

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к самостоятельной работе
для студентов специальности
1-40 05 01 «Информационные системы и технологии (по направлениям)»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 621.3 + 62.83
ББК 32.85
О-75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «4» января 2022 г.,
протокол № 4

Составители: канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов;
ст. преподаватель В. В. Писарик;
ст. преподаватель И. А. Черкасова

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации к самостоятельной работе для студентов специальности 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии (по направлениям)» дневной и заочной форм обучения

Учебно-методическое издание

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

Введение.....	4
1 Расчётно-графическое задание № 1. Расчёт электрических цепей постоянного тока.....	5
2 Расчетно-графическое задание № 2. Расчёт электрических цепей переменного тока.....	16
3 Расчетно-графическое задание № 3. Расчет усилителя на биполярном транзисторе.....	24
4 Расчетно-графическое задание № 4. Расчет схемы счетчика с заданным коэффициентом счета и схемы индикации.....	36
Список литературы.....	45
Приложение А.....	46
Приложение Б. Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов....	47

Введение

Выполнение самостоятельной работы по дисциплине «Основы электротехники, электроники и автоматизированного электропривода» способствует более глубокому усвоению теоретических закономерностей и получению практических навыков расчёта и моделирования работы электрических цепей постоянного и переменного токов в среде NI Multisim.

Работы выполняют на страницах формата А4. На первой странице (обложке или титульном листе) обязательно следует указать следующую информацию: название и порядковый номер расчётно-графического задания, вариант, свою фамилию, инициалы и учебную группу, фамилию преподавателя, год. Работы без вышеперечисленных сведений на проверку не принимаются.

На последующих страницах приводят условие задания, расчётную схему, размещают решение задания с краткими пояснениями. Модели электрических цепей и результаты моделирования вставляют в текст работы. Схемы и диаграммы выполняют в графическом редакторе в соответствии с требованиями ГОСТ 2.723–68, ГОСТ 2.747–68.

Расчётные формулы следует записывать сначала в символьном виде, а затем осуществлять подстановку численных данных с указанием единиц измерения, полученных в ходе вычисления результатов. Рекомендуемое количество значащих цифр при округлениях – две. При осуществлении выбора элементов следует его результаты сводить в таблицу, указав в ней расчётное значение основного параметра элемента и сокращённое условное обозначение выбранного элемента. Номиналы резисторов и конденсаторов берут из стандартного ряда E24. При выборе элементов по результатам проведенных расчётов следует пользоваться справочной литературой и доступными базами данных, содержащими информацию по электронным элементам.

Перед выполнением задания необходимо изучить соответствующие разделы рекомендуемой литературы и настоящих методических рекомендаций по курсу. Задания представляются на проверку в установленные учебным графиком сроки.

Вариант задания выдаётся преподавателем. Параметры расчетной схемы выбираются по соответствующим таблицам.

Расчётно-графические задания № 1 «Расчет электрических цепей постоянного тока», № 2 «Расчет электрических цепей переменного тока», № 3 «Расчет усилителя на биполярном транзисторе», № 4 «Расчет схемы счетчика с заданным коэффициентом счета и схемы индикации».

1 Расчётно-графическое задание № 1. Расчет электрических цепей постоянного тока

Для электрических схем, соответствующих номеру варианта и изображенных на рисунках 1.1–1.10 (номер рисунка указан в таблице 1.1), выполнить следующее:

- составить и решить численным методом систему уравнений, необходимых для определения токов в ветвях по первому и второму законам Кирхгофа;
- составить баланс мощностей для заданной схемы;
- найти все токи в ветвях, пользуясь методом контурных токов;
- проверить правильность решения, применив метод двух узлов, предварительно упростив схему, заменив треугольник сопротивлений R_4 , R_5 , R_6 эквивалентной звездой;
- определить показание вольтметра;
- построить потенциальную диаграмму для внешнего контура;
- составить модель схемы в среде Multisim, определить токи в ветвях и показание вольтметра.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Номер		E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом
варианта	рисунка									
1	1.1	22	24	10	2	1	8	10	5	7
2	1.2	55	18	26	6	9	10	2	7	34
3	1.3	36	10	50	12	23	14	16	23	23
4	1.4	16	6	35	25	48	13	15	28	54
5	1.5	14	50	8	75	34	25	23	45	26
6	1.6	20	21	30	45	22	20	29	46	65
7	1.7	5	18	20	12	21	30	39	36	43
8	1.8	10	12	10	34	19	40	49	22	21
9	1.9	5	24	12	32	49	43	42	35	7
10	1.10	21	36	55	4	25	28	32	34	6
11	1.1	4	9	17	10	8	21	13	52	37
12	1.2	4	34	22	17	9	32	25	6	42
13	1.3	16	25	32	24	10	34	28	8	32
14	1.4	48	18	44	42	11	7	54	34	24
15	1.5	12	19	55	24	17	3	32	16	13
16	1.6	12	42	5	50	12	5	60	18	17
17	1.7	6	36	26	26	28	19	15	34	46
18	1.8	12	52	21	16	36	43	17	37	50
19	1.9	12	8	19	8	32	44	6	43	10
20	1.10	12	38	45	4	28	33	3	21	12
21	1.1	9	18	11	28	7	55	27	23	4
22	1.2	15	52	22	19	5	12	24	38	8
23	1.3	100	54	76	52	31	87	12	21	15
24	1.4	54	75	82	67	9	76	18	74	33
25	1.5	46	8	45	14	76	9	73	56	44

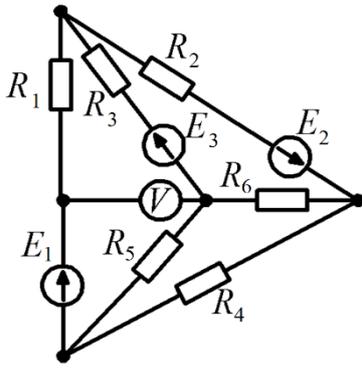


Рисунок 1.1

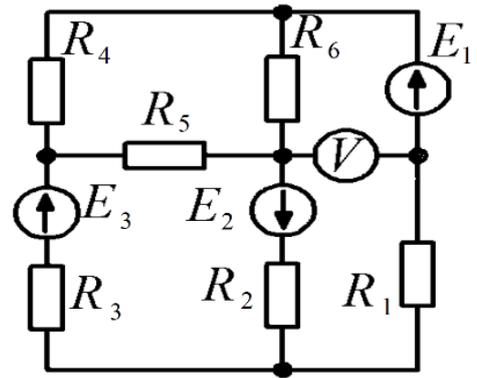


Рисунок 1.2

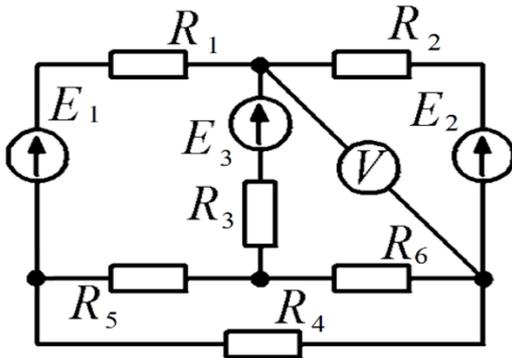


Рисунок 1.3

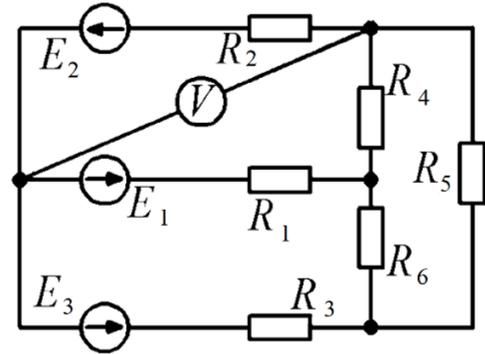


Рисунок 1.4

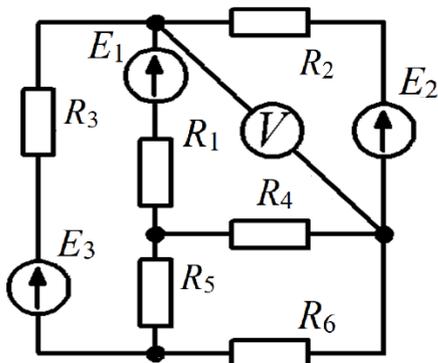


Рисунок 1.5

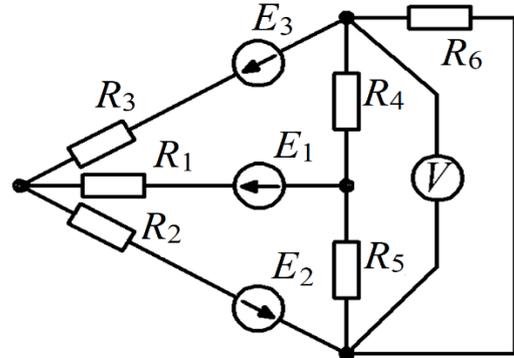


Рисунок 1.6

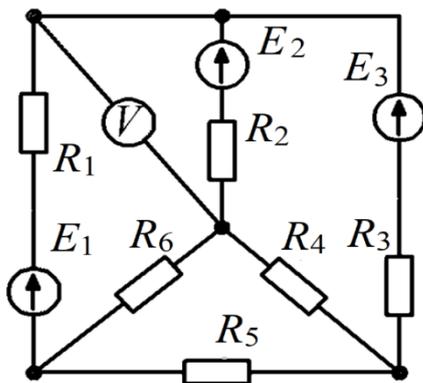


Рисунок 1.7

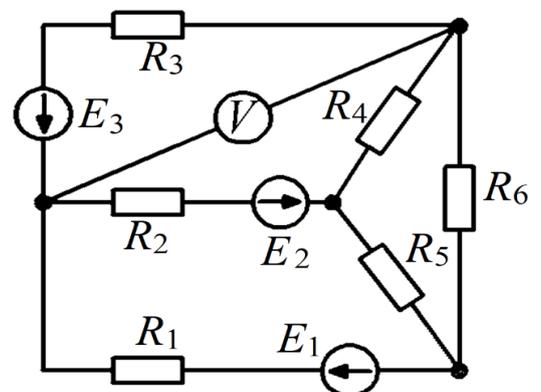


Рисунок 1.8

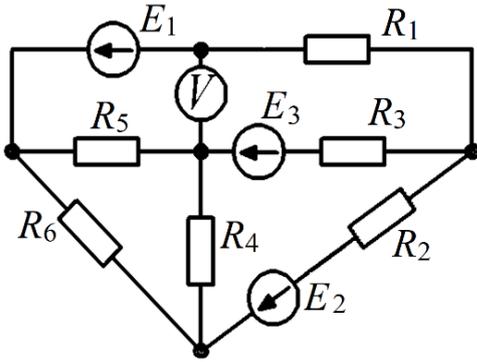


Рисунок 1.9

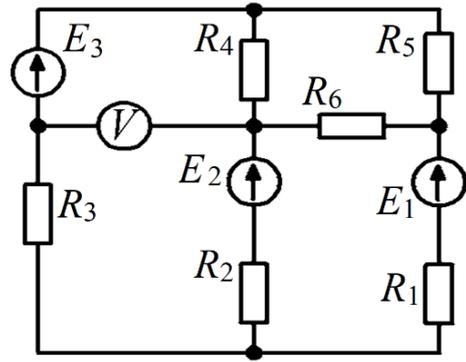


Рисунок 1.10

1.1 Методические указания

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа является универсальным при расчетах и анализах сложных электрических цепей.

Порядок расчета по этому методу состоит в следующем:

- 1) указываем произвольно положительные направления токов в ветвях и в соответствии с ними положительные направления напряжений, а также направления обхода в выбранных независимых контурах;
- 2) записываем уравнения по первому закону Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

Количество этих уравнений равно $k - 1$, где k – число узлов электрической цепи;

- 3) записываем уравнения по второму закону Кирхгофа применительно к контуру:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{i=1}^m I_i R_i,$$

где E_k – ЭДС k -го источника контура;

I_i – ток, протекающий через резистор R_i .

I_i и E_k берутся со знаком «плюс», если их направления совпадают с направлением обхода контура.

Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа,

$$n - (k - 1),$$

где n – число ветвей исходной схемы.

Решая систему полученных уравнений, определяем токи ветвей.

Для проверки правильности расчетов электрической цепи используют уравнение баланса мощностей

$$\sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i.$$

$(E_i \cdot I_i)$ берется со знаком «плюс», если направления ЭДС и тока совпадают, и со знаком «минус», если их направления не совпадают.

Метод контурных токов вытекает из метода, основанного на непосредственном применении законов Кирхгофа. Уравнения по методу контурных токов составляют по второму закону Кирхгофа введением так называемых контурных токов. Количество уравнений, составленных по методу контурных токов:

$$n - (k - 1).$$

Направления контурных токов выбираются произвольно. При составлении уравнений положительными принимаются ЭДС, совпадающие с направлениями контурных токов. Решая систему уравнений, определим значение контурных токов. Во внешних ветвях контурные токи будут являться истинными токами. Токи в смежных ветвях определяют по первому закону Кирхгофа.

Расчет сложных электрических цепей постоянного тока методом двух узлов производим по формуле

$$I_i = \frac{\pm E_i \pm U_{AB}}{R_i} = (\pm E_i \pm U_{AB}) \cdot g_i,$$

где I_i – ток i -й ветви;

E_i – ЭДС i -й ветви;

U_{AB} – узловое напряжение;

R_i – сопротивление i -й ветви;

g_i – проводимость i -й ветви, $g_i = 1 / R_i$.

ЭДС и напряжение берутся со знаком «плюс», если их направления совпадают с направлением тока рассматриваемой ветви.

Величина U_{AB} находится по формуле

$$U_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n (\pm E_i \cdot G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i}.$$

В этой формуле E_i берется со знаком «плюс», если ее направление противоположно направлению U_{AB} , и со знаком «минус», если направления совпадают.

Формулы для расчета R_A, R_B, R_C (преобразование треугольника в звезду) следующие:

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}.$$

1.2 Пример решения

Решить задание для схемы, представленной на рисунке 1.11, с исходными данными таблицы 1.2.

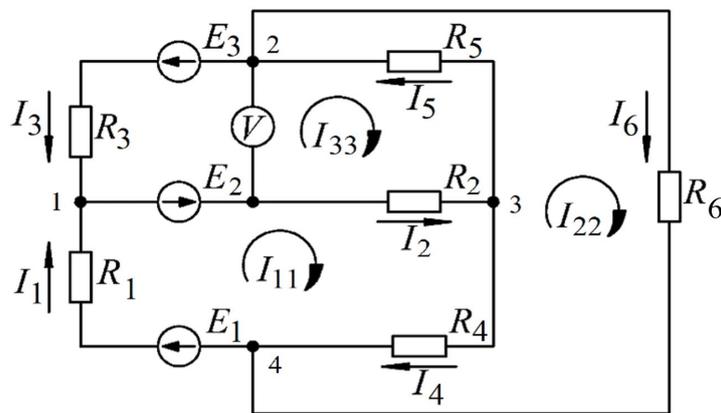


Рисунок 1.11 – Схема электрической цепи для примера решения

Таблица 1.2 – Исходные данные для примера решения

Номер		E_1 ,	E_2 ,	E_3 ,	R_1 ,	R_2 ,	R_3 ,	R_4 ,	R_5 ,	R_6 ,
варианта	рисунка	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	1.11	100	50	60	12	35	64	16	18	38

Составим систему уравнений, необходимых для определения токов в ветвях по первому и второму законам Кирхгофа (метод непосредственного применения законов Кирхгофа).

Так как вольтметр обладает бесконечно большим сопротивлением, то при расчётах токов его не учитываем.

Число узлов схемы $k = 4$ (обозначены цифрами 1–4); число ветвей $n = 6$. Произвольно задаемся направлением токов в ветвях, обозначая их $I_1 - I_6$.

Число уравнений по первому закону Кирхгофа $k - 1 = 4 - 1 = 3$.

$$\text{Узел 1: } I_1 - I_2 + I_3 = 0.$$

$$\text{Узел 2: } I_5 - I_6 - I_3 = 0.$$

$$\text{Узел 3: } I_2 - I_4 - I_5 = 0.$$

Число уравнений по второму закону Кирхгофа $n - (k - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$.

Контур $R_3 - E_3 - R_5 - R_2 - E_2$: $-I_3 \cdot R_3 - I_5 \cdot R_5 - I_2 \cdot R_2 = -E_3 - E_2$.

Контур $R_2 - R_4 - E_1 - R_1 - E_2$: 1.

Контур $R_6 - R_4 - R_5$: $I_6 \cdot R_6 - I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 = 0$.

Направление обхода контуров – по часовой стрелке.

Число всех уравнений $N = 6$ равно числу искомых токов.

