

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

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Методические указания к практическим занятиям
по дисциплине “Электротехника и электроника”.

Составители
Д.П. Андрианов,
В.И. Афонин

Владимир 2014

УДК 621. 621.316
ББК 31.2я73

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электротехника и электроника» / «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ). Составители Д.П. Андрианов, В.И. Афонин. - Владимир, 2014, 16 с.

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электротехника и электроника» предназначены для студентов дневной и контрактно-заочной форм обучения и составлены 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».

Ил. 56. Библиогр.: 4 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения и
информационно-измерительной техники

Владимирского государственного университета

Грибакин В.С.

Практическое занятие № 1

Параллельно-последовательное соединение сопротивлений.

Цель: Освоение методов расчета эквивалентных сопротивлений и проводимостей при параллельно-последовательных схемах соединения сопротивлений.

План проведения занятия:

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

Краткие теоретические сведения.

1. Сумма сопротивлений последовательно соединенных участков (рис. 1.1) цепи равна

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

и называется эквивалентным сопротивлением или общим сопротивлением цепи.

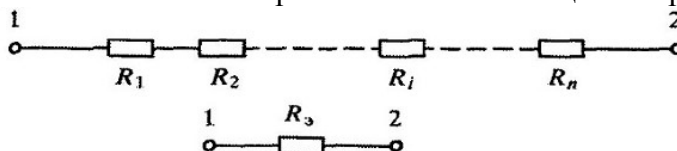


Рис.1.1

2. Для участка цепи с параллельным соединением сопротивлений (рис. 2.1)

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}; \quad R_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad \text{или} \quad g_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n g_i,$$

где $g_{\Sigma} = 1/R_{\Sigma}$ - эквивалентная проводимость электрической цепи
 $g_i = 1/R_i$ - проводимость ветви электрической цепи.

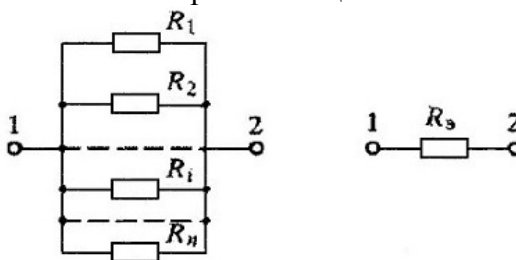


Рис. 2.1

3. Для участка цепи со смешанным соединением (рис. 3.1)

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m R_i + \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}}$$

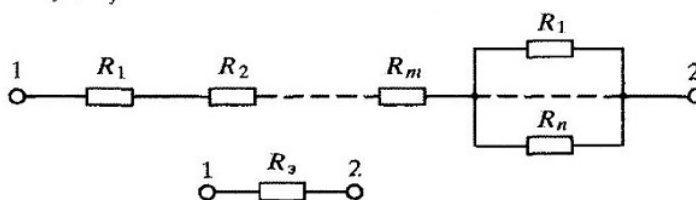


Рис. 3.1

Решение примеров

Задание: рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис. 4.1), если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$.

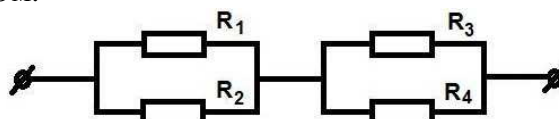


Рис. 4.1

Решение:

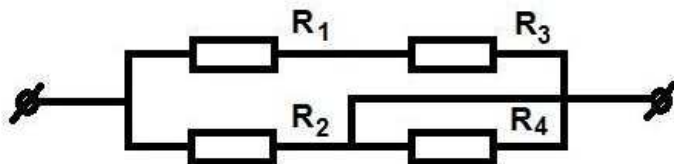
участок электрической цепи представляет собой два блока из двух параллельных сопротивлений соединенных последовательно, соответственно

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

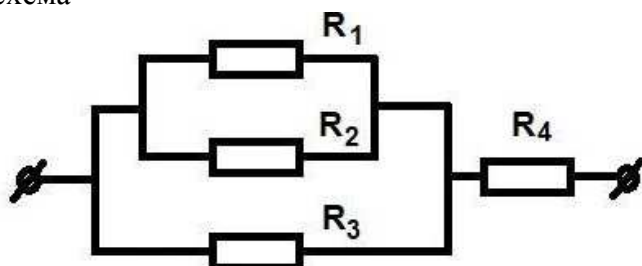
Решение примеров

Задание 1: рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис. 5.1) из четырех сопротивлений, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$.

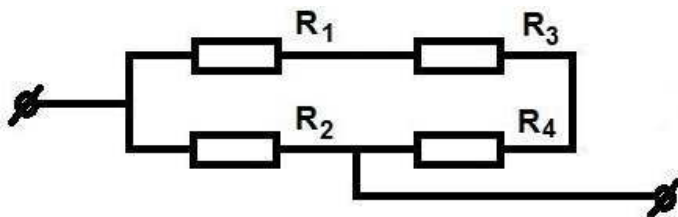
1 схема



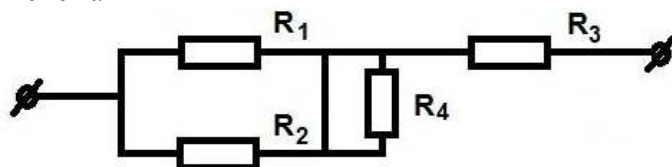
2 схема



3 схема



4 схема



5 схема

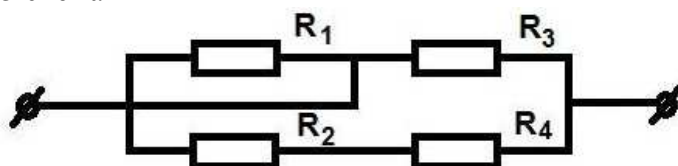


Рис.5.1

Задание 2: рассчитать эквивалентное сопротивление участка электрической цепи (рис.6.1) из семи сопротивлений для случая включения ключа К и его выключения, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10 \text{ Ом}$.

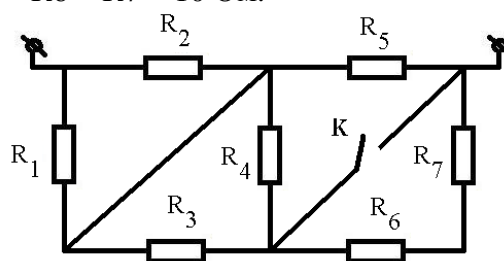


Рис.6.1

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.

Практическое занятие № 2

Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Потенциальные диаграммы

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

План проведения занятия:

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

Краткие теоретические сведения

Схемы соединений «звезда» и «треугольник» приведены на рис. 2.1.

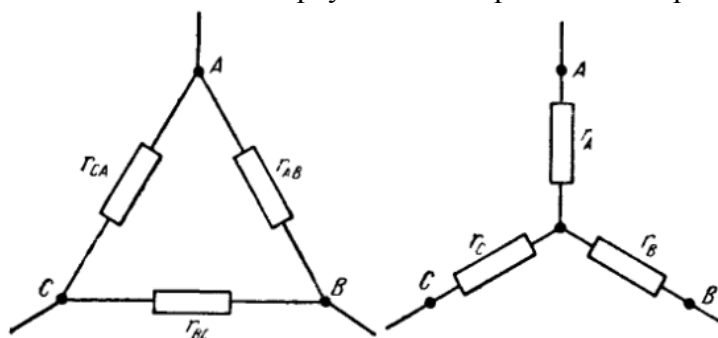


Рис.2.1 Схемы соединения сопротивлений «треугольник» и «звезда»

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

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

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

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

Методика эквивалентных преобразований схем представлена на рис. 2.2

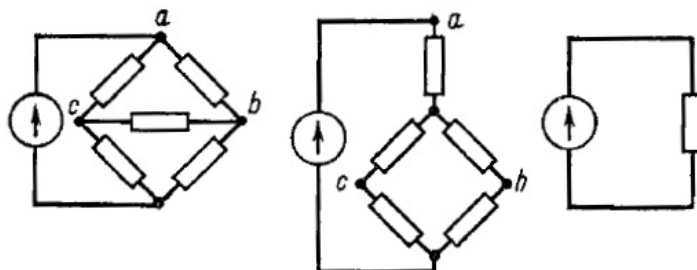


Рис.2.2

Решение примеров

Задание: построить потенциальную диаграмму для цепи (рис 2.3) , если $E_1 = 8$ В; $E_2 = 24$ В; $E_3 = 12$ В; $r_1 = 4$ Ом; $r_2 = 6$ Ом; $r_3 = 10$ Ом; $r_4 = 12$ Ом; $r_5 = 8$ Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

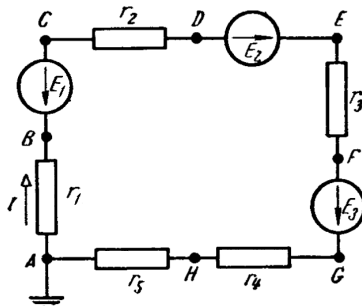


Рис. 2.3

Построение потенциальной диаграммы начинаем с точки А в обход контура по часовой стрелке (Рис. 2.4)

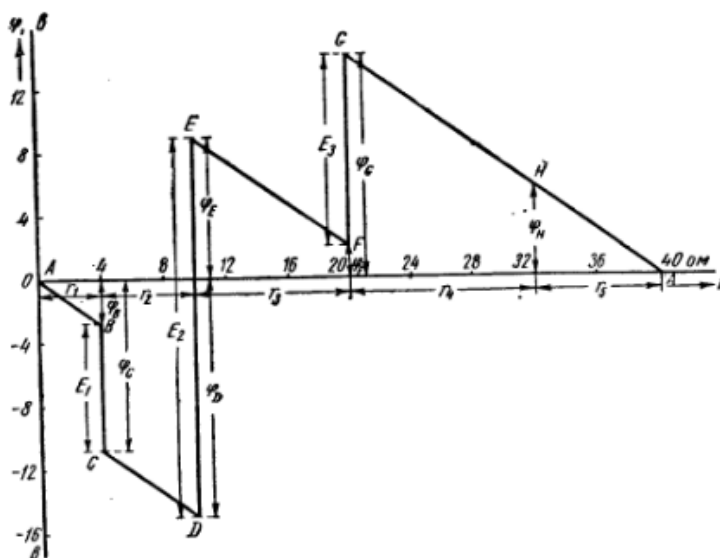


Рис. 2.4. Пример построения потенциальной диаграммы.

Расчетные задания.

