

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки 23.03.02 «Наземные  
транспортно-технологические комплексы»  
очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.3  
ББК 31.2:32.85  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «15» марта 2023 г.,  
протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. А. Г. Старовойтов;  
канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Рецензент М. И. Миронова

Изложена методика расчета линейных электрических цепей различными  
методами.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

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 21 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, 2023

## Содержание

1 Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с одним источником питания.....	4
2 Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками питания.....	9
3 Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником и несколькими источниками питания с применением комплексных чисел.....	15
4 Практическое занятие № 4. Анализ простейших трехфазных цепей с помощью комплексных чисел и векторных диаграмм.....	22
5 Практическое занятие № 5. Расчет переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.....	26
6 Практическое занятие № 6. Полупроводниковые диоды и расчет электронных устройств на их основе .....	33
7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей.....	37
8 Практическое занятие № 8. Реализация устройств на основе логических элементов.....	41
Список литературы.....	44
Приложение А.....	45
Приложение Б. Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов.....	46

# 1 Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

## 1.1 Основные теоретические положения

Закон Ома для пассивного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Закон Ома для активного участка цепи:

$$I = \frac{\pm \sum E \pm \sum U}{\sum R}.$$

Знак «плюс» пишется, если направления ЭДС и напряжения совпадают с направлением тока.

Первый закон Кирхгофа для электрического узла:

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

где  $I_k$  – ток  $k$ -й ветви, присоединенной к данному узлу, причем втекающие токи в узел берутся со знаком «плюс», вытекающие – со знаком «минус», либо наоборот.

Второй закон Кирхгофа для замкнутого контура:

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

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.

Мощность, потребляемая активным сопротивлением:

$$P = I^2 \cdot R.$$

Баланс мощности для электрической цепи постоянного тока

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

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

*Эквивалентное преобразование электрических цепей постоянного тока.*

Расчет сложных электрических цепей во многих случаях можно упростить и сделать более наглядным путем эквивалентного преобразования схемы одного вида в схему другого вида. При этом токи и напряжения в частях цепи, не затронутых преобразованием, должны остаться такими же, как и в исходной схеме. Целесообразное преобразование схемы приводит к уменьшению числа ее ветвей или узлов, а значит, и числа уравнений, необходимых для расчета.

Примеры преобразования схем:

– замена нескольких последовательно или параллельно соединенных резисторов одним (рисунок 1).

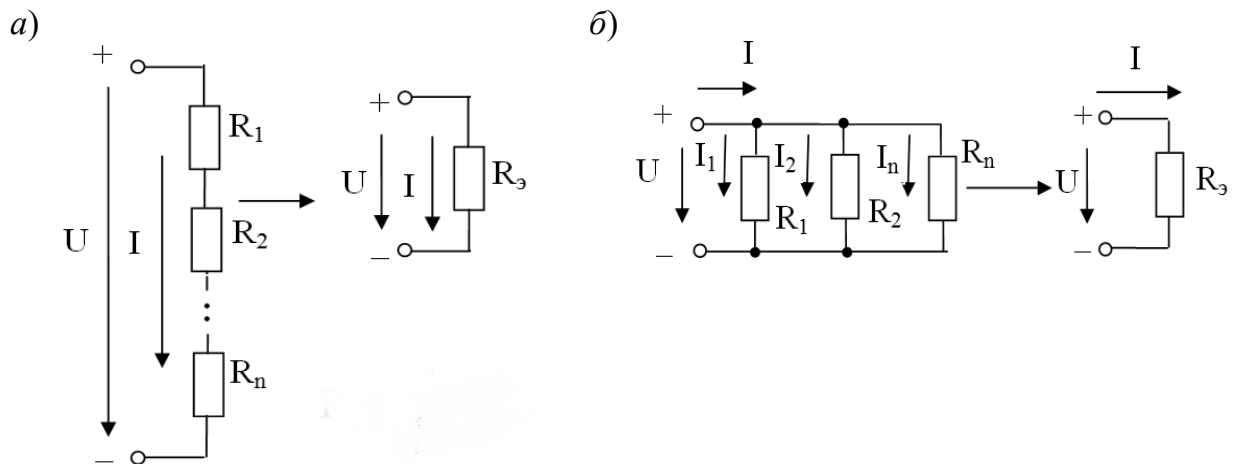


Рисунок 1 – Последовательное и параллельное соединение резисторов

Расчет эквивалентного сопротивления при последовательном соединении:

$$R_3 = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Расчет эквивалентного сопротивления при параллельном соединении:

$$R_3 = 1/G_3; \quad G_3 = \sum_{i=1}^n G_i; \quad G_i = 1/R_i;$$

– преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду и наоборот (рисунок 2).

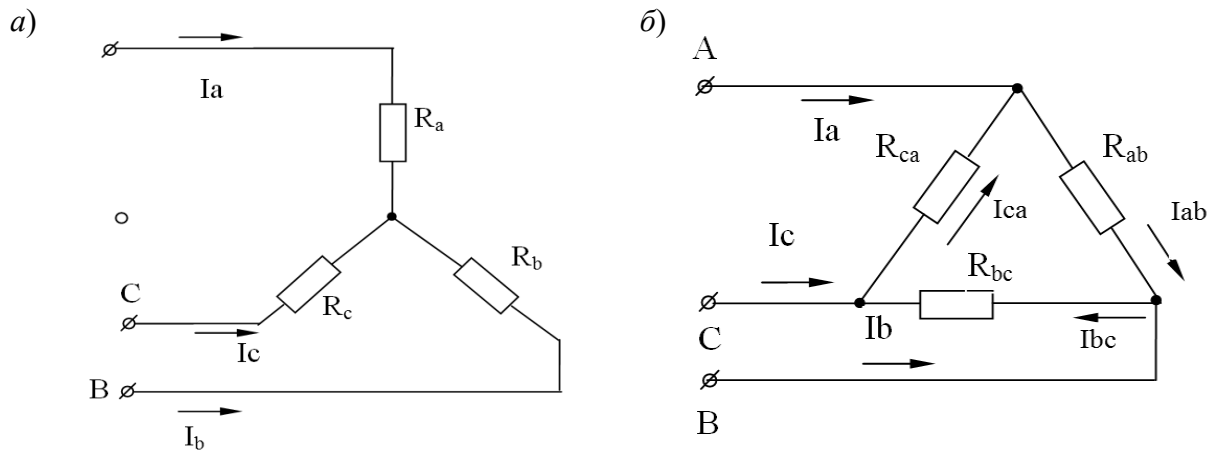


Рисунок 2 – Соединение резисторов звездой (а) и треугольником (б)

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

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

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

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

Формулы для расчета  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$ ,  $R_{CA}$  (преобразование звезды в треугольник):

$$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A \cdot R_B}{R_C};$$

$$R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B \cdot R_C}{R_A};$$

$$R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C \cdot R_A}{R_B}.$$

### 1.1.1 Пример решения задачи.

**Задача.** Определить токи и напряжения на отдельных участках схемы (рисунок 3), если напряжение на входе  $U = 240$  В, а сопротивления резисторов:  $R_1 = R_2 = 0,5$  Ом,  $R_3 = R_5 = 10$  Ом,  $R_4 = R_6 = R_7 = 5$  Ом. Определить мощность  $P$ , потребляемую электрической цепью.

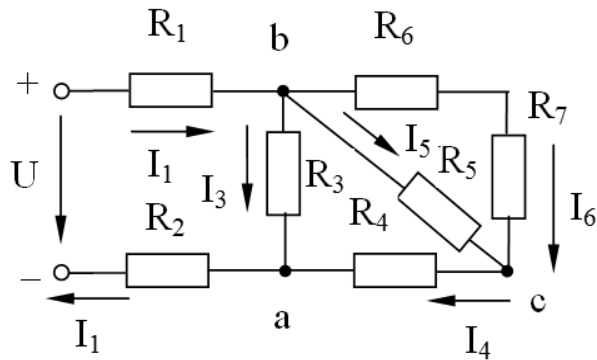


Рисунок 3 – Электрическая цепь постоянного тока к задаче

### Решение

Определим эквивалентное сопротивление схемы:

$$R_{bc} = \frac{(R_6 + R_7) \cdot R_5}{R_5 + R_6 + R_7} = \frac{(5 + 5) \cdot 10}{5 + 5 + 10} = 5 \text{ Ом},$$

так как резисторы  $R_6$  и  $R_7$  соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором  $R_5$ ;

$$R_{ab} = \frac{(R_{bc} + R_4) \cdot R_3}{R_{bc} + R_4 + R_3} = \frac{(5 + 5) \cdot 10}{5 + 5 + 10} = 5 \text{ Ом},$$

так как резисторы  $R_{bc}$  и  $R_4$  соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором  $R_3$ .

$$R_3 = R_{ab} + R_1 + R_2 = 5 + 0,5 + 0,5 = 6 \text{ Ом}.$$

Ток  $I_1$  определяем по закону Ома:

$$I_1 = U / R_3 = 240 / 6 = 40 \text{ А}.$$

Напряжение между точками  $a$  и  $b$  определяем по закону Ома:

$$U_{ab} = R_{ab} \cdot I_1 = 40 \cdot 5 = 200 \text{ В},$$

или  $U_{ab} = U - (R_1 + R_2) \cdot I_1 = 200 \text{ В}$  – по второму закону Кирхгофа.

Токи:

$$I_3 = U_{ab} / R_3 = 200 / 10 = 20 \text{ А};$$

$$I_4 = I_1 - I_3 = 40 - 20 = 20 \text{ А};$$

$$I_6 = I_5 = I_4 / 2 = 20 / 2 = 10 \text{ А}, \text{ т. к. } R_6 + R_7 = R_5.$$

Напряжения:

$$U_{bc} = R_5 \cdot I_5 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В};$$

$$U_{ca} = R_4 \cdot I_4 = 20 \cdot 5 = 100 \text{ В}.$$

Мощность, потребляемая электрической цепью:

$$P = U \cdot I_1 = 240 \cdot 40 = 9600 \text{ Вт}.$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 4).

После запуска программы на экране появляется рабочее поле, предназначенное для виртуального построения принципиальной схемы электрической цепи с подключением к ней необходимых источников воздействий и измерительно-регистрирующих приборов.

Вызов необходимых компонентов осуществляется или нажатием левой кнопки мышки на соответствующем меню панели компонентов, расположенном горизонтально над экраном, или нажатием правой кнопки мышки на пустом месте наборного поля с последующим вызовом меню компонентов через *PlaceComponent*. Показания измерительных приборов соответствуют расчётным значениям.

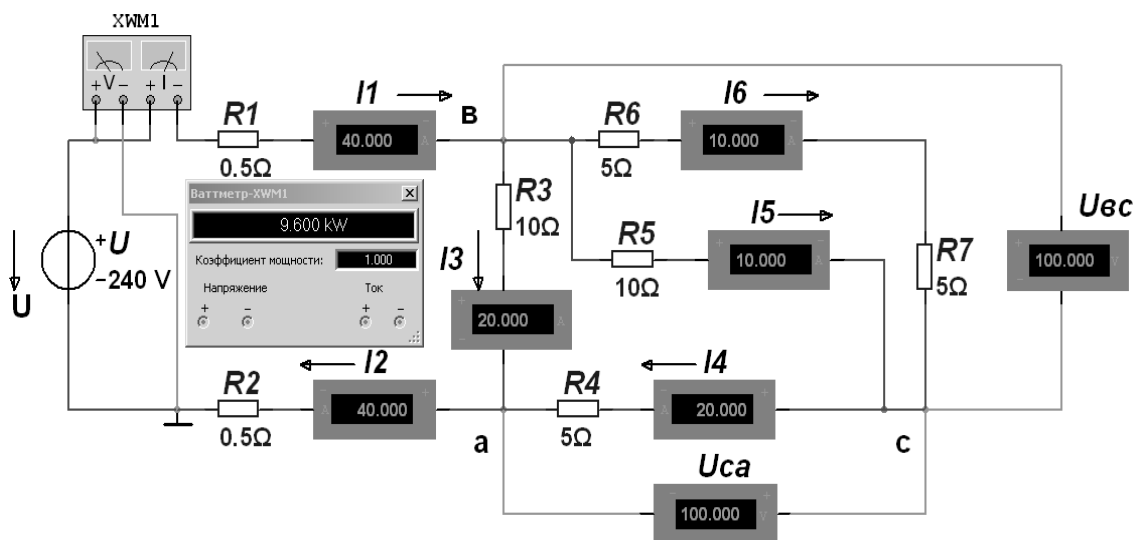


Рисунок 4 – Модель электрической цепи постоянного тока к задаче 1

## 1.2 Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем, а также следующую задачу.

**Задача.** Для цепи (рисунок 5) известны значения  $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  и ток  $I_2$ . Определить ЭДС источника, а также значения токов в ветвях.



$R_0 = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 0,7 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 40 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 2,4 \text{ Ом}$ ,  
 $R_6 = 4 \text{ Ом}$ ,  $I_2 = 0,25 \text{ А}$ .