Подставим числовые значения в полученную систему уравнений:

$$\begin{cases} 1 \cdot I_1 + (-1) \cdot I_2 + 1 \cdot I_3 + 0 \cdot I_4 + 0 \cdot I_5 + 0 \cdot I_6 = 0; \\ 0 \cdot I_1 + 0 \cdot I_2 + (-1) \cdot I_3 + 0 \cdot I_4 + 1 \cdot I_5 + (-1) \cdot I_6 = 0; \\ 0 \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 + (-1) \cdot I_4 + (-1) \cdot I_5 + 1 \cdot I_6 = 0; \\ 12 \cdot I_1 + 35 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 + 16 \cdot I_4 + 0 \cdot I_5 + 0 \cdot I_6 = 150; \\ 0 \cdot I_1 + 0 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 + (-16) \cdot I_4 + 18 \cdot I_5 + 38 \cdot I_6 = 0; \\ 0 \cdot I_1 + (-35) \cdot I_2 + (-64) \cdot I_3 + 0 \cdot I_4 + (-18) \cdot I_5 + 0 \cdot I_6 = -110. \end{cases}$$

Решим систему уравнений с помощью программы (рисунок 1.12).

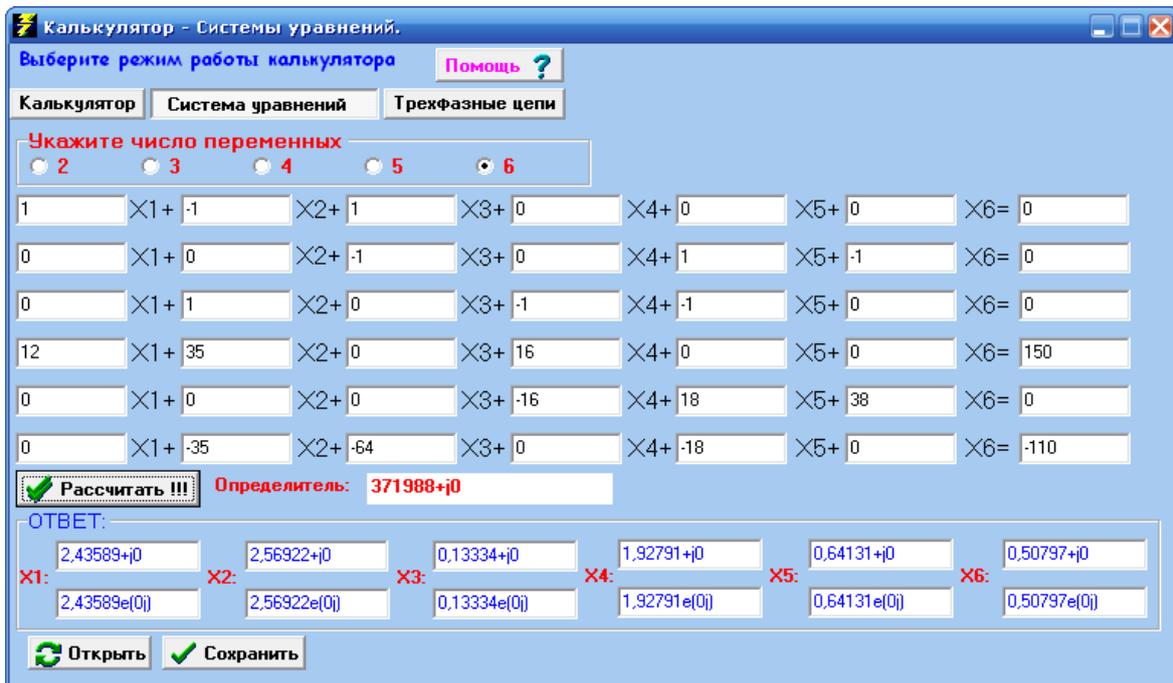


Рисунок 1.12 – Результат решения системы уравнений для определения токов методом непосредственного применения законов Кирхгофа с помощью программы «Калькулятор»

Полученные токи в ветвях методом непосредственного применения законов Кирхгофа: $I_1 = 2,436$ А; $I_2 = 2,569$ А; $I_3 = 0,133$ А; $I_4 = 1,928$ А; $I_5 = 0,641$ А; $I_6 = 0,508$ А.

Составим баланс мощностей для заданной схемы:

$$I_1 \cdot E_1 + I_2 \cdot E_2 + I_3 \cdot E_3 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6;$$

$$243,58 + 128,46 + 8,0 = 69,2 + 226,2 + 1,3 + 64,8 + 8,1 + 10,7;$$

$$380,05 \text{ Вт} \approx 380,1 \text{ Вт} .$$

Погрешность

$$\Delta = \frac{380,1 - 380,05}{380,1} \cdot 100 \% = 0,013 \% < 5 \%,$$

что допустимо. Баланс мощностей выполняется, токи определены верно.

Найдем токи в ветвях, пользуясь методом контурных токов.

Количество уравнений $n - (k - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$.

Обозначение контурных токов: I_{11}, I_{22}, I_{33} (см. рисунок 1.11).

Система уравнений

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 + R_2 + R_4) - I_{22} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_2 = E_2 + E_1; \\ -I_{11} \cdot R_4 + I_{22} \cdot (R_5 + R_6 + R_4) - I_{33} \cdot R_5 = 0; \\ I_{11} \cdot R_2 - I_{22} \cdot R_5 + I_{33} \cdot (R_3 + R_5 + R_2) = -E_3 - E_2. \end{cases}$$

Подставим числовые значения

$$\begin{cases} 63 \cdot I_{11} - 16 \cdot I_{22} - 35 \cdot I_{33} = 150; \\ -16 \cdot I_{11} + 72 \cdot I_{22} - 18 \cdot I_{33} = 0; \\ -35 \cdot I_{11} - 18 \cdot I_{22} + 117 \cdot I_{33} = -110. \end{cases}$$

Решим систему уравнений с помощью программы «Калькулятор» (рисунок 1.13).

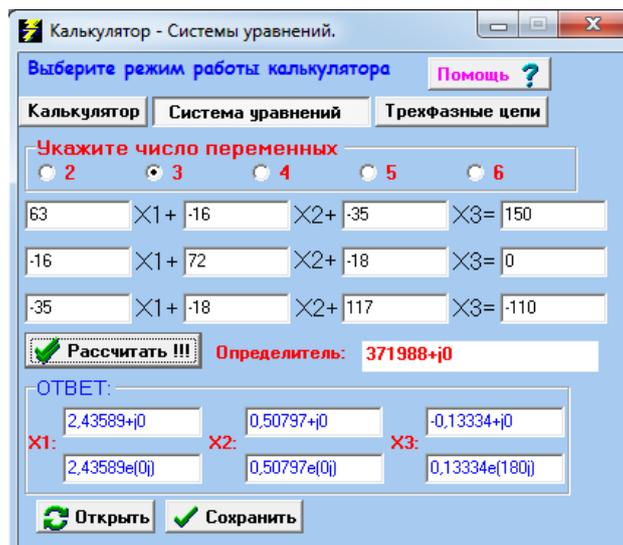


Рисунок 1.13 – Результат решения системы уравнений для определения токов методом контурных токов с помощью программы «Калькулятор»

Полученные токи: $I_{11} = 2,436 \text{ А}$; $I_{22} = 0,508 \text{ А}$; $I_{33} = -0,133 \text{ А}$.

Определим реальные токи в ветвях:

$$I_1 = I_{11} = 2,436 \text{ А};$$

$$I_2 = -I_{33} + I_{11} = 0,133 + 2,436 = 2,569 \text{ А};$$

$$I_3 = -I_{33} = 0,133 \text{ А};$$

$$I_4 = -I_{11} - I_{22} = 2,436 - 0,508 = 1,928 \text{ А};$$

$$I_5 = -I_{22} + I_{33} = 0,508 + 0,133 = 0,641 \text{ А};$$

$$I_6 = I_{22} = 0,508 \text{ А}.$$

Найденные токи близки к значениям, полученным методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

Проверим правильность решения, применив метод двух узлов, предварительно упростив схему, заменив треугольник сопротивлений R_4 , R_5 , R_6 эквивалентной звездой (рисунок 1.14).

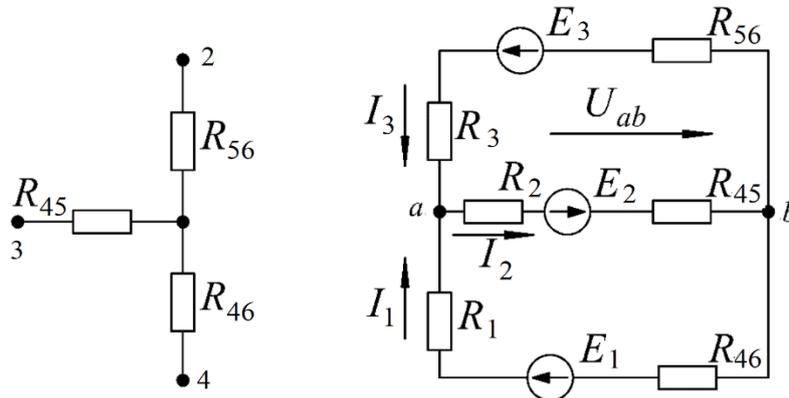


Рисунок 1.14 – Преобразование схемы заменой треугольника сопротивлений R_4 , R_5 , R_6 на эквивалентную звезду R_{45} , R_{56} , R_{46}

Сопротивления после преобразования схемы определяются следующим образом:

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{16 \cdot 18}{16 + 18 + 38} = 4 \text{ Ом};$$

$$R_{46} = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{16 \cdot 38}{72} = 8,44 \text{ Ом};$$

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{18 \cdot 38}{72} = 9,5 \text{ Ом}.$$

Найдем напряжение между узлами ab схемы

$$U_{ab} = \frac{E_1 \cdot g_1 - E_2 \cdot g_2 + E_3 \cdot g_3}{g_1 + g_2 + g_3},$$

где проводимости ветвей

$$g_1 = \frac{1}{R_1 + R_{46}} = \frac{1}{12 + 8,44} = \frac{1}{20,44} = 0,049 \text{ См};$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_{45}} = \frac{1}{35 + 4} = \frac{1}{39} = 0,026 \text{ См};$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3 + R_{56}} = \frac{1}{65 + 9,5} = \frac{1}{73,5} = 0,014 \text{ См}.$$

Тогда

$$U_{ab} = \frac{100 \cdot 0,049 - 50 \cdot 0,026 + 60 \cdot 0,014}{0,049 + 0,026 + 0,014} = \frac{4,9 - 1,3 + 0,84}{0,089} = 49,887 \text{ В}.$$

Токи в ветвях схемы по первому закону Кирхгофа находят по формулам

$$I_1 = (E_1 - U_{ab}) \cdot q_1 = (100 - 49,887) \cdot 0,049 = 2,455 \text{ А};$$

$$I_2 = (E_2 - U_{ab}) \cdot q_2 = (50 + 49,887) \cdot 0,026 = 2,579 \text{ А};$$

$$I_3 = (E_3 - U_{ab}) \cdot q_3 = (60 - 49,887) \cdot 0,014 = 0,14 \text{ А}.$$

Найденные токи близки к значениям, полученным другими методами расчёта.

Определим показание вольтметра. Для контура на рисунке 1.15 составим уравнение по второму закону Кирхгофа.

$$U_V + I_3 \cdot R_3 = E_3 + E_2;$$

$$U_V = -I_3 \cdot R_3 + E_3 + E_2;$$

$$U_V = -0,133 \cdot 64 + 60 + 50 = 101,5 \text{ В}.$$

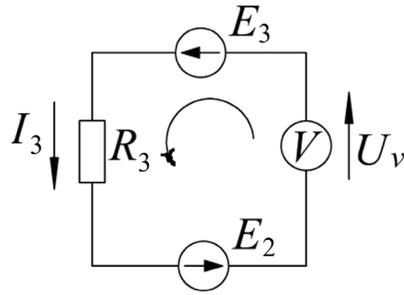


Рисунок 1.15 – Контур схемы, содержащий вольтметр

Построим потенциальную диаграмму для внешнего контура (рисунки 1.16 и 1.17), приняв потенциал $\varphi_1 = 0$.

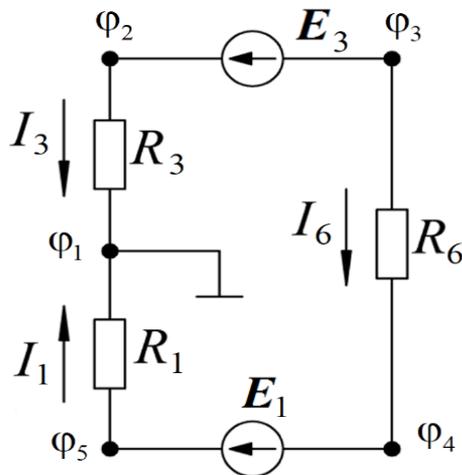


Рисунок 1.16 – Схема внешнего контура

$$\varphi_1 = 0 \text{ В};$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + I_3 \cdot R_3 = 0 + 0,133 \cdot 64 = 8,512 \text{ В};$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 - E_3 = 8,512 - 60 = -51,488 \text{ В};$$

$$\varphi_4 = \varphi_3 - I_6 \cdot R_6 = -51,488 - 0,508 \cdot 38 = -70,792 \text{ В};$$

$$\varphi_5 = \varphi_4 + E_1 = -70,792 + 100 = 29,208 \text{ В};$$

$$\varphi_1 = \varphi_5 - I_1 \cdot R_1 = 29,208 - 2,436 \cdot 12 = -0,024 \approx 0 \text{ В}.$$

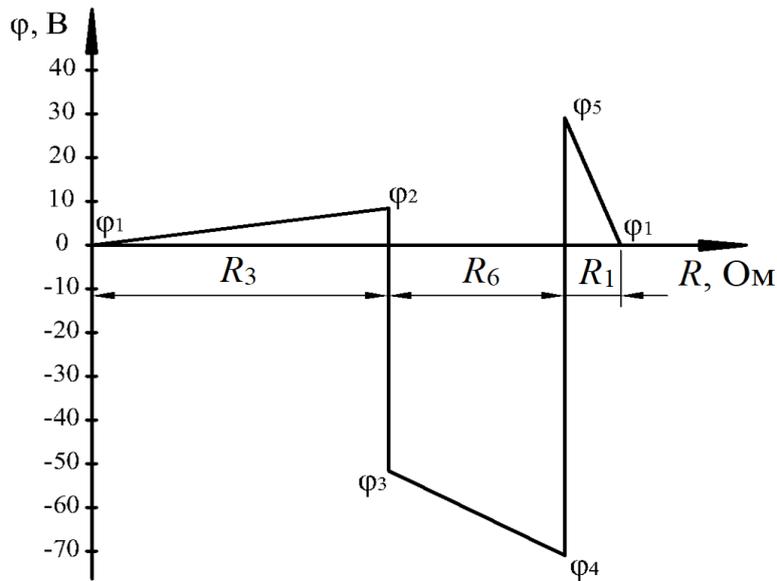


Рисунок 1.17 – Потенциальная диаграмма

Составим модель схемы в среде Multisim (рисунок 1.18).

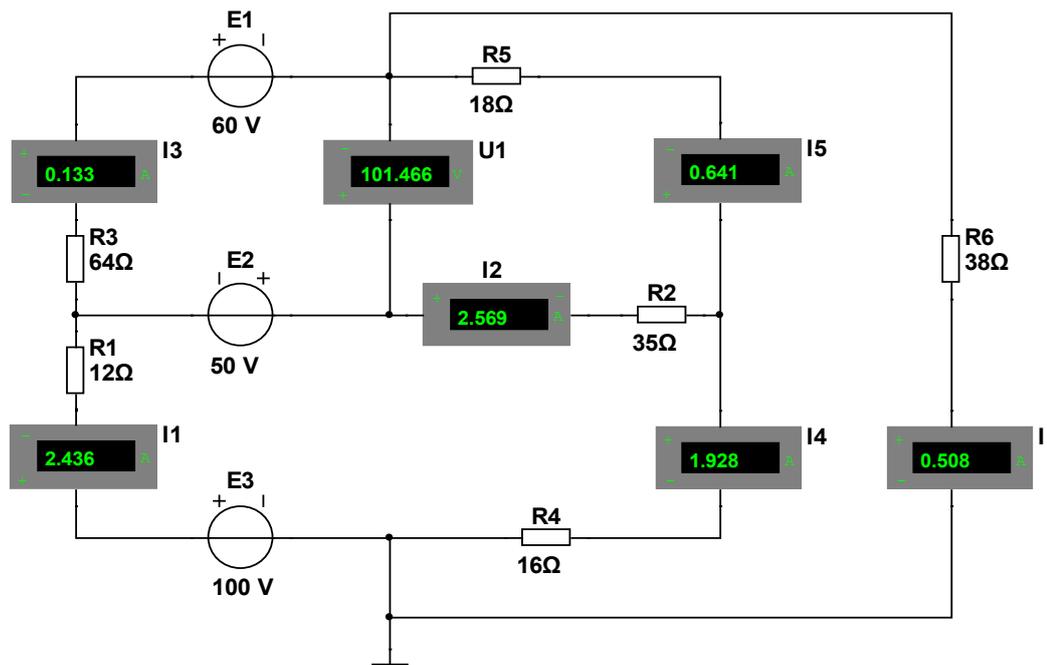


Рисунок 1.18 – Моделирование работы схемы в среде Multisim

Результаты расчётов токов в ветвях схемы различными методами сведём в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты решения

Метод расчёта	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	I_5, A	I_6, A
Непосредственное применение законов Кирхгофа	2,436	2,569	0,133	1,928	0,641	0,508
Метод контурных токов	2,436	2,569	0,133	1,928	0,641	0,508
Метод двух узлов	2,455	2,579	0,14	–	–	–
Моделирование в Multisim	2,436	2,569	0,133	1,928	0,641	0,508

2 Расчетно-графическое задание № 2. Расчёт электрических цепей переменного тока

Для электрической цепи, схема которой изображена на рисунках 2.1–2.10, по заданным в таблице 2.1 параметрам и ЭДС источников выполнить следующее:

- определить токи во всех ветвях цепи и действующие значения напряжения на всех пассивных элементах цепи;
- составить баланс мощностей;
- определить показание вольтметра;
- записать уравнение мгновенного значения одного из токов ветви и построить его график;
- составить модель схемы в среде Multisim, определить токи в ветвях и показание вольтметра в полученной модели.

