

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации  
к практическим занятиям для студентов направления  
подготовки 15.03.01 «Машиностроение»  
очной формы обучения*



Могилев 2021

УДК 621.3  
ББК 32.85  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «б» января 2021 г.,  
протокол № 5

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

Рецензент Б. Б. Скарыно

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине  
«Электротехника и электроника» предназначены для студентов направления  
подготовки 15.03.01 «Машиностроение» очной формы обучения.

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
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, 2021

## Содержание

1 Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с одним источником питания.....	4
2 Практическая занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками питания .....	6
3 Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником питания.....	10
4 Практическое занятие № 4. Анализ сложных электрических цепей переменного тока с несколькими источниками питания при помощи комплексных чисел.....	13
5 Практическое занятие № 5. Анализ простейших трёхфазных цепей с помощью комплексных чисел.....	19
6 Практическое занятие № 6. Анализ простейших трёхфазных цепей с помощью комплексных чисел.....	22
7 Практическое занятие № 7. Расчет параметров трансформатора....	25
8 Практическое занятие № 8. Расчёт схем на основе полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов.....	28
Список литературы.....	40
Приложение А. Параметры выпрямительных диодов.....	41
Приложение Б. Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов.....	41
Приложение В. Параметры биполярных транзисторов.....	41
Приложение Г. Параметры полевых транзисторов.....	41

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

**Задача 1.** Определить токи в ветвях схемы (рисунок 1.1), мощность  $P$ , потребляемую электрической цепью. Исходные данные к задаче (напряжение на зажимах цепи  $U$ , сопротивления резисторов  $R_1 \dots R_6$ ) приведены в таблице 1.1. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

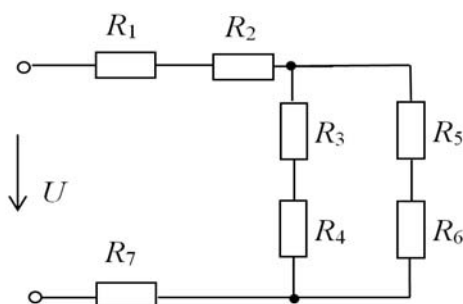


Рисунок 1.1 – Схема электрической цепи к задаче 1

Таблица 1.1 – Исходные данные к задаче 1

Номер варианта	$U$ , В	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$R_7$ , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	10	10	20	–	20	–	–
2	10	10	–	20	–	20	–	10
3	10	10	10	10	–	10	–	5
4	10	10	–	10	10	20	–	–
5	10	10	10	20	20	40	–	10
6	10	10	–	10	–	5	5	5
7	10	10	10	10	10	10	10	5
8	10	10	–	20	20	20	20	10
9	10	10	10	–	10	–	10	5
10	10	10	–	–	20	10	10	20
11	50	10	10	20	–	20	–	–
12	50	10	–	20	–	20	–	10
13	50	10	10	10	–	10	–	5
14	50	10	–	10	10	20	–	–
15	50	10	10	20	20	40	–	10
16	50	10	–	10	–	5	5	5
17	50	10	10	10	10	10	10	5
18	50	10	–	20	20	20	20	10
19	50	10	10	–	10	–	10	5
20	50	10	–	–	20	10	10	20
21	100	10	10	20	–	20	–	–
22	100	10	–	20	–	20	–	10
23	100	10	10	10	–	10	–	5
24	100	10	–	10	10	20	–	–
25	100	10	10	20	20	40	–	10

Окончание таблицы 1.1

Номер варианта	$U, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$	$R_7, Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
26	100	10	–	10	–	5	5	5
27	100	10	10	10	10	10	10	5
28	100	10	–	20	20	20	20	10
29	100	10	10	–	10	–	10	5
30	100	10	–	–	20	10	10	20

**Пример решения задачи 1.**

Определить токи в ветвях схемы (рисунок 1.2), мощность  $P$ , потребляемую электрической цепью.

Исходные данные к задаче:

– напряжение на зажимах цепи  $U = 20 В$ ;

– сопротивления резисторов  $R_1 = 10 Ом$ ,  $R_3 = 20 Ом$ ,  $R_5 = 10 Ом$ ,  $R_6 = 10 Ом$ .

Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

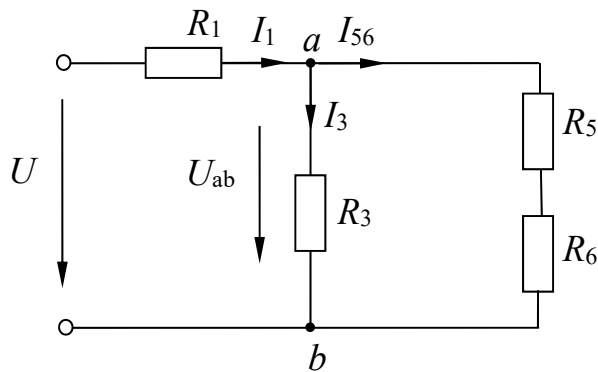


Рисунок 1.2 – Электрическая цепь постоянного тока с одним источником питания к задаче 1

Определим эквивалентное сопротивление схемы между узлами  $a$  и  $b$ :

$$R_{ab} = \frac{(R_5 + R_6) \cdot R_3}{R_5 + R_6 + R_3} = \frac{(10 + 10) \cdot 20}{10 + 10 + 20} = 10 \text{ Ом},$$

т. к. резисторы  $R_5$  и  $R_6$  соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором  $R_3$ .