Задание 1: определить эквивалентное сопротивление цепи (рис. 2.5), если сопротивления отдельных ветвей цепи равны: $r_1 = 7,9 \text{ Ом}$; $r_2 = 17 \text{ Ом}$; $r_3 = 20 \text{ Ом}$; $r_4 = 14 \text{ Ом}$; $r_5 = 13 \text{ Ом}$; $r_6 = 5 \text{ Ом}$; $r_7 = 50 \text{ Ом}$; $r_8 = 30 \text{ Ом}$;

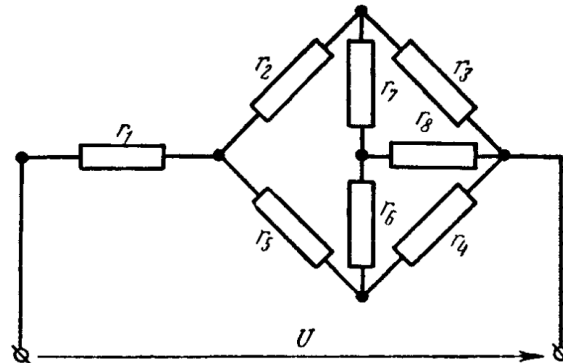


Рис.2.5

Задание 2: определить ток I_5 в диагонали схемы моста (рис. 2.6), сопротивление которой $r_5 = 100 \text{ Ом}$, если плечи моста имеют сопротивления $r_1 = 40 \text{ Ом}$, $r_2 = 20 \text{ Ом}$, $r_3 = 60 \text{ Ом}$, $r_4 = 30 \text{ Ом}$, а э.д.с. источника $E = 12 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление его $r_B = 4 \text{ Ом}$.

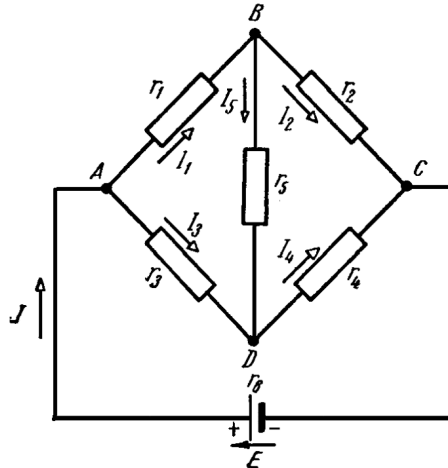


Рис.2.6

Задание 3: построить потенциальную диаграмму для цепи (рис.2.7), если $E_1 = 125 \text{ В}$, $E_2 = 115 \text{ В}$, $r_{B1} = 0,4 \text{ Ом}$, $r_{B2} = 0,2 \text{ Ом}$, $r_1 = 2 \text{ Ом}$, $r_2 = 5 \text{ Ом}$, $r_3 = 2,4 \text{ Ом}$.

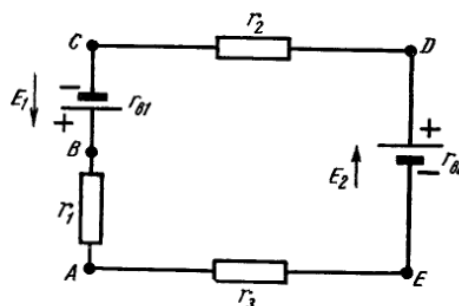


Рис. 2.7

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 э.д.с. источника на потенциальной диаграмме?
4. Как отображается влияние сопротивлений на потенциальной диаграмме?

Практическое занятие № 3.

Законы Ома и Кирхгофа.

Цель: Освоение методов расчета простых электрических цепей с использованием законов Ома и Кирхгофа.

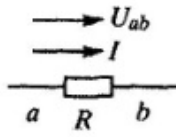
План проведения занятия:

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

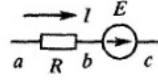
Краткие теоретические сведения

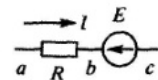
Закон Ома для участка цепи, не содержащего ЭДС, устанавливает связь между током и напряжением на этом участке:

$$U_{ab} = IR,$$

$$I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}.$$


Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, позволяет найти ток этого участка по известной разности потенциалов ($\varphi_a - \varphi_b$) на концах участка цепи и имеющейся на этом участке ЭДС (E):

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{U_{ac} + E}{R}$$


$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c - E}{R} = \frac{U_{ac} - E}{R}$$


$$I = \frac{U_{ac} \pm E}{R} = \frac{(\varphi_a - \varphi_c) \pm E}{R}.$$


В общем случае

Первый закон Кирхгофа (баланс токов):

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

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0; \quad \text{или} \quad \sum_{k=1}^m I_k = \sum_{\kappa=1}^4 I_\kappa = 0;$$

Сумма подтекающих УК 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.

$$\sum IR = \sum E.$$

Алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю.

Решение примеров

Задание 1: вычислить эквивалентную проводимость g и эквивалентное сопротивление r цепи (рис. 3.1), напряжение U на зажимах цепи и токи в параллельных ветвях, если ток $I = 46,2 \text{ А}$, $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 50 \text{ Ом}$, $r_3 = 20 \text{ Ом}$, $r_4 = 25 \text{ Ом}$.

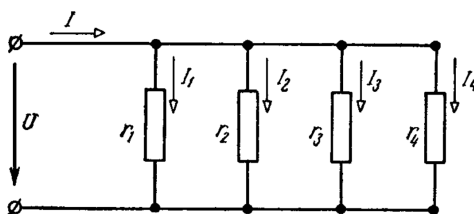


Рис. 3.1

Задание 2: найти ток в цепи (рис. 3.2), если известно, что э.д.с. каждого гальванического элемента $E = 1,45$ В, а его внутреннее сопротивление $r_1 = 1$ Ом, а внешнее сопротивление $r = 4,8$ Ом.

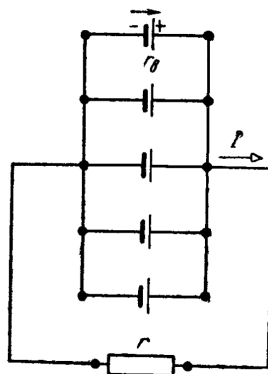


Рис. 3.2

Задание 3: Определить токи I, I_1, I_2 в цепи (рис. 3.3), если $E_1 = 120$ В, $E_2 = 119$ В, $r_{в1} = 0,6$ Ом, $r_{в2} = 0,3$ Ом, $r_1 = 4,4$ Ом, $r_2 = 2,7$ Ом, $r = 22$ Ом.

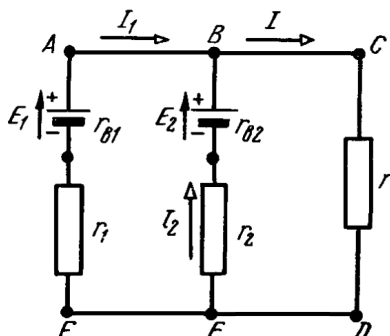


Рис. 3.3

Задание 4. Электрическая цепь (рис. 3.4) имеет сопротивления $R_1 = 18$ Ом, $R_2 = 30$ Ом, $R_3 = 20$ Ом. Определить токи ветвей, если, если напряжение $U = 120$ В.

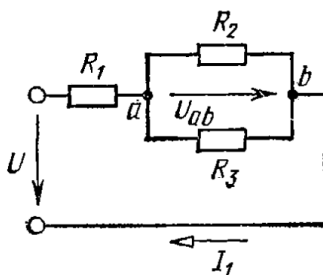


Рис. 3.4

Задание 5. Найти распределение токов в схеме (рис. 3.5), 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.

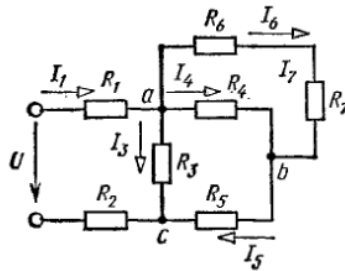
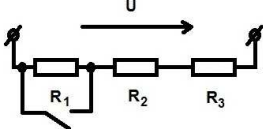


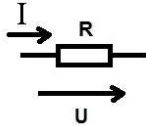
Рис. 3.5

Контрольные вопросы

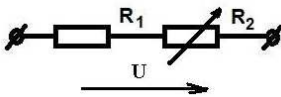
1. Как изменится напряжение на участках R2 и R3 при замыкании ключа К ($U = \text{const}$)?



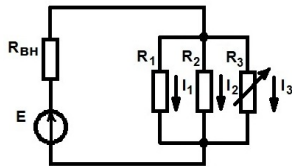
2. Если сопротивление R и напряжение U увеличить в два раза, то ток I?



3. Как изменится напряжение на сопротивлении R1, если сопротивление R3 уменьшилось при неизменном напряжении U?



4. Как изменятся токи I1 и I2, если сопротивление R3 уменьшится?



Практическое занятие № 4. Расчет цепей переменного тока

Цель: Освоение методов расчета электрических цепей переменного тока.

План проведения занятия:

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

Краткие теоретические сведения

Периодический ток – ток, для которого выполняется равенство $i(t) = i(t+T)$, где T – постоянный промежуток времени (период). Простейшим переменным током является гармоническая синусоидальная функция.

Гармонический синусоидальный ток определяется выражением

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

где I_m – максимальное значение амплитуды тока,

$\left(\frac{2\pi}{T}t + \Psi_i\right)$ - фаза гармонического тока [рад].

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

Протекание переменного тока по резистору (рис. 4.1).

Резистор - проводник, не обладающий индуктивностью и емкостью.
Ток, текущий через резистор, совпадает по фазе с напряжением.

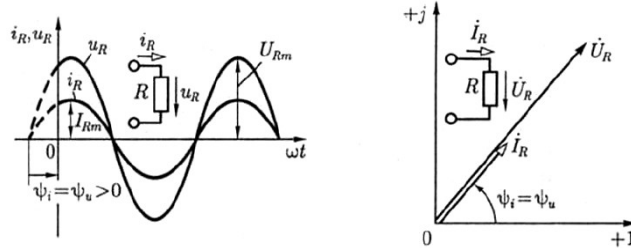


Рис. 4.1

Мощность переменного тока $P = I_{\text{д}}^2 R = U_{\text{д}}^2 / R$

Конденсатор в цепи переменного тока (рис. 4.2).

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

Заряд конденсатора $q = U C = U_{\text{MAX}} C \cos(\omega t)$

$I = dq/dt = -U_{\text{MAX}} C \omega \sin(\omega t)$ $I_{\text{MAX}} = U_{\text{MAX}} C \omega$

Емкостное сопротивление $X_C = U_{\text{MAX}} / I_{\text{MAX}} = 1 / (C \omega)$

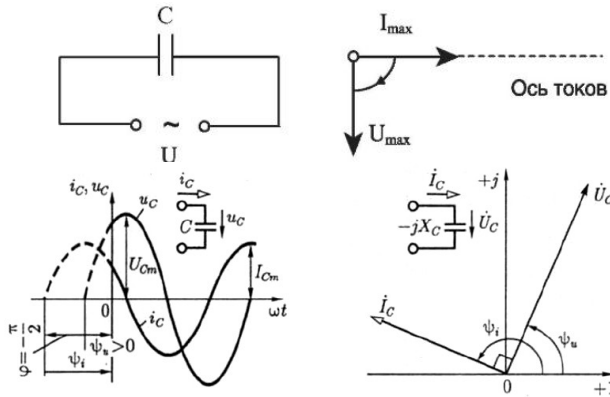


Рис. 4.2

Идеальная катушка индуктивности в цепи переменного тока (рис. 4.3).

Идеальная катушка индуктивности – ее активным сопротивлением можно пренебречь.