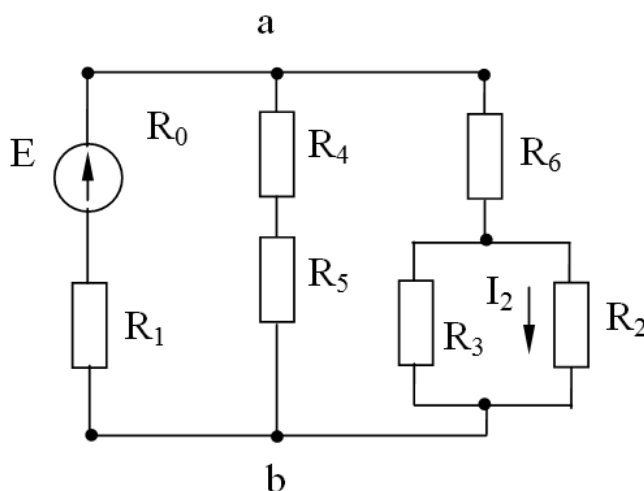


Рисунок 5 – Электрическая цепь задачи для самостоятельного решения

### **Контрольные вопросы**

- 1 Дать информацию о способах определения эквивалентного сопротивления электрической цепи.
- 2 Записать закон Ома для пассивного и активного участков электрической цепи.
- 3 Сформулировать законы Кирхгофа.
- 4 Записать формулы расчета мощности, потребляемой электрической цепью.

## **2 Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками питания**

### **2.1 Основные теоретические положения**

*2.1.1 Расчет сложных электрических цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа.*

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

Порядок расчета по этому методу состоит в следующем:

– указываем произвольно положительные направления токов в ветвях, а также направления обхода в выбранных независимых контурах;

– записываем уравнения по первому закону Кирхгофа. Количество уравнений по первому закону Кирхгофа равно  $K - 1$ , где  $K$  – число узлов электрической цепи;

– записываем уравнения по второму закону Кирхгофа применительно к контуру.

Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно

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

где  $n$  – число ветвей электрической цепи.

Решая систему полученных уравнений, определяем токи ветвей.

Для проверки правильности расчета электрической цепи используют уравнение баланса мощностей.

### 2.1.2 Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов

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, равно

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

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.

**Задача 1.** Рассмотрим пример расчета электрической цепи (рисунок 6) методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов.

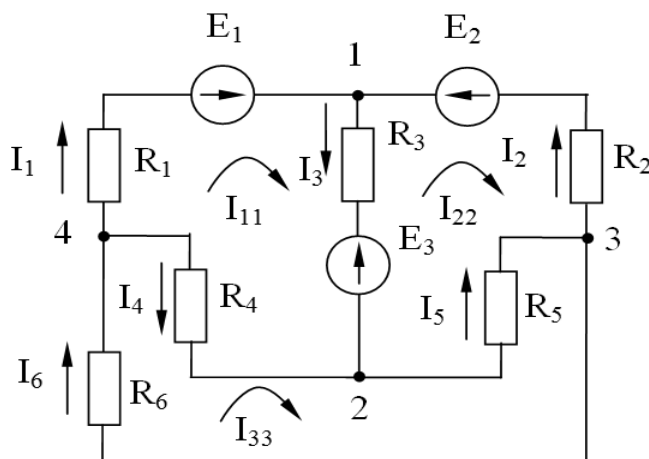


Рисунок 6 – Электрическая цепь к примеру расчета задачи 1 методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов

*Метод непосредственного применения законов Кирхгофа:*

Число узлов  $k = 4$  Число ветвей  $n = 6$ .

Число уравнений по первому закону Кирхгофа

$$k - 1 = 4 - 1 = 3.$$

Число уравнений по второму закону Кирхгофа

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

Число всех уравнений  $n = 6$

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad - \text{узел 1;}$$

$$I_3 + I_4 - I_5 = 0 \quad - \text{узел 2;}$$

$$I_5 - I_6 - I_2 = 0 \quad - \text{узел 3;}$$

$$E_1 - E_3 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 \quad - \text{контур 1, 2, 4, 1;}$$

$$E_3 - E_2 = -I_2 \cdot R_2 - I_5 \cdot R_5 - I_3 \cdot R_3 \quad - \text{контур 1, 3, 2, 1;}$$

$$0 = I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 + I_4 \cdot R_4 \quad - \text{контур 2, 3, 4, 2.}$$

*Метод контурных токов:*

Количество уравнений

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

Обозначение контурных токов:  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$ .

Система уравнений

$$\begin{cases} E_1 - E_3 = I_{11} \cdot (R_1 + R_3 + R_4) - I_{22} \cdot R_3 - I_{33} \cdot R_4 \quad - \text{контур 1, 2, 4, 1;} \\ E_3 - E_2 = -I_{11} \cdot R_3 + I_{22} \cdot (R_2 + R_5 + R_3) - I_{33} \cdot R_5 \quad - \text{контур 1, 3, 2, 1;} \\ 0 = -I_{11} \cdot R_4 - I_{22} \cdot R_5 + I_{33} \cdot (R_4 + R_5 + R_6) \quad - \text{контур 2, 3, 4, 2.} \end{cases}$$

Решая данную систему уравнений, определяем значения контурных токов  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$ .

Находим значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{22}; I_3 = I_{11} - I_{22}; I_4 = I_{33} - I_{11}; I_5 = I_{33} - I_{22}; I_6 = I_{33}$$

Проверяем правильность расчета, составив уравнение баланса мощности:

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

*2.1.3 Расчет сложных электрических цепей методом двух узлов.*

Метод двух узлов применяется в тех случаях, если схема имеет два узла и ряд параллельных ветвей между ними. Для нахождения неизвестных токов составляют уравнения по закону Ома:

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

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  $E_i$  и напряжение  $U_{AB}$  берутся со знаком «+», 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 их направления совпадают.

**Задача 2.** Составить необходимые уравнения для определения значений токов в ветвях схемы (рисунок 7), используя метод двух узлов.

По закону Ома токи в ветвях равны:

$$I_1 = (E_1 + U_{AB}) \cdot G_1;$$

$$I_2 = (E_2 - U_{AB}) \cdot G_2;$$

$$I_3 = (E_3 + U_{AB}) \cdot G_3;$$

$$I_4 = -U_{AB} \cdot G_4,$$

где  $G_1 = 1/(R_1 + R_5)$ ;  $G_2 = 1/R_2$ ;  $G_3 = 1/R_3$ ;  $G_4 = 1/R_4$ .

Напряжение между двумя узлами  $U_{AB}$ :

$$U_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n (\pm E_i \cdot G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{-E_1 \cdot G_1 + E_2 \cdot G_2 - E_3 \cdot G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}.$$

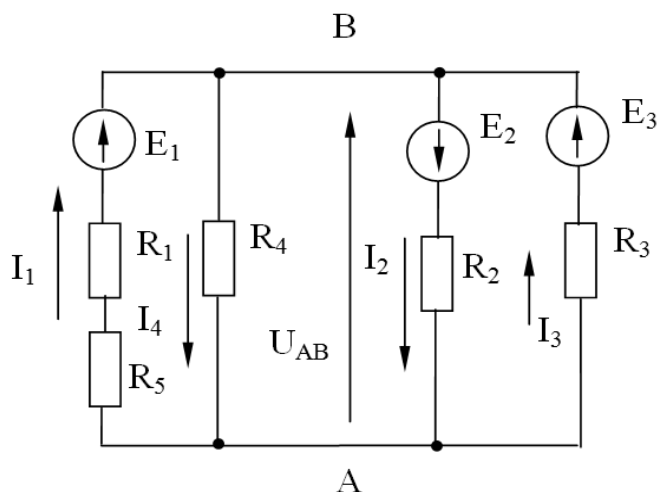


Рисунок 7 – Электрическая цепь к примеру расчета методом двух узлов

**Задача 3.** Расчет электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжений.

Данным методом целесообразно пользоваться, если необходимо рассчитать только ток одной ветви. Сущность метода состоит в том, что любая сложная активная цепь представляется активным двухполюсником, внутренняя ЭДС которого равна напряжению холостого хода  $U_{xx}$  на участке, где определяется ток при отключении резистора, а внутреннее сопротивление – сопротивлению всей остальной цепи при отключенной ветви и закороченных источниках ЭДС ( $R_{кз}$ ).

Ток в  $i$ -й ветви определяется по формуле

$$I_1 = \frac{U_{xx}}{R_{кз} + R_1},$$

где  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода относительно точек разрыва в ветви, где определяется ток;

$R_{кз}$  – внутреннее сопротивление цепи при отключенной нагрузке и закороченных источниках ЭДС;

$R_1$  – сопротивление резистора, где определяется ток.

Напряжение  $U_{xx}$  эквивалентного генератора напряжения определяется путем расчета цепи при отключенной нагрузке любым из методов расчета.

Сопротивление  $R_{кз}$  определяется как  $R_{экв}$  электрической цепи относительно точек разрыва и закороченных источников ЭДС.

**Задача 4.** Определить значение тока  $I_5$  в схеме на рисунке 8, а.

Определяем напряжение холостого хода  $U_{xx}$  (рисунок 8, б), используя второй закон Кирхгофа:

$$U_{xx} = I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1.$$

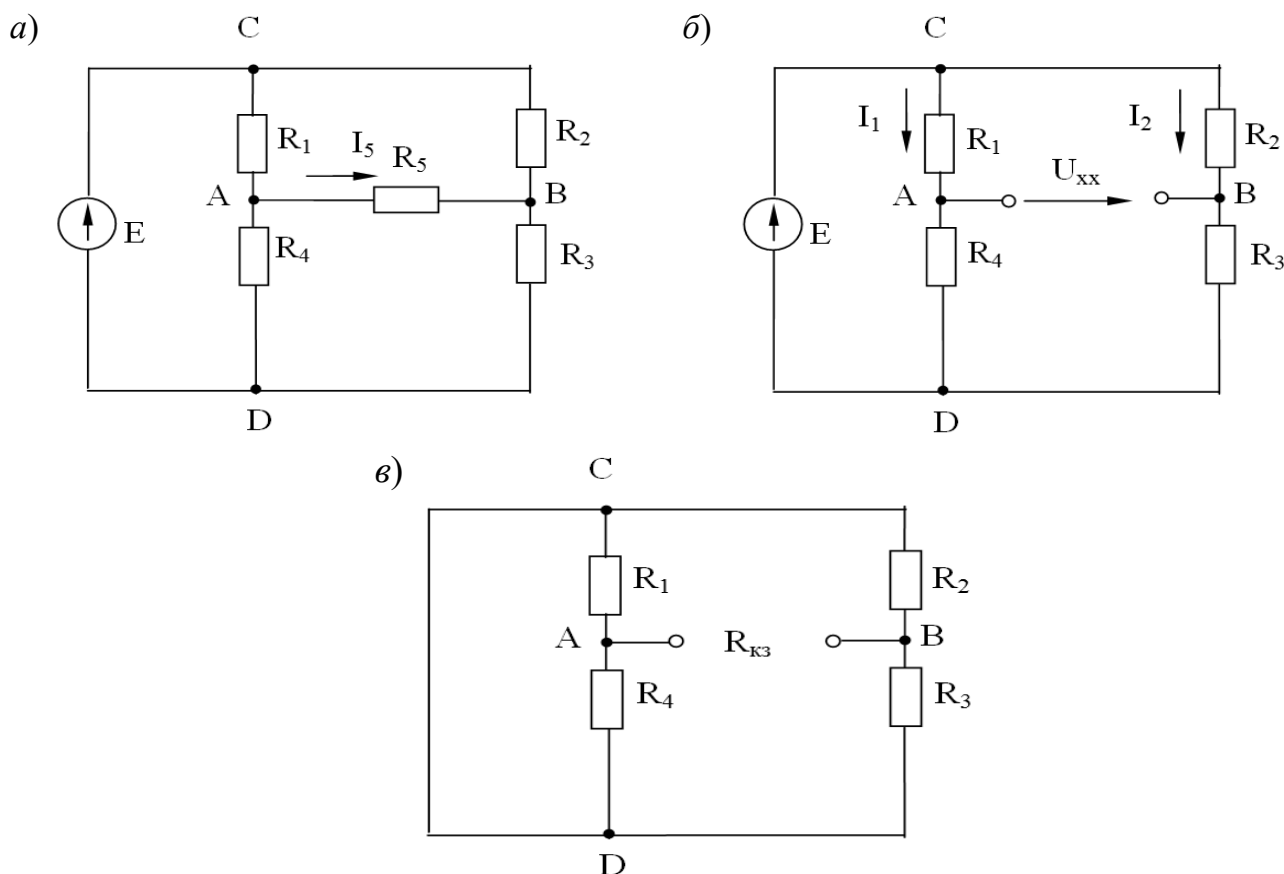


Рисунок 8 – Электрические схемы к примеру расчета методом эквивалентного генератора

Токи в ветвях (см. рисунок 8, б):

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_4}; \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + R_3}.$$

Определяем значение сопротивления  $R_{кз}$  (рисунок 8, в):

$$R_{кз} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

Определяем значение тока  $I_5$ :

$$I_5 = \frac{U_{xx}}{R_{кз} + R_5}.$$

### **Самостоятельная работа**

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

**Задача 1.** Для разветвленной электрической цепи (рисунок 9), пользуясь законами Кирхгофа и методом контурных токов, определить токи во всех ветвях.