Полное эквивалентное сопротивление схемы

$$R_э = R_{ab} + R_1 = 10 + 10 = 20 \text{ Ом}.$$

Ток  $I_1$  определяем по закону Ома:

$$I_1 = U / R_э = 20 / 20 = 1 \text{ А}.$$

Напряжение между точками  $a$  и  $b$  равно падению напряжения на сопротивлении  $R_{ab}$ :

$$U_{ab} = R_{ab} \cdot I_1 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ В.}$$

Ток  $I_3$  определяем по закону Ома:

$$I_3 = U_{ab} / R_3 = 10 / 20 = 0,5 \text{ А.}$$

Ток  $I_{56}$  определяем по первому закону Кирхгофа для узла  $a$ :

$$I_{56} = I_3 - I_1 = 1 - 0,5 = 0,5 \text{ А.}$$

Мощность, потребляемая электрической цепью,

$$P = U \cdot I_1 = 20 \cdot 1 = 20 \text{ Вт.}$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 1.3).

Показания измерительных приборов соответствуют расчётным значениям.

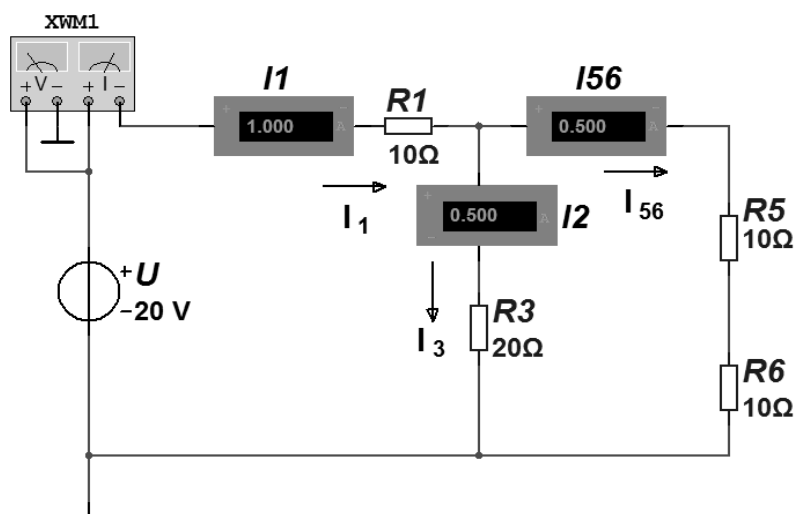


Рисунок 1.3 – Модель электрической цепи постоянного тока к задаче 1

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

**Задача 2.** Определить токи в ветвях схемы (рисунок 2.1). Исходные данные к задаче (ЭДС источников  $E_1 \dots E_3$ , внутренние сопротивления источников и нагрузки  $R_1 \dots R_3$ ) приведены в таблице 2.1. Задачу решить методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов. Проверить правильность расчёта по балансу мощностей. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

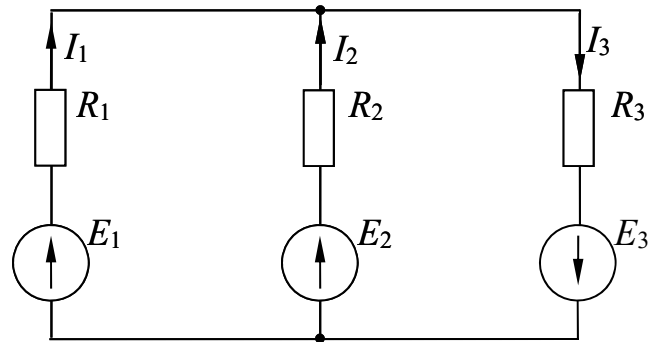


Рисунок 2.1 – Схема электрической цепи к задаче 2

Таблица 2.1 – Исходные данные к задаче 2

Номер варианта	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
1	2	3	4	5	6	7
1	12	24	–	2	3	10
2	12	24	–	1	2	10
3	12	24	–	0	2	10
4	12	24	–	0	3	10
5	12	24	–	2	0	10
6	12	24	–	1	0	10
7	12	–	12	1	20	1
8	12	–	12	2	10	2
9	24	–	24	2	10	2
10	24	–	24	3	10	3
11	6	–	6	1	20	1
12	6	–	6	2	20	2
13	24	12	–	2	3	10
14	24	12	–	1	2	10
15	24	12	–	0	2	10
16	24	12	–	0	3	10
17	24	12	–	2	0	10
18	24	12	–	1	0	10
19	24	–	12	2	10	1
20	6	–	12	1	10	2
21	12	–	24	1	20	2
22	12	–	6	2	20	1
23	24	–	12	2	10	0
24	6	–	12	0	20	2
25	–	24	12	10	2	1
26	–	6	12	10	1	2
27	–	12	24	20	1	2
28	–	12	6	20	2	1
29	–	24	12	10	2	0
30	–	6	12	20	0	2

**Пример решения задачи 2.**

Определить токи в ветвях схемы (рисунок 2.2).

