-94074-688-1. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785940746881.html> (дата обращения: 10.09.2017).

2. Немцов, М. В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / М. В. Немцов. – М. : Абрис, 2012. – 560 с. – ISBN 978-5-4372-0055-1. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200551.html> (дата обращения: 10.09.2017).

3. Справочник электрика [Электронный ресурс] / С. Л. Корякин-Черняк [и др.]. – СПб. : Наука и техника, 2011. – 576 с. – ISBN 978-5-94387-848-0. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785943878480.html> (дата обращения: 10.09.2017).

4. Ванюшин, М. Первые шаги в электротехнику. Просто о сложном [Электронный ресурс] / М. Ванюшин. – СПб. : Наука и техника, 2011. – 352 с. – ISBN 978-5-94387-835-0. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785943878350.html> (дата обращения: 10.09.2017).

5. Рекус, Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники [Электронный ресурс] / Г. Г. Рекус. – М. : Абрис, 2012. – 654 с. – ISBN 978-5-4372-0066-7. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200667.html> (дата обращения: 10.09.2017).

6. Савченко, В. И. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / В. И. Савченко. – М. : АСВ, 2012. – 266 с. – ISBN 978-5-93093-884-5. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930938845.html> (дата обращения: 10.09.2017).

7. Электротехника и электроника. Т. 1. Электротехника / Ю. Г. Подкин [и др.]. – М. : Академия, 2011. – 400 с. (Серия Бакалавриат). – ISBN 978-5-7695-7147-3.

8. Справочник по основам теоретической электротехники : учеб. пособие / под ред. Ю. А. Бычкова [и др.]. – СПб. : Лань, 2012. – 368 с. – ISBN 978-5-8114-1227-3.

9. Электротехника и основы электроники / И. И. Иванов [и др.]. – СПб. : Лань, 2012. – 736 с. – ISBN 978-5-8114-0523-7.

10. Касаткин, А. С. Электротехника : учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Академия, 2005. – 544 с. – ISBN 5-7695-2144-9.

11. Исаев, И. Н. Практика использования системы Mathcad в расчетах электрических и магнитных цепей : учеб. пособие / И. Н. Исаев, А. М. Купцов. – М. : Солон-Пресс, 2014. – 180 с. – ISBN 978-5-91359-123-4.

Литература по электронике

12. Рег, Дж. Промышленная электроника [Электронный ресурс] / Дж. Рег. – М. : Пресс, 2011. – 1136 с. – ISBN 978-5-94074-478-8. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785940744788.html> (дата обращения: 10.09.2017).

13. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электроника». Ч. 1 [Электронный ресурс] / сост.: Д. П. Андрианов, В. И. Афонин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – URL: <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/3785/1/00509.doc> (дата обращения: 10.09.2017).

14. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электроника». Ч. 2 [Электронный ресурс] / сост.: Д. П. Андрианов, В. И. Афонин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – URL: <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4086/1/00562.doc> (дата обращения: 10.09.2017).

15. Мелешин, В. Транзисторная преобразовательная техника / В. Мелешин. – М. : Техносфера, 2005. – 632 с. – ISBN 5-94836-051-2.

16. Артамонов, Б. И. Источники электропитания радиоустройств / Б. И. Артамонов, А. А. Бокуняев. – М. : Энергоиздат, 1982.

17. Электронные компоненты. Каталоги фирмы «Платан» [Электронный ресурс]. – URL: <http://platan.ru/> (дата обращения: 10.09.2017).

18. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры : справочник / под ред. Г. С. Найвельта. – М. : Радио и связь, 1985.

Электронные ресурсы

19. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.exponenta.ru/soft/mathcad/usersguide/0.asp> (дата обращения: 15.05.2018).

20. Информационный проект для работников электрических служб и студентов электротехнических вузов: сайт для электриков [Электронный ресурс]. – URL: <http://electrichelp.ru/elektrotexnika-i-elektronika-konspekt-lekcij> (дата обращения: 15.05.2018).

21. Радиоэлектроника и электротехника: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.radioingener.ru/elektronika-polnyj-kurs-lekcij> (дата обращения: 15.05.2018).

22. Единое окно доступа к информационным ресурсам: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://window.edu.ru/resource/855/36855> (дата обращения: 15.05.2018).

23. Учебные материалы для студентов: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://vunivere.ru/work14845> (дата обращения: 15.05.2018).

24. Телефония и электронные компоненты: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://tec.org.ru/board/irfp250n/49-1-0-1135> (дата обращения: 15.05.2018).

25. Справочник радиолюбителя: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.radiolibrary.ru> (дата обращения: 15.05.2018).