$$E_1 = 24 \text{ В}; \quad E_2 = 48 \text{ В}; \quad E_3 = 96 \text{ В};$$

$$R_1 = 16 \text{ Ом}; \quad R_2 = 8 \text{ Ом}; \quad R_3 = 16 \text{ Ом}; \quad R_4 = 8 \text{ Ом}.$$

Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

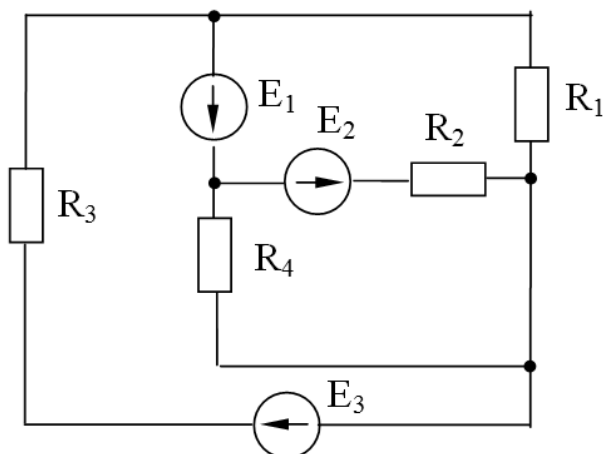


Рисунок 9 – Электрическая цепь задачи 1 для самостоятельного решения

### 3 Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником и несколькими источниками питания с применением комплексных чисел

#### 3.1 Основные теоретические положения

##### 3.1.1 Символический метод расчета цепей переменного тока.

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

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

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

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

### 3.1.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Пусть задана расчетная схема с последовательным соединением элементов  $R, L, C$  с параметрами  $R_1, R_2 \dots R_n, X_{L1}, X_{L2} \dots X_{Ln}, X_{C1}, X_{C2} \dots X_{Cn}$  и напряжением  $U$  на входе (рисунок 10). Определить ток  $I$ , угол сдвига по фазе  $\varphi$  и мощность на входе цепи.

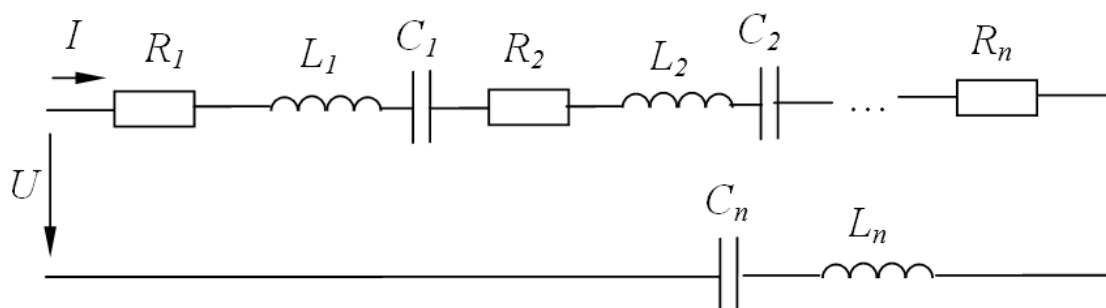


Рисунок 10 – Электрическая цепь с последовательным соединением  $R$ -,  $L$ - и  $C$ -элементов к задаче 1

*Решение*

Комплекс действующего значения тока в цепи

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

где  $\dot{U} = U$ , т. к.  $\varphi = 0^\circ$ ;

$$\underline{Z} = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) + j(X_{L1} - X_{C1} + X_{L2} - X_{C2} + \dots + X_{Ln} - X_{Cn}).$$

Комплекс полной мощности

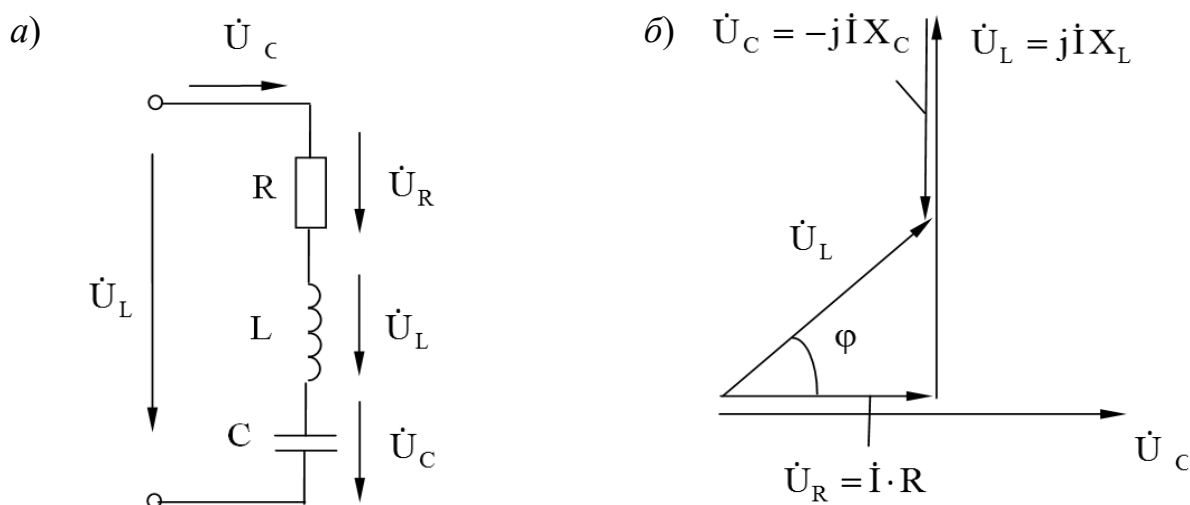
$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = P \pm jQ,$$

где  $\dot{I}^*$  – сопряженный комплекс тока.

**Задача 2.** Катушка с активным сопротивлением  $R = 6$  Ом и индуктивностью  $L = 25,5$  мГн соединена последовательно с конденсатором, емкость которого  $C = 1590$  мкФ.



Определить ток, напряжения на катушке и конденсаторе, мощности катушки, конденсатора и всей цепи. Построить векторную диаграмму напряжений, если напряжение на входе схемы (рисунок 19, а)  $U = 127$  В и частота  $f = 50$  Гц. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.



а – схема электрической цепи; б – векторная диаграмма

Рисунок 11 – Схема электрической цепи переменного тока и векторная диаграмма к задаче 2

*Решение*

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 25,5 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1590 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ Ом}.$$

Комплекс полного сопротивления цепи:

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = R + jX = 6 + j6 = \sqrt{6^2 + 6^2} e^{j(\arctg \frac{6}{6})} = 8,5 e^{j45^\circ}.$$

Комплекс полного сопротивления катушки:

$$\underline{Z}_k = R + jX_L = 6 + j8 = \sqrt{6^2 + 8^2} e^{j(\arctg \frac{8}{6})} = 10 e^{j53^\circ} \text{ Ом}.$$

Схема электрической цепи приведена на рисунке 11, а. Векторная диаграмма приведена на рисунке 11, б.

Комплексы напряжения и тока:

$$\dot{U} = 127 \text{ В};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{127}{8,5 \cdot e^{j45^\circ}} = 14,9 \cdot e^{-j45^\circ} = 14,9 \cdot \cos(-45^\circ) + j \cdot \sin(-45^\circ) = 10,5 - j10,5 \text{ A.}$$

Комплексные действующие значения напряжений:

– на конденсаторе

$$\dot{U}_C = \underline{Z}_C \cdot \dot{I} = -j \cdot X_C \cdot \dot{I} = -j2 \cdot 14,9 \cdot e^{-j45^\circ} = 29,8 \cdot e^{-j135^\circ} = -21,1 - j21,1 \text{ В;}$$

– на катушке

$$\dot{U}_k = \underline{Z}_k \cdot \dot{I} = 10 \cdot e^{j53^\circ} \cdot 14,9 \cdot e^{-j45^\circ} = 149 \cdot e^{j8^\circ} = 147,5 + j20,7 \text{ В.}$$

Комплекс полной мощности

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = 127 \cdot 14,9 \cdot e^{j45^\circ} = 1892 \cdot e^{j45^\circ} = 1338 + j1338 \text{ В} \cdot \text{А,}$$

где  $\dot{I}^*$  – сопряженный комплекс тока.

Следовательно, активная мощность цепи составляет  $P = 1338$  Вт, а реактивная –  $Q = 1338$  вар.

Реактивная мощность конденсатора

$$Q_C = I^2 \cdot X_C = 14,9^2 \cdot 2 = 444 \text{ вар.}$$

Комплекс полной мощности катушки

$$\tilde{S} = \dot{U}_k \cdot \dot{I}^* = 149 \cdot 14,9 \cdot e^{j8^\circ} \cdot e^{j45^\circ} = 2220 \cdot e^{j53^\circ} = 1336 + j1773 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование её работы в среде Multisim.

В качестве источника питания для цепи на рисунке 12 можно использовать источник *ACPower* из группы *Sources*, установив действующее значение напряжения *RMS* и частоту *F*. Измерительные приборы перевести в режим *AC*. При этом они осуществляют индикацию действующих значений токов и напряжений. Результаты моделирования соответствуют расчетным значениям с небольшой погрешностью.

Измерение мощностей  $P$ ,  $S$  и  $Q$  можно провести с помощью ваттметра, который в Multisim, кроме активной мощности, измеряет коэффициент мощности  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ .

В соответствии с показаниями ваттметра можно записать:

$P = 1343$  Вт;  $\cos \varphi = 0,707$ ;  $\varphi = 45^\circ$  (напряжение опережает ток по фазе);  
 $S = \frac{P}{\cos \varphi} = 1900$  В·А;  $Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1343$  вар, что с небольшой погрешностью соответствует расчетным значениям.

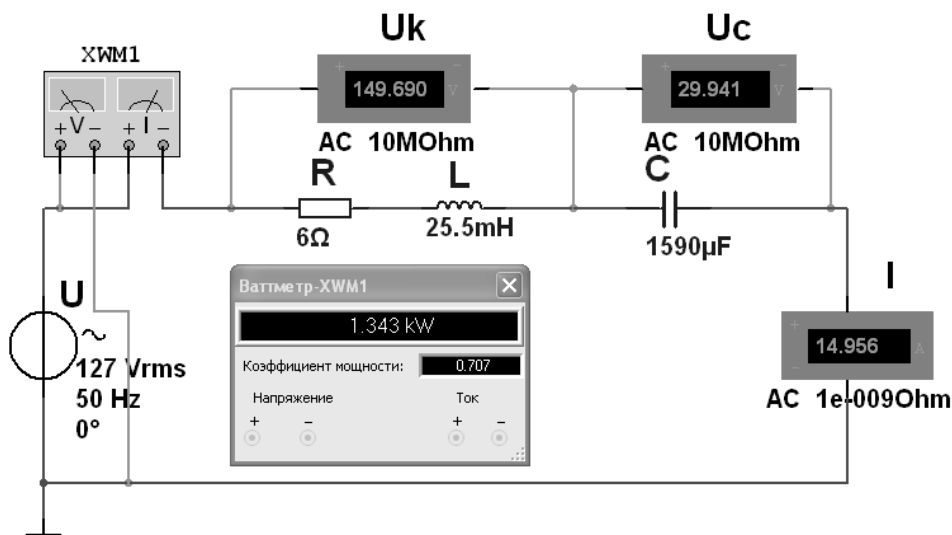


Рисунок 12 – Модель электрической цепи переменного тока в среде Multisim к задаче 2

**Задача 3.** Определить токи в электрической цепи (рисунок 12), если напряжение на входе  $U_{ab} = 120$  В, а значение сопротивлений  $X_{L0} = 4$  Ом,  $R_1 = 6$  Ом,  $X_{L1} = 8$  Ом,  $X_C = 5$  Ом,  $R_2 = 5$  Ом. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

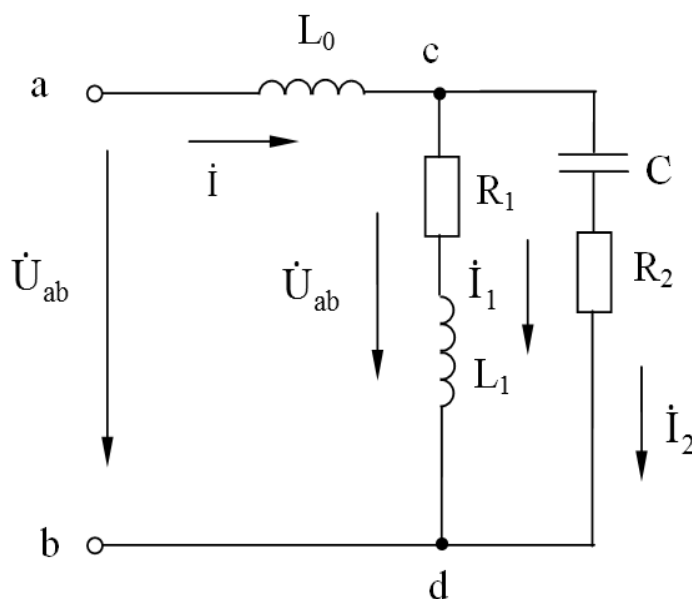


Рисунок 13 – Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением элементов к задаче 3

Решение

Входное комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{ab} &= \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{cd} = \underline{Z}_0 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = jX_{L0} + \frac{(R_1 + jX_{L1}) \cdot (R_2 - jX_C)}{R_1 + jX_{L1} + R_2 - jX_C} = \\ &= j4 + \frac{(6 + j8) \cdot (5 - j5)}{6 + j8 + 5 - j5} = 6,15 + j3,23 \text{ Ом.}\end{aligned}$$

Общий ток цепи

$$\dot{I} = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{120}{6,15 + j3,23} = 15,39 - j8,08 = 17,4 \cdot e^{-j27,7^\circ} \text{ А.}$$

Комплексное напряжение на зажимах  $cd$  по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{cd} = \dot{U}_{ab} - \dot{U}_{ac} = 120 - j4 \cdot (15,39 - j8,08) = 87,78 - j61,5 = 107,2 \cdot e^{-j35^\circ} \text{ В.}$$

Токи в ветвях:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{cd}}{\underline{Z}_1} = \frac{87,8 - j61,5}{6 + j8} = 0,34 - j10,7 = 10,71 \cdot e^{-j88,2^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{cd}}{\underline{Z}_2} = \frac{87,8 - j61,5}{5 - j5} = 14,92 + j2,64 = 15,2 \cdot e^{j10^\circ} \text{ А.}$$

Комплексная полная мощность всей цепи:

$$\tilde{S} = \dot{U}_{ab} \cdot \dot{I}^* = 120 \cdot (15,39 + j8,08) = 1846 + j970 = 2085 \cdot e^{j27,7^\circ} \text{ В} \cdot \text{А;}$$

$$S = \sqrt{1846^2 + 970^2} = 2085 \text{ В} \cdot \text{А,}$$

откуда  $P = 1846$  Вт;  $Q = 970$  вар.