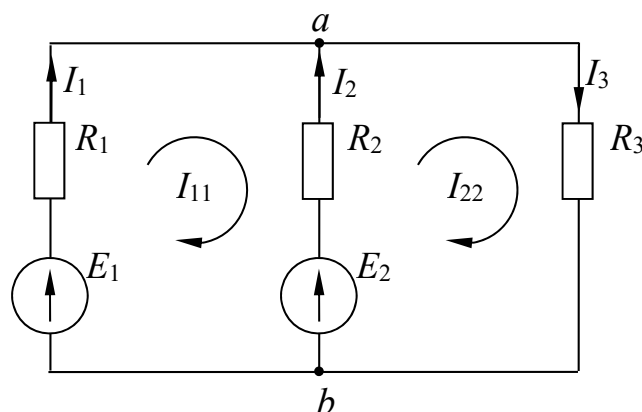


Рисунок 2.2 – Электрическая цепь постоянного тока с несколькими источниками питания к задаче 2

Исходные данные к задаче:

- ЭДС источников  $E_1 = 12$  В,  $E_2 = 6$  В;
- внутренние сопротивления источников  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = 1$  Ом;
- сопротивление нагрузки  $R_3 = 10$  Ом.

Задачу решить методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов. Проверить правильность расчёта по балансу мощностей. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

**Расчет электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.**

Число узлов  $\kappa = 2$ . Число ветвей  $n = 3$ .

Число уравнений по первому закону Кирхгофа

$$\kappa - 1 = 2 - 1 = 1.$$

Число уравнений по второму закону Кирхгофа

$$n - (\kappa - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

Число всех уравнений  $n = 3$ .

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

$$I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 = E_1 - E_2 - \text{контур } E_1, R_1, E_2, R_2;$$

$$I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 = E_2 - \text{контур } E_2, R_2, R_3.$$

Подставляем числовые значения:

$$1 \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + (-1) \cdot I_3 = 0;$$

$$2 \cdot I_1 + (-1) \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 = 6;$$

$$0 \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + 10 \cdot I_3 = 6.$$



Решить систему уравнений можно, используя численные методы, например, с помощью программы *Калькулятор* (рисунок 2.3).

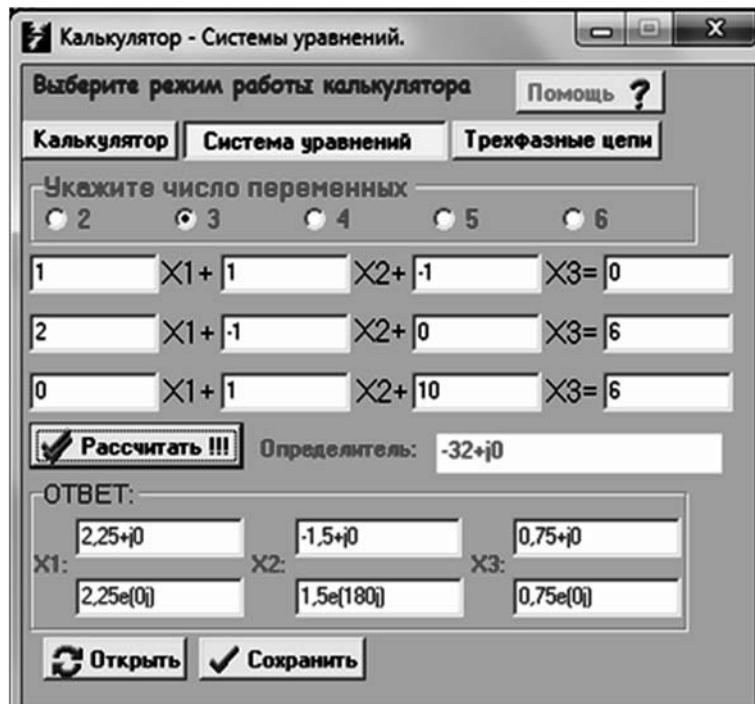


Рисунок 2.3 – Решение системы уравнений по законам Кирхгофа

$$I_1 = 2,25 \text{ A}; I_2 = -1,5 \text{ A}; I_3 = 0,75 \text{ A}.$$

Отрицательное значение тока  $I_2$  указывает на то, что в действительности он имеет противоположное направление и источник  $E_2$  работает в режиме потребителя.

### **Метод контурных токов.**

Количество уравнений

$$n - (k - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

Обозначение контурных токов:  $I_{11}, I_{22}$  (см. рисунок 2.2).