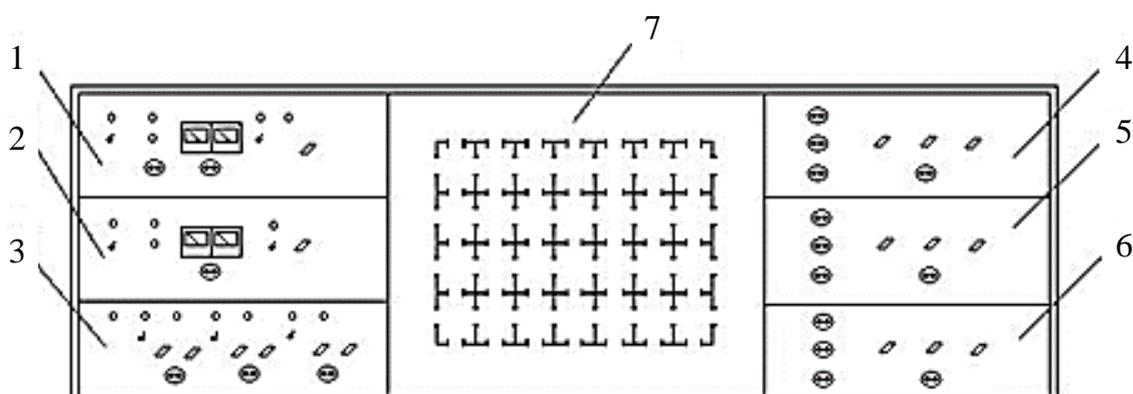
26. Справочник по электронным компонентам: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://5v.ru/index.htm> (дата обращения: 15.05.2018).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Краткие сведения о лабораторном стенде УИЛС-1

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд УИЛС-1 представляет собой конструкцию, состоящую из корпусов активных и пассивных блоков, соединенных наборным полем (см. рисунок).



Общий вид стенда УИЛС-1: 1, 2 – блоки постоянных и переменного напряжений; 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.

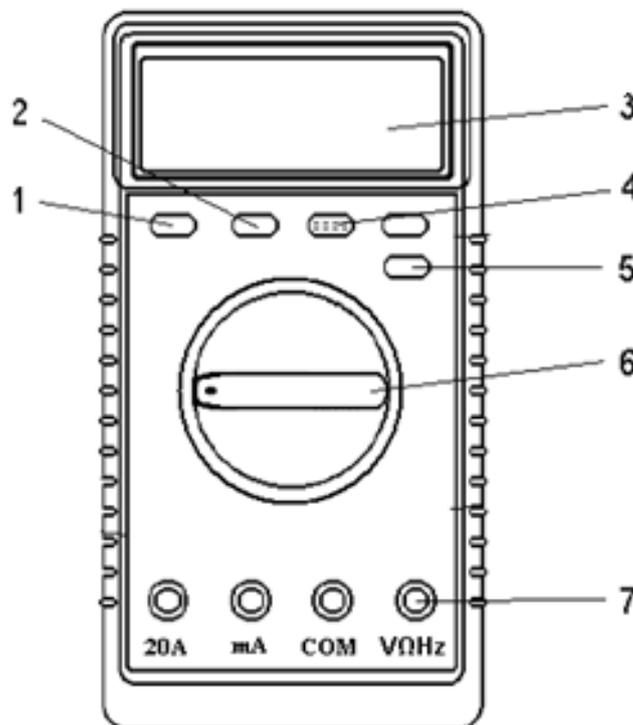
Блок переменного напряжения представляет собой источник однофазного переменного напряжения регулируемой частоты синусоидальной, прямоугольной и треугольной форм. Схема снабжена электронной защитой от короткого замыкания и перегрузок.

Блок трехфазного напряжения является источником трехфазного напряжения промышленной частоты. Каждая фаза электрически независима 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.

Цифровой мультиметр VC9808

Мультиметр – портативный профессиональный измерительный инструмент, выполняющий следующие функции: измерение постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, сопротивлений, емкости конденсаторов, частоты, температуры, звуковая прозвонка. Внешний вид мультиметра представлен на рисунке.



*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 COM, 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, кГц	Разрешающая способность, Гц	Точность
2	1	$\pm 2,0 \% \pm 5 D$
20	10	$\pm 1,5 \% \pm 5 D$

7. Температура

Диапазон, °С	Разрешающая способность, °С	Точность, °С		
		-20 ... 0	0 ... 400	400 ... 1000
-20 ... 1000	1	$\pm 5,0 \% \pm 4D$	$\pm 1,0 \% \pm 3D$	$\pm 2,0 \%$