Модель электрической цепи в среде Multisim приведена на рисунке 14. Действующие значения токов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , напряжения  $U_{cd}$  и активной мощности цепи  $P$  с небольшой погрешностью соответствуют расчетным.

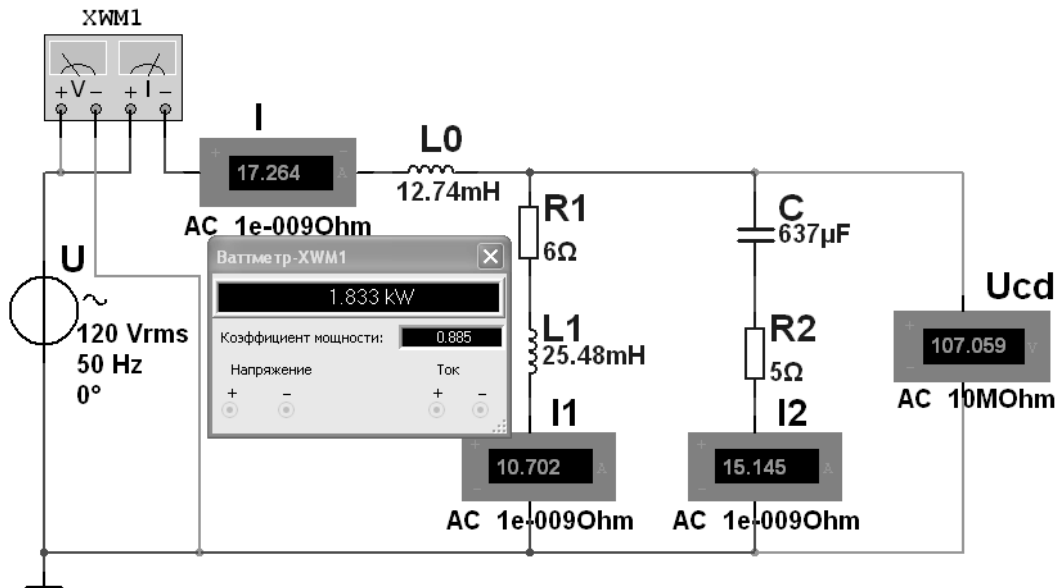


Рисунок 14 – Модель электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов к задаче 3

### 3.2 Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачу, предложенную преподавателем.

**Задача.** В цепь переменного тока частотой 50 Гц (рисунок 15) включена катушка, обладающая активным сопротивлением  $R$  и индуктивным сопротивлением  $X_L$ . К цепи приложено напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ . Определить показания измерительных приборов, а также активную, реактивную и полную мощности цепи. Построить треугольник сопротивлений и векторную диаграмму при  $R = 3$  Ом;  $X_L = 4$  Ом;  $U_m = 282$  В. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

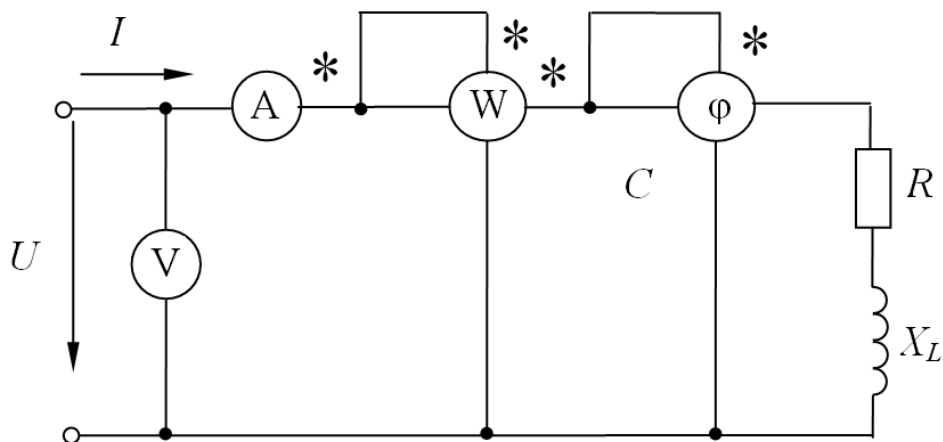


Рисунок 15 – Электрическая цепь с катушкой переменного тока задачи для самостоятельного решения

### Контрольные вопросы

1 Запишите формулы комплексного сопротивления участка цепи при последовательном соединении элементов  $R, L, C$ .

2 Дайте формулировку и запишите закон Ома в комплексной форме для участка цепи с последовательным соединением элементов  $R, L, C$ .

3 Запишите комплексное сопротивление двух параллельно соединенных ветвей.

4 Запишите формулы для расчета комплексной мощности.

5 Поясните, что понимают под коэффициентом мощности и какое экономическое значение он имеет.

## 4 Практическое занятие № 4. Анализ простейших трехфазных цепей с помощью комплексных чисел и векторных диаграмм

### 4.1 Основные теоретические соотношения

Фазные напряжения для схемы (рисунок 16, а) в комплексной форме определяются по заданному линейному напряжению:

$$\dot{U}_A = U_A; \quad \dot{U}_B = U_B \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = U_C \cdot e^{-j240^\circ},$$

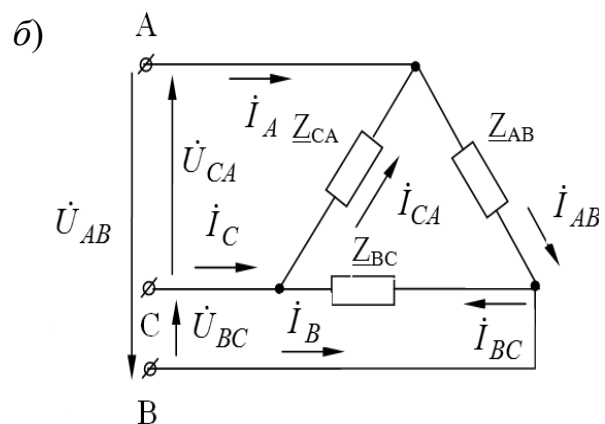
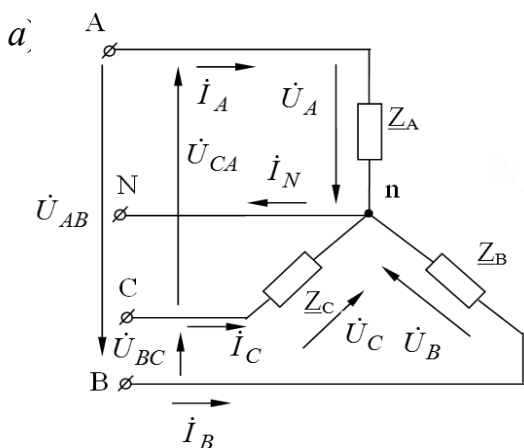
где  $U_A = U_B = U_C = U_\phi = U_l / \sqrt{3}$ .

Для схемы на рисунке 16, б фазные и линейные напряжения равны:

$$U_l = U_\phi.$$

В комплексной форме

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB}; \quad \dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{-j240^\circ}.$$



а – треугольник; б – звезда

Рисунок 16 – Схемы соединения трехфазной нагрузки

#### 4.1.1 Примеры решения задач.

**Задача 1.** К трехфазной линии электропередачи, линейные напряжения которой симметричны:  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220$  В, присоединены три приемника энергии по схеме треугольник (рисунок 17). Комплексные сопротивления этих приемников  $Z_{AB} = 22$  Ом;  $Z_{BC} = 19 - j11$  Ом;  $Z_{CA} = 19 + j11$  Ом. Определить линейные и фазные токи в цепи и построить векторную диаграмму.

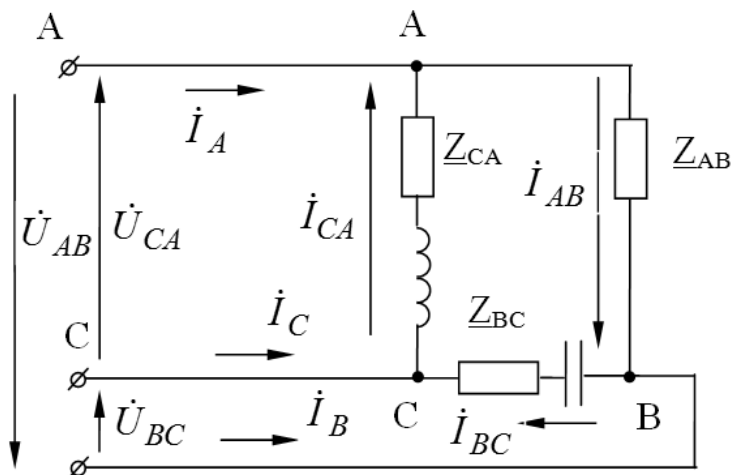


Рисунок 17 – Схема трехфазной электрической цепи к задаче 1

#### Решение

Запишем значения линейных напряжений в комплексной форме:

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB} = 220 \text{ В},$$

тогда

$$\dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} = -110 - j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{-j240^\circ} = 220 \cdot e^{-j240^\circ} = -110 + j190 \text{ В}.$$

На основании закона Ома определим фазные токи:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / Z_{AB} = 220 / 22 = 10 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} / Z_{BC} = (-110 - j190) / (19 - j11) = -j10 = 10 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} / Z_{CA} = (-110 + j190) / (19 + j11) = j10 = 10 \cdot e^{j90^\circ} \text{ А}.$$

Применив первый закон Кирхгофа к точкам А, В, С найдем линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 10 - j10 = 14,1 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{CA} = -10 - j10 = 141 \cdot e^{-j135^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = j20 = 20 \cdot e^{j90^\circ} \text{ A}.$$

Проверка:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

$$10 - j10 - j10 - 10 + j20 = 0.$$

**Задача 2.** Определить токи в трехфазной цепи (рисунок 18), если линейные напряжения на входе в цепь симметричны:  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 208 \text{ В}$ , а комплексные сопротивления фаз

$$\underline{Z}_A = 8 + j6 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_B = 8 - j6 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_C = 25 \text{ Ом}.$$

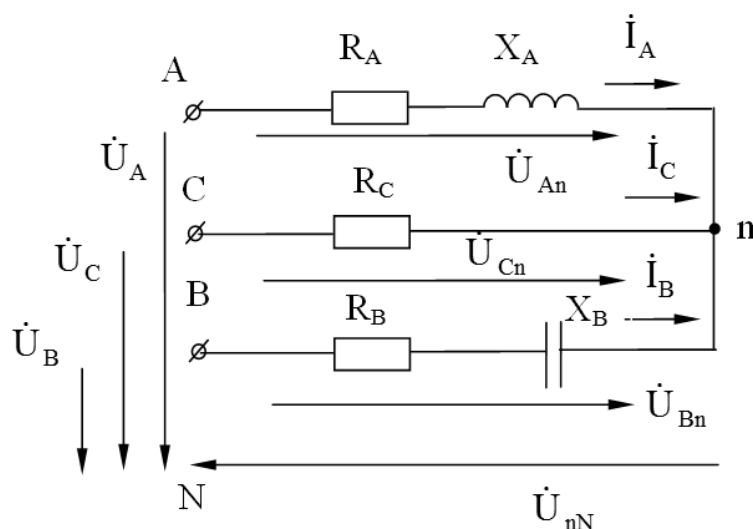


Рисунок 18 – Схема трехфазной электрической цепи к задаче 2

*Решение*

Комплексные проводимости фаз:

$$\underline{Y}_A = 1 / \underline{Z}_A = 1 / (R_A + jX_A) = 1 / (8 + j6) = 0,08 - j0,06 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_B = 1 / \underline{Z}_B = 1 / (R_B + jX_B) = 1 / (8 - j6) = 0,08 + j0,06 \text{ См};$$

$$\underline{Y}_C = 1 / \underline{Z}_C = 1 / R_C = 1 / 25 = 0,04 \text{ См}.$$

Фазные напряжения генератора

$$U_A = U_B = U_C = U_{AB} / \sqrt{3} = 208 / \sqrt{3} = 120 \text{ В}.$$



Значения фазных напряжений в комплексной форме:

$$\dot{U}_A = 120 \text{ В}; \quad \dot{U}_B = U_B \cdot e^{-j120^\circ} = 120 \cdot e^{-j120^\circ} = -60 - j104 \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = U_C \cdot e^{-j240^\circ} = 120 \cdot e^{-j240^\circ} = -60 + j104 \text{ В}.$$