ЭДС самоиндукции - $L di / dt = U_{\text{MAX}} \cos(\omega t)$

После интегрирования

$i = (U_{\text{MAX}} / \omega L) \sin(\omega t) = (U_{\text{MAX}} / \omega L) \cos(\omega t - \pi/2)$ $I_{\text{MAX}} = U_{\text{MAX}} / \omega L$

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

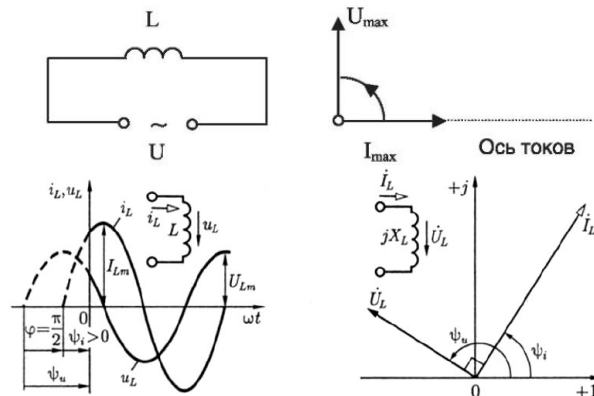


Рис. 4.3

Пример решения типовой задачи

Пример расчета электрической цепи переменного тока в пакете MathCad приведен на рис. 4.4.

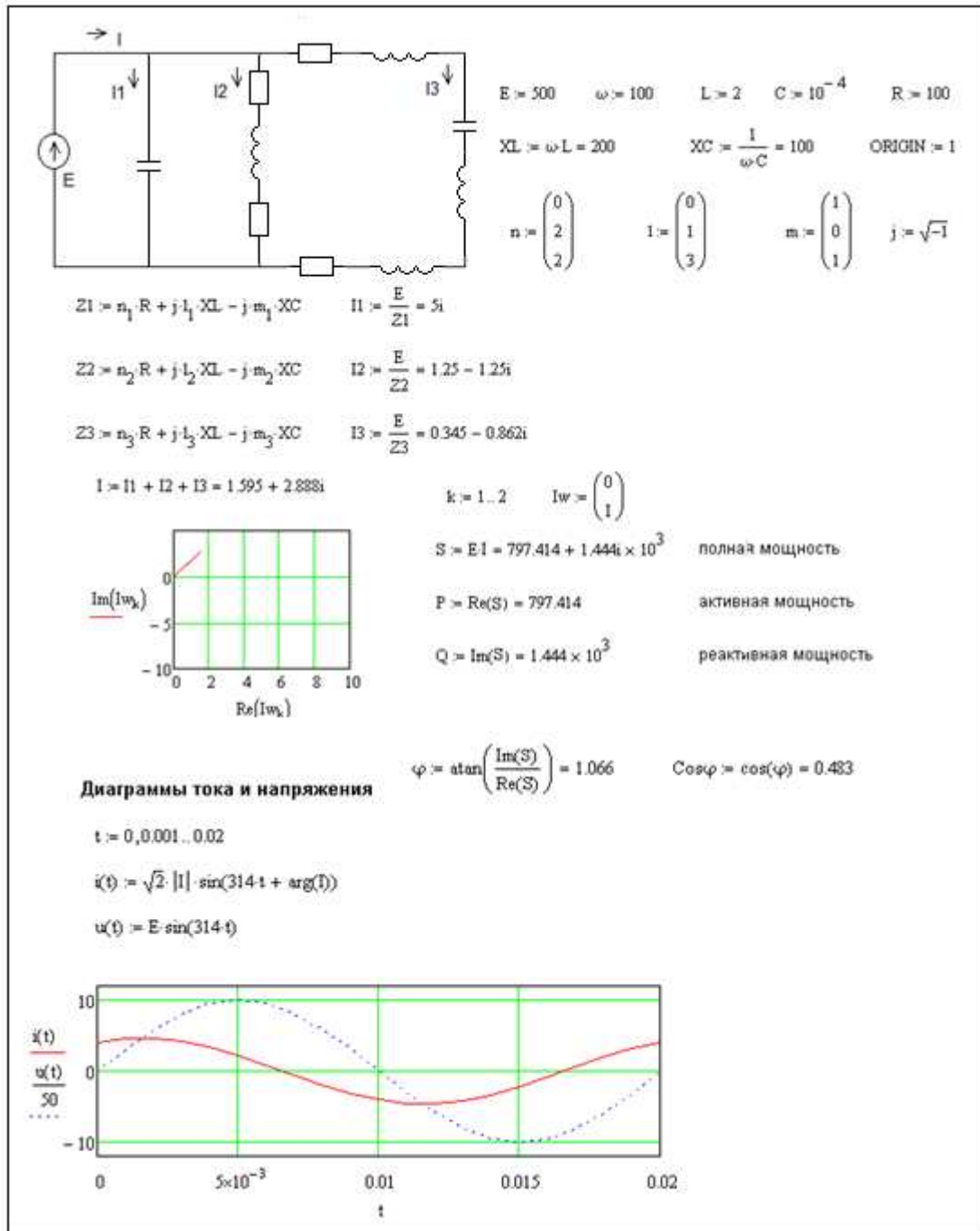


Рис. 4.4. Образец листинга выполнения задания.

Контрольные вопросы

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

Практическое занятие № 5.

Расчет сложных цепей

Цель: Освоение методов расчета сложных электрических цепей.

План проведения занятия:

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

Краткие теоретические сведения

Электрические цепи постоянного и синусоидального тока зачастую содержат несколько источников ЭДС и представляют собой смешанное соединение пассивных элементов – *сложные разветвленные цепи*. Эти цепи не могут быть представлены эквивалентными схемами из одного источника ЭДС и одного пассивного элемента.

Расчет цепей сводится к определению токов в ветвях, электрических потенциалов узлов и падений напряжения на элементах и участках цепи. Расчеты электрических цепей основаны на использовании законов Кирхгофа и Ома и в равной мере относятся к цепям постоянного и к цепям синусоидального тока.

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* входит хотя бы один ток, не вошедший в другие уравнения.

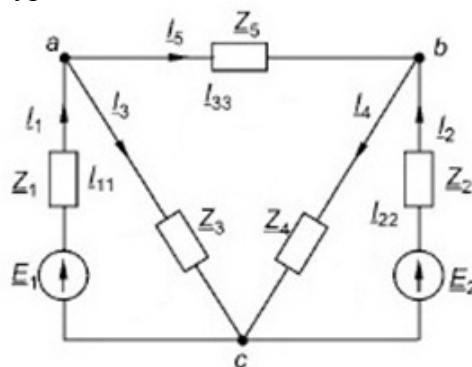


Рис. 5.1. Схема сложной электрической цепи.

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

По законам Кирхгофа можно записать $(q - 1) + (p - q + 1) = p$ независимых уравнений. Решив такую систему уравнений, можно найти все комплексные токи в ветвях.

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

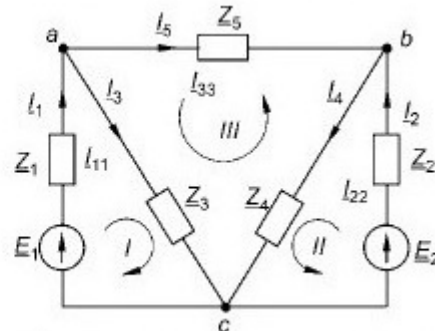


Рис. 5.2. Система расчетных уравнений для сложной электрической цепи.

Пример решения задачи

Пример расчета сложной электрической цепи в пакете MathCad приведен в листинге на рис. 5.3.

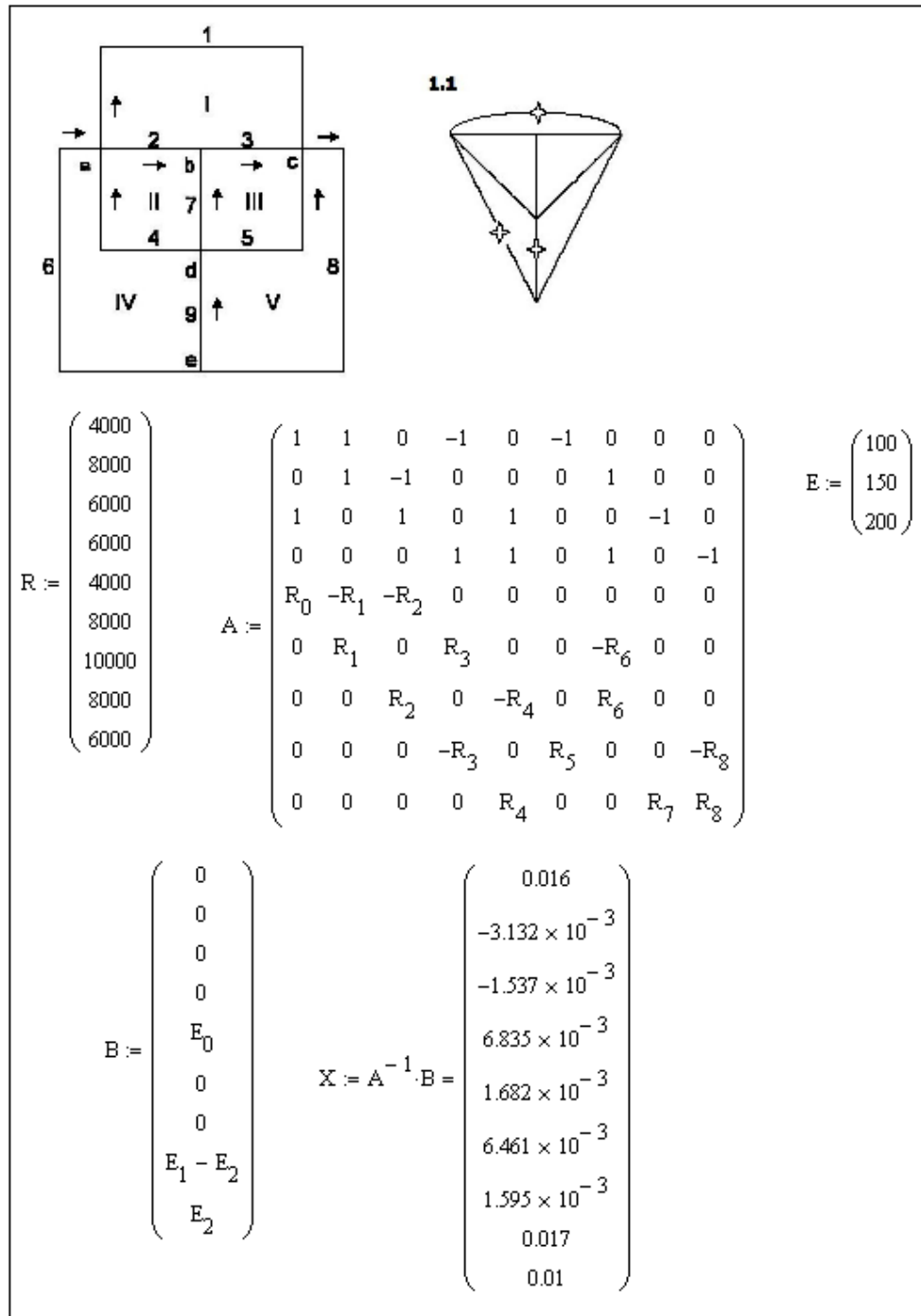


Рис. 5.3. Образец листинга выполнения задания.

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?