Система уравнений

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 + R_2) - I_{22} \cdot R_2 = E_1 - E_2; \\ -I_{11} \cdot R_2 + I_{22} \cdot (R_2 + R_3) = E_2. \end{cases}$$

Подставим числовые значения:

$$\begin{cases} 3 \cdot I_{11} - 1 \cdot I_{22} = 6; \\ -1 \cdot I_{11} + 11 \cdot I_{22} = 6. \end{cases}$$

Решая данную систему уравнений, определяем значения контурных токов:  $I_{11} = 2,25 \text{ A}; I_{22} = 0,75 \text{ A}.$

Находим значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_{11} = 2,25 \text{ A}; I_2 = I_{22} - I_{11} = 0,75 - 2,25 = -1,5 \text{ A}; I_3 = I_{22} = 0,75 \text{ A}.$$

Проверяем правильность расчета по балансу мощности:

$$\begin{aligned} E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3; \\ 12 \cdot 2,25 + 6 \cdot (-1,5) &= 2,25^2 \cdot 2 + (-1,5)^2 \cdot 1 + 0,75^2 \cdot 10; \\ 18 \text{ Вт} &= 18 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Баланс мощностей выполняется.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 2.4).

Показания измерительных приборов соответствуют расчётным значениям.

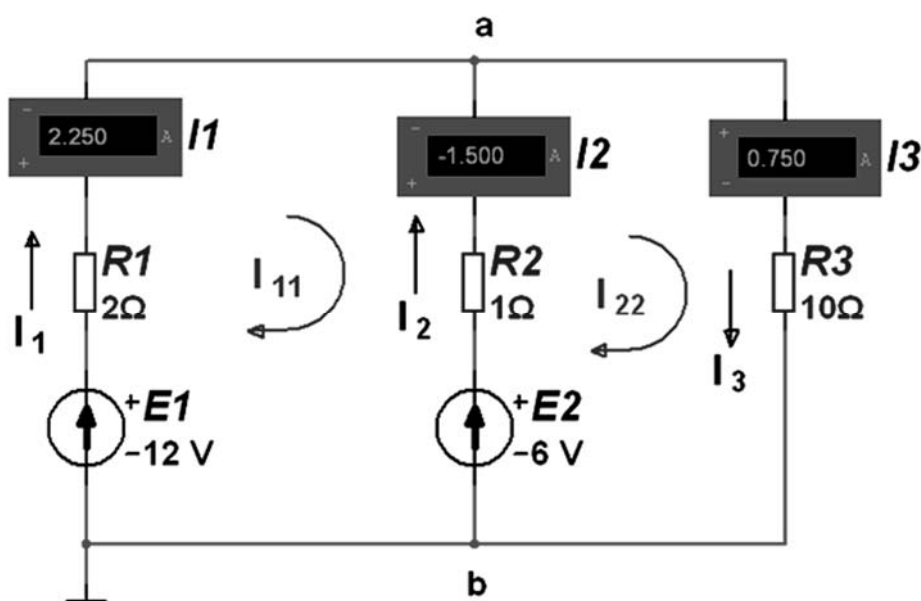


Рисунок 2.4 – Модель электрической цепи постоянного тока к задаче 2

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

**Задача 3.** Определить показание амперметра в цепи однофазного синусоидального тока (рисунок 3.1), напряжения на элементах и мощность всей цепи. Исходные данные к задаче (мгновенное значение напряжение на зажимах цепи, активные сопротивления  $R_1, R_2$ , индуктивности  $L_1, L_2$ , емкости  $C_1, C_2$ ) приведены в таблице 3.1. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