Напряжение между нейтральными точками генератора и нагрузки

$$U_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C};$$

$$\begin{aligned} U_{nN} &= \frac{120 \cdot (0,08 - j0,06) + (-60 - j104) \cdot (0,08 + j0,06) + (-60 + j104) \cdot 0,04}{0,08 - j0,06 + 0,08 + j0,06 + 0,04} = \\ &= 43,2 - j74,8 = 86,3 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Фазные напряжения нагрузки:

$$\dot{U}_{An} = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN} = 120 - 43,2 + j74,8 = 76,8 + j74,8 = 107,2 \cdot e^{j44^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Bn} = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} = -60 - j104 - 43,2 + j74,8 = -103,2 - j28,2 = 107,2 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Cn} = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN} = -60 + j104 - 43,2 + j74,8 = -103,2 + j178,8 = 206,4 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ В}.$$

Комплексные линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{An} \cdot \underline{Y}_A = (76,8 + j74,8) \cdot (0,08 - j0,06) = 10,63 + j1,38 = 10,7 \cdot e^{j7,4^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_{Bn} \cdot \underline{Y}_B = (-103,2 - j28,2) \cdot (0,08 + j0,06) = -6,5 - j8,53 = 10,7 \cdot e^{-j127^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_{Cn} \cdot \underline{Y}_C = (-103,2 + j28,2) \cdot 0,04 = -4,13 + j7,15 = 8,25 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ А}.$$

Проверка:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

$$10,63 + j1,38 - 6,5 - j8,53 - 4,13 + j7,15 = 0.$$

## 4.2 Самостоятельная работа

**Задача.** Определить линейные и фазные токи в трехфазной цепи. Исходные данные к задаче (линейное напряжение  $U_L$ , нагрузка  $\underline{Z}$  и её схема подключения) приведены в таблице 1. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

Таблица 1 – Исходные данные к задаче

Номер варианта	$U_l, В$	$\underline{Z}, Ом$	Схема подключения нагрузки
1	380	$20 + j20$	Звезда
2	380	$20 + j20$	Треугольник
3	380	$20 - j20$	Звезда
4	380	$20 - j20$	Треугольник
5	380	$3 + j4$	Звезда

### ***Контрольные вопросы***

1 Запишите комплексные выражения для фазных и линейных напряжений при соединении нагрузок звездой и треугольником.

2 Объясните назначение нейтрального провода.

3 Запишите формулу, определяющую смещение нейтрали и фазные напряжения приемника, фазы которого соединены звездой без нейтрального провода.

## **5 Практическое занятие № 5. Расчет переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока**

### ***5.1 Основные теоретические положения***

#### ***5.1.1 Основные положения классического метода.***

Расчет переходного процесса в линейной электрической цепи с сосредоточенными параметрами сводится к решению линейного дифференциального уравнения  $n$ -го порядка, полученного на основании законов Кирхгофа. Порядок дифференциального уравнения  $n$  определяется количеством реактивных элементов в схеме и способом их соединения. Для всех вариантов схем  $n = 2$ .

Классический метод расчета предполагает нахождение решения в виде суммы свободной и принуждённой составляющих:

$$X(t) = X_{np}(t) + X_{св}(t), \quad (1)$$

где  $X_{np}(t)$  – частное решение неоднородного дифференциального уравнения (принужденная составляющая);

$X_{св}(t)$  – общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения (свободная составляющая).

В электротехнической практике в качестве частного решения обычно используют значение  $X_{np}(t)$ , получаемое из расчёта рассматриваемой схемы в установившемся режиме.

Общее решение  $X_{cb}(t)$  определяется видом корней характеристического уравнения  $p$ :

– если характеристическое уравнение имеет два действительных и разных корня  $p_1 \neq p_2$ :

$$X_{cb}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}, \quad (2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – постоянные интегрирования;

– корни действительные и равные  $p_1 = p_2 = p$ :

$$X_{cb}(t) = (A_1 + A_2 \cdot t) \cdot e^{p t}; \quad (3)$$

– корни комплексно-сопряженные  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega'$ :

$$X_{cb}(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega' \cdot t + \nu). \quad (4)$$

Для получения характеристического уравнения достаточно составить выражение для входного сопротивления схемы после коммутации в комплексной форме  $Z_{ex}(j\omega)$ , заменить  $j\omega$  на  $p$  и приравнять это выражение к нулю, либо приравнять к нулю матрицу контурных сопротивлений или матрицу узловых проводимостей схемы. При определении  $Z_{ex}$  все источники ЭДС в схеме закорачиваются, а источники тока отбрасываются с сохранением в схеме их внутренних сопротивлений.

Для определения  $A_1$  и  $A_2$  либо  $A$  и  $\nu$  (при комплексных корнях) необходимо вычислить значение искомой величины  $X(0_+)$  и её производной  $\left. \frac{dX}{dt} \right|_{t=0_+}$

в момент времени непосредственно после коммутации ( $t=0_+$ ), используя законы Кирхгофа для послекоммутационной схемы и законы коммутации.

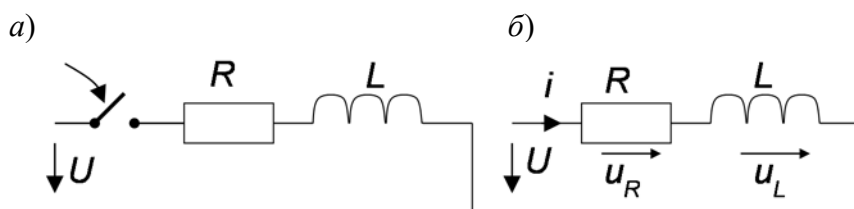
При этом не изменяющиеся мгновенно токи в индуктивностях и напряжения на емкостях определяются из расчета схемы до коммутации.

Основным недостатком классического метода является необходимость определения постоянных интегрирования  $A$ . Этому недостатка лишен операторный метод расчёта переходных процессов.

## 5.2 Примеры решения задач

5.2.1 Включение цепи с последовательным соединением  $R$  и  $L$  на постоянное напряжение.

**Задача 1.** Дано:  $U$ ,  $R$ ,  $L$ . Определить:  $i(t)$  и  $u_L(t)$  при переходном процессе (рисунок 19).



*a* – до коммутации; *б* – после коммутации

Рисунок 19 – Цепь с последовательным соединением  $R$  и  $L$  на постоянное напряжение

*Решение*

Производим коммутацию и запускаем переходный процесс. Уравнение 2-го закона Кирхгофа  $U = u_R + u_L$ .

*Аналитическое решение*

1 Составляем дифференциальное уравнение по 2-му закону Кирхгофа для цепи, образовавшейся после коммутации:

$$u_R + u_L = U; L \frac{di}{dt} + Ri = U.$$

Его общий интеграл (искомый ток  $i$ ) имеет две составляющие:

– **принужденная составляющая тока.**

Математически – это частное решение дифференциального уравнения, имеющее вид свободного члена. В данном случае свободный член ( $u = \text{const}$ ) – постоянное число. Следовательно,  $i_{np} = \text{const}$ .

Подставляя  $i_{np} = \text{const}$  в исходное дифференциальное уравнение, получаем

$U = i_{np}R + 0$ . Отсюда  $i_{np} = \frac{U}{R}$ . Физически – это ток установившегося режима

после завершения переходного процесса;

свободная составляющая искомого тока –  $i_{св}$ .

Математически – это общее решение однородного уравнения, которое имеет вид экспоненты.

$$i_{св} = Ae^{pt},$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения.

Это уравнение получают, подставив имеющееся решение в однородное уравнение  $0 = Ae^{pt}R + LpAe^{pt}$ . Сокращая на  $Ae^{pt} \neq 0$  – уменьшается со временем.

Эта математика соответствует физике процессов в цепи, лишенной внешнего источника энергии.

2 Промежуточный ответ:  $i = i_{np} + i_{ca} = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}$ .

3 Определяем  $A$ , полагая в этом уравнении  $t = 0$ :

$$i(0_+) = \frac{U}{R} + A.$$

Тогда  $A = i(0_+) - \frac{U}{R}$ .

Для данного примера  $i(0_+) = i(0_-) = 0$ . Следовательно,  $A = -\frac{U}{R}$ .

4 Окончательный ответ:  $i = \frac{U}{R} - \frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$ .

Проверка: при  $t = 0$   $i(0_+) = 0$ ; при  $t = \infty$   $i_{уст} = \frac{U}{R}$  ( $e^{-\infty} = 0$ ).

5 Напряжение на индуктивности

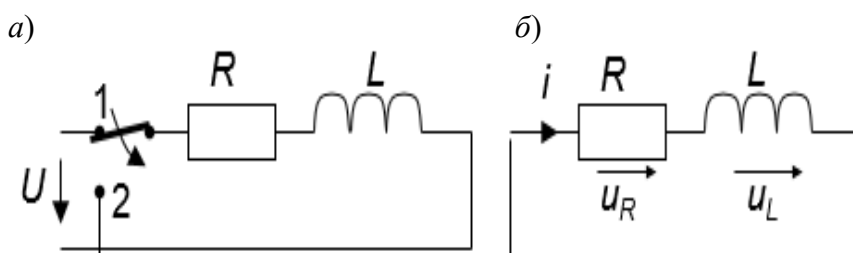
$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} \left[ \frac{U}{R} - \frac{U}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right] = L \left[ \left( -\frac{U}{R} \right) \left( -\frac{R}{L} \right) e^{-\frac{R}{L}t} \right] = +Ue^{-\frac{R}{L}t}.$$

Проверка: при  $t = 0$   $u_L(0) = U$ ; при  $t = \infty$   $u_L(\infty) = 0$ .

В цепи с одним накопителем энергии кривые тока и напряжения изменяются монотонно; колебательные процессы отсутствуют.

5.2.2 Замыкание цепи с последовательным соединением  $R$  и  $L$  накоротко.

**Задача 2.** Дано:  $U$ ,  $R$ ,  $L$ . Определить:  $i(t)$  и  $u_L(t)$  при переходном процессе (рисунок 20).



а – до коммутации; б – после коммутации

Рисунок 20 – Цепь с последовательным соединением  $R$  и  $L$  накоротко

**Решение**

Производим коммутацию и запускаем переходный процесс. Уравнение 2-го закона Кирхгофа  $U = u_R + u_L$ .

*Аналитическое решение*

1 Составляем дифференциальное уравнение по 2-му закону Кирхгофа для цепи, образовавшейся после коммутации:

$$u_R + u_L = 0; L \frac{di}{dt} + Ri = 0.$$

2 Его общий интеграл (искомый ток  $i$ ) имеет одну составляющую:

$$i = i_{c\theta} = Ae^{pt},$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p^{c\theta}$  – корень характеристического уравнения:  $R + pL = 0$ . Следовательно,

$$p = -\frac{R}{L}.$$

3 Промежуточный ответ:  $i = Ae^{-\frac{R}{L}t}$ .

4 Определяем  $A$ , полагая в этом уравнении  $t = 0$ :  $i(0+) = A$ .

Для данного примера  $i(0_+) = i(0_-) = \frac{U}{R}$ .

Таким образом,  $A = \frac{U}{R}$ .

5 Окончательный ответ.

Искомый ток  $i = \left(\frac{U}{R}\right)e^{-\frac{R}{L}t}$ .

Проверка: при  $t = 0$   $i(0_+) = \frac{U}{R}$ ; при  $t = \infty$   $i(\infty) = 0$ .

6 Напряжение на индуктивности

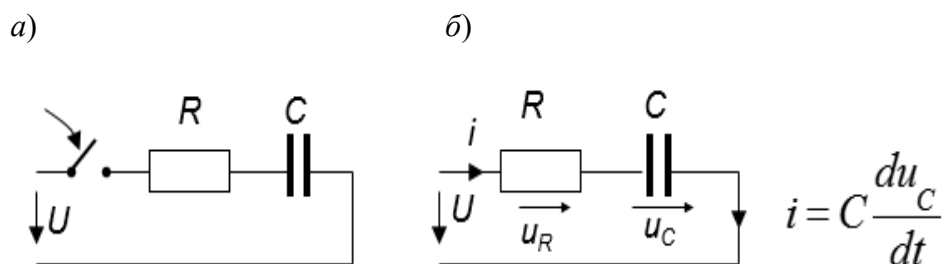
$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} \left[ \left(\frac{U}{R}\right) \left(-\frac{R}{L}\right) e^{-\frac{R}{L}t} \right] = -Ue^{-\frac{R}{L}t}.$$

Проверка: при  $t = 0$   $u_L(0+) = -U$ ; при  $t = \infty$   $u_L(\infty) = 0$ .