Расчетно-графическое задание по электротехнике № 1
Расчет цепей постоянного тока

Дано: Схема электрической цепи постоянного тока, содержащая источник э.д.с. и 5 сопротивлений (рис. 5.4). $U_{ab} = 120$ В. Рассчитать показания вольтметра, присоединенного к точкам с и d U_{cd} . Значения сопротивлений указаны в Таблице 1

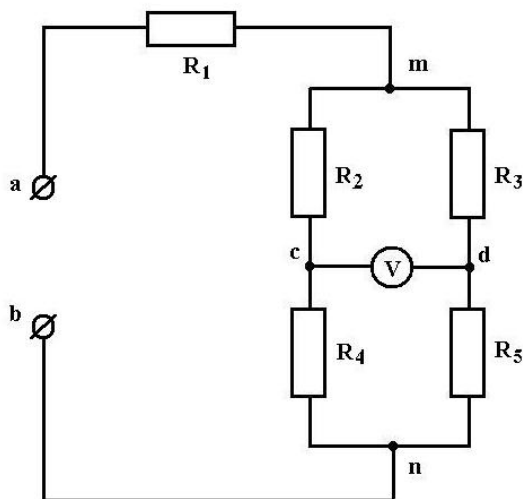


Рис. 5.4 Схема электрической цепи.

Таблица 1

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

Расчетно-графическое задание по электротехнике № 2
Расчет параллельных цепей с одним гармоническим источником

Дано: на рис. 5.5 приведены неориентированные графы схемы цепей с одним гармоническим источником. Номер графа для каждого варианта выбирается по колонке 2 таблицы. Номер индуктивных и емкостных элементов указаны в колонках 3 и 4 таблицы. Остальные элементы являются сопротивлениями.

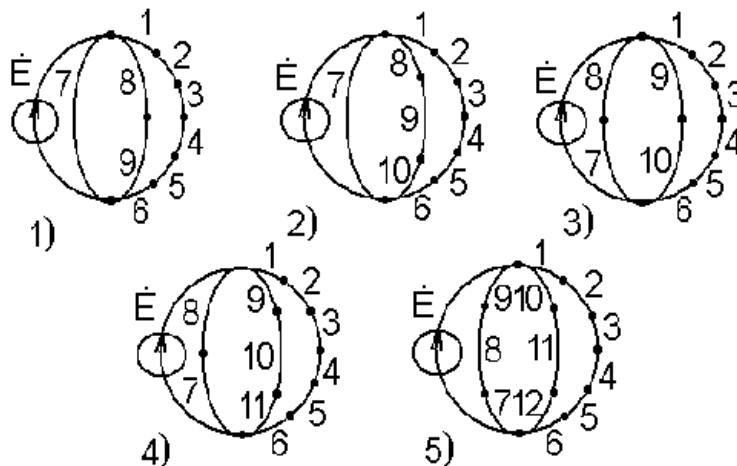


Рис. 5.5

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 э.д.с. источника

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

где $E_m = \sqrt{2} 500 \text{ В}$,

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

φ – начальный фазовый угол (выбирается произвольно),

f – частота изменения э.д.с. 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, генерируемые источником.
6. Построить векторную диаграмму сопротивлений для ветви с наибольшим количеством последовательно включенных элементов.

№ варианта	№ графа схемы	№ реактивных элементов	
		Li	Ci
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
31	5	1,3,6,8,11	4,10
32	1	2,3,6,8	5,7
33	2	5	1,3,9
34	3	6,9	1,4,7
35	4	6,9	1,3,7
36	5	4,7,10	1,3,11
37	1	5	1,4,7,8
38	2	5,9	2,4,10
39	3	6,7	2,4,10
40	4	5,8	2,3,10

Практическое занятие № 6 Расчет светодиодов.

Цель: Освоение методики расчета светодиодов.

План проведения занятия:

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

Краткие теоретические сведения.

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) токоограничительная цепь представляет собой резистор, последовательно включенный со светодиодом. Для мощных светодиодов применяются схемы с широтно-импульсной модуляцией, которые поддерживают средний ток через светодиод на заданном уровне, и позволяют регулировать его яркость.

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. 1)

Табл.1 Примерные напряжения светодиодов в зависимости от цвета.

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

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. При параллельном соединении светодиодов каждый из них должен иметь свой собственный ограничительный резистор (рис. 6.1)

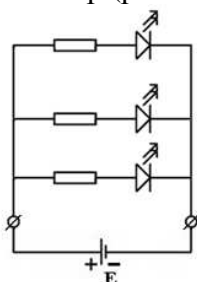


Рис. 6.1 Пример правильного параллельного подключения светодиодов.

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

Величина сопротивления защитного резистора

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

где R – значение резистора в Омах,

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

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

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

Пример решения типовой задачи.

Дано: светодиод с рабочим напряжением 3 вольт и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить его к источнику с напряжением 5 вольт (Рис. 6.2).

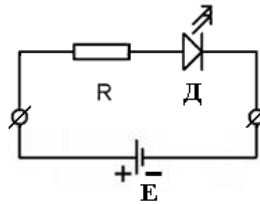


Рис. 6.2. Схема к решению задачи.

Решение.

$$\begin{aligned} U_{\text{питания}} &:= 5 \\ U_{\text{диода}} &:= 3 \\ I_{\text{диода}} &:= 20 \cdot 10^{-3} \\ R &:= \frac{U_{\text{питания}} - U_{\text{диода}}}{I_{\text{диода}}} = 100 \end{aligned}$$

Дано: 3 светодиода с рабочим напряжением 3 вольт и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить их к источнику с напряжением 15 вольт (Рис. 6.3).

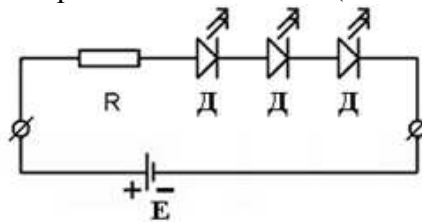


Рис. 6.3. Схема к решению задачи

Решение

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

Решение примеров

Задача 1.

Необходимо рассчитать сопротивление и рассеиваемую на сопротивлении мощность для цепи, содержащей батарейку E , светодиод D и резистор R (рис. 6.2).

№	Напряжение источника, В	Среднее напряжение на светодиоде при $I=20$ мА		
		2 В	2.5 В	3 В
		Номера вариантов		
1	6	1	11	21
2	8	2	12	22
3	9	3	13	23
4	10	4	14	24
5	12	5	15	25
6	15	6	16	26
7	16	7	17	27
8	18	8	18	28
9	20	9	19	29
10	24	10	20	30

Задача 2

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

Надо подключить N светодиодов к источнику U Вольт.

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 № 7 Расчет параметров диодов.

Цель: Освоение методов расчета параметров диодов.

План проведения занятия:

Рассмотрение теоретических сведений.

Рассмотрение примера решения типовой задачи.

Решение примеров.

Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения.

Диод — двухэлектродный электронный прибор, обладает различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Электрод диода, подключенный к положительному полюсу источника тока, когда диод открыт (имеет малое сопротивление) — **анод**, подключенный к отрицательному полюсу — **катод**. **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. 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.

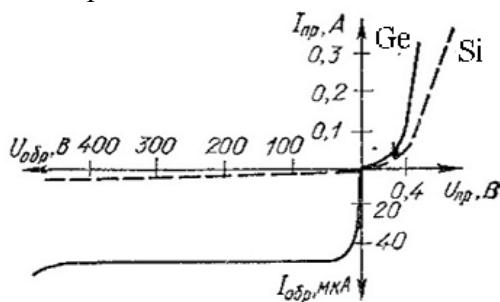


Рис. 7.1 Сравнительные характеристики германиевых и кремниевых диодов.

Пример решения типовой задачи

Задача 1. Дано: схема включения и ВАХ диода даны на рис. 7.2

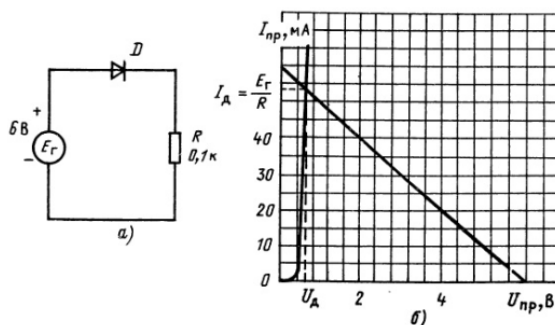


Рис. 7.2. Схема включения (а) и ВАХ (б) диода

Сопротивление нагрузки $R = 100 \text{ Ом}$, Э.д.с. источника $E_{и} = 6 \text{ В}$.

Задание: рассчитать ток и напряжение на диоде.

Решение графо-аналитическим методом

Совместно решаются уравнения вольт-амперной характеристики и нагрузочной прямой.

$$I = f(U_D)$$

$$E = U_D + R I$$

Точки для построения нагрузочной прямой

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

$$I = 0 \quad U_d = E = 6 \text{ В}$$

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

Решение аналитическим методом

Аналитическое выражение ВАХ

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

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

Из предположения, что $U_d \ll E$ следует

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

$$U_d \approx \varphi_T \ln \frac{I}{I_0} \approx 0,025 \ln \frac{60 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-12}} \approx 0,59 \text{ В}.$$

Ток диода

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

Задача 2. Дано: ВАХ диода (рис. 7.3).

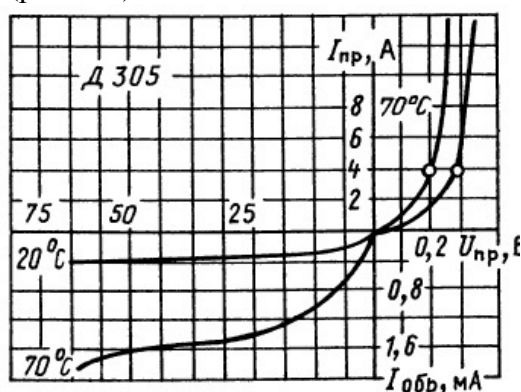


Рис. 7.3

Задание. Определить:

1. Как при напряжении на диоде $+0,2 \text{ В}$ с ростом температуры изменяются сопротивление постоянному току R_0 и дифференциальное сопротивление диода r_d ;
2. Температурный коэффициент по напряжению (ТКН) при токе 4 мА ;
3. Как изменяются с ростом температуры сопротивление постоянному току R_0 и обратное сопротивление $r_{обр}$ при напряжении -50 В ;
4. Температуру удвоения T_u для теплового тока I_0 .

Решение.

1. Дифференциальное сопротивление

$$\varphi_T (+20^\circ \text{ С}) \approx 0,025 \text{ В};$$

$$r'_{\text{диф}} \approx \varphi_T / I_{\text{пр}} \approx 0,025 / 2 \approx 0,0125 \text{ Ом};$$

Сопротивление постоянному току

$$R'_0 = U_{\text{пр}} / I_{\text{пр}} = 0,2 / 2 = 0,1 \text{ Ом}.$$

С ростом температуры до $T = 70^\circ \text{ С}$

$$\varphi_T (+70^\circ \text{ С}) = 343 / 11\,600 \approx 0,03 \text{ В};$$

$$r''_{\text{диф}} \approx 0,03 / 4 \approx 0,0075 \text{ Ом};$$

$$R''_0 = 0,2 / 4 = 0,05 \text{ Ом}.$$

Оба сопротивления с ростом температуры уменьшились.