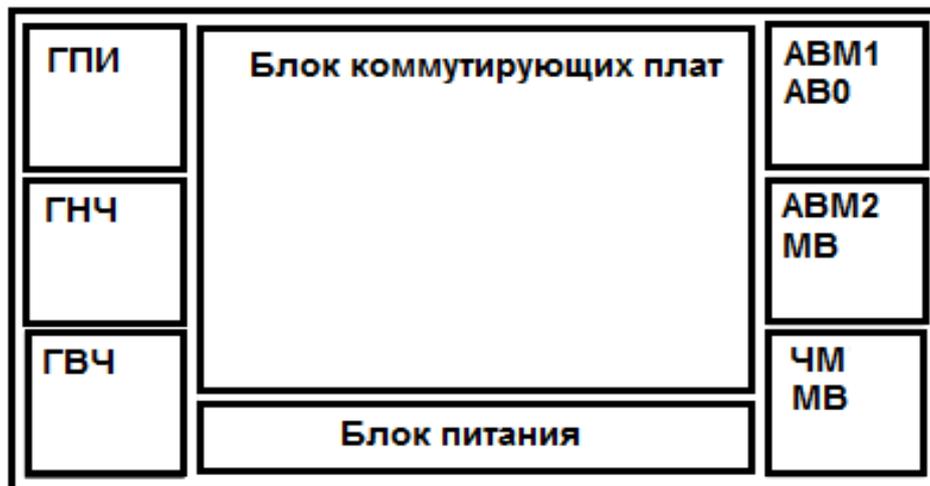
8. Измерение емкости

Диапазон, нФ	Разрешающая способность, пФ	Точность
2	1	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
20	10	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
200	0,1	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
2	1	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$
20	10	$\pm 4,0 \% \pm 3 D$

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, состоящую из четырех блоков (см. рисунок):

- 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.



Общий вид стенда 87Л-01: ГПИ – генератор прямоугольных импульсов 20 Гц...100кГц, ГНЧ – генератор низкой частоты 20 Гц...100 кГц; ГВЧ – генератор высокой частоты 465 ± 30 кГц, АВМ, АВМ2; АВ0 – ампервольтметр; МВ – милливольтметр 0...500 мВ; ЧМ – частотомер 0...100 кГц

Лабораторный стенд 87Л-01 потребляет мощность не более $50 \text{ В} \cdot \text{А}$, питается от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В, имеет массу 50 кг, габаритные размеры $970 \times 237 \times 478$ мм.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
Базовые понятия	4
Электрические цепи	5
Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда»	7
Законы Ома и Кирхгофа	9
Сложные цепи постоянного тока	9
Расчет цепей переменного тока	11
Измерение емкостей и индуктивностей пассивных элементов цепи переменного тока	13
Трехфазные электрические цепи	16
Переходные процессы в электрических цепях	19
Трансформаторы	20
1.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	23
Лабораторная работа № 1. Исследование пассивных линейных двухполюсников в цепях постоянного тока	23
Лабораторная работа № 2. Определение параметров пассивных элементов в цепях переменного тока	27
Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы сложных цепей постоянного тока	30
Лабораторная работа № 4. Исследование трехфазной электрической цепи при присоединении приемников звездой	32
1.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	36
Практическое занятие № 1. Параллельно-последовательное соединение сопротивлений	36

Практическое занятие № 2. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Потенциальные диаграммы	39
Практическое занятие № 3. Законы Ома и Кирхгофа	42
Практическое занятие № 4. Расчет цепей переменного тока	44
Практическое занятие № 5. Расчет сложных цепей	47
Практическое занятие № 6. Трехфазные электрические цепи	50
Практическое занятие № 7. Переходные процессы в электрических цепях	52
Практическое занятие № 8. Трансформаторы	56
1.4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ	56
Задание № 1. Расчет цепей постоянного тока	56
Задание № 2. Расчет параллельных цепей с одним гармоническим источником	57
1.5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	60
Вопросы для самостоятельного изучения	60
Контрольные задачи	61

РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОНИКА

2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	65
Диоды	65
Вторичные источники питания	66
Моделирование работы выпрямительных устройств	68
Оптические приборы	70
Фотодиоды и оптроны	75
Биполярные транзисторы	81
Полевые транзисторы	83
Расчет охлаждения транзисторов	84
Усилители	87
2.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	89
Лабораторная работа № 1. Исследование однофазных выпрямительных устройств	89

Лабораторная работа № 2. Исследование светодиодов	93
Лабораторная работа № 3. Исследование оптической пары	96
Лабораторная работа № 4. Исследование усилителя напряжения	98
2.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	102
Практическое занятие № 1. Расчет светодиодов	102
Практическое занятие № 2. Расчет параметров диодов	104
Практическое занятие № 3. Расчет параметров биполярных транзисторов	108
Практическое занятие № 4. Расчет параметров полевых транзисторов	112
Практическое занятие № 5. Расчет радиатора	114
Практическое занятие № 6. Моделирование работы сглаживающего емкостного фильтра в цепи переменного тока	117
Практическое занятие № 7. Проектирование выпрямительного устройства с фильтром	120
2.4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	127
Темы для самостоятельного изучения	127
Контрольные задачи	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	132
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	135

Учебное издание

АНДРИАНОВ Дмитрий Петрович
АФОНИН Валерий Иванович
БАДАЛЯН Норайр Петикович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-практическое пособие

Редактор А. П. Володина
Технический редактор А. В. Родина
Корректор О. В. Балашова
Компьютерная верстка Е. А. Герасиной
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 10.10.18.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 8,37. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.