Частота источников питания 50 Гц. Для ЭДС источников заданы: амплитуда ЭДС E_m , начальная фаза φ в градусах.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Номер		E_{m1} , В	φ_1 , град	E_{m2} , В	φ_2 , град	E_{m3} , В	φ_3 , град	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом
вари- анта	ри- сунка															
1	2.1	141	0	–	–	60	30	637	–	–	–	9	16	2	3	2
2	2.2	100	30	75	-45	–	–	–	–	100	16	9	16	8	3	4
3	2.3	60	-70	45	80	100	0	637	318	–	–	–	16	8	3	4
4	2.4	80	0	70	0	–	–	–	300	–	16	–	16	10	5	8
5	2.5	220	-60	90	0	141	60	637	–	100	–	48	–	8	–	4
6	2.6	141	0	75	-30	–	–	100	300	–	16	–	115	10	–	10
7	2.7	35	0	–	–	120	-10	–	–	100	16	–	0	–	4	10
8	2.8	60	20	80	0	–	–	–	159	–	–	–	115	10	4	10
9	2.9	110	-80	60	0	130	0	–	318	–	16	–	–	15	8	20
10	2.10	42	50	85	-60	0	0	–	637	200	16	–	64	5	-	8
11	2.1	100	0	–	–	60	-30	200	–	–	–	20	19	2	5	2
12	2.2	100	-30	75	45	–	–	–	–	159	48	9	16	8	6	4
13	2.3	160	-70	45	-80	100	0	300	200	–	–	–	6	8	6	4
14	2.4	180	0	70	30	–	–	–	200	–	48	–	40	15	5	8
15	2.5	200	60	90	0	141	-60	400	–	200	–	32	–	8	–	4
16	2.6	141	30	75	-30	–	–	100	300	–	16	–	115	10	–	10
17	2.7	35	20	–	–	120	10	–	–	100	16	–	115	–	4	0
18	2.8	160	-20	80	0	–	–	–	170	–	–	–	105	10	8	10
19	2.9	110	80	60	0	130	20	–	318	–	16	–	–	15	8	20
20	2.10	42	-50	85	-70	0	0	–	318	200	16	–	64	5	–	18
21	2.1	241	30	–	–	60	-30	200	–	–	–	29	36	8	3	2
22	2.2	100	-30	75	45	–	–	–	–	200	16	19	16	8	23	4
23	2.3	70	-70	45	50	100	0	300	218	–	–	–	16	28	3	14
24	2.4	80	20	70	30	–	–	–	100	–	96	–	16	20	5	8
25	2.5	200	-60	90	10	141	60	337	–	300	–	28	–	8	–	4

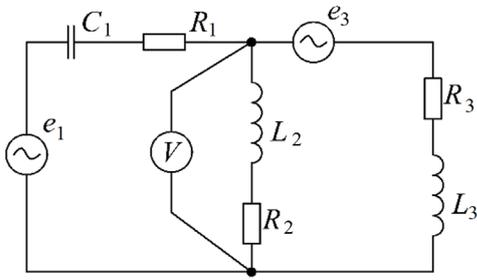


Рисунок 2.1

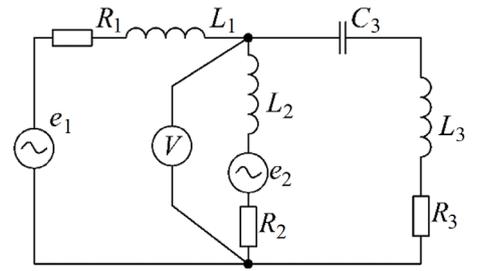


Рисунок 2.2

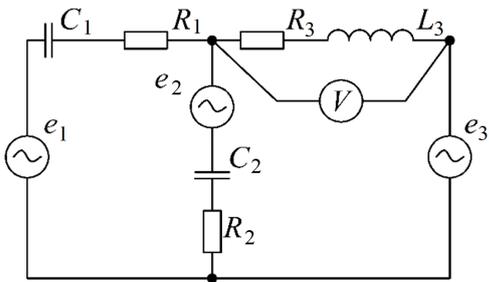


Рисунок 2.3

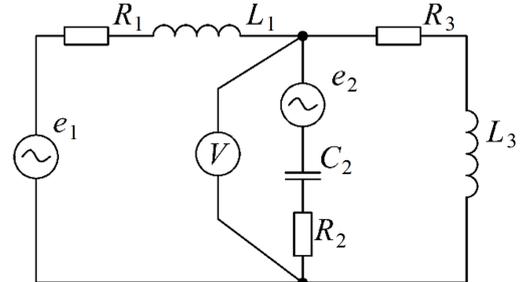


Рисунок 2.4

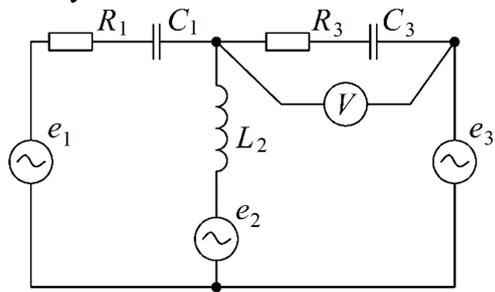


Рисунок 2.5

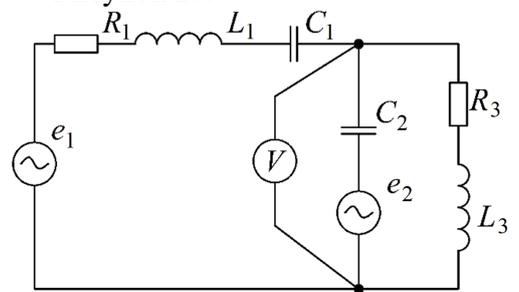


Рисунок 2.6

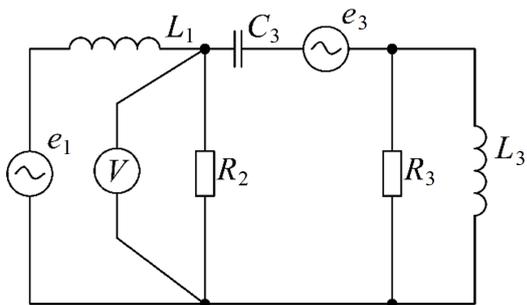


Рисунок 2.7

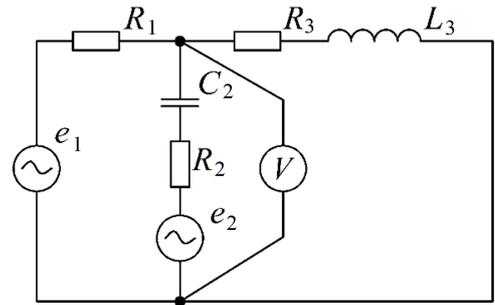


Рисунок 2.8

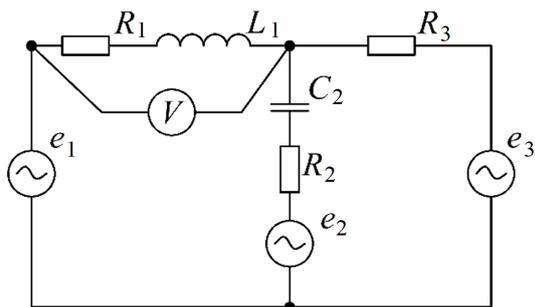


Рисунок 2.9

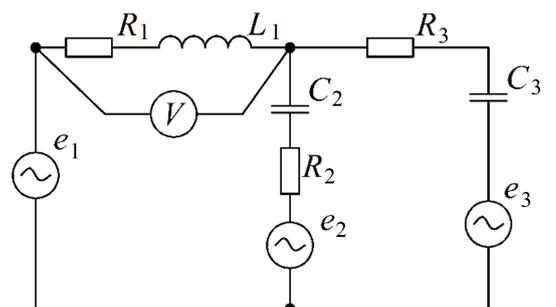


Рисунок 2.10

2.1 Методические указания

Сущность символического метода состоит в том, что гармонической функции тока (напряжения, ЭДС) ставится в соответствие комплексная гармоническая функция:

$$i = I_m \sin(\omega t \pm \varphi); \dot{I}_m = I_m \cdot e^{j(\omega t \pm \varphi)}.$$

Для $t = 0$ комплексное амплитудное значение тока $\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j(\pm\varphi)}$, а комплекс действующего значения тока $\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm\varphi)}$. Аналогично $\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm\varphi)}$.

Закон Ома в символической форме имеет вид:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}},$$

где \underline{Z} – комплекс полного сопротивления цепи.

При последовательном соединении элементов R, L, C

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = z \cdot e^{j\varphi},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$;

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

При параллельном соединении элементов

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_i}.$$

2.2 Пример решения

Решить задание для схемы, представленной на рисунке 2.11, с исходными данными таблицы 2.2.

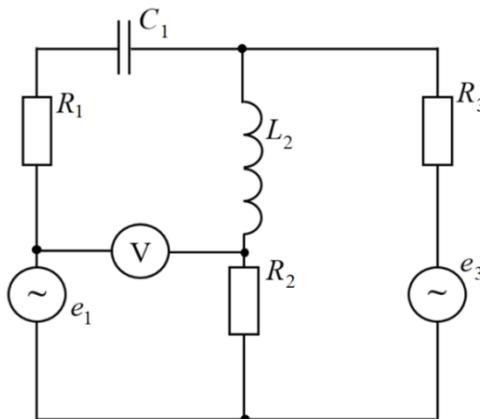


Рисунок 2.11 – Схема электрической цепи

Таблица 2.2 – Исходные данные

Номер		E_{m1} , В	φ_1 , град	E_{m2} , В	φ_2 , град	E_{m3} , В	φ_3 , град	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом
вари- анта	ри- сунка															
1	2.11	200	30	–	–	150	-15	200	–	–	–	90	–	32	24	20

Преобразуем исходную схему, заменив сопротивления ветвей полными комплексными сопротивлениями (рисунок 2.12). Вольтметр в схеме не учитываем из-за большой величины сопротивления. Произвольно задаёмся направлением комплексов токов в ветвях и ЭДС источников.

Получим необходимые для расчета параметры переменных ЭДС и сопротивлений.

$$\dot{E}_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi_1} = \frac{200}{\sqrt{2}} \cdot e^{j30^\circ} = 141,421 \cdot e^{j30^\circ} = 122,47 + j70,71 \text{ В};$$

$$\dot{E}_3 = \frac{E_{m3}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi_3} = \frac{150}{\sqrt{2}} \cdot e^{-j15^\circ} = 106,066 \cdot e^{-j15^\circ} = 102,45 - j27,45 \text{ В}.$$

Найдем реактивные сопротивления катушки индуктивности и конденсатора:

$$X_{C1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 15,92 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 90 \cdot 10^{-3} = 28,27 \text{ Ом}.$$

Полные сопротивления ветвей схемы в комплексной форме будут иметь вид:

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 32 - j15,92 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 24 + j28,27 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 = 20 \text{ Ом}.$$

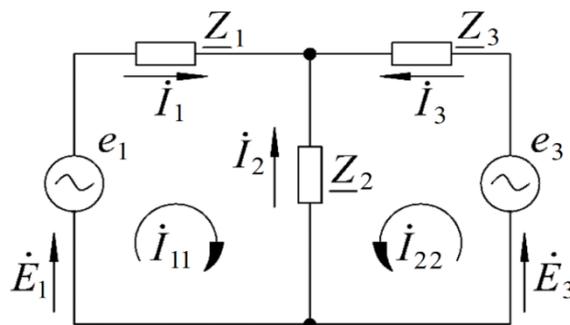


Рисунок 2.12 – Преобразованная схема электрической цепи

Решим задачу методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

Число узлов схемы $k = 2$; число ветвей $n = 3$. Число уравнений по первому закону Кирхгофа: $k - 1 = 2 - 1 = 1$. Число уравнений по второму закону Кирхгофа: $n - (k - 1) = 3 - (2 - 1) = 2$. Составим уравнения для верхнего узла схемы и контуров: $\dot{E}_1 - \underline{Z}_1 - \underline{Z}_2$ и $\dot{E}_3 - \underline{Z}_3 - \underline{Z}_2$.

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \\ \dot{I}_1 \underline{Z}_1 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2 = \dot{E}_1; \\ -\dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{I}_3 \underline{Z}_3 = \dot{E}_3. \end{cases}$$

Подставив числовые значения, получим

$$\begin{cases} 1 \cdot \dot{I}_1 + 1 \cdot \dot{I}_2 + 1 \cdot \dot{I}_3 = 0; \\ (32 - j15,92) \cdot \dot{I}_1 - (24 + j28,27) \cdot \dot{I}_2 + 0 \cdot \dot{I}_3 = 122,47 + j70,71; \\ 0 \cdot \dot{I}_1 - (24 + j28,27) \cdot \dot{I}_2 + (20) \cdot \dot{I}_3 = 102,45 - j27,45. \end{cases}$$

Для решения системы уравнений воспользуемся программой «Калькулятор» (рисунок 2.13).

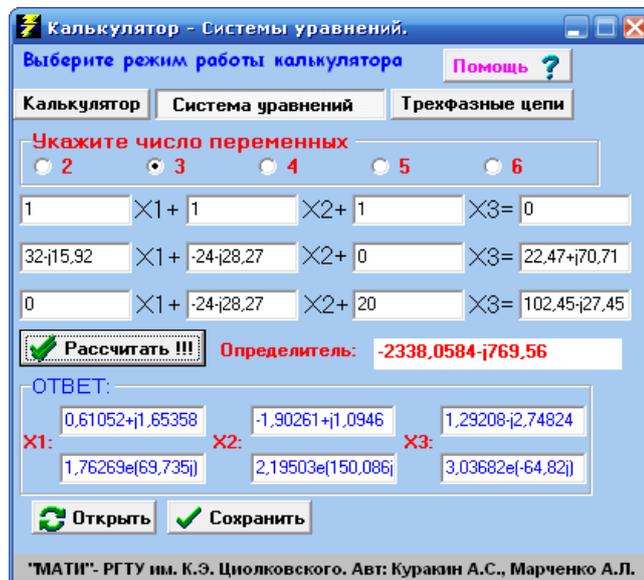


Рисунок 2.13 – Результат решения системы уравнений для определения токов методом непосредственного применения законов Кирхгофа в программе «Калькулятор»

Полученные токи

$$\dot{I}_1 = 0,611 + j1,654 = 1,763 \cdot e^{-j69,74^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_2 = -1,903 + j1,095 = 2,195 \cdot e^{j150,86^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_3 = 1,292 - j2,748 = 3,037 \cdot e^{j-64,82^\circ} \text{ A.}$$

Решим задачу методом двух узлов (рисунок 2.14).

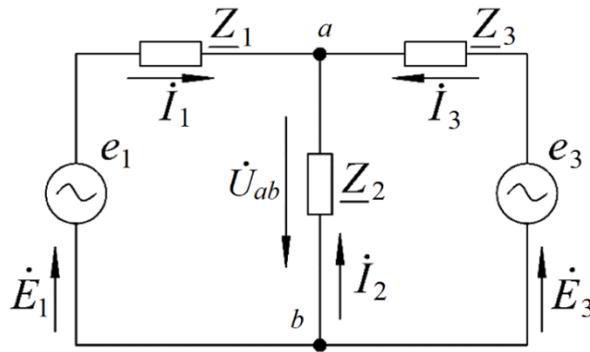


Рисунок 2.14 – Схема для расчета цепи методом двух узлов

Найдем полную проводимость ветвей в комплексной форме:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{32 - j15,92} = 0,025 + j0,012 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{24 + j28,27} = 0,017 - j0,02 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См.}$$

Найдём напряжение

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \frac{\dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1 + \dot{E}_3 \cdot \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \\ &= \frac{(122,47 + j70,71) \cdot (0,025 + j0,012) + (102,45 - j27,45) \cdot 0,05}{0,025 + j0,012 + 0,017 - j0,02 + 0,05} = \\ &= \frac{7,309 + j1,925}{0,0925 + j0,0081} = 76,608 + j27,515 \text{ В.} \end{aligned}$$

Тогда токи в ветвях будут равны:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_1} = \frac{(122,47 + j70,71) - (76,608 + j27,515)}{32 - j15,92} =$$

$$= 0,611 + j1,653 = 1,762 \cdot e^{j69,7^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{-(76,608 + j27,515)}{24 + j28,27} = -1,903 + j1,095 = 2,195 \cdot e^{j150^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_3 - \dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{(102,45 - j27,45) - (76,608 + j27,515)}{20} =$$

$$= 1,292 - j2,748 = 3,036 \cdot e^{-j64,8^\circ} \text{ A}.$$

Найдем действующие значения напряжений на элементах схемы:

$$U_{R1} = I_1 \cdot R_1 = 1,762 \cdot 32 = 56,406 \text{ В};$$

$$U_{R2} = I_2 \cdot R_2 = 2,195 \cdot 24 = 52,681 \text{ В};$$

$$U_{R3} = I_3 \cdot R_3 = 3,036 \cdot 20 = 60,736 \text{ В};$$

$$U_{C1} = I_1 \cdot X_{C1} = 1,762 \cdot 15,92 = 28,062 \text{ В};$$

$$U_{L2} = I_2 \cdot X_{L2} = 2,195 \cdot 28,27 = 62,053 \text{ В}.$$

Составим для данной схемы баланс мощностей:

$$\tilde{S}_H = \tilde{S}_П;$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_H &= \dot{E}_1^* \cdot \dot{I}_1 + \dot{E}_3^* \cdot \dot{I}_3 = (122,47 + j70,71) \cdot (0,611 - j1,653) + \\ &+ (102,45 - j27,45) \cdot (1,292 + j2,748) = 399,508 + 86,745 \text{ В} \cdot \text{А}, \end{aligned}$$

где \dot{I}_1^*, \dot{I}_3^* – комплексные сопряжённые значения токов.