2. Температурный коэффициент по напряжению

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

3. Обратное сопротивление диода при смещении -50 В

при $T = 20^\circ \text{C}$

$$r'_{\text{обр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \Big|_{T=20^\circ \text{C}} = \frac{25}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 250 \text{ кОм};$$

при $T = 70^\circ \text{C}$

$$r''_{\text{обр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \Big|_{T=70^\circ \text{C}} = \frac{25}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 125 \text{ кОм}.$$

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

Сопротивление диода постоянному току

при $T = 20^\circ \text{C}$

$$R'_0 = U/I = \frac{50}{(0,4 \cdot 10^{-3})} \approx 125 \text{ кОм};$$

при $T = 70^\circ \text{C}$

$$R''_0 = 50 / (1,6 \cdot 10^{-3}) \approx 33,3 \text{ кОм}.$$

Сопротивление диода постоянному току уменьшается в 3,7 раза.

4. Из аналитического выражения ВАХ диода следует

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

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

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

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

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

Контрольные задания.

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

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

Контрольные вопросы.

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

Практическое занятие № 8 Расчет параметров биполярных транзисторов.

Цель: Освоение методов расчета параметров биполярных транзисторов.

План проведения занятия:

Рассмотрение теоретических сведений.

Рассмотрение примера решения типовой задачи.

Решение примеров.

Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения.

Транзистор — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналам управлять током в электрической цепи. Используется для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Управление током в выходной цепи осуществляется за счет изменения входного напряжения или тока. Условные обозначения и упрощенная схема поперечного разреза биполярного транзистора приведены на рис. 8.1. Схемы возможных включений транзисторов приведены на рис. 8.2.

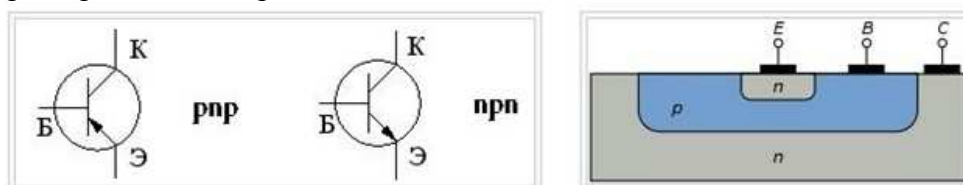


Рис. 8.1. Условные обозначения и схема поперечного разреза транзистора.

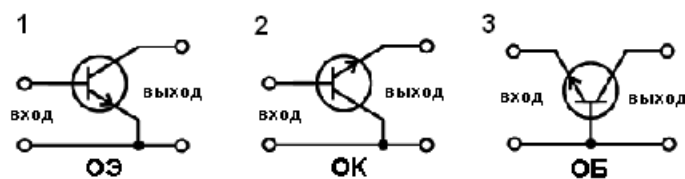


Рис. 8.2 Схемы включения биполярных транзисторов

- 1 – с общим эмиттером,
2- с общим коллектором,
3 – с общей базой.

h-параметры биполярных транзисторов

$$h_{11з} = \frac{\Delta U_{бз}}{\Delta I_{б}} \quad \text{при } U_{кз} = \text{const} \quad (\Delta U_{кз} = 0)$$

$$h_{12з} = \frac{\Delta U_{бз}}{\Delta U_{кз}} \quad \text{при } I_{б} = \text{const} \quad (\Delta I_{б} = 0)$$

$$h_{21з} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \quad \text{при } U_{кз} = \text{const} \quad (\Delta U_{кз} = 0)$$

$$h_{22з} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кз}} \quad \text{при } I_{б} = \text{const} \quad (\Delta I_{б} = 0)$$

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

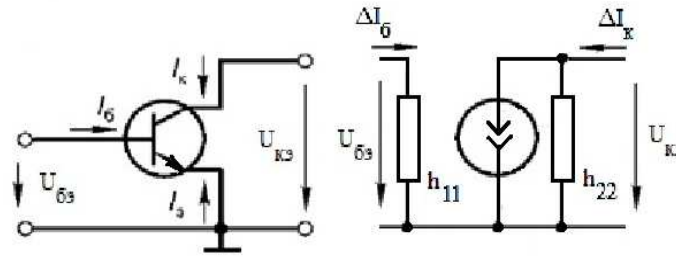


Рис. 8.3. Включение транзистора n-p-n типа

Ток базы: $I_b = I_e - I_c = (1 - \alpha) I_e - I_{c\bar{e}} \ll I_e \sim I_c$

Решение типовой задачи.

Задача 1. Дано: Входная и выходная вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора (Рис. 8.5).

Определить тип транзистора и основные параметры его Т-образной схемы замещения (Рис. 8.4), обратный ток коллекторного перехода.

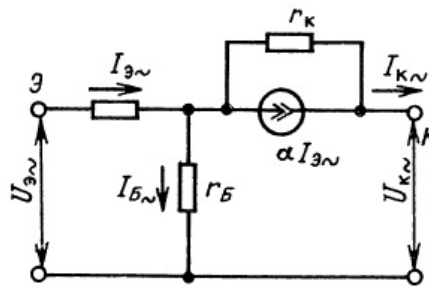


Рис. 8.4. Т-образная схема замещения биполярного транзистора.

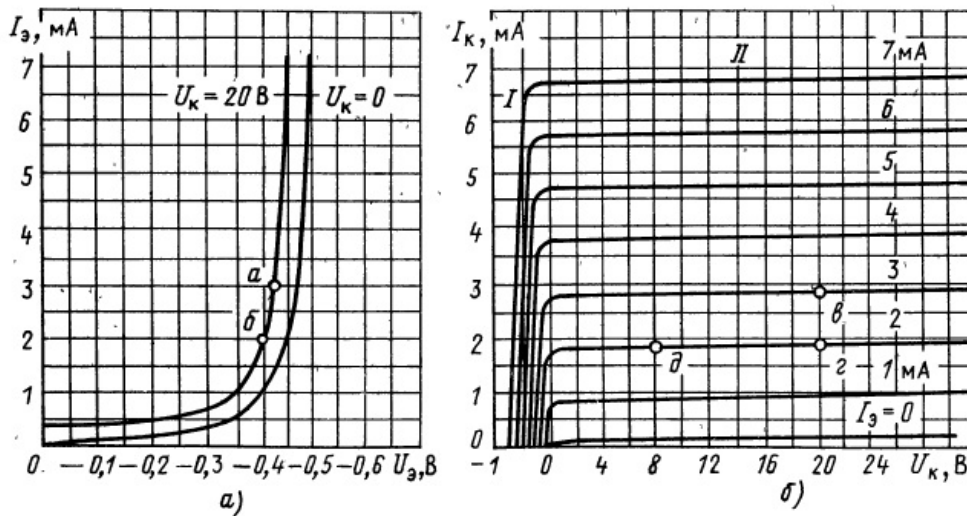


Рис. 8.5 Вольтамперные характеристики биполярного транзистора.

Решение.

Полярность внешних напряжений ($U_{э} < 0$ и $U_{к} > 0$) соответствует транзистору типа n-p-n.

Входная и выходная ВАХ соответствуют включению транзистора с общей базой.

Эквивалентная Т-образная схема описывается параметрами:

$\alpha = \Delta I_{к} / \Delta I_{э} |_{U_{к} = const}$ - дифференциальный коэффициент прямой передачи по току;

$r_{к} = \Delta U_{к} / \Delta I_{к} |_{I_{э} = const}$ - дифференциальное сопротивление коллекторного перехода;

$\Gamma_{э}$ - дифференциальное сопротивление; $\Gamma_{б}$ - объемное сопротивление базы.

1. Коэффициент прямой передачи α определяется по выходной ВАХ при $U_{к} = 20$ В.

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

2. Дифференциальное сопротивление $r_{\text{э}}$
 $r_{\text{э}} \approx \varphi_T / I_{\text{эср}} = 0,025 / (2,5 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом.}$
3. Входное сопротивление транзистора для рабочей точки на участке аб ВАХ
 $r_{\text{вх}} = r_{\text{э}} + r_{\text{Б}}(1 - \alpha) = \Delta U_{\text{э}} / \Delta I_{\text{э}} |_{U_{\text{К}} = \text{const}} = 0,025 / (1 \cdot 10^{-3}) = 25 \text{ Ом.}$
4. Дифференциальное сопротивление на участке ГД выходной ВАХ
 $r_{\text{К}} = 12 / (0,05 \cdot 10^{-3}) = 240 \text{ кОм.}$
5. $I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{К0}} + U_{\text{К}} / r_{\text{К}}$
 $I_{\text{К0}} = I_{\text{К}} |_{I_{\text{э}}=0} - U_{\text{К}} / r_{\text{К}}$
 $I_{\text{К0}} = I_{\text{К}} |_{I_{\text{э}}=0}$, так как $U_{\text{К}} / r_{\text{К}}$ при включении с общей базой мало.
 $I_{\text{К0}} = 0,2 \text{ мА.}$ при $I_{\text{э}} = 0 \quad U_{\text{К}} = 20 \text{ В}$

Задача 2. Дано: Транзистор включен в схему, приведенную на рис. 8.6.

$\alpha = 0,995$, $I_{\text{э0}} = I_{\text{К0}} = 10^{-12} \text{ А}$, Найти токи транзистора и напряжение между коллектором и эмиттером.

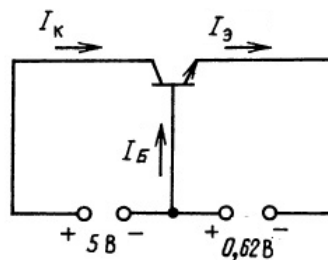


Рис. 8.6

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

1. Ток эмиттера
 $I_{\text{э}} = I_{\text{э0}} (e^{U_{\text{э}} / \varphi_T} - 1) = 10^{-12} (e^{0,62 / 0,025} - 1) \approx 58,95 \text{ мА.}$
2. Ток коллектора
 $I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{э}} - I_{\text{К0}} (e^{U_{\text{К}} / \varphi_T} - 1) = 0,995 \cdot 58,95 \cdot 10^{-3} - 10^{-12} (e^{-5 / 0,025} - 1) \approx 58,66 \text{ мА.}$
3. Ток базы
 $I_{\text{Б}} = (1 - \alpha) I_{\text{э}} = (1 - 0,995) 58,95 = 0,29 \text{ мА.}$
 при $\alpha = 0,995$, $I_{\text{э0}} = I_{\text{К0}} = 10^{-12} \text{ А}$,
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 (рис. 8.7) имеет следующие параметры

$$\alpha = 0,993; r_{\text{К}} = 1,5 \text{ МОм}; r_{\text{Б}} = 200 \text{ Ом}; r_{\text{э}} = 20 \text{ Ом.}$$

Определить *h*-параметры для схемы с общей базой

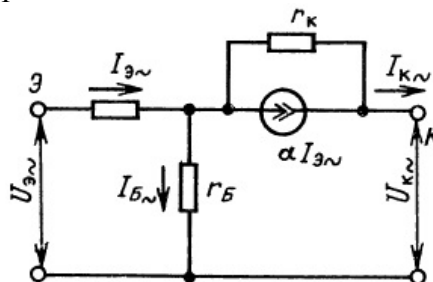


Рис. 8.7

Решение

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

$$h_{21Б} \approx \alpha = 0,993;$$

$$h_{22Б} \approx 1/r_{К} = 1/(1,5 \cdot 10^6) \approx 0,67 \text{ мкСм};$$

$$h_{12Б} \approx r_{Б}/r_{К} = 200/(1,5 \cdot 10^6) \approx 1,33 \cdot 10^{-6}.$$

Задача 4. Дано: ВАХ транзистора с общим эмиттером (рис. 8.8). Рабочая точка с напряжением $U_{КЭ} = 25 \text{ В}$ и током базы 300 мкА .