Заметим, что в цепи с одним накопителем энергии кривые тока и напряжения изменяются монотонно; колебательные процессы отсутствуют.

*5.2.3 Включение цепи с последовательным соединением  $R$  и  $C$  на постоянное напряжение.*

**Задача 3.** Дано:  $U, R, C$ . Определить:  $i(t)$  и  $u_C(t)$  при переходном процессе (рисунок 21).



*a* – до коммутации; *б* – после коммутации

Рисунок 21 – Цепь с последовательным соединением  $R$  и  $C$  на постоянное напряжение

*Решение*

Производим коммутацию и запускаем переходный процесс.  
Уравнение 2-го закона Кирхгофа  $U = u_R + u_C$ .

*Аналитическое решение*

1 Составляем дифференциальное уравнение по 2-му закону Кирхгофа для цепи, образовавшейся после коммутации:

$$u_R + u_C = Ri + u_C = 0,$$

где  $i = C \frac{du_C}{dt}$ .

$$\text{Тогда } U = CR \left( \frac{du_C}{dt} \right) + u_C.$$

Заметим, что в цепях с емкостью дифференциальное уравнение составляется относительно неизвестного напряжения на емкости  $u_C$ .

2 Общий интеграл этого уравнения  $u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв}$ .

Здесь принужденная составляющая  $u_{Cnp} = u_{Cуст} = U$ .

Свободная составляющая

$$u_{Cсв} = Ae^{pt},$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение цепи  $CRp + 1 = 0$ .

Его корень  $p = -\frac{1}{CR}$ .

3 Промежуточный ответ:  $u_C = U + Ae^{pt} = U + Ae^{-\frac{1}{CR}t}$ .

4 Постоянную  $A$  определяем при  $t = 0$ :  $u_C(0_+) = U + A$ .

Тогда  $A = u_C(0_+) - U$ .

Для данного примера  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$ .

Следовательно,  $A = -U$ .

5 Окончательный ответ:  $u_C = U - Ue^{-\frac{1}{CR}t} = U\left(1 - e^{-\frac{1}{CR}t}\right)$ .

Проверка: при  $t = 0$   $u_C(0_+) = U(1 - 1) = 0$ ; при  $t = \infty$   
 $u_C(\infty) = u_{Cуст} = U(1 - 0) = U$ .

6 Ток цепи (в емкости)

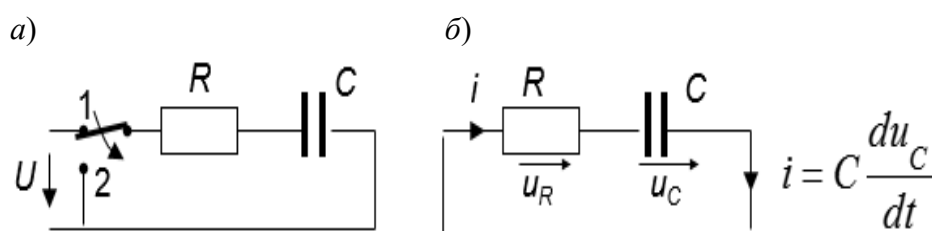
$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left( U - Ue^{-\frac{1}{CR}t} \right) = C \left[ (-U) \left( -\frac{1}{CR} \right) e^{-\frac{1}{CR}t} \right] = \frac{U}{R} e^{-\frac{1}{CR}t}.$$

Проверка: при  $t = 0$   $i_C(0_+) = \frac{U}{R}$ ; при  $t = \infty$   $i_C(\infty) = 0$ .

В цепи с одним накопителем энергии кривые тока и напряжения изменяются монотонно; колебательные процессы отсутствуют.

5.2.4 Замыкание цепи с последовательным соединением  $R$  и  $C$  накоротко.

**Задача 4.** Дано:  $U, R, C$ . Определить:  $i(t)$  и  $u_C(t)$  при переходном процессе (рисунок 22).



$a$  – до коммутации;  $b$  – после коммутации

Рисунок 22 – Цепь с последовательным соединением  $R$  и  $C$  накоротко

*Решение*

Производим коммутацию и запускаем переходный процесс. Уравнение 2-го закона Кирхгофа  $U = u_R + u_C$ .

*Аналитическое решение*

1 Составляем дифференциальное уравнение по 2-му закону Кирхгофа для цепи, образовавшейся после коммутации:

$$u_R + u_C = Ri + u_C = CR \frac{du_C}{dt} + u_C = 0.$$

2 Его общий интеграл  $u_C$  имеет одну составляющую:

$$u_C = u_{Ccb} = Ae^{pt},$$



где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения  $CRp + 1 = 0$ .

Следовательно,  $p = -\frac{1}{CR}$ .

3 Промежуточный ответ:  $u_C = Ae^{-\frac{1}{CR}t}$ .

4 Определяем  $A$ , полагая в уравнении  $t = 0$ :  $u_C(0_+) = A$ .

Для данного примера  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = U$ .

Таким образом,  $A = U$ .

5 Окончательный ответ:  $u_C(t) = Ue^{-\frac{1}{CR}t}$ .

Проверка: при  $t = 0$   $u_C(0_+) = U$ ; при  $t = \infty$   $u_C(\infty) = u_{C_{уст}} = 0$ .

6 Ток цепи (в емкости)

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left( Ue^{-\frac{1}{CR}t} \right) = C \left[ (U) \left( -\frac{1}{CR} \right) e^{-\frac{1}{CR}t} \right] = -\frac{U}{R} e^{-\frac{1}{CR}t}.$$

Проверка: при  $t = 0$   $i_C(0_+) = -\frac{U}{R}$ ; при  $t = \infty$   $i_C(\infty) = 0$ .

**5.2.5 Электромагнитная постоянная времени. Практическая длительность переходного процесса.**

С помощью  $\tau$  определяют практическую длительность переходного процесса:

$$\tau = \left| \frac{1}{p} \right|.$$

Тогда во всех примерах  $e^{pt} = e^{-\frac{t}{\tau}}$ .

Через время  $t = (4 \dots 5)\tau$  после начала переходного процесса этот переходный процесс практически завершается.

Ток цепи (в емкости)  $e \approx 2,71$  (неперово число).

### 5.3 Самостоятельная работа

Решить задачи на переходные процессы в цепях постоянного тока, рекомендованные преподавателем.

## 6 Практическое занятие № 6. Полупроводниковые диоды и расчет электронных устройств на их основе

**Задача.** Расчет однофазного неуправляемого выпрямителя.

Разработать схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах с индуктивно-емкостным LC-фильтром для выпрямления однофазного синусоидального напряжения. Исходные данные к задаче (напряжение сети  $U_1$ , номинальное напряжение нагрузки  $U_d$ , номинальная мощность нагрузки  $P_d$ ,

допустимый коэффициент пульсаций  $K_n$  приведены в таблице 2. Частота питающего напряжения  $f = (50 \text{ Гц} - \text{группа } \text{№} 1; 100 \text{ Гц} - \text{группа } \text{№} 2; 400 \text{ Гц} - \text{группа } \text{№} 3; 60 \text{ Гц} - \text{группа } \text{№} 4)$ . Необходимо выбрать тип вентиля, трансформатора, рассчитать параметры фильтра. Описать принцип работы схемы, осуществить моделирование её работы в среде Multisim.

Таблица 2 – Исходные данные к задаче

Номер варианта	$U_1, \text{В}$	$U_d, \text{В}$	$P_d, \text{Вт}$	$K_n, \%$
1	2	3	4	5
1	220	12	20	0,1
2	220	24	35	0,2
3	220	36	45	0,3
4	110	40	40	0,4
5	110	24	10	0,5
6	220	18	50	0,6
7	220	15	30	0,4
8	110	12	25	0,8
9	110	36	30	0,9
10	110	24	15	1,0
11	220	12	60	0,8
12	110	24	25	0,3
13	220	36	45	0,2
14	220	40	30	0,4
15	110	24	20	0,5
16	220	18	55	0,1
17	110	15	10	0,1
18	110	12	20	0,9
19	220	36	60	0,2
20	220	24	65	0,4
21	220	12	70	0,3
22	110	24	30	0,7
23	110	36	15	0,1
24	220	40	45	0,3
25	220	24	35	0,4
26	110	18	25	0,5
27	110	15	30	0,6
28	110	12	45	0,9
29	220	36	80	0,7
30	110	24	25	0,5
31	220	50	30	0,7

*Пример решения задачи.*

Схема однофазного мостового выпрямителя с LC-фильтром приведена на рисунке 23. Принцип ее работы описан в [4].

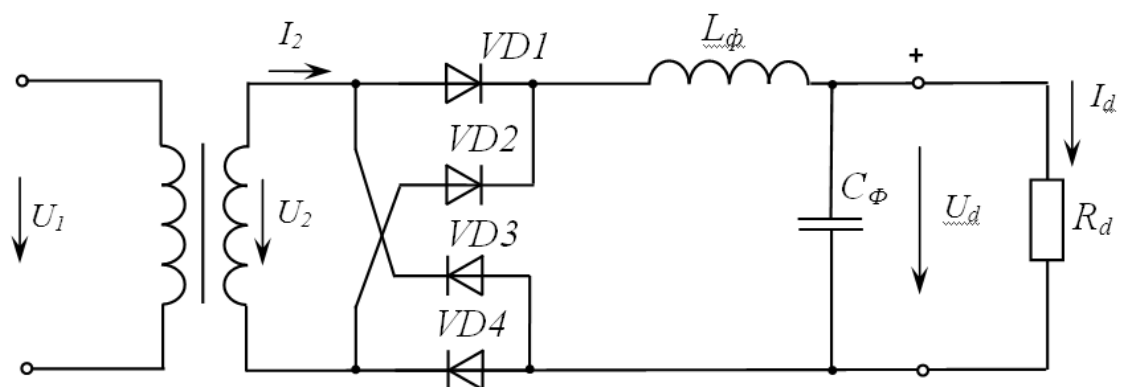


Рисунок 23 – Схема однофазного мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным LC-фильтром

Ток нагрузки:

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{30}{50} = 0,6 \text{ А.}$$

Сопротивление нагрузки

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{50}{0,6} = 83,3 \text{ Ом.}$$

Для однофазного мостового выпрямителя среднее значение прямого тока через вентиль (выпрямительный диод) определяется как

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ А.}$$

Обратное максимальное напряжение на вентиле равно:

$$U_{a \text{ обр. max}} = 1,57 \cdot U_d = 1,57 \cdot 50 = 78,5 \text{ В.}$$

Выбираем вентили (выпрямительные диоды) 1N4934 (таблица А.1, рисунок А.1 или электронный справочник по полупроводниковым приборам – файл «INQUIRY.EXE») с параметрами:

- максимальный прямой ток  $I_{np \text{ max}} = 1 \text{ А} > I_a = 0,3 \text{ А}$ ;
- максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр \text{ max}} = 100 \text{ В} > U_{a \text{ обр max}} = 78,5 \text{ В}$ ;
- максимальное напряжение в открытом состоянии  $U_{np \text{ max}} = 1,1 \text{ В}$ .

Для однофазного мостового выпрямителя действующее значение вторичного напряжения равно:

$$U_2 = 1,11 \cdot U_d + 2 \cdot U_{np \text{ max}} = 1,11 \cdot 50 + 2 \cdot 1,1 = 57,5 \text{ В.}$$

Расчетная мощность трансформатора определяется как

$$S_{расч} = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 30 = 36,9 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Выбираем трансформатор (электронный справочник – файл «Силловые трансформаторы.pdf») ТПП 271-127/220-50:

$$S_{ном} = 57,0 \text{ В}\cdot\text{А} > S_{расч} = 36,9 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

При последовательном соединении вторичных обмоток А, Б, В, Г получаем  $U_2 = 9,95 + 10 + 20 + 20 = 59,95 \text{ В}$ .

Тогда коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{59,95} = 3,67.$$

Коэффициент пульсации на выходе однофазного мостового выпрямителя  $K_n = 0,67$ .

Требуемый коэффициент пульсации  $K_n = 0,007$ .

Коэффициент сглаживания фильтра:

$$S = \frac{K_n}{K_n} = \frac{0,67}{0,007} = 95,71.$$

Для LC-фильтра

$$L_\phi C_\phi = \frac{S_{LC} + 1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot m)^2} = \frac{96,71}{(2\pi \cdot 50 \cdot 2)^2} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}\cdot\text{Ф},$$

где  $m$  – число пульсов выпрямленного напряжения за период.