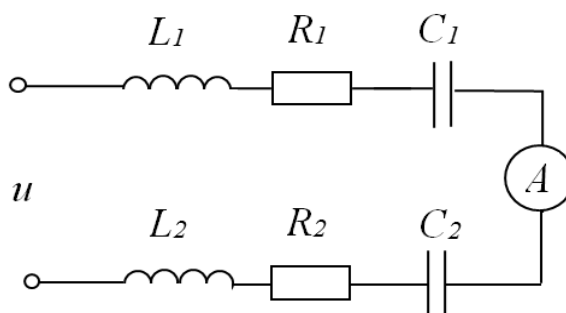


Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи к задаче 3

Таблица 3.1 – Исходные данные к задаче 3

Номер варианта	$u(t)$ , В	$R_1$ , Ом	$L_1$ , мГн	$C_1$ , мкФ	$R_2$ , Ом	$L_2$ , мГн	$C_2$ , мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$14,14 \sin 314t$	10	31,85	–	10	–	106,16
2	$14,14 \sin 314t$	10	95,54	–	10	–	318,47
3	$14,14 \sin 314t$	5	31,85	–	5	–	159,24
4	$14,14 \sin 314t$	5	63,69	–	5	–	318,47
5	$14,14 \sin 314t$	10	31,85	–	–	31,85	106,16
6	$14,14 \sin 314t$	10	31,85	–	–	31,85	318,47
7	$14,14 \sin 314t$	20	63,69	–	–	63,69	159,24
8	$14,14 \sin 314t$	20	63,69	159,24	–	63,69	159,24
9	$14,14 \sin 314t$	30	31,85	159,24	–	–	159,24
10	$14,14 \sin 314t$	30	63,69	–	–	63,69	318,47
11	$28,28 \sin 314t$	10	31,85	–	10	–	106,16
12	$28,28 \sin 314t$	10	95,54	–	10	–	318,47
13	$28,28 \sin 314t$	5	31,85	–	5	–	159,24
14	$28,28 \sin 314t$	5	63,69	–	5	–	318,47
15	$28,28 \sin 314t$	10	31,85	–	–	31,85	106,16
16	$28,28 \sin 314t$	10	31,85	–	–	31,85	318,47
17	$28,28 \sin 314t$	20	63,69	–	–	63,69	159,24
18	$28,28 \sin 314t$	20	63,69	159,24	–	63,69	159,24
19	$28,28 \sin 314t$	30	31,85	159,24	–	–	159,24
20	$28,28 \sin 314t$	30	63,69	–	–	63,69	318,47
21	$36,42 \sin 314t$	10	31,85	–	10	–	106,16
22	$36,42 \sin 314t$	10	95,54	–	10	–	318,47
23	$36,42 \sin 314t$	5	31,85	–	5	–	159,24
24	$36,42 \sin 314t$	5	63,69	–	5	–	318,47
25	$36,42 \sin 314t$	10	31,85	–	–	31,85	106,16
26	$36,42 \sin 314t$	10	31,85	–	–	31,85	318,47
27	$36,42 \sin 314t$	20	63,69	–	–	63,69	159,24
28	$36,42 \sin 314t$	20	63,69	159,24	–	63,69	159,24
29	$36,42 \sin 314t$	30	31,85	159,24	–	–	159,24
30	$36,42 \sin 314t$	30	63,69	–	–	63,69	318,47

**Пример решения задачи 3.**

Определить показание амперметра в цепи однофазного синусоидального тока (рисунок 3.2), напряжения на элементах и мощность всей цепи.

Исходные данные к задаче:

- мгновенное значение напряжения на зажимах цепи  $u = 20\sin 314t$  В;
- активное сопротивление  $R_1 = 10$  Ом;
- индуктивность  $L_1 = 63,7$  мГн;
- емкость  $C_1 = 318,32$  мкФ.

Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

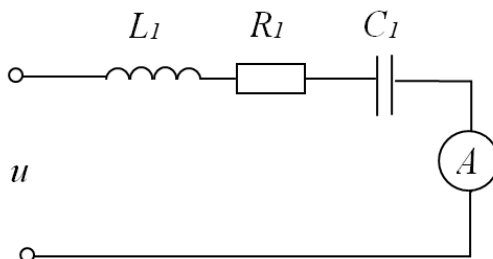


Рисунок 3.2 – Электрическая цепь однофазного синусоидального тока к задаче 3

Мгновенное значение напряжения на зажимах цепи

$$u = U_m \sin \omega t = 20 \sin 314t \text{ В,}$$

где  $U_m$  – максимальное значение питающего напряжения;

$\omega$  – угловая частота питающего напряжения, рад/с;

$\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота питающего напряжения, Гц.

Реактивные сопротивления элементов цепи

$$X_{L1} = \omega \cdot L_1 = 314 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом;}$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega \cdot C_1} = \frac{1}{314 \cdot 318,32 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2} = \sqrt{10^2 + (20 - 10)^2} = 14,14 \text{ Ом.}$$

Действующее значение напряжения на зажимах цепи

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14,14 \text{ В.}$$

Действующее значение тока в цепи (показание амперметра)

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{14,14}{14,14} = 1 \text{ А.}$$

Действующие значения напряжений на элементах цепи:

– на резисторе

$$U_{R1} = R_1 \cdot I = 10 \cdot 1 = 10 \text{ В;}$$

– на конденсаторе

$$U_{C1} = X_{C1} \cdot I = 10 \cdot 1 = 10 \text{ В};$$

– на индуктивности

$$U_{L1} = X_{L1} \cdot I = 20 \cdot 1 = 20 \text{ В}.$$

Полная мощность цепи

$$S = U \cdot I = 14,14 \cdot 1 = 14,14 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность цепи

$$P = I^2 \cdot R_1 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность цепи

$$Q = I^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) = 1 \cdot (20 - 10) = 10 \text{ вар}.$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 3.3).