Комплексная мощность нагрузки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_П &= I_1^2 \cdot \underline{Z}_1 + I_2^2 \cdot \underline{Z}_2 + I_3^2 \cdot \underline{Z}_3 = 1,762^2 \cdot (32 - j15,92) + 2,195^2 \times \\ &\times (24 + j28,27) + 3,036^2 \cdot 20 = 399,508 + j86,745 \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Баланс мощностей выполняется.

Определяем показания вольтметра (рисунок 2.15):

$$\dot{U}_V - \dot{I}_2 \cdot R_2 = \dot{E}_1;$$

$$\dot{U}_V = \dot{I}_2 \cdot R_2 + \dot{E}_1 = (2,195 \cdot e^{j150^\circ} \cdot 24) + 141,421 \cdot e^{j30^\circ} = 123,79 \cdot e^{j51,6^\circ} \text{ В.}$$

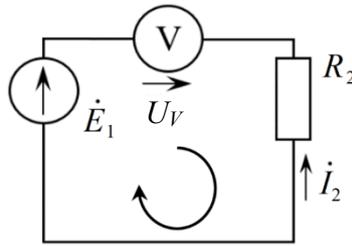


Рисунок 2.15 – Схема для определения показания вольтметра

Вольтметр показывает значение $U_V = 123,79 \text{ В}$.

Запишем уравнение мгновенного значения тока

$$\dot{I}_2 = 2,195 \cdot e^{j150^\circ} \text{ А.}$$

Амплитудное значение тока

$$\dot{I}_{m2} = \dot{I}_2 \cdot \sqrt{2} = 2,195 \cdot \sqrt{2} = 3,053 \text{ А.}$$

Тогда $i_2 = 3,053 \cdot \sin(314t + 150^\circ) \text{ А}$.

График этого тока имеет вид, представленный на рисунке 2.16.

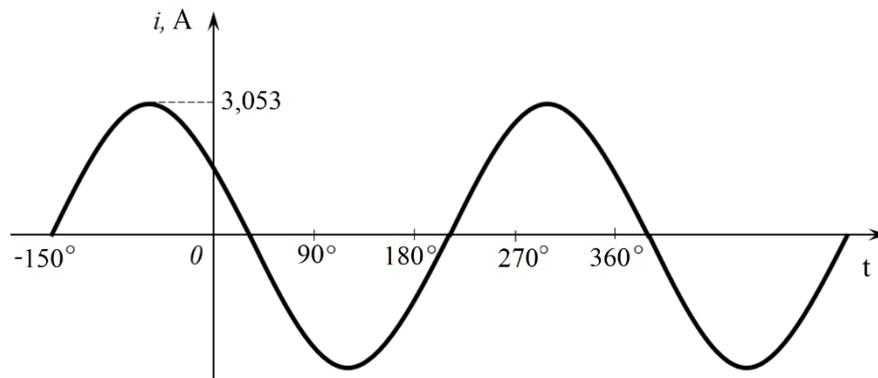


Рисунок 2.16 – Волновая диаграмма тока i_2

Составим модель схемы в среде Multisim (рисунок 2.17).

Результаты решения сведены в таблицу 2.3.

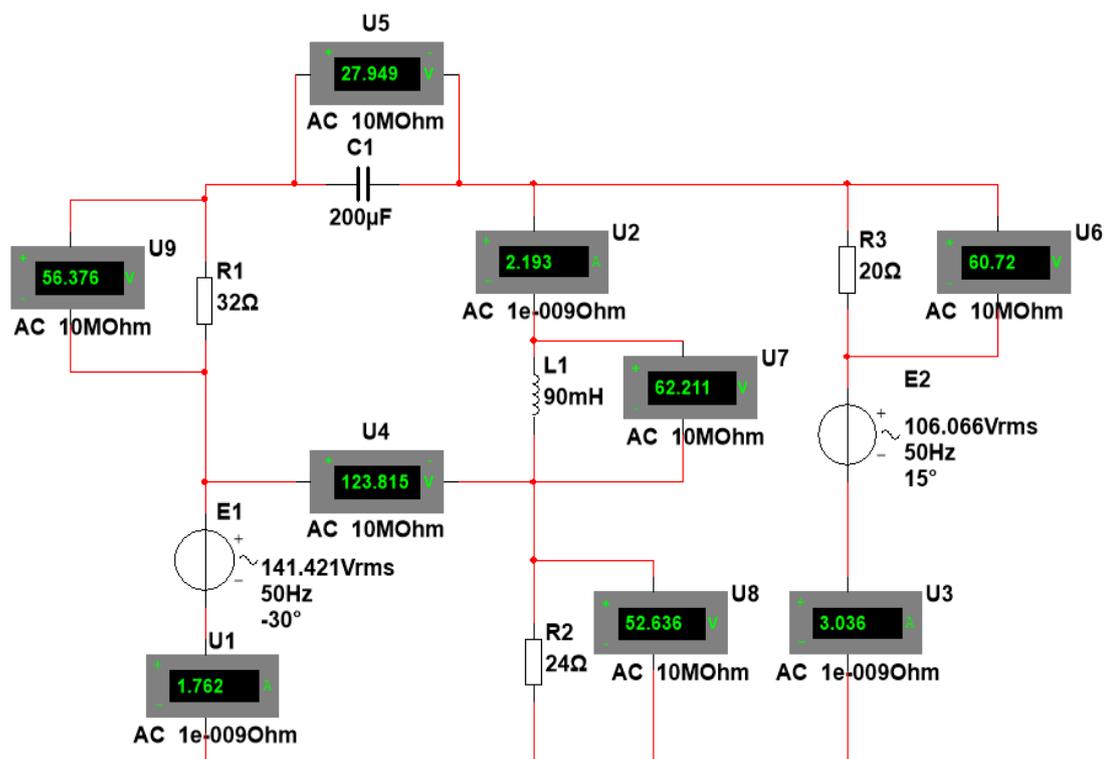


Рисунок 2.17 – Моделирование работы схемы в среде Multisim

Таблица 2.3 – Результаты решения

Метод расчёта	I_1, A	I_2, A	I_3, A	U_V, B
Непосредственное применение законов Кирхгофа	1,763	2,195	3,037	–
Метод двух узлов	1,762	2,195	3,036	
Моделирование в Multisim	1,762	2,193	3,036	123,82

Результаты, полученные разными методами решения, совпадают.

3 Расчетно-графическое задание № 3. Расчет усилителя на биполярном транзисторе

В соответствии с вариантом рассчитать усилитель с параметрами, заданными в таблице 3.1 (параметры транзисторов взять из таблицы А.1 и рисунка А.1). Снять входные и выходные характеристики транзистора согласно рисунку 3.7. Построить на выходной характеристике нагрузочную прямую, указать точку А на входной и выходной характеристиках транзистора. Выполнить моделирование усилителя с рассчитанными параметрами согласно рисункам 3.8–3.10. По результатам расчетов и моделирования заполнить соответствующие таблицы.

Таблица 3.1 – Исходные данные

Номер варианта	Тип транзистора	E_n , В	f_n , Гц	f_6 , кГц
1	BC547A	6	100	20
2	BD237	9	200	30
3	2N2218	6	400	25
4	BD135	12	20	50
5	BD135	12	10	100
6	2N2218	9	30	80
7	BD135	15	80	90
8	BC547A	18	160	70
9	BC547A	6	150	60
10	BD237	9	180	110
11	2N2218	6	250	105
12	BD135	12	300	120
13	BD135	11	100	125
14	2N2218	9	200	30
15	BD135	15	400	35
16	BC547A	18	20	45
17	BC547A	15	10	55
18	BC547A	18	30	65
19	BD237	12	80	75
20	2N2218	9	160	85
21	BD135	15	150	95
22	BD135	18	180	105
23	2N2218	6	250	115
24	BD135	9	300	125
25	BC547A	6	70	135

3.1 Методические указания

Часто в современных электронных системах сигнал датчиков имеет уровень, недостаточный для работы исполнительных устройств. Для согласования сигналов в этих и других случаях используются усилители. Усилитель электрических сигналов строится, в основном, на электронных лампах, биполярных или полевых транзисторах. Обязательной составной частью усилителя является внешний источник напряжения, часть энергии которого направляется в нагрузку. Таким образом, усилитель перераспределяет энергию источника в полезную работу в соответствии со входным сигналом. В расчетно-графическом задании предлагается рассчитать простой усилитель на биполярном транзисторе.

Одним из наиболее часто используемых усилителей на биполярных транзисторах является усилитель с *общим эмиттером* (ОЭ). В этом усилителе эмиттер – общий электрод для входной и выходной цепей (рисунок 3.1). Входное напряжение $u_{вх}$ от источника сигнала E_c с внутренним сопротивлением R_c подается на усиливаемый каскад на биполярном транзисторе VT через разделяющий конденсатор C_{p1} , предотвращающий прохождение постоянной составляющей от источника сигнала. Усиленное выходное напряжение $u_{вых}$ подается на нагрузку R_n через

разделительный конденсатор C_{p2} . Таким образом, рассматриваемый усилитель предназначен для усиления только переменного напряжения.

Для питания усилителя используется источник постоянного напряжения с ЭДС E_n (обычно напряжение $U_n = 5 \dots 50$ В) с внутренним сопротивлением R_{em} (которым часто пренебрегают).

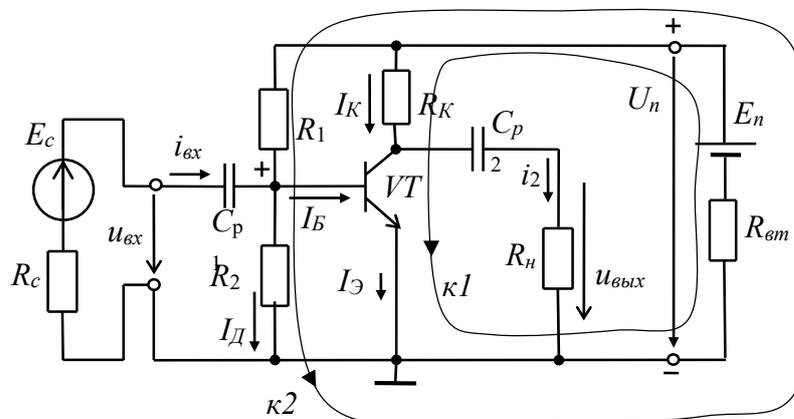


Рисунок 3.1 – Схема усилителя с общим эмиттером

Рассматриваемый усилитель работает в классе А, т. е. обе полуволны входного напряжения усиливаются одним транзистором, для чего транзистор нужно сместить по напряжению или току. Смещение транзистора задается делителем R_1, R_2 так, чтобы рабочая точка А (или точка покоя) располагалась на середине линейного участка входной характеристики (рисунок 3.2, а). Входной переменный сигнал накладывается на напряжение смещения. Суммарный сигнал, поступающий на базу транзистора, схематически изображен на рисунке 3.2, б. Таким образом, эмиттерный переход транзистора всегда открыт как для положительной, так и для отрицательной полуволны сигнала (т. е. транзистор работает в активном режиме).

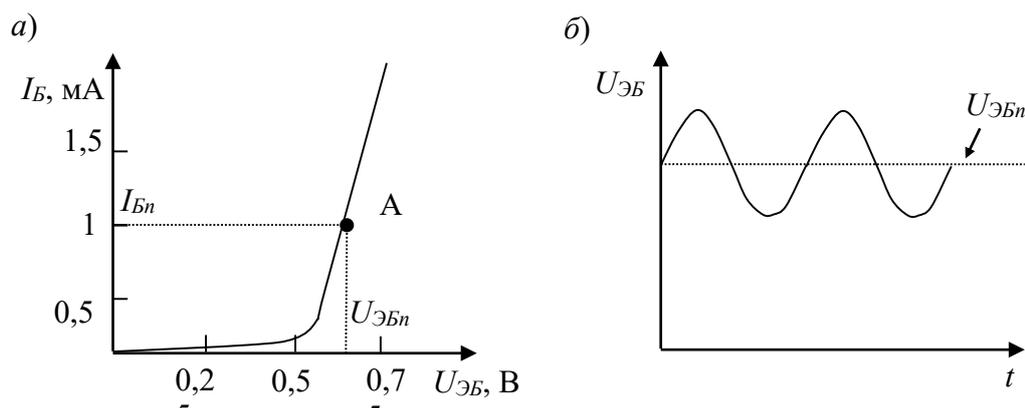


Рисунок 3.2 – Входная характеристика транзистора (а); осциллограмма напряжения, прилагаемого к базе транзистора (б)

Расчет значений R_1, R_2 удобно производить после расчета R_K . Резистор R_K необходим для ограничения тока коллектора I_K , а также для выбора коэффициента усиления по напряжению. Запишем второй закон Кирхгофа для контура $\kappa 1$:

$$E_n = U_{KЭ} + R_K I_K \text{ или } U_{KЭ} = E_n - R_K I_K. \quad (3.1)$$

Корни (3.1) легко найти графически как точки пересечения выходной характеристики транзистора $U_{KЭ}(I_K)$ и прямой $f(I_K) = E_n - R_K I_K$, называемой нагрузочной (см. рисунок 3.2). Нагрузочную прямую строят следующим образом: из уравнения (3.1) следует, что $U_{Kн} = E_n$ при $I_{Kн} = 0$, а $I_{K\max} = E_n / R_K$ при $U_{Kн} = 0$. Через две найденные точки проводят прямую (нагрузочную) линию.

Нагрузочная прямая позволяет, зная ток базы покоя $I_{Bн}$, найти ток коллектора покоя $I_{Kн} \sim 50$ мА и напряжение коллектора покоя $U_{Kн} \sim 11$ В. Как видно, $I_{Kн} \approx I_{K\max}/2$ и $U_{Kн} \approx E_n / 2$. Кроме того, при увеличении тока базы от 0,5 до 1 мА ($\Delta I_B = 0,5$ мА) ток коллектора увеличивается от 5 до 50 мА ($\Delta I_K = 45$ мА), что соответствует усилению по току $K_I = \Delta I_K / \Delta I_B = 90$. Зная напряжение питания E_n и $I_{K\max}$ (задается в таблице А.1), можно определить R_K по формуле

$$R_K = E_n / I_{K\max}. \quad (3.2)$$

Например, при $E_n = 20$ В и $I_{K\max} = 100$ мА получим $R_K = 200$ Ом. Если нужно уменьшить коэффициент усиления по току, то можно увеличить R_K , при этом нагрузочная прямая пересечет ось u ниже точки $I_{K\max}$ (штрихпунктирная прямая на рисунке 3.3), следовательно, уменьшится ΔI_K при неизменном значении ΔI_B , а соответственно и K_I .

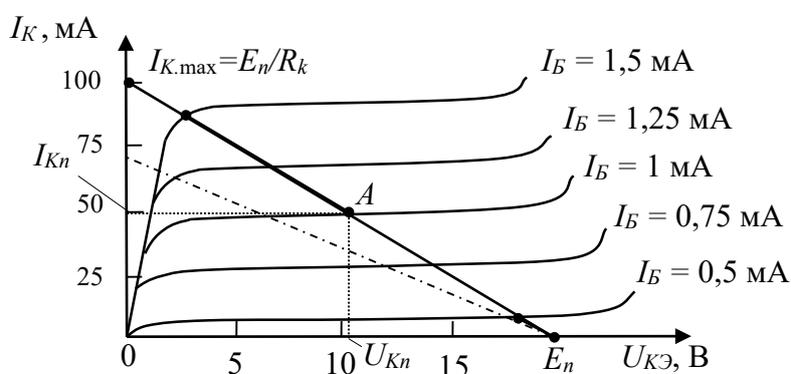


Рисунок 3.3 – Выходные характеристики биполярного транзистора и нагрузочные прямые

Вернемся к расчету резисторов R_1 и R_2 — делителя напряжения питания E_n , предназначенного для установки тока базы $I_{Bн}$ транзистора (рабочей точки). Для контура κ_2 на рисунке 3.1 можно записать второй закон Кирхгофа в виде

$$E_n = R_1 I_d + R_2 (I_d - I_{Bн}), \quad (3.3)$$

где I_d — ток делителя R_1 и R_2 .