Зададимся  $C_\phi = 200 \text{ мкФ}$ . Тогда

$$L_\phi = \frac{L_\phi C_\phi}{C_\phi} = \frac{2,45 \cdot 10^{-4}}{200 \cdot 10^{-6}} \approx 1,23 \text{ Гн}.$$

Параметры фильтра  $C_\phi = 200 \text{ мкФ}$ ,  $L_\phi = 1,23 \text{ Гн}$  удовлетворяют условиям эффективной работы:

$$\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot m \cdot C_\phi} \ll R_d; \quad 2\pi \cdot f \cdot m \cdot L_\phi \gg R_d.$$

$$7,96 \ll 83,3; \quad 770,02 \gg 83,3.$$

Модель однофазного неуправляемого мостового выпрямителя с фильтром приведена на рисунке 24 (файл «Мостовой выпрямитель.ms11»).

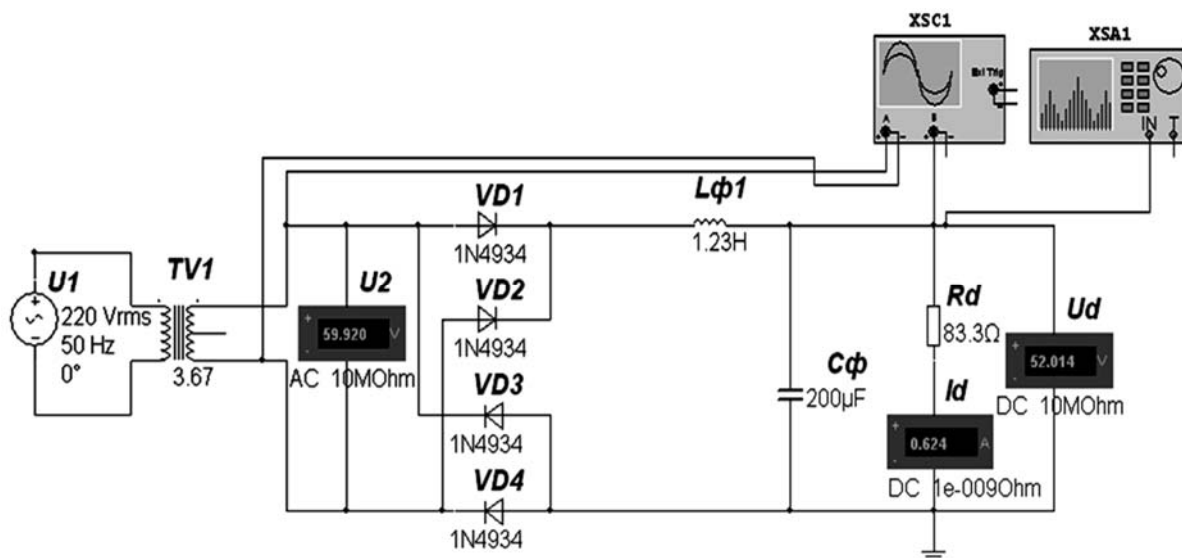


Рисунок 24 – Модель мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

Результаты моделирования:  $U_2 = 59,921$  В,  $I_d = 0,606$  А,  $U_d = 52,04$  В (задано  $U_d = 50$  В), что соответствует заданию.

Коэффициент пульсаций в нагрузке

$$K_H = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,36}{52,014} = 0,0069,$$

что удовлетворяет заданию  $K_H = 0,7\% \geq 0,0069 \cdot 100\%$ .

## 7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей

### 7.1 Основные теоретические положения

#### 7.1.1 Пример решения задачи.

**Задача.** На основе операционного усилителя КР140УД11 разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления  $K_u = 20$  и минимальным входным напряжением  $U_{вх\min} = 10$  мВ.

*Решение*

Параметры операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8) (таблица А.1, рисунок А.1):

- номинальное напряжение питания  $U_{пит\ ном} = \pm 15$  В;
- коэффициент усиления  $K_{u\ ОУ} = 30000$ ;

- максимально допустимое выходное напряжение  $U_{\text{выхmax}} = 12 \text{ В}$ ;
- разность входных токов  $\Delta I_{\text{ex}} = 0,2 \text{ мкА}$ ;
- входное сопротивление  $R_{\text{ex}} = 0,4 \text{ МОм}$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки  $R_{H \text{ min}} = 2 \text{ кОм}$ .

Разработанная схема инвертирующего усилителя низкой частоты приведена на рисунке 25 (цепи балансировки нуля  $NC$  и частотной коррекции  $FC$  не используются).

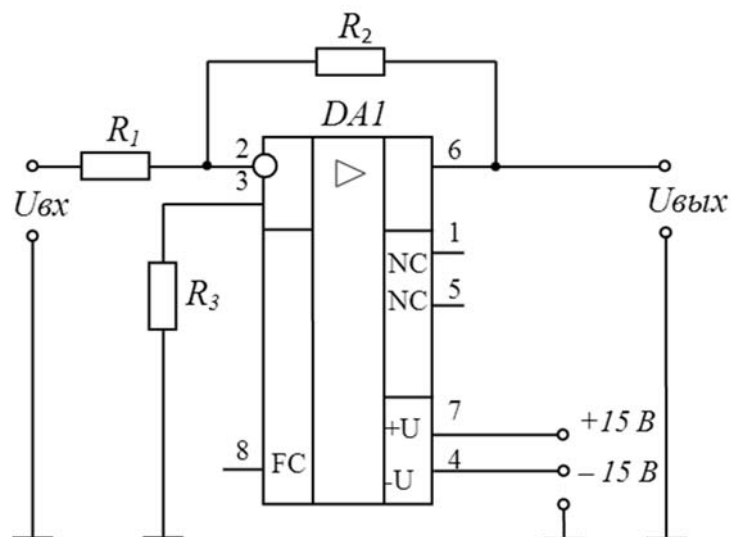


Рисунок 25 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ КР140УД11

Для инвертирующего усилителя на ОУ входное сопротивление  $R_{\text{ex}} = R_1$ . Чтобы не загружать источники сигнала, величину  $R_1$  желательно иметь большой. Но падение напряжения на  $R_1$  от разностного тока  $\Delta I_{\text{ex}}$  воспринимается усилителем как сигнал. Чтобы отстроить эту помеху от полезного сигнала, надо иметь  $\Delta I_{\text{ex}} \cdot R_1$  значительно меньше, чем  $U_{\text{exmin}}$ .

$$\frac{U_{\text{ex min}}}{\Delta I_{\text{ex}}} = \frac{10}{0,2} = 50 \text{ кОм} \gg R_1.$$

Принимаем из стандартного ряда E24 (приложение Б)  $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$ , тогда

$$\Delta I_{\text{ex}} \cdot R_1 = 0,2 \cdot 5,1 = 1 \text{ мВ} \ll U_{\text{exmin}} = 10 \text{ мВ}.$$

Сопротивление обратной связи

$$R_2 = K_u \cdot R_1 = 20 \cdot 5,1 = 102 \text{ кОм}.$$

Принимаем по ряду E24  $R_2 = 100 \text{ кОм}$ .

Для уравнивания входных токов ОУ по обоим входам в цепь неинвертирующего входа включают резистор  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5,1 \cdot 100}{5,1 + 100} = 4,85 \text{ кОм.}$$

Принимаем по ряду E24  $R_3 = 4,7 \text{ кОм.}$

Амплитуда выходного сигнала не может быть больше максимального выходного напряжения (для данного типа ОУ – 12 В). Поэтому действующее значение максимального входного синусоидального сигнала составит:

$$U_{\text{ex.max}} = \frac{U_{\text{вых.max}}}{\sqrt{2} \cdot K_U} = \frac{12}{\sqrt{2} \cdot 20} = 0,42 \text{ В.}$$

Модель инвертирующего усилителя на ОУ в среде Multisim приведена на рисунке 26. Результаты моделирования при напряжении, не превышающем  $U_{\text{ex.max}}$ :  $U_{\text{ex}} = 0,2 \text{ В}$ ;  $U_{\text{вых}} = 3,92 \text{ В}$ .

Коэффициент усиления  $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ex}}} = \frac{3,92}{0,2} = 19,6 \approx 20$ , что соответствует заданию.

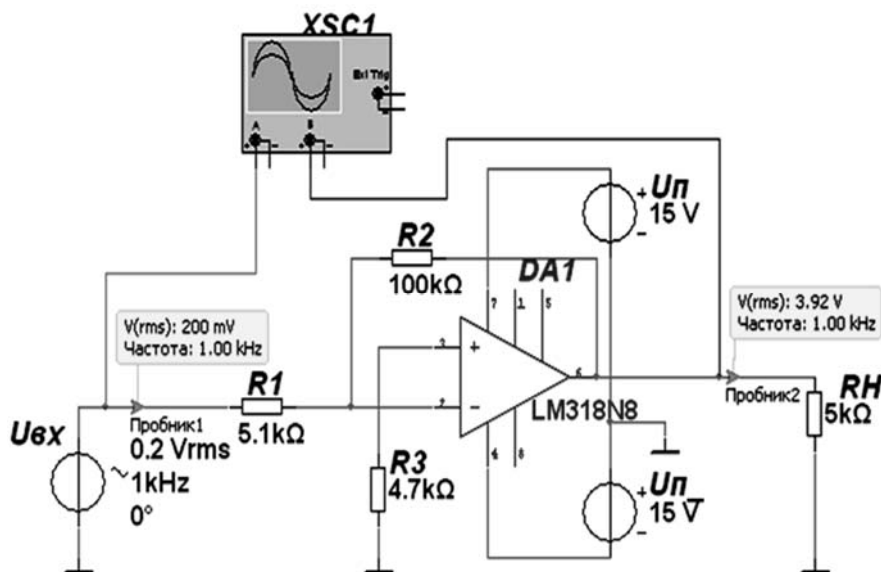
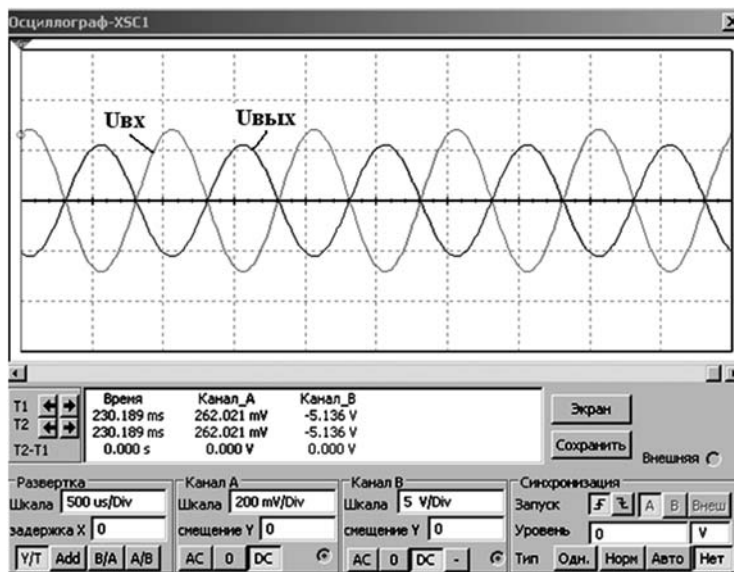


Рисунок 26 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ

Временные диаграммы работы усилителя при различных уровнях входного сигнала представлены на рисунке 27. Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  смещено относительно входного  $U_{\text{ex}}$  на  $180^\circ$  (инвертирующий усилитель). При входном напряжении  $U_{\text{ex}} = 1 \text{ В}$ , превышающем  $U_{\text{ex.max}}$ , наблюдается ограничение выходного напряжения на уровне  $U_{\text{выхmax}} = 12 \text{ В}$  (рисунок 27).

а)



б)

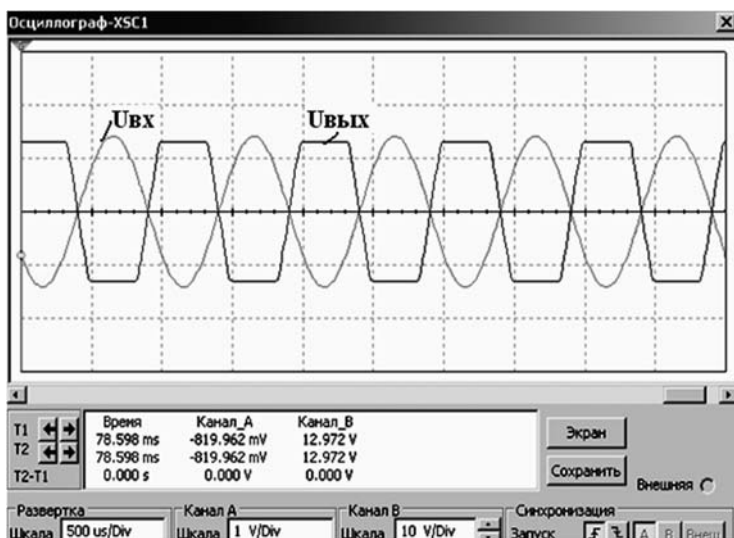


Рисунок 27 – Временные диаграммы работы инвертирующего усилителя на ОУ при входном напряжении  $U_{вхmax} = 0,2 \text{ В}$  (а) и  $U_{вхmax} = 1 \text{ В}$  (б)

## 7.2 Самостоятельная работа

**Задача.** Расчет инвертирующего усилителя низкой частоты на базе операционного усилителя.

На основе заданного операционного усилителя разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления  $K_u$  и минимальным входным напряжением  $U_{вхmin}$ . Исходные данные приведены в таблице 3. Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала  $U_{вхmax}$ , при котором не будет значительных искажений выходного сигнала. Описать работу схемы, осуществить моделирование её работы при  $U_{вхmin} < U_{вх1} < U_{вхmax}$  и  $U_{вх2} > U_{вхmax}$ .