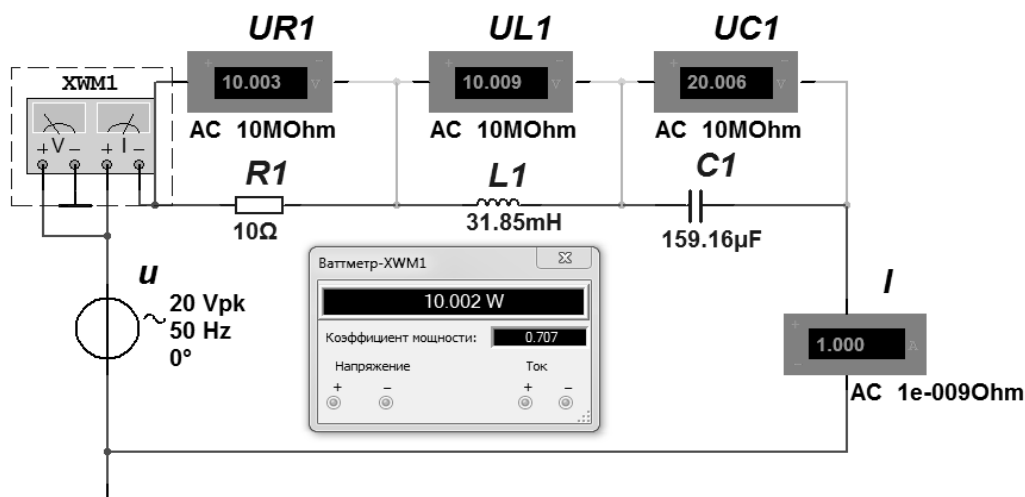


Рисунок 3.3 – Модель однофазной электрической цепи переменного тока к задаче 3

Показания измерительных приборов соответствуют расчётным значениям. Ваттметр измеряет активную мощность  $P$ .

#### 4 Практическое занятие № 4. Анализ сложных электрических цепей переменного тока с несколькими источниками питания при помощи комплексных чисел

**Задача 4.** Определить токи в ветвях электрической цепи переменного тока (рисунок 4.1). Исходные данные к задаче (действующие значения ЭДС  $E_1, E_2$ , их начальные фазы  $\psi_{e1}, \psi_{e2}$ , полные комплексные сопротивления ветвей  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ ) приведены в таблице 4.1. Задачу решить методом контурных токов, методом

непосредственного применения законов Кирхгофа. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

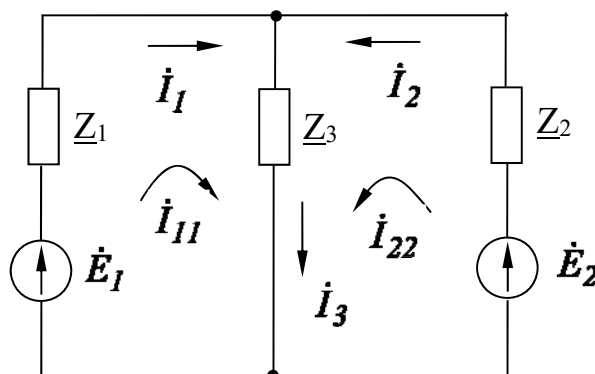


Рисунок 4.1 – Схема электрической цепи к задаче 4

Таблица 4.1 – Исходные данные к задаче 4

Номер варианта	$E_1, \text{В}$	$\psi_{e1}, ^\circ$	$E_2, \text{В}$	$\psi_{e2}, ^\circ$	$Z_1, \text{Ом}$	$Z_2, \text{Ом}$	$Z_3, \text{Ом}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	141	45	282	0	10	$20 - j20$	$10 + j10$
2	141	45	282	0	10	$10 + j10$	$20 - j20$
3	141	0	282	45	$10 - j10$	$20 + j20$	$10 + j10$
4	141	0	282	45	$10 + j10$	$20 + j20$	$10 - j10$
5	141	30	282	-45	$10 - j10$	$20 + j20$	10
6	141	30	282	-45	$10 + j10$	$20 - j20$	10
7	141	60	282	30	$20 - j20$	$10 + j10$	10
8	141	60	282	30	$20 - j20$	$10 + j10$	20
9	141	-60	282	-60	10	$10 - j10$	$20 + j20$
10	141	-60	282	-60	10	$10 - j10$	$10 + j10$
11	141	0	282	15	$10 + j10$	$20 + j20$	$10 - j10$
12	141	0	282	15	$10 + j10$	$20 + j20$	$20 - j20$
13	141	45	282	-15	$10 - j10$	$20 - j20$	$10 + j10$
14	141	45	282	-15	$10 - j10$	$20 - j20$	$j10$
15	282	30	141	45	$20 + j20$	10	$-j10$
16	282	30	141	45	$20 + j20$	10	$-j20$
17	282	-30	141	0	$20 - j20$	20	$j10$
18	282	-30	141	0	$20 - j20$	20	$j20$
19	282	-45	141	60	10	$10 + j10$	$10 - j10$
20	282	-45	141	60	10	$10 + j10$	$20 - j20$
21	282	60	141	-60	20	$10 - j10$	$j10$
22	282	60	141	-60	20	$10 - j10$	$j20$
23	282	-60	141	15	$10 + j10$	$20 + j20$	$10 - j10$
24	282	-60	141	15	$10 + j10$	$20 + j20$	$20 - j20$
25	282	15	141	-15	$10 - j10$	$20 - j20$	$10 + j10$
26	282	15	141	-15	$10 - j10$	$20 - j20$	$20 + j20$
27	282	-15	141	45	$20 + j20$	10	$10 - j10$
28	282	-15	141	45	$20 + j20$	10	$20 - j20$
29	282	45	141	60	$20 - j20$	20	$j10$
30	282	45	141	60	$20 - j20$	20	$j20$

**Пример решения задачи 4.** Определить токи в ветвях электрической цепи переменного тока (см. рисунок 4.1).

Исходные данные к задаче:

– ЭДС:  $E_1 = 100$  В,  $\psi_{e1} = 0^\circ$ ,  $E_2 = 100$  В,  $\psi_{e1} = 90^\circ$ ;

– полные комплексные сопротивления  $\underline{Z}_1 = 3 - j4$  Ом,  $\underline{Z}_2 = 8 + j6$  Ом,  $\underline{Z}_3 = j10$  Ом.