Для того чтобы ток базы не влиял на положение рабочей точки, необходимо выполнить условие $I_D \gg I_{Bn}$. На практике выбирают I_D в 3–10 раз больше I_{Bn} .

I_{Bn} может быть определен двумя способами:

1) графически – по входным (выходным) характеристикам транзистора (в нашем примере $I_B = 1$ мА);

2) аналитически. Определив по таблице А.1 I_{Kmax} , можно определить $I_{Kn} = I_{Kmax}/2$. Тогда $I_{Bn} = I_{Kn} / h_{21Э}$, где $h_{21Э}$ – коэффициент передачи тока базы, определяемый по таблице А.1.

Если R_2 рассчитан верно, то падение напряжения на нем должно составлять в соответствии со входной характеристикой 0,65 В – для кремниевого транзистора и 0,3 В – для германиевого транзистора.

Чтобы постоянная составляющая входного сигнала не влияла на работу транзистора, на вход устройства ставят разделительный конденсатор C_{1p} . Конденсатор C_{2p} защищает нагрузку от постоянной составляющей. Методика расчета C_{1p} , C_{2p} приведена ниже.

Временные диаграммы входных и выходных напряжений представлены на рисунке 3.4.

Сопротивление полупроводников сильно зависит от температуры. С ростом температуры ток через транзистор увеличивается, при этом выходные характеристики смещаются вверх (рисунок 3.5, б, в). Точка А смещается из оптимального положения. Оптимальной становится точка А, соответствующая $I_{Bn} = 0,75$ мА. Температурную стабилизацию режима усиления можно обеспечить, включив резистор $R_Э$ в цепь коллектора (рисунок 3.5, а).

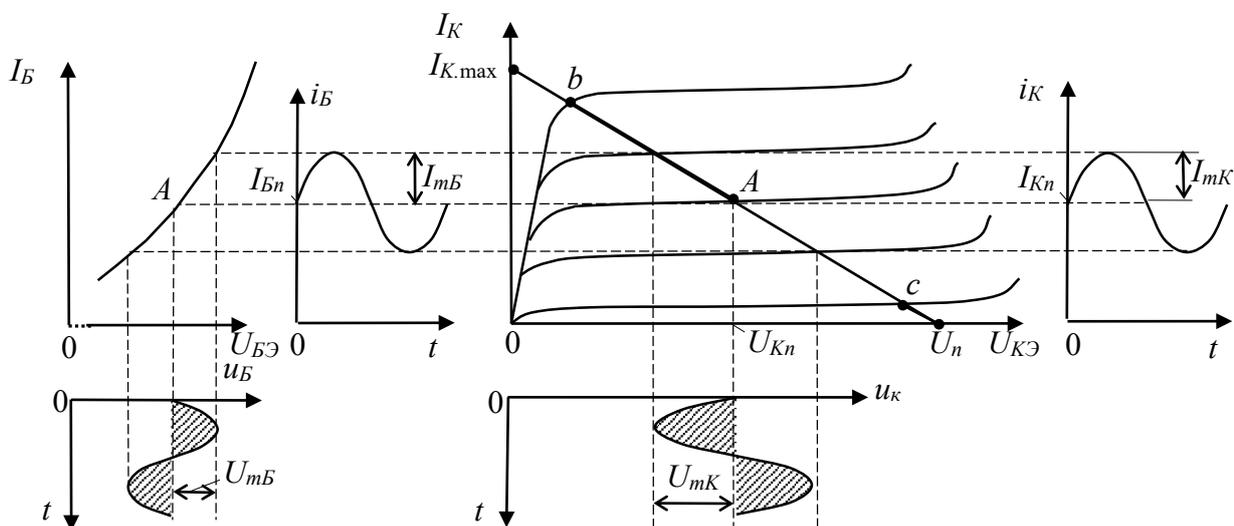


Рисунок 3.4 – Временные диаграммы входного и выходного сигналов

Термостабилизация осуществляется следующим образом: при увеличении температуры возрастают постоянные составляющие токов коллектора I_K и эмиттера $I_Э$, а следовательно, и падение напряжения $R_Э I_Э$. Поскольку напряжения на параллельных участках цепи равны, то

$$R_2 I_D = U_{BЭ} + R_Э I_Э. \quad (3.4)$$

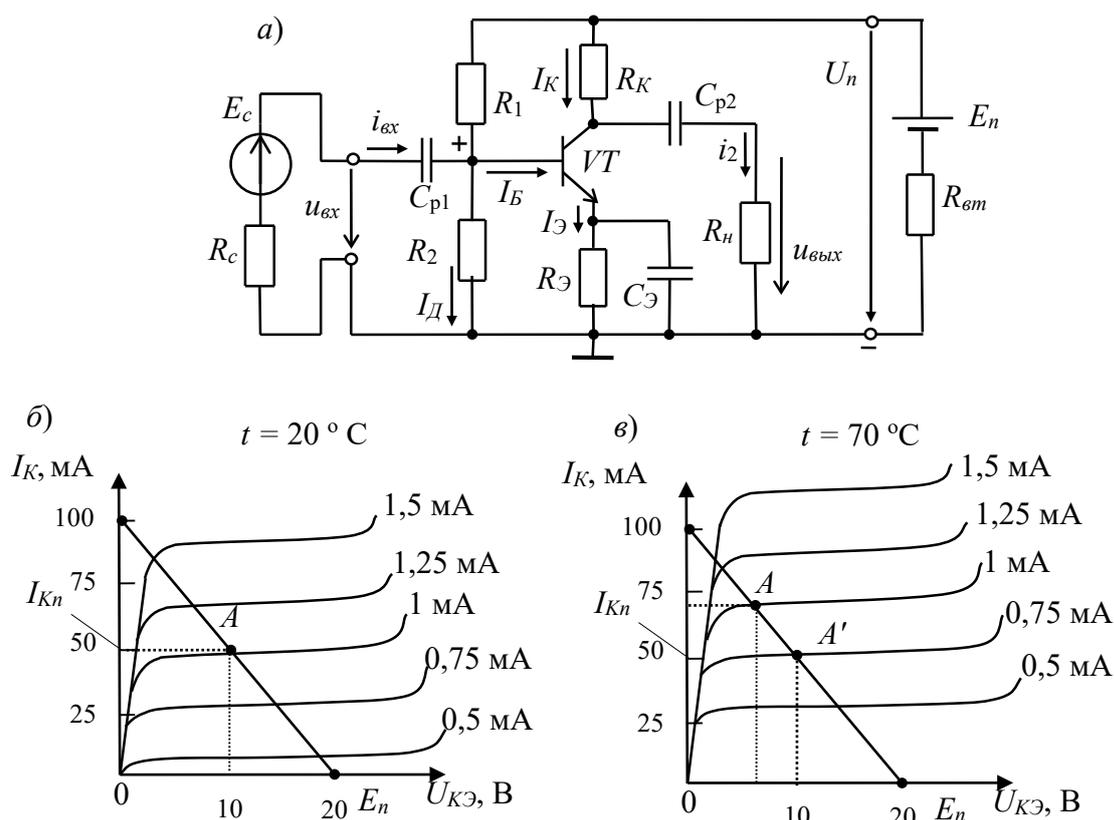


Рисунок 3.5 – Схема усилителя с температурной коррекцией (а); выходные характеристики при различной температуре (б, в)

Ток делителя I_D мы считали постоянным, следовательно, постоянным будет левая часть уравнения (3.4). В результате увеличения температуры и падения напряжения $R_3 I_3$ напряжение $U_{BЭ}$ должно уменьшиться, что вызовет уменьшение тока базы $I_{Bн}$, как и требовалось по условию. Резистор R_3 представляет собой цепь отрицательной обратной связи. Чтобы обратная связь действовала только по постоянному току, резистор R_3 шунтируют конденсатором C_3 большой ёмкости (десятки микрофард), что исключает ослабление усиливаемого переменного сигнала цепью обратной связи.

Для удобства анализа работы усилителя отдельно рассматривают его схемы замещения по постоянному (рисунок 3.6, б) и переменному (рисунок 3.6, а) токам. В режиме работы усилителя по *постоянному току* для получения наименьших нелинейных искажений усиливаемого сигнала рабочую точку А выбирают посередине рабочего участка bc линии нагрузки по постоянному току (см. рисунок 3.4), описываемой уравнением

$$I_{Kn} = E_n - U_{KЭ} - R_3 I_{3н}. \quad (3.5)$$

Задав ток базы в режиме покоя $I_{Bн}$, находят точку А на пересечении линии нагрузки с выходной характеристикой транзистора, а также значения $U_{Kн}$ и $I_{Kн}$.

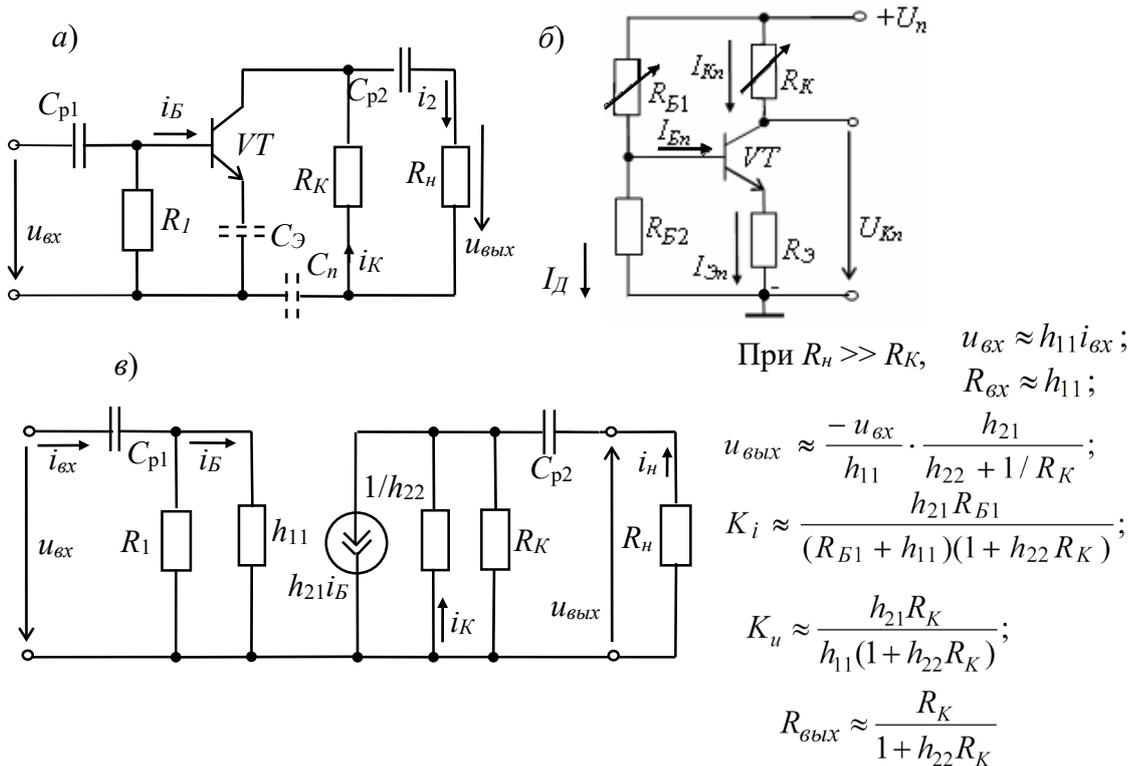


Рисунок 3.6 – Схемы замещения усилителя по переменному (а) и постоянному (б) токам; схема замещения для сигналов малой амплитуды с уравнениями для расчетов (в)

3.2 Пример решения

Требуется рассчитать и промоделировать усилительный каскад с параметрами, заданными в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Пример задания

Тип транзистора	Напряжение питания E_n , В	Рабочий диапазон частот Δf , Гц	h_{21}	Максимальный ток коллектора I_{Kmax} , мА
BC547BP	14	20...2000	200	100

Приближенно токи покоя коллектора и эмиттера в рабочей точке А рассчитывают по формуле

$$I_{Kn} \approx 0,5I_{Kmax} = E_n / 2R_K.$$

Откуда найдем I_{Kn} и R_K :

$$I_{Kn} = 50 \text{ мА}; R_K = E_n / I_{Kmax} = 140 \text{ Ом}.$$

Выбираем ближайшее значение из ряда E24 (приложение Б): $R_K = 150 \text{ Ом}$.
 Далее

$$I_{Эn} = I_{Kn} + I_{Bn} \approx I_{Bn}(1 + h_{21Э}).$$

Поскольку $I_{Kn} \gg I_{Bn}$,

$$I_{Эн} \approx I_{Kn} = 50 \text{ мА};$$

$$I_{Бн} \approx I_{Kn} / h_{21Э} = 0,25 \text{ мА}.$$

Сопровитления $R_Э$ выбирают так, чтобы напряжение покоя эмиттера составляло 10 %...20 % от напряжения питания, т. е.

$$U_{Эн} \approx U_n / 2 - U_{КЭн} \approx (0,1 \dots 0,2) E_n = 1,4 \text{ В}.$$

Найдем отсюда $R_Э$:

$$R_Э = U_{Эн} / I_{Эн} = 0,14 / 50 \cdot 10^{-3} \approx 28 \text{ Ом}.$$

Выбираем $R_Э = 27 \text{ Ом}$.

Ёмкость $C_Э$ выбирают из условия $X_{CЭ} \ll R_Э$. Будем считать $X_{CЭ} = 0,1R_Э$. Тогда $C_Э = 10 / (2\pi f_n R_Э)$, где f_n – минимальная частота входного напряжения $u_{вх}$. По условию $f_n = 20 \text{ Гц}$, тогда $C_Э = 3000 \text{ мкФ}$.

Сопровитление резистора рассчитывают по формуле

$$R_2 \approx \frac{U_{Эн} + U_{БЭн}}{I_D}.$$

Как следует из входной характеристики, $U_{БЭн} \approx 0,65 \text{ В}$ – для кремниевых транзисторов; $U_{БЭн} \approx 0,3 \text{ В}$ – для германиевых. I_D – ток делителя напряжения. Как отмечалось выше, $I_D = (3 \dots 10) I_{Бн}$. Полагая, что $I_D = 5I_{Бн}$, получим $R_2 = 1,6 \text{ кОм}$.

Сопровитление резистора R_1 рассчитывают по формуле

$$R_1 \approx \frac{E_n - U_{Эн} - U_{БЭн}}{I_D + I_{Бн}} = 8 \text{ кОм}.$$

Выбираем $R_1 = 8,2 \text{ кОм}$.

В режиме работы усилителя по *переменному току* принимают

$$u_Э = (1 / \omega_c C) i_Э \approx 0 \quad (X_C \leq 0,1R_Э).$$

Пренебрегают также внутренним сопротивлением $R_{вн}$ и ёмкостью C_n источника питания, т. е. источник питания в схеме замещения замыкают накоротко (см. рисунок 3.6, а).

При подаче на вход усилителя *переменного напряжения* $u_{вх}$ происходит изменение тока базы i_B , тока коллектора i_K и напряжения на коллекторе $u_K = U_n - R_K i_K$ (см. рисунок 3.4). Амплитуда переменного коллекторного тока I_{mK} примерно в h_{21} раз больше амплитуды тока базы $I_{mБ}$, а амплитуда коллекторного напряжения U_{mK} во много раз больше амплитуды входного напряжения. Таким образом, в схеме усилителя с ОЭ усиливается ток и напряжение входного сигнала.

Пользуясь графиками, изображенными на рисунке 3.4, нетрудно определить входное сопротивление и коэффициенты усиления каскада:

$$R_{ex} = \frac{U_{mБ}}{I_{mБ}}; K_i = \frac{I_{mК}}{I_{mБ}}; K_u = \frac{U_{mК}}{U_{mБ}}; K_p = K_i K_u.$$

При этом положительному полупериоду входного напряжения u_{ex} соответствует отрицательный полупериод выходного напряжения $u_K \approx u_{вых}$. Иначе говоря, между входным и выходным напряжениями существует сдвиг фаз, равный 180° , т. е. схема усилителя с ОЭ является инвертирующим устройством, усиливающим и изменяющим фазу входного напряжения на 180° .

Обычно рассмотренный тип усилительного каскада работает в режиме усиления слабых сигналов (постоянные составляющие тока базы и коллектора существенно превосходят аналогичные переменные составляющие). Эти особенности позволяют использовать аналитические методы расчета параметров усилительного каскада на низких частотах по известным h -параметрам транзистора (см. рисунок 3.6, в), полагая, что транзистор работает в линейном режиме. При этом сигнал, поданный на вход усилителя, практически не искажается (по форме) на его выходе.

Наличие в усилителе ёмкостей C_{p1} и C_{p2} (см. рисунок 3.5, а) приводит к частотным искажениям усиливаемых сигналов в области нижних частот: с уменьшением частоты входного сигнала увеличивается сопротивление конденсатора $X_{C_{p1}} = 1/\omega C_{p1}$, падение напряжения $u_{C_{p1}}$ на нем, следовательно, снижается входное u_{ex} и выходное $u_{вых}$ напряжения. Это приводит к уменьшению коэффициента усиления K_u с уменьшением частоты, а наличие в усилителе межэлектродных ёмкостей транзистора и монтажных ёмкостей приводит к возникновению частотных искажений усиливаемых сигналов в области высоких частот. Коэффициенты частотных искажений определяют по формуле $M = K_U / K_{Ucp}$, где K_{Ucp} – коэффициент усиления на средних частотах; K_U – коэффициент усиления на граничных частотах диапазона (в нашем примере 20 и 20000 Гц соответственно).