Определить параметры $h_{21Э}$ и $h_{22Э}$.

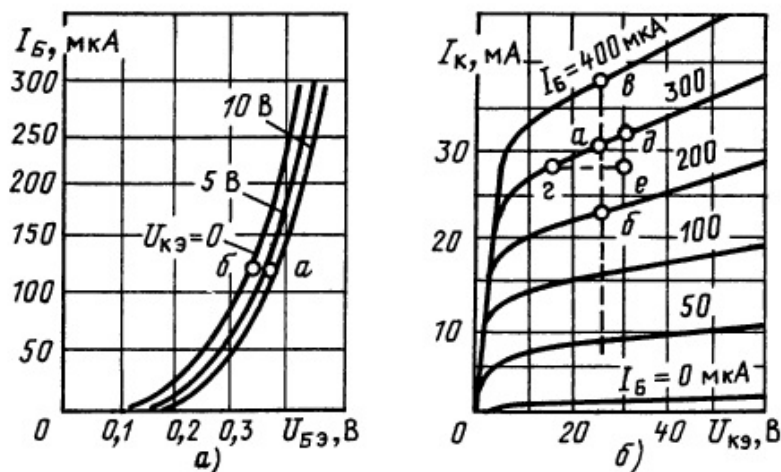


Рис. 8.8

1. Определение параметра $h_{21Э}$.

По расстоянию между выходными характеристиками можно судить о параметре $h_{21Э}$:

$$h_{21Э} = I_{2\sim} / I_{1\sim} |_{U_{2\sim} = 0} = \Delta I_K / \Delta I_B |_{U_{КЭ} = \text{const}}.$$

Подставляя значения коллекторного тока в точках b и e , находим

$$h_{21Э} = (37 - 23) \cdot 10^{-3} / [(400 - 200) \cdot 10^{-6}] = 70.$$

2. Определение параметра $h_{22Э}$.

По наклону выходных характеристик можно судить о параметре $h_{22Э}$:

$$h_{22Э} = I_{2\sim} / U_{2\sim} |_{I_{1\sim} = 0} = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ} |_{I_B = \text{const}}.$$

Находим приращения тока ΔI_K и напряжения $\Delta U_{КЭ}$ при фиксированном значении тока базы $I_B = 300 \text{ мкА}$ (треугольник gde), откуда следует, что

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

Контрольные вопросы

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением биполярного транзистора?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.
3. Изобразите условное графическое изображение р-п-р и п-р-п-транзисторов.
5. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и направление протекания токов.
6. Какие характеристики являются входными и выходными?
7. Укажите соотношения между током эмиттера, коллектора и базы.
10. Объясните физический смысл h-параметров транзистора.
11. Назовите и охарактеризуйте режимы работы транзистора.
13. Изобразите схему замещения биполярного транзистора.
14. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

Практическое занятие № 9 Расчет параметров полевых транзисторов.

Цель: Освоение методов расчета параметров полевых транзисторов.

План проведения занятия:

Рассмотрение теоретических сведений.

Рассмотрение примера решения типовой задачи.

Решение примеров.

Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения.

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

Носители заряда перемещаются по каналу от истока к стоку (рис. 9.2). С помощью затвора создается управляющее электрическое поле, позволяющее регулировать электрическую проводимость канала (ток в канале). В зависимости от электропроводности исходного материала транзисторы бывают с р-каналом и n-каналом (рис. 9.1 и рис. 9.3).

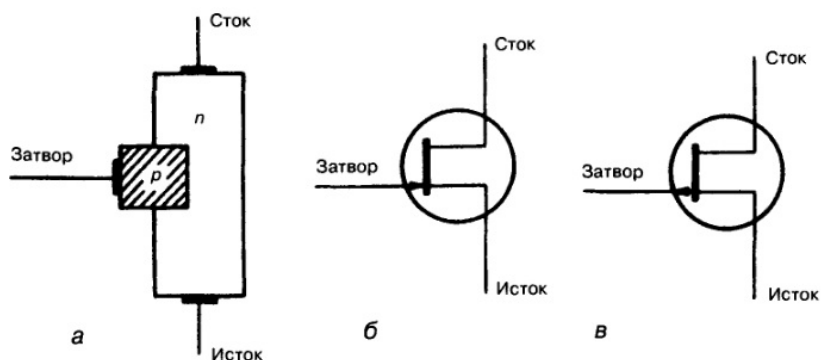


Рис. 9.1. Полевой транзистор с р-п-переходом
а- схематическое изображение конструкции транзистора с каналом n-типа;
б, в – обозначение транзисторов с каналом n-типа и р-типа.

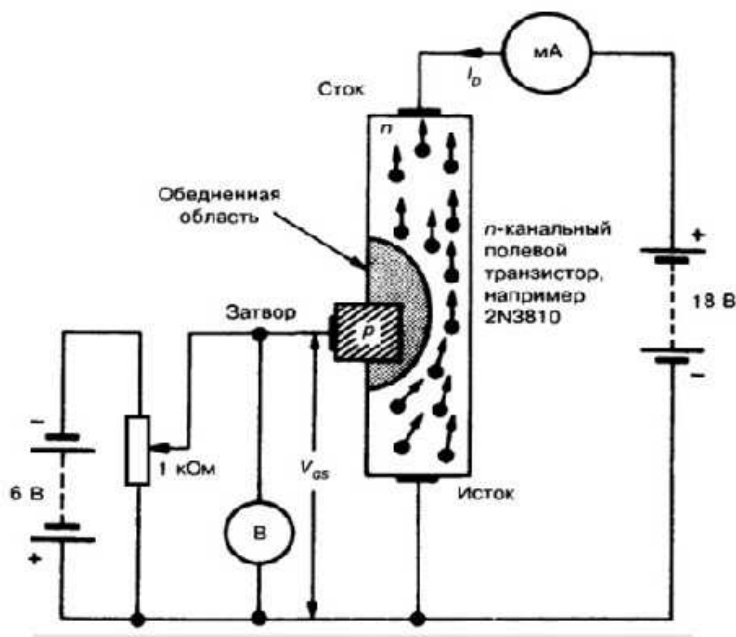


Рис. 9.2

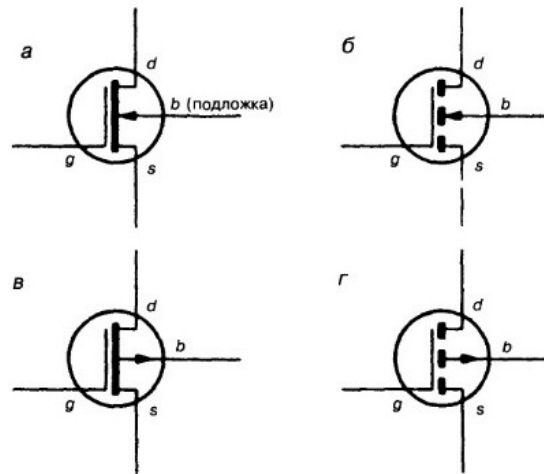


Рис. 9.3 Условные обозначения полевых транзисторов.

- a* — *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).

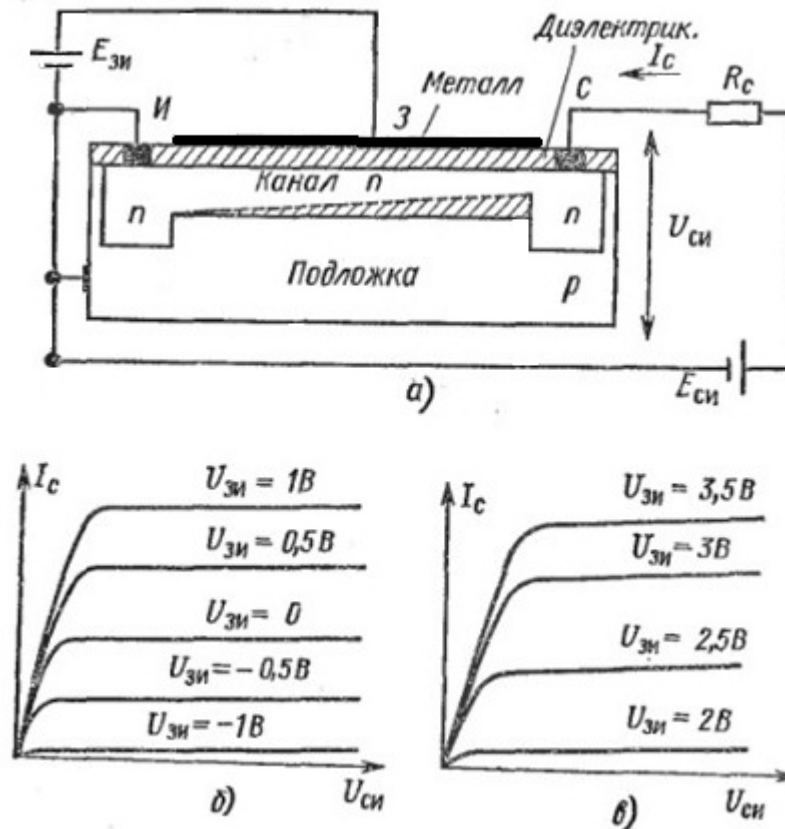


Рис. 9.4 Структура (а) и стоковые характеристики МДП-транзисторов.
 б — со встроенным каналом,
 в — с индуцированным каналом.

Решение типового примера.

Задача 1. Дано: ВАХ полевого транзистора (рис. 9.5).

Определить тип канала и основные характеристики транзистора.

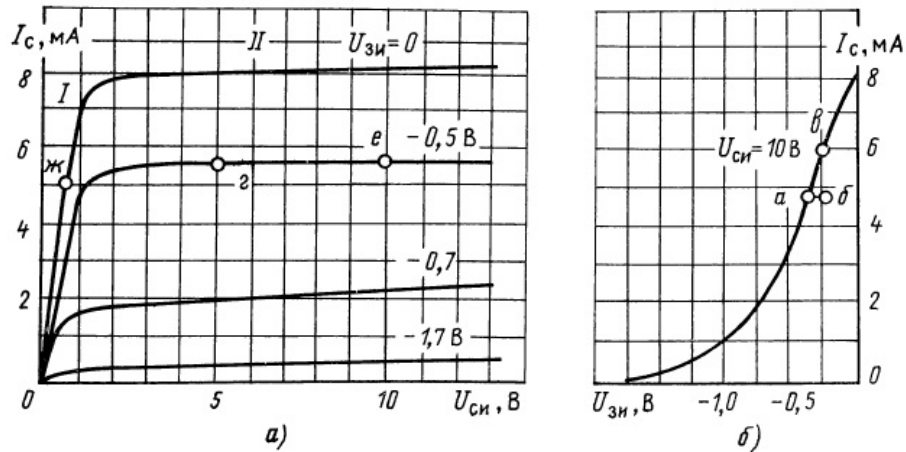


Рис. 9.5. ВАХ полевого транзистора.

1. Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом имеет канал n-типа, так как ток стока управляется отрицательным напряжением $U_{зи}$, приложенным к затвору (минус – к области затвора, плюс – к каналу n-типа). Канал перекрывается полностью ($I_C=0$) при напряжении $U_{зи} = -1,75$ В (напряжение отсечки $U_{отс}$). При $U_{зи} = 0$ и $U_{си} > 1,75$ В (участок насыщения II) в транзисторе течет максимальный ток стока $I_{снас} = 8,2$ мА.
2. Эквивалентная схема полевого транзистора показана на рис. 9.6.

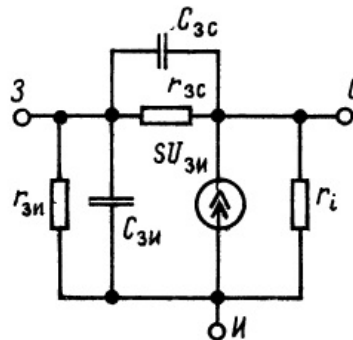


Рис. 9.6. Эквивалентная схеме полевого транзистора.

Крутизна стокзатворной характеристики

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} |_{U_{си} = \text{const}}$$

$$S = 1,2 \cdot 10^{-3} / 0,12 = 10 \text{ мА/В. для } U_{си} = 10 \text{ В}$$

3. Дифференциальное сопротивление канала на участке насыщения

$$r_C = \Delta U_{си} / \Delta I_C |_{U_{зи} = \text{const}}$$

$$r_C = 5 / (0,1 \cdot 10^{-3}) = 50 \text{ кОм.}$$

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

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

Задача 2. Дано Полевой транзистор с р-п-переходом имеет

$I_{C\text{макс}} = 5 \text{ мА}$ и $U_{отс} = -2 \text{ В}$.

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

1. Ток стока

$$I_C = I_{C\text{макс}} (1 - |U_{зи}| / |U_{отс}|)^2.$$

при $U_{\text{зи}} = -2 \text{ В}$

$$I_{\text{C}} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 2/2)^2 = 0;$$

при $U_{\text{зи}} = 0$

$$I_{\text{C}} = I_{\text{C макс}} = 5 \text{ мА};$$

при $U_{\text{зи}} = -1 \text{ В}$

$$I_{\text{C}} = 5 \cdot 10^{-3} (1 - 1/2)^2 = 1,25 \text{ мА}.$$

2. Крутизна полевого транзистора

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

при $U_{\text{зи}} = -2 \text{ В}$

$$S = 0;$$

при $U_{\text{зи}} = 0$

$$S = S_{\text{макс}} = 2I_{\text{C макс}} / U_{\text{отс}} = (2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) / 2 = 5 \text{ мА/В};$$

при $U_{\text{зи}} = -1 \text{ В}$

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

Контрольные вопросы

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением полевого транзисторов?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.
3. Изобразите условное графическое изображение р-п-р и п-р-п-транзисторов.
4. Изобразите условные графическое изображения МЭП транзисторов и с управляемым переходом.
5. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и напряжение протекания токов.
6. Какие характеристики являются входными и выходными?
7. Какие параметры характеризуют свойства полевого транзистора?
8. В чем отличие статических характеристик передачи МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами?
9. Назовите и охарактеризуйте режимы работы транзистора.
10. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

Практическое занятие № 10

Расчет радиатора

Цель работы: освоение методики расчета охлаждающих устройств полупроводниковых приборов.

План проведения занятия:

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

Краткие теоретические сведения

Во время работы полупроводникового прибора в его кристалле выделяется мощность, которая приводит к разогреву последнего. Если тепла выделяется больше, чем рассеивается в окружающем пространстве, то температура кристалла будет расти и может

превысить максимально допустимую. При этом его структура будет необратимо разрушена.

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

По способу перемещения теплоносителя различают:

- естественную вентиляцию;
- принудительную вентиляцию.

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

Широкое распространение получил тепловой расчет элементов электроники, основанный на тепловой модели охлаждения (приложение теории подобия). Структурная схема процесса охлаждения представлена на рис. 10.1.

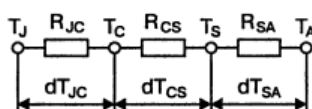


Рис. 10.1. Тепловая модель охлаждения

Разница между температурой кристалла T_J и температурой среды T_A вызывает тепловой поток, движущийся от кристалла к окружающей среде, через тепловые сопротивления R_{JC} (кристалл - корпус), R_{CS} (корпус - радиатор) и R_{SA} (радиатор - окружающая среда).

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

$$R_{JA} \leq \frac{T_J - T_A}{P_{\text{max}}},$$

где P_{max} - мощность, рассеиваемая на кристалле полупроводникового прибора, Вт.

Тепловое сопротивление радиатора

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

На рис. 10.2 приводятся графические зависимости между периметром сечения алюминиевого радиатора и его тепловым сопротивлением для естественного и принудительного охлаждения воздушным потоком.

По умолчанию считается, что:

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

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

- разницу температуры радиатора и окружающей среды - рис. 10.3,
- скорость воздушного потока - рис. 10.4,
- длину радиатора - рис. 10.5.

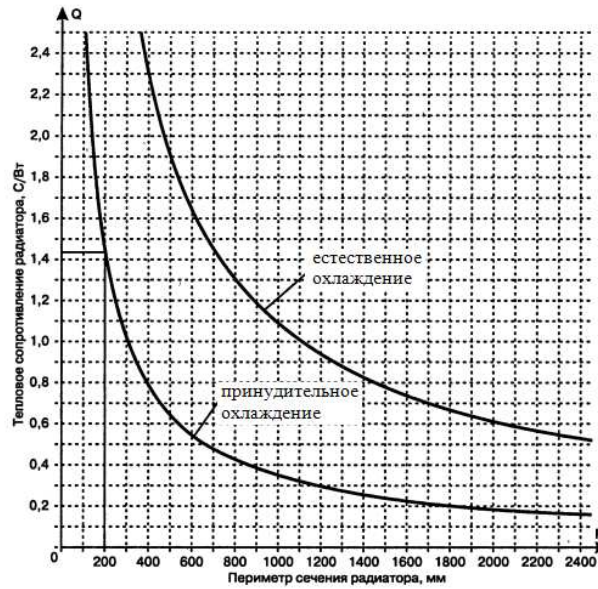


Рис. 10.2. Зависимости между сечением алюминиевого радиатора и его тепловым сопротивлением.

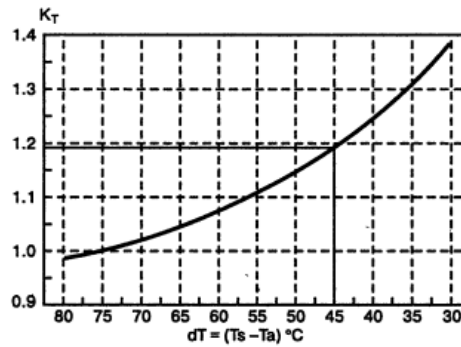


Рис. 10.3. Поправочный коэффициент на разницу температуры радиатора и окружающей среды

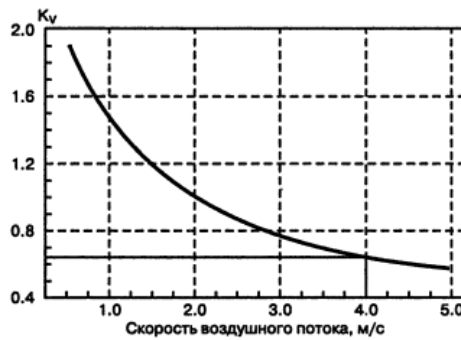


Рис. 10.4. Поправочный коэффициент на скорость воздушного потока

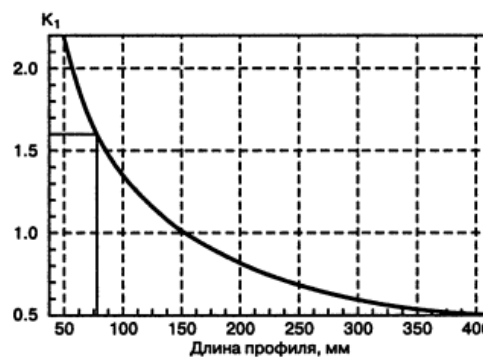


Рис. 10.5. Поправочный коэффициент на длину радиатора

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 равно $R_{JC} + R_{CS} = 0,7 + 0,24 = 0,94$ °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.

Рассчитать радиатор, обеспечивающий охлаждение транзистора ЭРСТ, состоящего из 20-ти транзисторов типа IRFP250N. Расчет радиатора можно вести для одного транзистора, а затем полученный размер увеличить в 20 раз.

Так как на ключевом транзисторе рассеивается суммарная мощность 528 Вт, то на каждом транзисторе IRFP250N рассеивается мощность $528/20 = 26,4$ Вт. Радиатор должен обеспечивать максимальную температуру кристалла транзистора не более +110 °C при максимальной температуре окружающей среды +40 °C.

Тепловое сопротивление R_{JA} для одного транзистора IRFP250N:

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

Тепловое сопротивление радиатора:

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

Зная максимальную температуру кристалла и тепловое сопротивление на участке кристалл-радиатор, определим максимальную температуру радиатора:

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

По графику (рис. 10.3) определим поправочный коэффициент K_T на разницу температуры радиатора и окружающей среды:

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

$$K_T = 1,110.$$

Для охлаждения радиатора используется вентилятор типа 1,25ЭВ-2,8-6-3270У4, имеющий производительность 280 м³/ч. Чтобы вычислить скорость потока, нужно разделить производительность на сечение воздуховода, продуваемого вентилятором.

Если воздуховод имеет площадь поперечного сечения:

$$0,14 \cdot 0,14 = 0,0196 \text{ м}^2,$$

то скорость воздушного потока будет равна:

$$280/0,0196/3600 = 4 \text{ м/с.}$$

По графику (рис. 10.4) определим поправочный коэффициент K_V на реальную скорость воздушного потока:

$$K_V = 0,63.$$

Допустим, что в нашем распоряжении имеется большое количество готовых радиаторов, имеющих периметр сечения 1050 мм и длину 80 мм. По графику (рис. 10.5) определим поправочный коэффициент K_L на длину радиатора:

$$K_L = 1,6.$$

Чтобы найти общую поправку, перемножим все поправочные коэффициенты:

$$K = K_T \cdot K_V \cdot K_L = 1,19 \cdot 0,63 \cdot 1,6 = 1,2.$$

С учетом поправок, радиатор должен обеспечивать тепловое сопротивление:

$$R_{SA} = 1,71 / 1,2 = 1,425 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}.$$

С помощью графика (рис. 10.2) найдем, что для одного транзистора требуется радиатор с периметром сечения 200 мм. Для группы из 20-ти транзисторов IRFP250N радиатор должен иметь периметр сечения не менее 4000 мм. Так как имеющиеся в распоряжении радиаторы имеют периметр 1050 мм, то придется объединить 4 радиатора.