*Метод контурных токов*

Определим значения ЭДС источников в комплексной форме:

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= E_1 \cdot e^{j\psi_{e1}} = 100 \cdot e^{j0^\circ} = 100 \text{ В}; \\ \dot{E}_2 &= E_2 \cdot e^{j\psi_{e2}} = 100 \cdot e^{j90^\circ} = j100 \text{ В}.\end{aligned}$$

Запишем полные сопротивления отдельных ветвей в комплексной форме:

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 3 - j4 = 5 \cdot e^{-j53^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 8 + j6 = 10 \cdot e^{j37^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = jX_{L3} = j10 = 10 \cdot e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Система уравнений для определения контурных токов

$$\begin{cases} \dot{E}_{11} = \dot{I}_{11} \underline{Z}_{11} + \dot{I}_{22} \underline{Z}_{12}; \\ \dot{E}_{22} = \dot{I}_{11} \underline{Z}_{21} + \dot{I}_{22} \underline{Z}_{22}, \end{cases}$$

где  $\dot{E}_{11} = \dot{E}_1 = 100$  В;

$\dot{E}_{22} = \dot{E}_2 = j100 = 100 \cdot e^{j90^\circ}$  В;

$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 = 3 - j4 + j10 = 3 + j6 = 6,7 \cdot e^{j63^\circ}$  Ом;

$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 = j10 + 8 + j6 = 8 + j16 = 17,9 \cdot e^{j63^\circ}$  Ом;

$\underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_3 = j10 = 10 \cdot e^{j90^\circ}$  Ом.

Таким образом,

$$100 = \dot{I}_{11} \cdot (3 + j6) + \dot{I}_{22} \cdot j10;$$

$$j100 = \dot{I}_{11} j10 + \dot{I}_{22} \cdot (8 + j16).$$

Находим значение контурных токов:

$$i_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad i_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где  $\Delta = \begin{vmatrix} 3 + j6 & j10 \\ j10 & 8 + j16 \end{vmatrix} = 28 + j96 = 100 \cdot e^{j74^\circ};$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 100 & j10 \\ j100 & 8 + j16 \end{vmatrix} = 1800 + j1600 = 2408 \cdot e^{j42^\circ};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 + j6 & 100 \\ j10 & j100 \end{vmatrix} = -600 - j700 = 922 \cdot e^{-j130^\circ}.$$

$$i_{11} = \frac{2408 \cdot e^{j42^\circ}}{100 \cdot e^{j74^\circ}} = 24,08 \cdot e^{-j32^\circ} = 20,42 - j12,76 \text{ А};$$

$$i_{22} = \frac{922 \cdot e^{-j130^\circ}}{100 \cdot e^{j74^\circ}} = 9,22 \cdot e^{-j204^\circ} = -8,42 + j3,75 \text{ А}.$$

Найти решение системы уравнений в комплексной форме можно, воспользовавшись *Калькулятором* (рисунок 4.2).

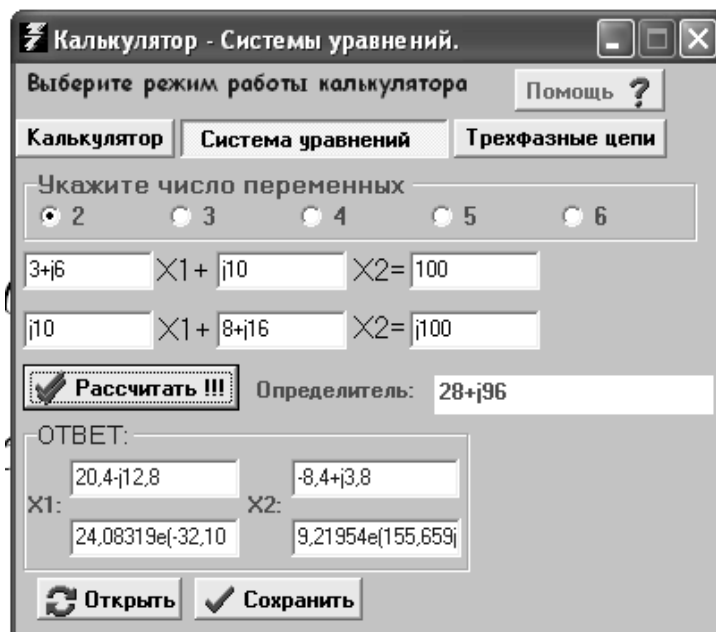


Рисунок 4.2 – Программа *Калькулятор* для решения системы уравнений



Токи в ветвях

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} = 20,42 - j12,76 = 24,08 \cdot e^{-j32^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{22} = -8,42 + j3,75 = 9,22 \cdot e^{-j204^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 20,42 - j12,76 - 8,42 + j3,75 = 12 - j9 = 15 \cdot e^{-j37^\circ} \text{ А}.$$

Модель электрической цепи в среде Multisim приведена на рисунке 4.3. Действующие значения токов  $I_1, I_2, I_3$  соответствуют расчётным.