Разделительные конденсаторы рассчитывают по формуле

$$C_p \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R_{ex/вых}},$$

где R_{ex} и $R_{вых}$ – входное и выходное сопротивления усилительного каскада для C_{p1} и C_{p2} соответственно.

Входное сопротивление усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ обычно имеет значение порядка нескольких сотен ом. Выходное сопротивление обычно в несколько раз меньше входного. Полагая $R_{ex} = 1000$ Ом, а $R_{вых} = 100$ Ом, получим $C_{p1} = 8,2$ мкФ, $C_{p2} = 82$ мкФ (с учетом ряда E24 см. приложение Б).

Реальный коэффициент усиления по напряжению K_u всегда меньше коэффициента усиления ненагруженного усилителя ($R_n \gg R_K$). Это различие тем за-

метнее, чем больше выходное сопротивление усилителя и меньше сопротивление нагрузки R_n . На практике реальный коэффициент усиления каскада K_u может достигать нескольких сотен, а коэффициент усиления по мощности $K_p = K_u K_i$ в схеме с ОЭ – нескольких тысяч.

Расчитанные значения необходимо внести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов

R_K , Ом	$R_Э$, Ом	R_1 , кОм	R_2 , кОм	$C_Э$, мкФ	C_{p1} , мкФ	C_{p2} , мкФ
150	27	8.2	1.6	3000	8.2	82

Моделирование усилителя

Смоделируем усилитель с рассчитанными параметрами (резистор R_4 – нагрузка).

На рисунке 3.7 представлены входные и выходные характеристики биполярного транзистора, полученные с помощью характеристикиста XIV. На рисунке 3.8 приведена модель усилителя с приборами для измерения постоянных напряжений и токов, значения которых сведены в таблицу 3.4.

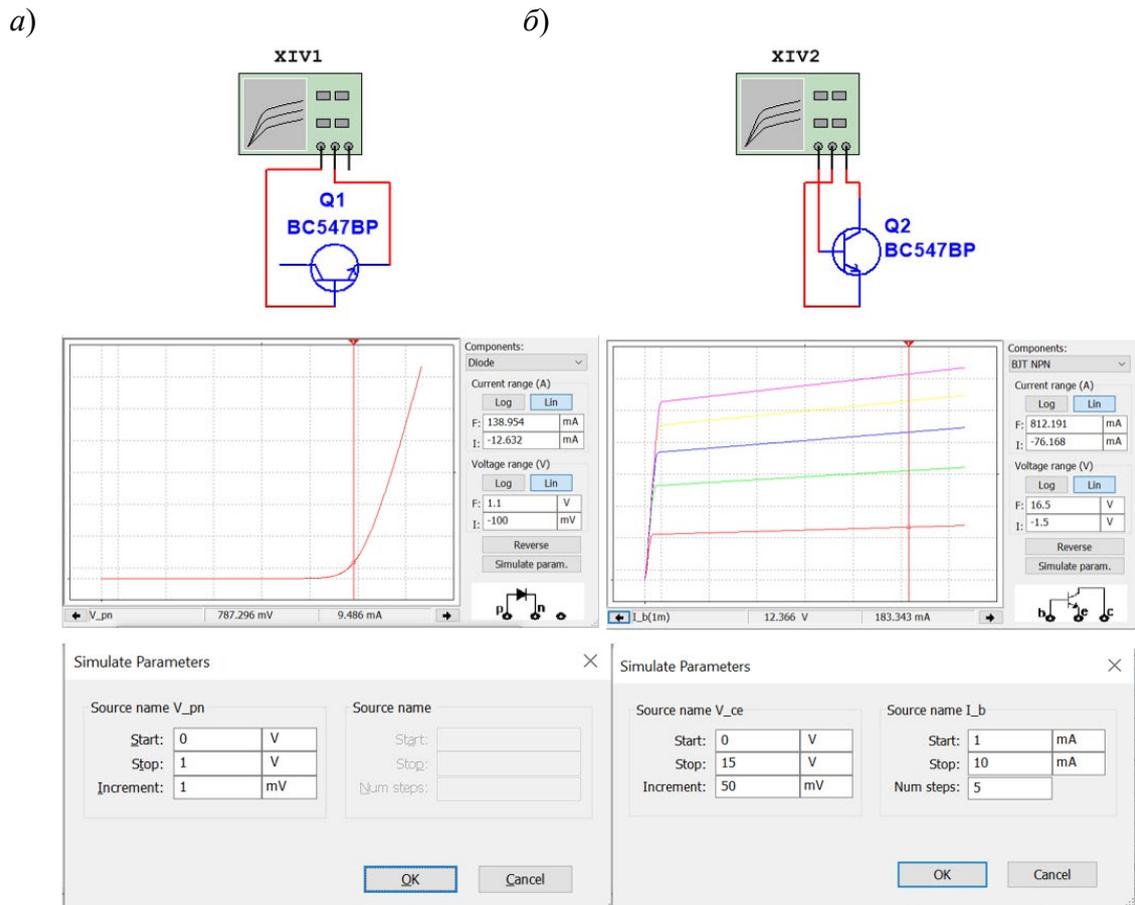


Рисунок 3.7 – Входная характеристика транзистора (а); выходные характеристики транзистора (б), полученные характеристикиста (параметры указаны в нижней части рисунка)

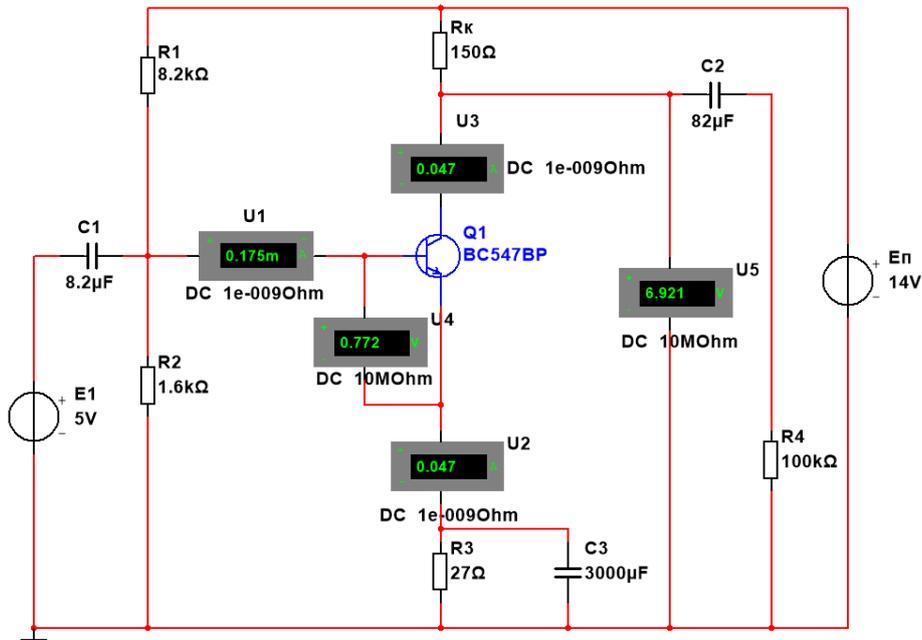


Рисунок 3.8 – Модель усилителя

Таблица 3.4 – Параметры усилителя по постоянному току

$E_n, \text{В}$	$U_{Kn}, \text{В}$	$U_{БЭ}, \text{В}$	$I_{Kn}, \text{мА}$	$I_{Эн}, \text{мА}$	$I_{Бн}, \text{мА}$
14	6,9	0,77	47	47	0,18

На рисунке 3.9 представлена модель усилителя с приборами для измерения параметров переменных сигналов, сведенных в таблицу 3.5. Осциллограф, плоттер (прибор для снятия АЧХ) и измеритель нелинейных искажений включены в схему на рисунке 3.10.

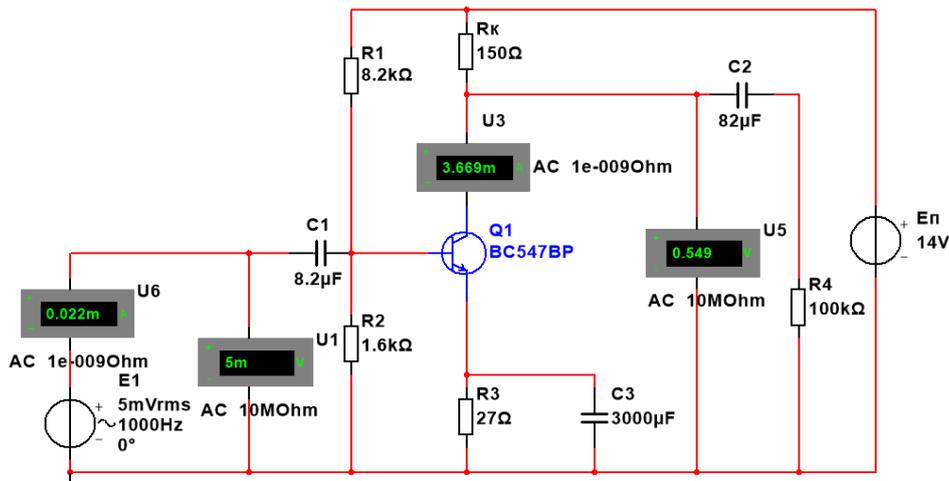


Рисунок 3.9 – Модель усилителя

Таблица 3.5 – Параметры усилителя по переменному току

$U_{вх}, \text{мВ}$	$U_{вых}, \text{мВ}$	K_U	$I_{вх}, \text{мА}$	$I_{вых}, \text{мА}$	K_I	$R_{вх}, \text{Ом}$
5	549	110	0,02	3,7	185	250

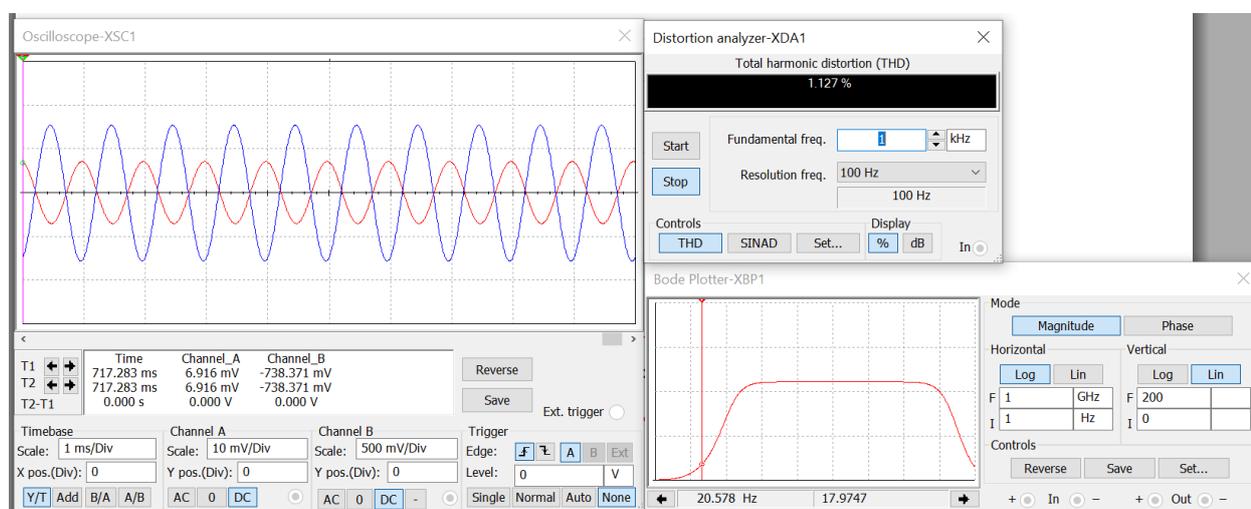
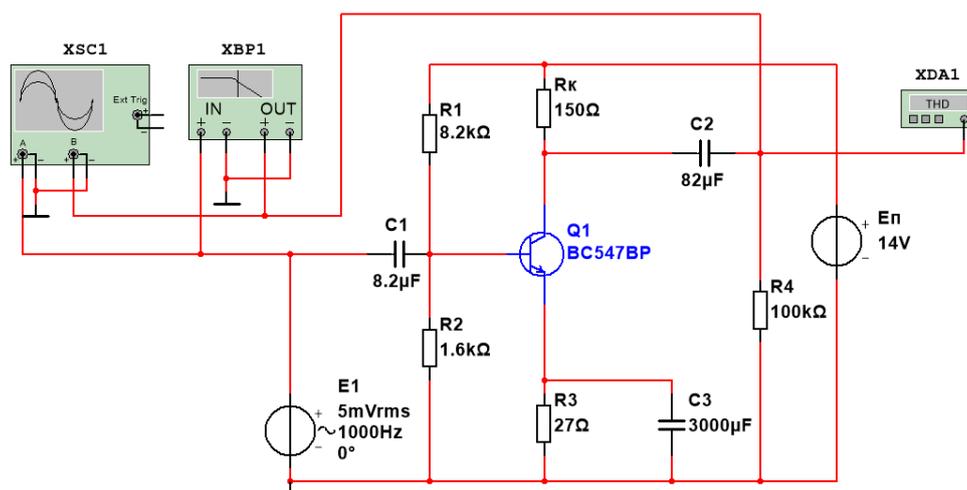


Рисунок 3.10 – Модель усилителя

В соответствии с моделью на рисунке 3.10 требуется вычислить сдвиг фаз на частоте 1 кГц (по осциллограмме), коэффициент нелинейных искажений THD и коэффициенты частотных искажений, определяемых по показаниям плоттера.

$$M_H = K_U(f_H) / K_U(f_{cp}),$$

где $K_U(f_H)$ – коэффициент усиления на нижней граничной частоте;

$K_U(f_{cp})$ – коэффициент усиления на средних частотах.

Аналогично определяется M_B .

Параметры усилителя приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры усилителя

$\Delta\varphi$, град	THD, %	M_H	M_B
180	1,127	6,1	1

4 Расчетно-графическое задание № 4. Расчет схемы счетчика с заданным коэффициентом счета и схемы индикации

В соответствии с вариантом разработать схему счетчика с заданным коэффициентом счета (таблица 4.1). Выполнить моделирование счетчика. Убедиться, что реализуется заданный коэффициент счета.

Таблица 4.1 – Исходные данные

Номер варианта	Микросхема счетчика	Коэффициент счета	Направление счета
1	SN74LS192	6	+
2	SN74LS160	91	+
3	SN74LS90	62	–
4	SN74LS390	12	–
5	SN74LS193	11	+
6	SN74LS93	94	–
7	SN74LS163	15	+
8	SN74LS169	18	+
9	SN74LS192	46	–
10	SN74LS160	93	–
11	SN74LS90	68	+
12	SN74LS390	24	–
13	SN74LS193	11	+
14	SN74LS93	96	+
15	SN74LS163	78	–
16	SN74LS169	66	–
17	SN74LS192	7	+
18	SN74LS160	18	–
19	SN74LS90	32	+
20	SN74LS390	43	+
21	SN74LS193	44	–
22	SN74LS93	19	–
23	SN74LS163	69	–
24	SN74LS169	99	–
25	SN74LS390	56	+

4.1 Методические указания

На базе счетных триггеров можно построить цифровое устройство, получившее название электронного счетчика. Электронные счетчики (далее просто счетчики) позволяют вести подсчет электрических импульсов, количество которых (поступивших на вход счетчика) представляется, обычно, в параллельном коде. Счетчики могут отличаться модулем счета и типом счетной последовательности, которая, в частности, может быть двоичной, двоично-десятичной, в коде Грея и т. п. Цифровые последовательностные устройства, выполненные по схеме счетчика, но имеющие один счетный вход и один выход называются делителями

частоты. Таким образом, любой счетчик может служить в качестве делителя частоты, если используется информация только одного из его выходов. Так как счетчики и делители имеют единую структуру, основное внимание будет уделено синтезу счетчиков.

Счетчики, независимо от способа синхронизации, подразделяются на счетчики прямого счета (суммирующие) и на счетчики обратного счета (вычитающие). В интегральном исполнении выпускаются также реверсивные счетчики, в которых имеется специальный вход для переключения режима работы, т. е. направления счета. Многие типы счетчиков, выпускаемые промышленностью в интегральном исполнении, имеют дополнительные входы предустановки, позволяющие использовать эти счетчики в режиме регистра памяти.

Асинхронный двоичный счетчик представляет собой совокупность последовательно соединенных триггеров (D или JK), каждый из которых ассоциируется с битом в двоичном представлении числа. Если в счетчике m триггеров, то число возможных состояний счетчика равно 2^m , и, следовательно, модуль счета M также равен 2^m . Счетная последовательность в двоичном суммирующем счетчике начинается с нуля и доходит до максимального числа $2^m - 1$, после чего снова проходит через нуль и повторяется. В вычитающем двоичном счетчике последовательные двоичные числа перебираются в обратном порядке, и при повторении последовательности максимальное число следует за нулем.

Рассмотрим устройство двоичного суммирующего счетчика по модулю $M = 16$, выполненного на базе JK -триггеров (рисунок 4.1, *a*).

Как видно из рисунка, синхронизирующие входы всех триггеров, кроме крайнего левого (T_1), соединены с выходами предыдущих триггеров. Поэтому состояние триггера меняется в ответ на изменение состояния предыдущего триггера.