Таблица 3 – Исходные данные к задаче

Номер варианта	Тип операционного усилителя	$K_u$
1	КР140УД7 ( $\mu$ A741CD)	10
2	КР140УД11 (LM318N8)	12
3	КР140УД14 (LM308AM8)	14
4	КР1408УД1 (LM343H)	16
5	КР140УД18 (LF355BN)	18
6	К140УД10 (LM118P)	20
7	КР140УД7 ( $\mu$ A741CD)	22
8	КР140УД11 (LM318N8)	24
9	КР140УД14 (LM308AM8)	26
10	КР1408УД1 (LM343H)	28
11	КР140УД18 (LF355BN)	30
12	К140УД10 (LM118P)	32
13	КР140УД7 ( $\mu$ A741CD)	34
14	КР140УД11 (LM318N8)	36
15	КР140УД14 (LM308AM8)	38
16	КР1408УД1 (LM343H)	40
17	КР140УД18 (LF355BN)	42
18	К140УД10 (LM118P)	44
19	КР140УД7 ( $\mu$ A741CD)	46
20	КР140УД11 (LM318N8)	48
21	КР140УД14 (LM308AM8)	50
22	КР1408УД1 (LM343H)	52
23	КР140УД18 (LF355BN)	54
24	К140УД10 (LM118P)	56
25	КР140УД7 ( $\mu$ A741CD)	58

### **Контрольные вопросы**

- 1 Дайте определение понятию операционный усилитель, изобразите его условно-графическое обозначение.
- 2 Какие внешние условия влияют на работу ОУ?
- 3 Охарактеризуйте область применения ОУ.
- 4 Приведите основные характеристики ОУ.
- 5 Какие усилительные схемы, использующие ОУ, вы знаете?

## **8 Практическое занятие № 8. Реализация устройств на основе логических элементов**

**Задача.** Разработка устройства на логических элементах.

Разработать устройство управления механизмом на логических элементах серии (К555 (74LS) – группа № 1; К561 (CD40xx) – группа № 2; К564 (CD40xx) – группа № 3; К1533 (74ALS) – группа № 4), работа которого контролируется по пяти параметрам. Параметры могут принимать значение 0 и 1. Значения параметров определяются десятичным числом, соответствующим

варианту задания. При несовпадении хотя бы одного из параметров механизм отключается. Составить схему управления механизмом, используя только логические элементы 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ. Осуществить моделирование работы схемы при комбинации логических сигналов на входах, соответствующих включенному состоянию механизма. Описать работу схемы.

*Пример решения задачи (вариант 28)*

Заданное десятичное число 28 преобразуем в двоичное: 11010. Нормальное значение параметров:  $X_5 = 1, X_4 = 1, X_3 = 0, X_2 = 1, X_1 = 0$ .

Так как  $F = 1$  только для одного состояния параметров, то логическая функция будет содержать только один минтерм:

$$F = X_1 \cdot X_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot X_4 \cdot \bar{X}_5.$$

Используемые логические элементы выполняют следующие функции:

$$2И - НЕ \quad F_1 = \overline{X_1 \cdot X_2};$$

$$2ИЛИ - НЕ \quad F_2 = \overline{X_1 + X_2}.$$

Преобразуемая функция  $F$  содержит пять переменных, а у каждого из логических элементов можно использовать не более двух входов. Поэтому надо произвести декомпозицию функции  $F$ , т. е. представить ее в виде набора функций  $F_1$  и  $F_2$ , каждая из которых должна содержать не более двух переменных. Подобные преобразования проводят, используя законы и теоремы алгебры и логики. Применяв закон ассоциативности, исходную функцию представим в следующем виде:

$$F = X_1 \cdot X_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot X_4 \cdot \bar{X}_5 = X_1 \cdot X_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot \bar{X}_5 \cdot X_4.$$

Выполнив операцию двойного отрицания каждого члена и используя теорему де-Моргана  $\overline{\bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2} = \overline{\bar{X}_1} + \overline{\bar{X}_2}$ , получим

$$F = \overline{\overline{X_1 \cdot X_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot \bar{X}_5 \cdot X_4}} = \overline{\overline{X_1 \cdot X_2} + \overline{\bar{X}_3 \cdot \bar{X}_5 \cdot X_4}}.$$

В такой форме функция  $F$  может быть реализована на заданных элементах серии К555 (74LS). Для реализации схемы требуется четыре логических элемента: два элемента 2И-НЕ – DD1, микросхема К555ЛА3 (74LS00) содержит четыре элемента в одном корпусе, два элемента 2ИЛИ-НЕ – DD2, микросхема К555ЛЕ1 (74LS02) содержит четыре элемента в одном корпусе.

Модель разработанной схемы реализации логической функции в среде Multisim

(файл «Логическая функция.ms11») приведена на рисунке 28.

Для проверки работы схемы на входах  $X_1 \dots X_5$  указаны значения переменных, задаваемых с помощью соответствующих ключей (уровню логической единицы соответствует напряжение 5 В (VCC), а уровню логического нуля – напряжение 0 В (GND)). Значение функции  $F = 1$  и промежуточных функций контролируется логическими пробниками. Легко проверить, что при любом другом наборе переменных  $F = 0$ .

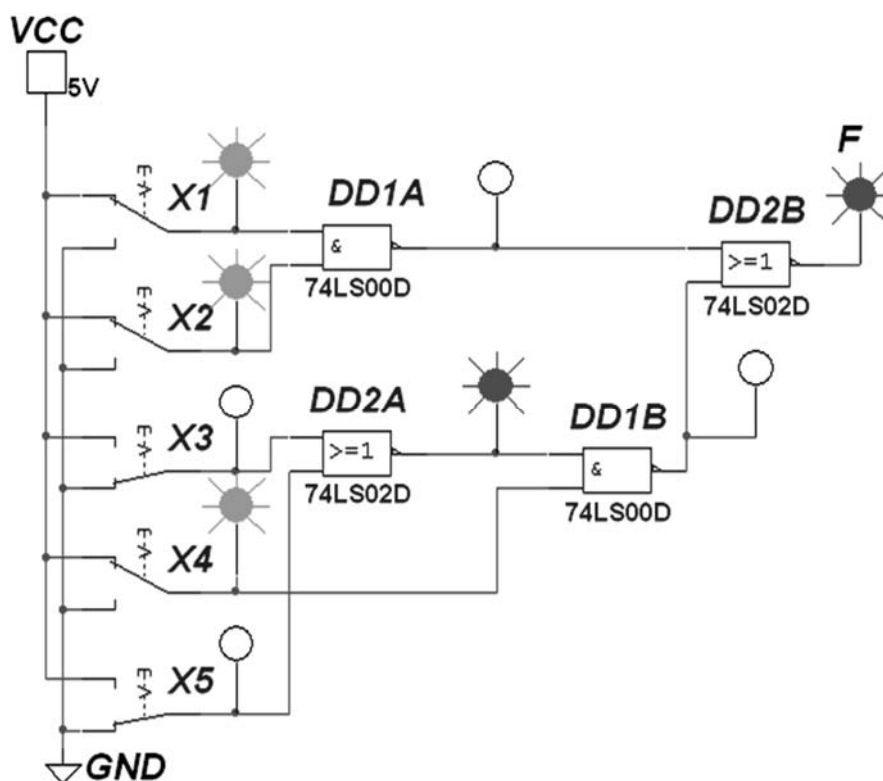


Рисунок 28 – Модель устройства управления механизмом на логических элементах серии 74LS

### **Контрольные вопросы**

- 1 Назовите способы задания логических функций.
- 2 Классификация логических элементов.
- 3 Параметры цифровых интегральных микросхем.

## Список литературы

1 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника : учебник 1 : в 2 т. Том 1: Электротехника / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опадчий. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 574 с.

2 **Миленина, С. А.** Электротехника, электроника и схемотехника : учебник и практикум для академ. бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. – Москва : Юрайт, 2015. – 399 с.

3 **Иванов, И. И.** Электротехника: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. А. Фролов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2012. – 736 с.

4 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim: учебное пособие / А. Л. Марченко, С. В Освальд. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

5 **Рыбков, И. С.** Электротехника : учебное пособие / И. С. Рыбков. – Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2013. – 160с.

6 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: курсовые работы с методическими указаниями и примерами / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опадчий. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 126 с.

7 **Касаткин, А. С.** Курс электротехники: учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., стереотип. – Москва : Высшая школа, 2005. – 541 с.

8 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim: учебное пособие / А. Л. Марченко, С. В Освальд. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

9 Сборник задач по электротехнике и электронике / Под общ. ред. Ю В. Бладыко. – Минск. : Высшэйшая школа, 2012. – 478 с.

## Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Параметры операционных усилителей

Тип операционного усилителя	$U_{пит\ ном}$ , В	$K_U$	$U_{вых\max}$ , В	$\Delta I_{ex}$ , мкА	$R_{ex}$ , МОм	$R_{нmin}$ , кОм	$V_u$ , В/мкс
КР140УД11	$\pm 15$	30000	12	0,2	0,4	2	50
КР140УД7	$\pm 15$	50000	10,5	0,05	0,4	2	0,3
КР140УД14Б	$\pm 15$	25000	12	0,001	10	1	0,05
КР1408УД1	$\pm 27$	70000	18	0,01	1	2	2
КР140УД18	$\pm 15$	50000	11	0,0002	10	2	5
К140УД10	$\pm 15$	50000	12	0,4	2	30	

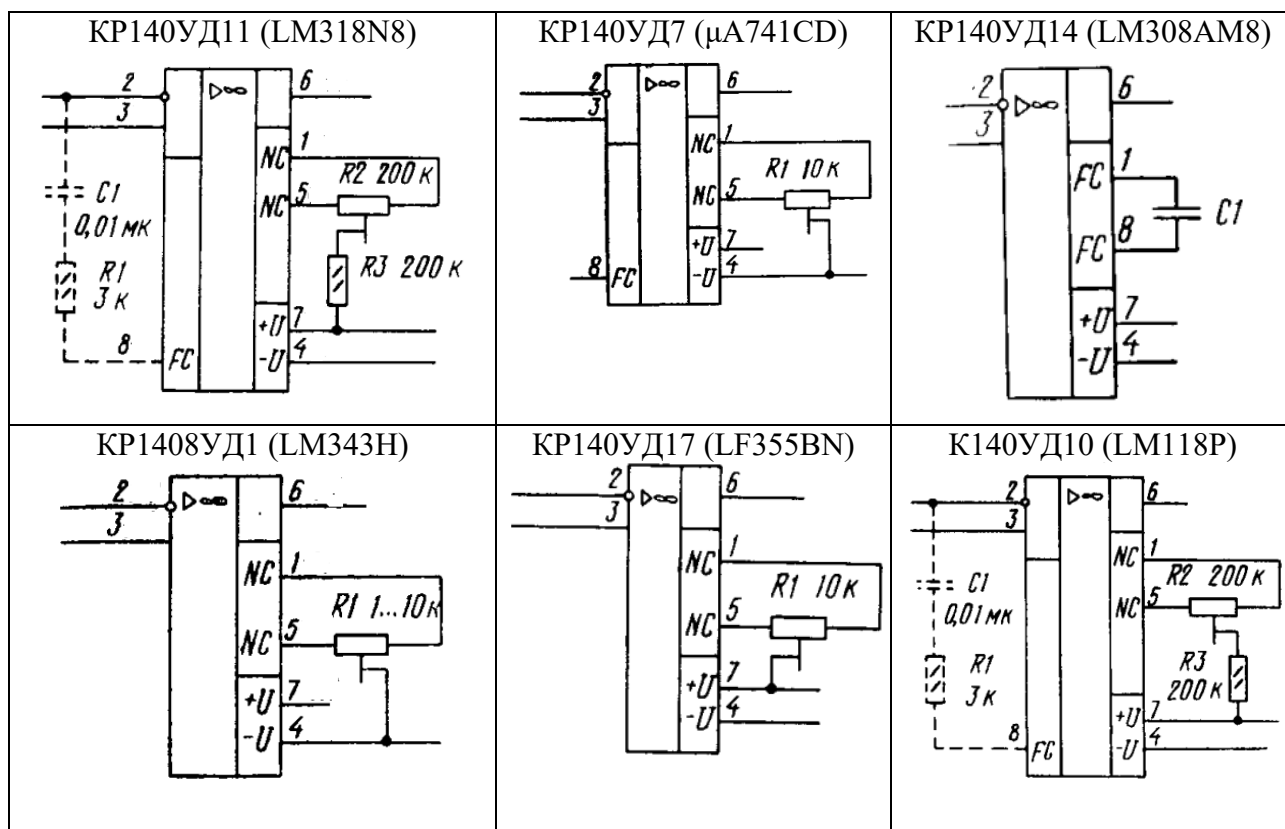


Рисунок А.1 – Схемы усилителей

## 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) · 10<sup>n</sup>,

где  $n = -2; -1; 0; 1; 2; 3$  и т. д.