На диоде ЭРСТ рассеивается меньшая мощность, но из конструктивных соображений для него можно использовать аналогичный радиатор.

Задание. Рассчитать радиатор, обеспечивающий охлаждение блока, состоящего из N транзисторов марки, указанной в Таблице для вариантов задания. Справочные данные взять из сайта <http://tec.org.ru/board/irfp250n/49-1-0-1135>

№ варианта	Марка транзистора	Кол-во в блоке
1	IRF4905	10
2	IRF3205 Pbf	20
3	IRF5305	10
4	IRF610	20
5	IRF7303	10
6	IRF730	20
7	IRF640N	10
8	IRF540N	20

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 № 11

Моделирование работы сглаживающего емкостного фильтра в цепи переменного тока.

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

План проведения занятия:

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

Ответы на контрольные вопросы

Краткие теоретические сведения

Одно и двух полупериодные выпрямители дают пульсирующее напряжение, которое необходимо сглаживать для обеспечения корректной работы электрических приборов. Схемы простейших однополупериодных выпрямителей приведены на рис. 11.1.

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

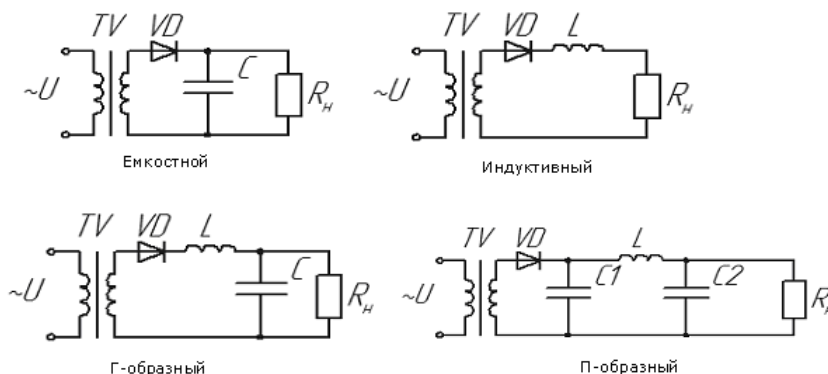


Рис. 1 Схемы однополупериодных выпрямителей.

В емкостном фильтре роль фильтрующего элемента играет конденсатор, устанавливаемый параллельно нагрузке (Рис. 11.2).

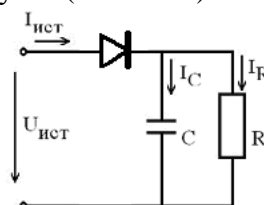


Рис. 11.2 Схема замещения емкостного фильтра

Первый закон Кирхгофа применительно к рассматриваемой схеме $I_{ист} := I_C + I_R$,

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

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

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

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

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

Z – эквивалентное сопротивление схемы замещения,

C , R – емкость и сопротивление соответственно.

Приводим уравнение колебаний к 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) $U_{ист} = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, 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

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

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

Эквивалентное сопротивление схемы Z определяется как векторная сумма

активного R и емкостного X_C сопротивлений (сопротивлением диода пренебрегаем), его модуль равен:

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

Эффект сглаживания пульсаций (рис. 11.3) определяется параметрами колебательного контура: нагрузкой R и емкостным сопротивлением X_C . В свою очередь емкостное сопротивление зависит от частоты колебаний и емкости конденсатора

$$X_C = \omega C.$$

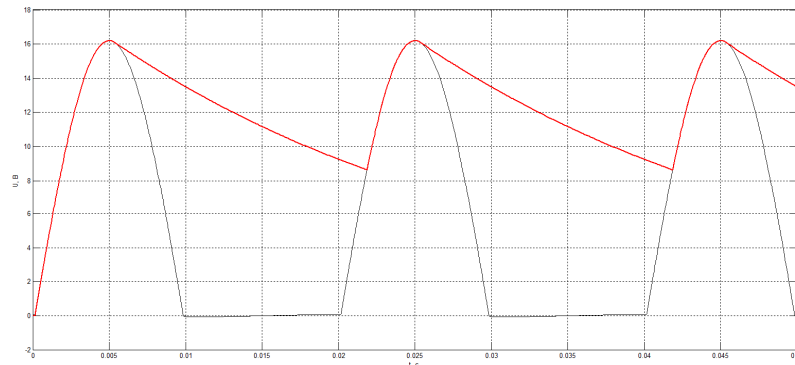


Рис. 11.3 Диаграмма пульсаций напряжения при использовании емкостного фильтра

На практике значение емкости фильтра выбирается из соотношения

$$R > X_C$$

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

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

Реализация рассмотренного выше алгоритма моделирования работы однополупериодного выпрямителя приведена в листинге на рис. 11.4.

Выпрямление от диода учитывается выражением функции с условием для однополупериодного выпрямления:

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

где $20 \sin(\omega \cdot t)$ - мгновенное выражение для напряжения источника переменного тока с амплитудой 20 вольт и нулевой фазой. Моделирование переходного процесса проводится численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования с помощью функции `rkfixed` пакета `MathCad`. Список параметров, передаваемых в функцию `rkfixed` (запись через запятую):

- начальное условие,
- начальная и конечная точки интервала интегрирования,
- число точек без учета начальной,
- функция первых производных искомой функции.

На графике представлены две функции:

U_d – изменение напряжения при установке в схему выпрямительного диода,

U – изменение напряжения без выпрямительного диода в схеме.

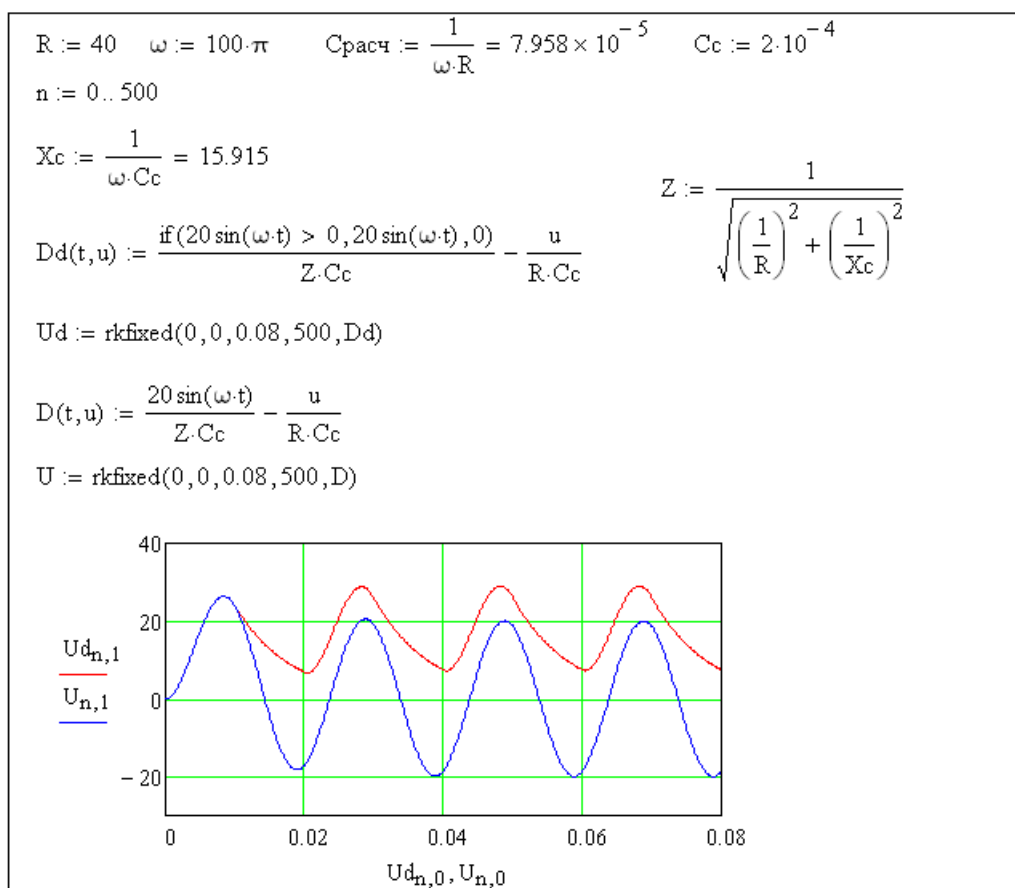


Рис. 11.4. Листинг выполняемого расчетного модуля пакета MathCad

Решение задач

Дано: схема замещения емкостного фильтра с сопротивлением нагрузки R , частотой переменного тока f и амплитудой колебаний напряжения U_m (рис. 11.2).

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

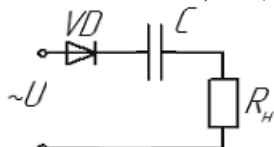
Варианты для заданий приведены в таблице

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

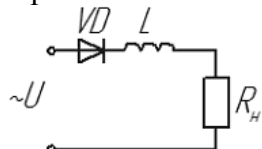
16	160	60	40
17	170	50	30
18	180	100	20
19	190	60	10
20	200	50	6

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. Составить исходную систему расчетных уравнений для схемы замещения цепи переменного тока индуктивного однополупериодного выпрямителя.



4. Для каких целей ставится трансформатор на входе в выпрямитель?
5. Изобразить векторную диаграмму для эквивалентного сопротивления схемы емкостного выпрямителя?
6. Как выглядит диаграмма изменения напряжения для емкостного фильтра в случае, если $R < X_c$?
7. Как рассчитывается коэффициент пульсаций?

Список рекомендуемой литературы

1. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Фролов В.Я. Электротехника и основы электроники. – СПб.: Издательство «Лань», 2012, –736 с.
2. Касаткин А.С., Электротехника: учебник для вузов. – М.: Академия, 2005
3. Бычков, Ю. А. Основы теории электрических цепей: учебник для вузов.– СПб.: Издательство «Лань», 2002.
4. Электротехника и электроника. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники. / Г.П. Гаев, В.Г, Герасимов, О.М. Князев и др. Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1988, –432 с.

Содержание

1. Практическое занятие № 1. Параллельно-последовательное соединение сопротивлений.	3
2. Практическое занятие № 2. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Потенциальные диаграммы	5
3. Практическое занятие № 3. Законы Ома и Кирхгофа.	8
4. Практическое занятие № 4. Расчет цепей переменного тока	10
5. Практическое занятие № 5. Расчет сложных цепей	13
6. Практическое занятие № 6. Расчет светодиодов.	18
7. Практическое занятие № 7. Расчет параметров диодов.	21
8. Практическое занятие № 8. Расчет параметров биполярных транзисторов.	24
9. Практическое занятие № 9. Расчет параметров полевых транзисторов.	28
10. Практическое занятие № 10. Расчет радиатора	31
11. Практическое занятие № 11. Моделирование работы сглаживающего емкостного фильтра в цепи переменного тока.	35
12. Список рекомендуемой литературы	39