Из таблицы состояния счетчика (рисунок 4.1, *b*) легко заметить, что значение разряда в выбранной позиции меняется тогда, когда в соседней справа позиции состояние переходит из «1» в «0», управление триггерами осуществляется задним фронтом синхроимпульсов (отрицательным перепадом напряжения импульса синхронизации). Временные диаграммы, поясняющие работу асинхронного суммирующего счетчика, приведены на рисунке 4.1, *в*.

Счетчики обратного счета (вычитающие счетчики). На рисунке 4.2 приведена схема асинхронного трехразрядного двоичного вычитающего счетчика, построенного на базе D -триггеров. Отметим, что условия для изменения состояний триггеров вычитающих счетчиков аналогичны условиям для суммирующих счетчиков с той лишь разницей, что они должны «опираться» на значения инверсных, а не прямых выходов триггеров. Следовательно, рассмотренный выше счетчик можно превратить в вычитающий, просто переключив входы «С» триггеров с выходов Q на выходы \bar{Q} . Когда в качестве разрядных триггеров используются D -триггеры, синхронизируемые передним фронтом синхроимпульсов, для получения вычитающего счетчика (асинхронного) входы «С» последующих триггеров соединяются с прямыми выходами предыдущих, также как в счетчике прямого счета, построенного на JK -триггерах.

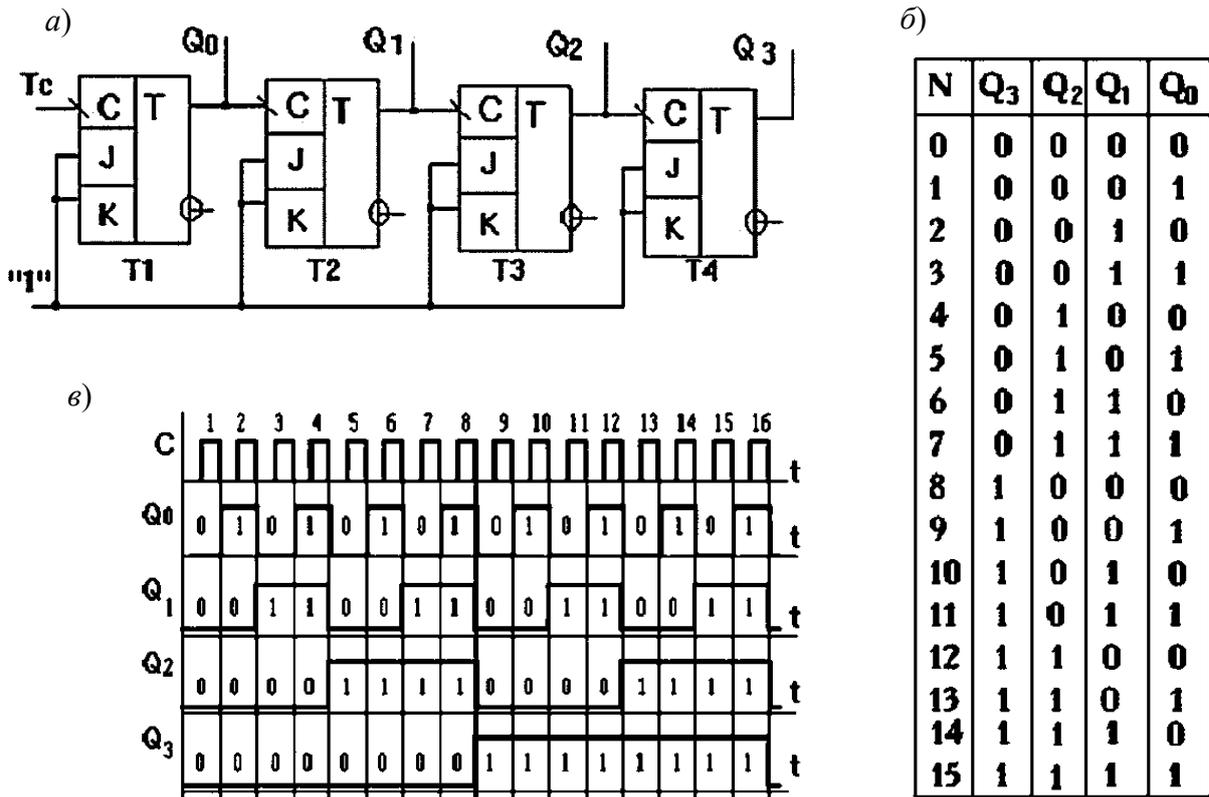


Рисунок 4.1 – Схема (а), таблица состояний триггеров (б) и временные диаграммы (в), поясняющие работу последовательного четырехразрядного счетчика на *JK*-триггерах

Работа вычитающего счетчика на *D*-триггерах наглядно проиллюстрирована на рисунке 4.2, б. Из рисунка 4.2 следует, что после нулевого состояния всех триггеров, с приходом первого синхроимпульса они устанавливаются в состояние «1». Поступление второго синхроимпульса приводит к уменьшению этого числа на одну единицу и т. д. После поступления восьмого импульса, снова, все триггеры обнуляются и цикл счета повторяется, что соответствует модулю $M = 8$.

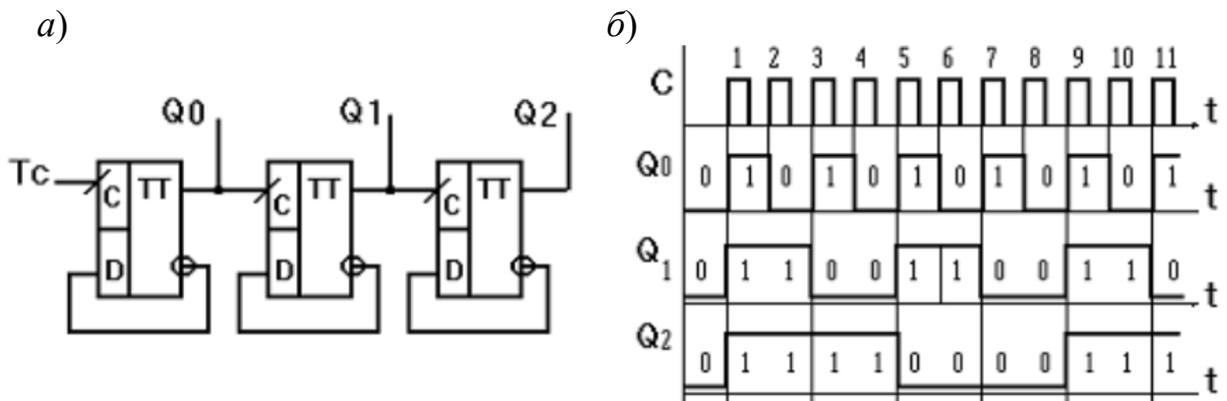


Рисунок 4.2 – Схема (а) и временные диаграммы (б), поясняющие работу вычитающего трехразрядного счетчика на *D*-триггерах

Существует несколько методов получения счетчиков с заданным коэффициентом пересчета $K_{сч}$. Один из этих методов заключается в немедленном сбросе в «0» счетчика, установившегося в комбинацию, соответствующему числу $K_{сч}$. Его называют также методом автосброса. Рассмотрим пример реализации счетчика с $K_{сч} = 10$ методом автосброса. Очевидно, что «сбрасывая» двоичный четырехразрядный счетчик на нуль каждый раз, когда он будет принимать состояние 1010, можно обеспечить «возврат» счетчика в исходное состояние после каждого десяти импульсов. Подобный прием удобно применять при использовании счетчиков в интегральном исполнении, имеющих ячейки конъюнкции (И) на входах установки в нуль, как это сделано в микросхеме К1533ИЕ5. В данном примере (рисунке 4.3) организованы соединения, обеспечивающие коэффициент пересчета $K_{сч} = 10$.

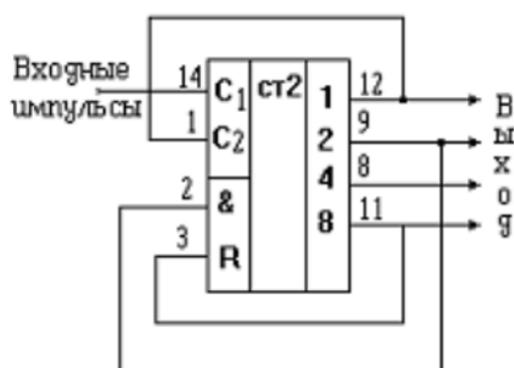


Рисунок 4.3 – Пример реализации счетчика с $K_{сч} = 10$

Дешифратор (декодер), от англ. *Decoder* – комбинационная схема, преобразующая n -разрядный двоичный, троичный или k -й код в k^n -й одноединичный код, где k – основание системы счисления. Логический сигнал активен на том выходе, порядковый номер которого соответствует двоичному, троичному или k -му коду. Дешифраторы являются устройствами, выполняющими двоичные, троичные логические функции (операции). Наиболее широко распространены дешифраторы, преобразующие двоичный код в десятичный, воспринимаемый человеком.

Двоичный дешифратор работает по следующему принципу. Пусть дешифратор имеет N входов, на которые подаётся двоичное слово $x_{N-1}x_{N-2}...x_0$. Тогда на выходах формируется код разрядности, меньшей или равной 2^N , где разряд, номер которого равен численному представлению входного слова, становится активным (принимает значение логической единицы, логического нуля или переводится в высокоимпедансное состояние – отключается, что зависит от конкретной реализации дешифратора), все остальные разряды неактивны. Очевидно, что максимально возможная разрядность выходного слова равна 2^N . Такой дешифратор называется *полным*. Если часть входных наборов не используется, то число выходов меньше 2^N и дешифратор является *неполным*.

Функционирование одноединичного дешифратора, где активные выходные сигналы принимают значение логической «1», описывается системой конъюнкций:

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \bar{x}_{N-1}\bar{x}_{N-2}\dots\bar{x}_1\bar{x}_0; \\
 F_1 &= \bar{x}_{N-1}\bar{x}_{N-2}\dots\bar{x}_1x_0; \\
 F_2 &= \bar{x}_{N-1}\bar{x}_{N-2}\dots x_1\bar{x}_0; \\
 &\dots \\
 F_{2N-2} &= x_{N-1}x_{N-2}\dots x_1\bar{x}_0; \\
 F_{2N-1} &= x_{N-1}x_{N-2}\dots x_1x_0.
 \end{aligned}$$

Часто дешифраторы дополняются входом разрешения работы E (*Enable*). Если на этот вход поступает активный логический сигнал (единица или ноль), то один из выходов дешифратора переходит в активное состояние, иначе все выходы неактивны вне зависимости от состояния входов.

Функционирование одноединичного дешифратора с дополнительным входом E (*Enable*) описывается системой конъюнкций:

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \bar{x}_{N-1}\bar{x}_{N-2}\dots\bar{x}_1\bar{x}_0E; \\
 F_1 &= \bar{x}_{N-1}\bar{x}_{N-2}\dots\bar{x}_1x_0E; \\
 F_2 &= \bar{x}_{N-1}\bar{x}_{N-2}\dots x_1\bar{x}_0E; \\
 &\dots \\
 F_{2N-2} &= x_{N-1}x_{N-2}\dots x_1\bar{x}_0E; \\
 F_{2N-1} &= x_{N-1}x_{N-2}\dots x_1x_0E.
 \end{aligned}$$

Обычно микросхемы дешифраторов выполняют с инверсными выходами. У такого дешифратора активный выбранный разряд принимает значение логического нуля.

Двоичное слово на входе дешифратора часто называют адресом.

Таблица истинности двухвходового двоичного дешифратора с четырьмя выходами ($2^2 = 4$) приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Таблица истинности двухвходового двоичного дешифратора

x_0	1	0	1	0	Активный выход	Условный номер функции
x_1	1	1	0	0		
F_0	0	0	0	1	F_0	$F2,1$
F_1	0	0	1	0	F_1	$F2,2$
F_2	0	1	0	0	F_2	$F2,4$
F_3	1	0	0	0	F_3	$F2,8$

Микросхема SN74LS248D представляет собой дешифратор, преобразующий входной двоичный код в выходной десятичный (шестнадцатеричный). К выходу дешифратора подключают семисегментный индикатор с общим катодом.

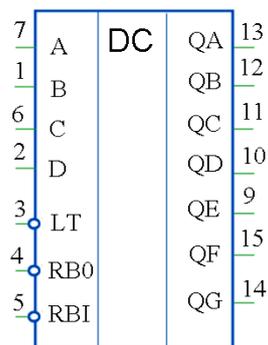


Рисунок 4.4 – Условное обозначение микросхемы

На рисунке 4.4 приняты следующие обозначения:

A–D – входная шина данных;

QA–QG – выходная шина данных;

LT – вход для проверки работоспособности;

RBO, RB1 – входы управления. Для начала работы необходимо подать на них сигнал высокого уровня.

4.1.1 Пример решения для двоичного счетчика.

Необходимо реализовать двоичный счётчик на микросхемах К555ИЕ7 (SN74LS193) с коэффициентом счёта $K_{сч} = 31 \cdot 3 = 93$.

Микросхема К555ИЕ7 (SN74LS193) представляет собой четырёхразрядный двоичный счётчик (рисунок 4.5).

Выходы 15, 1, 10, 9 предназначены для предварительной установки счётчика при нулевом уровне сигнала на входе 11. Высокий уровень напряжения на входе 11 (+5 В) исключает предварительную установку. Вход 5 используется для прямого счёта, а вход 4 – для обратного. Сброс счётчика осуществляется при подаче высокого уровня напряжения на вход 14.

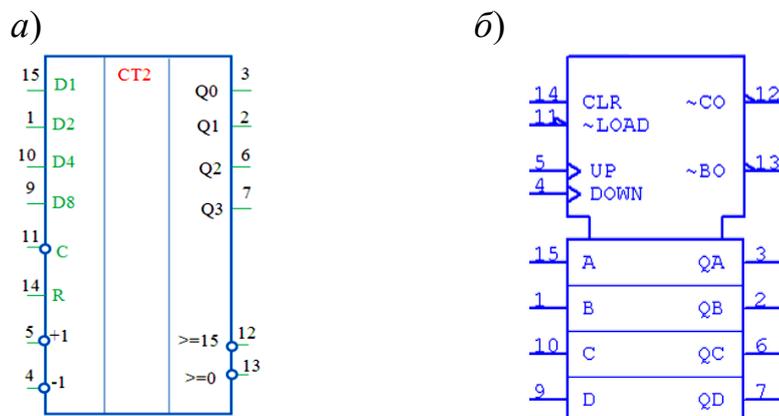


Рисунок 4.5 – Условное обозначение микросхем К555ИЕ7 (а) и SN74LS193 (б)

Одна микросхема может иметь максимальный коэффициент счёта, равный 16. Две последовательно соединённые микросхемы дадут коэффициент счёта, равный 256. Так как заданный коэффициент счёта $K_{сч} = 31 \cdot 3 = 93$, то для построения счетчика-делителя с заданным коэффициентом счёта достаточно двух микросхем. Определим двоичный код заданного коэффициента счёта:

$$K_{сч} = 93 = \frac{128 \ 64 \ 32 \ 16 \ 8 \ 4 \ 2 \ 1}{0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1} =$$

$$= 128 \cdot 0 + 64 \cdot 1 + 32 \cdot 0 + 16 \cdot 1 + 8 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 1.$$

При поступлении 93-го импульса на вход микросхемы $DD1$ на выходах Q_i микросхем $DD1$ и $DD2$ установятся следующие логические сигналы:

$$DD2: Q_3 Q_2 Q_1 Q_0; \quad DD1: Q_3 Q_2 Q_1 Q_0.$$

$$0 \ 1 \ 0 \ 1 \qquad \qquad 1 \ 1 \ 0 \ 1$$

Так как сброс счётчиков в исходное (нулевое) состояние осуществляется сигналом высокого уровня, подаваемым на входы 14, то, объединив с помощью логического элемента 8И-НЕ ($DD3$) выходы Q_i счётчиков, на которых появятся логические единицы при поступлении на вход 93-го импульса, подадим результирующий сигнал с выхода $DD3$, предварительно проинвертировав его с помощью логического элемента 3И-НЕ $DD4$ на входы 14 микросхем $DD1$ и $DD2$.

В качестве $DD3$ можно использовать микросхему К555ЛА2 (74LS30D), в которой содержится один логический элемент 8И-НЕ; в качестве $DD4$ – микросхему К555ЛА4 (74LS10D), в которой содержится два логических элемента 3И-НЕ.

Модель разработанной схемы счётчика в среде Multisim приведена на рисунке 4.6. Данная схема осуществляет подсчёт 93 импульсов и отображение их двоичного кода. С приходом 93-го импульса выходы счётчиков обнуляются и счёт возобновляется.

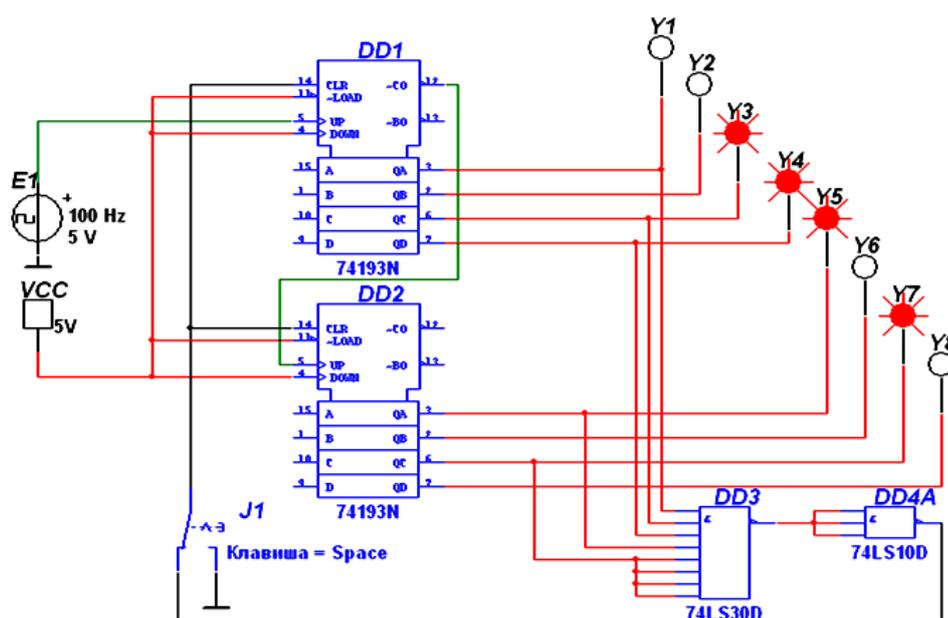


Рисунок 4.6 – Модель двоичного счётчика с коэффициентом счёта $K_{сч} = 93$

4.1.2 Пример решения для двоично-десятичного счетчика.

Необходимо реализовать двоично-десятичный счётчик на микросхемах К555ИЕ6 (SN74LS193) с коэффициентом счёта $K_{сч} = 31 \cdot 3 = 93$.

Микросхема К555ИЕ6 (SN74LS192) по назначению выводов аналогична микросхеме К555ИЕ7 (SN74LS193) (см. рисунок 4.5). Однако подсчёт числа импульсов осуществляет в двоично-десятичном коде.

Одна микросхема может иметь максимальный коэффициент счёта, равный 10. Две последовательно соединённые микросхемы дадут коэффициент счёта, равный 100. Так как заданный коэффициент счёта $K_{сч} = 31 \cdot 3 = 93$, то для построения счетчика-делителя с заданным коэффициентом счёта достаточно двух микросхем. Определим двоично-десятичный код заданного коэффициента счёта. При этом каждый из разрядов десятичного числа представляется двоичным кодом из четырёх разрядов:

$$9 = \frac{8 \ 4 \ 2 \ 1}{1 \ 0 \ 0 \ 1} = 8 \cdot 1 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 1;$$

$$3 = \frac{8 \ 4 \ 2 \ 1}{0 \ 0 \ 1 \ 1} = 8 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1.$$

При поступлении 93-го импульса на вход микросхемы DD1 на выходах Q_i микросхем DD1 и DD2 установятся следующие логические сигналы:

$$DD2: \begin{matrix} Q_3 & Q_2 & Q_1 & Q_0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}; \quad DD1: \begin{matrix} Q_3 & Q_2 & Q_1 & Q_0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{matrix}.$$

Так как сброс счётчиков в исходное (нулевое) состояние осуществляется сигналом высокого уровня, подаваемым на входы 14, то, объединив с помощью логического элемента 8И-НЕ (DD3) выходы Q_i счетчиков, на которых появятся логические единицы при поступлении на вход 93-го импульса, подадим результирующий сигнал с выхода DD3, предварительно проинвертировав его с помощью логического элемента 3И-НЕ DD4 на входы 14 микросхем DD1 и DD2.

В качестве DD3 можно использовать микросхему К555ЛА2 (74LS30D), в которой содержится один логический элемент 8И-НЕ; в качестве DD4 – микросхему К555ЛА4 (74LS10D), в которой содержится два логических элемента 3И-НЕ.

Модель разработанной схемы счётчика в среде Multisim приведена на рисунке 4.7. Данная схема осуществляет подсчёт 93 импульсов и отображение их двоично-десятичного кода. С приходом 93-го импульса выходы счётчиков обнуляются и счёт возобновляется.

Для отображения двоично-десятичного кода воспользуемся семисегментными индикаторами DCD_HEX.

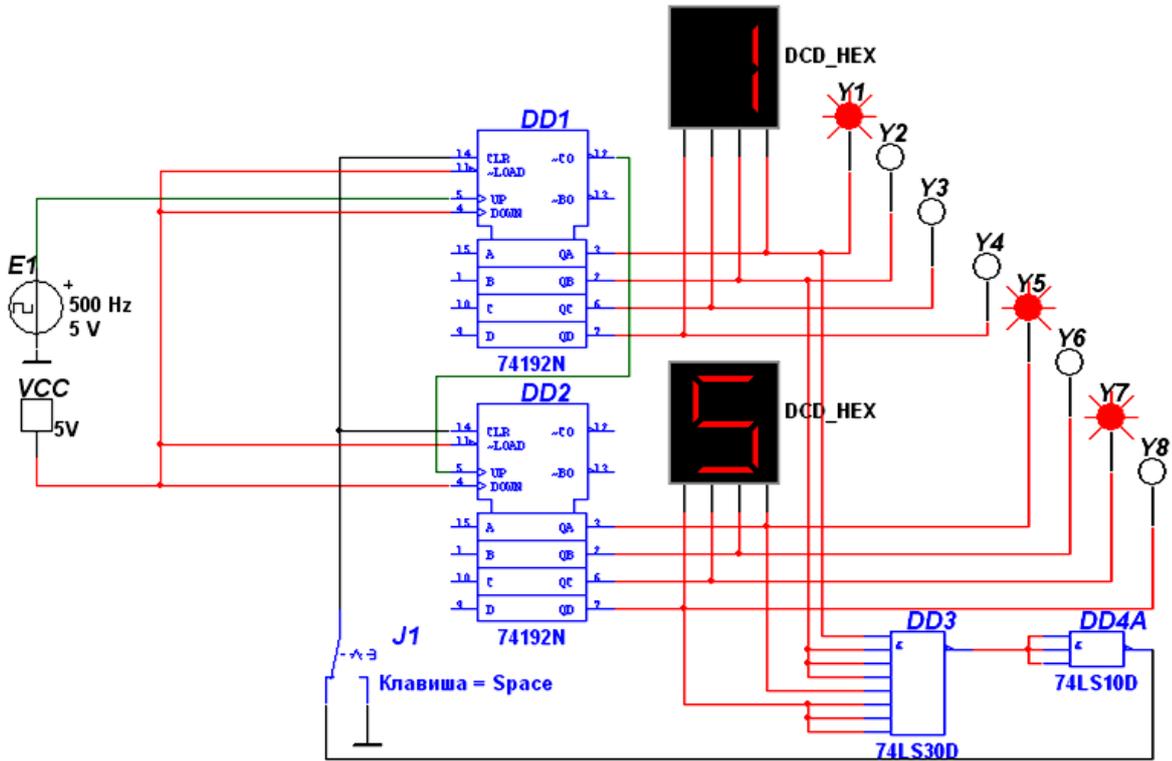


Рисунок 4.7 – Модель двоично-десятичного счётчика с коэффициентом счёта $K_{cu} = 93$

Схема моделирования двухразрядного двоично-десятичного счетчика с дешифраторами и индикаторами представлена на рисунке 4.8.

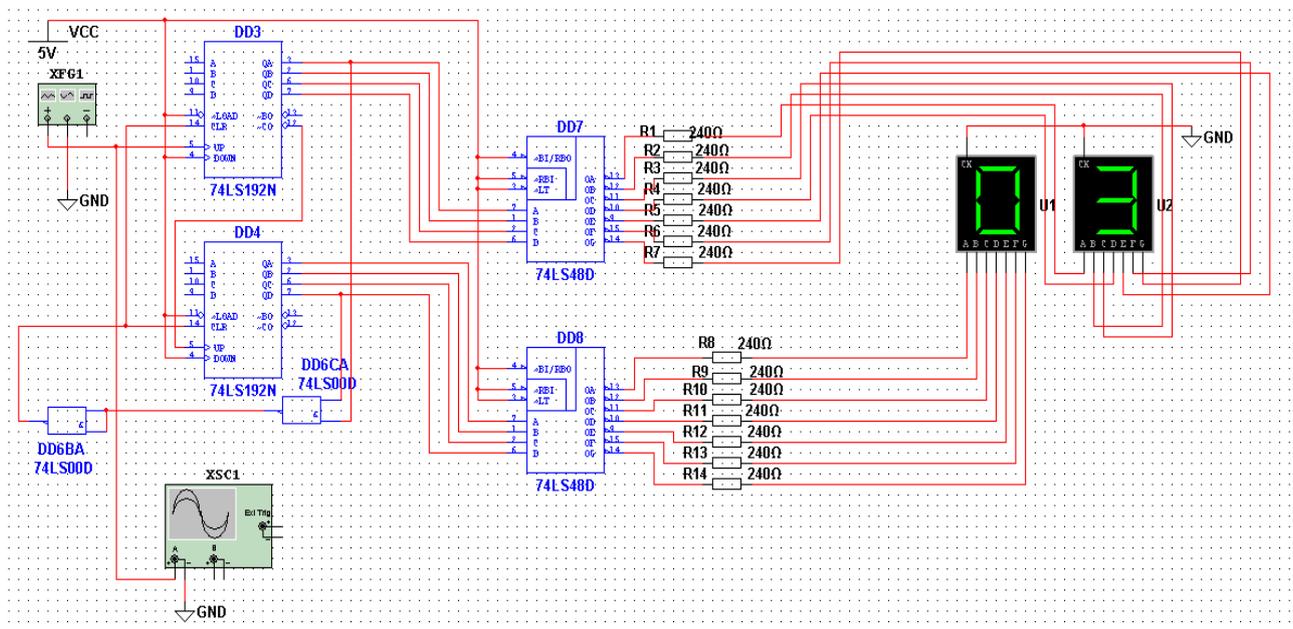


Рисунок 4.8 – Модель двоично-десятичного счётчика с индикацией с коэффициентом счёта $K_{cu} = 81$

Импульсы для счета формируются функциональным генератором XFG1 (рисунок 4.9) и подаются на суммирующий вход UP первого счетчика *DD3* (если подавать импульсы на вход DOWN, то счет будет вестись в обратном направлении). Счетные импульсы на вход старшего счетчика *DD4* подаются с выхода переполнения первого счетчика. Выходной сигнал счетчиков в виде параллельного двоичного кода поступает на выводы *QA*, *QB*, *QC*, *QD*, которые соединены со входами дешифраторов *DD7*, *DD8*. Преобразованный сигнал с дешифраторов подается на семисегментные индикаторы и отображается в удобном виде.

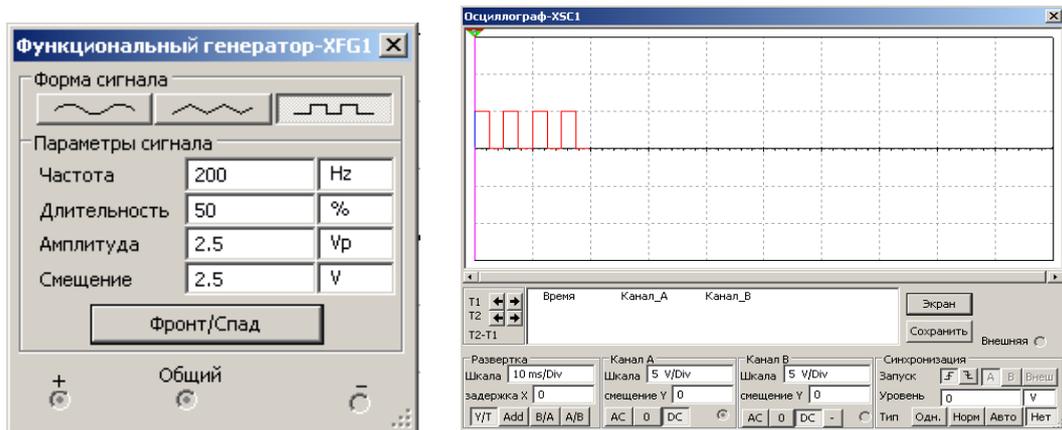


Рисунок 4.9 – Параметры счетных импульсов и их осциллограмма

Список литературы

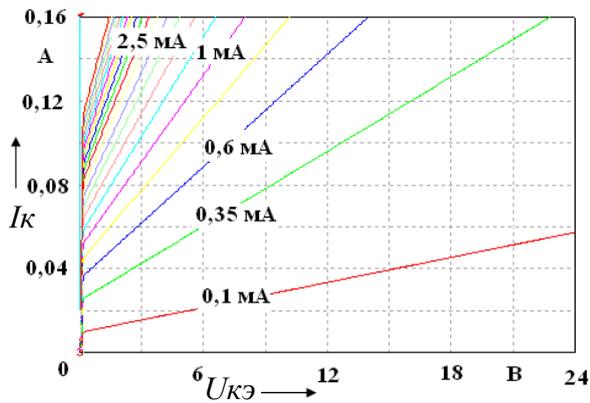
- 1 **Забродин, Ю. С.** Промышленная электроника: учебник / Ю. С. Забродин. – 2-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2017. – 496 с.: ил.
- 2 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – Москва: Форум; ИНФРА-М, 2018. – 480 с.
- 3 **Кузовкин, В. А.** Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim: учебное пособие / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 336 с.
- 4 **Розум, Т. Т.** Сборник задач по электротехнике и электронике: учебное пособие / Т. Т. Розум, Ю. В. Бладыко, Ю. А. Куварзин; под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 478 с.
- 5 **Иньков, Ю. М.** Электротехника и электроника / Ю. М. Иньков. – Москва: Academia, 2019. – 126 с.
- 6 **Кравченко, В. Б.** Электроника и схемотехника: учебное пособие / В. Б. Кравченко, Е. А. Бородкин. – Москва: Academia, 2017. – 640 с.

Приложение А (справочное)

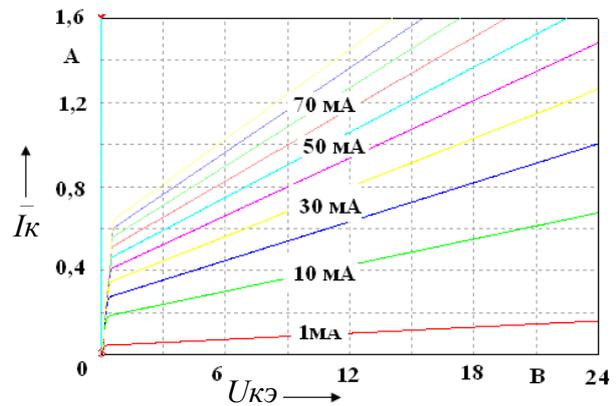
Таблица А.1 – Параметры биполярных транзисторов

Тип транзистора	$I_{K\max}$, А	$U_{KЭ\max}$, В	$h_{21Э}$	I_{K0} , мкА	R_{θ} , Ом	$U_{Б0}$, В
3102 BC547A (КТ Б)	0,1	45	220	0,05	7	0,6
2N2218 (КТ928А)	0,8	30	25	5	3	1,0
BD135 (КТ815Б)	1,5	45	40	50	5	0,6
BD237 (КТ817Г)	4	60	25	100	2	0,6

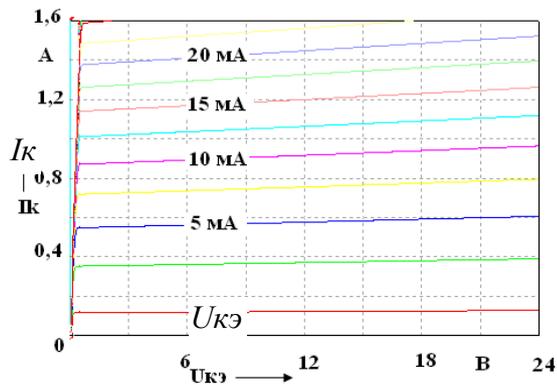
а)



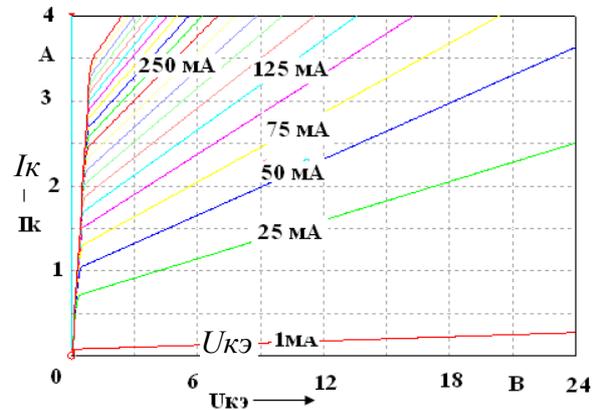
в)



б)



г)



а – BC547A (КТ3102Б); б – BD135 (КТ815Б); в – 2N2218 (КТ928А); г – BD237 (КТ817Г)

Рисунок А.1 – Выходные характеристики биполярных транзисторов

Приложение Б (справочное)

Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов

Числовой ряд E24, применяемый для присвоения номинальных значений сопротивлений резисторов и конденсаторов:

(1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0 3,3
3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1) $\cdot 10^n$,

где $n = -2; -1; 0; 1; 2; 3$ и т. д.