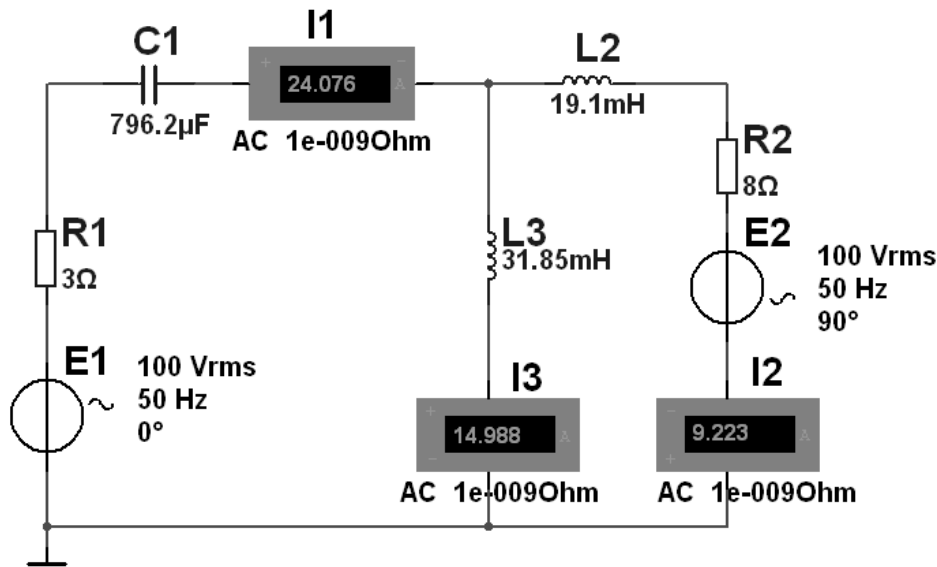


Рисунок 4.3 – Модель цепи переменного тока в Multisim с двумя источниками питания к задаче 4

Комплексные мощности источников ЭДС

$$\dot{E}_1 \cdot \dot{I}_1^* = 100 \cdot (20,42 + j12,76) = 2042 + j1276 \text{ В}\cdot\text{А};$$

$$\dot{E}_2 \cdot \dot{I}_2^* = 100 \cdot (-8,42 - j3,75) = 375 - j842 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Здесь

$$P_{\text{ист}} = P_1 + P_2 = 2042 + 375 = 2417 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{ист}} = Q_1 + Q_2 = 1276 - 842 = 434 \text{ вар}.$$

Комплексные мощности нагрузки

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{\text{нагр}} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + j(-X_1 I_1^2 + I_2^2 X_2 + I_3^2 X_3) = 24,08^2 \cdot 3 + 9,22^2 \cdot 8 + \\ &+ j(-4 \cdot 24,08^2 + 9,22^2 \cdot 6 + 15^2 \cdot 10) = 2419 + j440. \end{aligned}$$

Небольшие расхождения в полученных значениях мощностей объясняются округлением величин при расчете.

**Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.**

Записываем уравнение по первому закону Кирхгофа для узла *a*:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (4.1)$$

Записываем уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{E}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 + \underline{Z}_3 \cdot \dot{I}_3; \quad (4.2)$$

$$\dot{E}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 + \underline{Z}_3 \cdot \dot{I}_3. \quad (4.3)$$

Объединив уравнения (4.1)–(4.3), получим

$$\dot{E}_1 = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) \cdot \dot{I}_1 + \underline{Z}_3 \cdot \dot{I}_2; \quad (4.4)$$

$$\dot{E}_2 = \underline{Z}_3 \cdot \dot{I}_1 + (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) \cdot \dot{I}_2. \quad (4.5)$$

В уравнения (4.4), (4.5) подставляем значения заданных величин:

$$100 = \dot{I}_1 \cdot (3 - j4 + j10) + \dot{I}_2 \cdot j10 = \dot{I}_1 \cdot (3 + j6) + \dot{I}_2 \cdot j10; \quad (4.6)$$

$$j100 = \dot{I}_1 \cdot j10 + \dot{I}_2 \cdot (8 + j6 + j10) = \dot{I}_1 \cdot j10 + \dot{I}_2 \cdot (8 + j16). \quad (4.7)$$

Решаем уравнения (4.6), (4.7), используя определители:

$$\dot{I}_1 = \frac{\begin{vmatrix} 100 & j10 \\ j100 & 8 + j16 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 + j6 & j10 \\ j10 & 8 + j6 \end{vmatrix}} = 20,4 - j12,8 = 24,1 \cdot e^{-j32^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\begin{vmatrix} 3 + j6 & 100 \\ j10 & j100 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 + j6 & j10 \\ j10 & 8 + j6 \end{vmatrix}} = -8,4 + j3,8 = 9,2 \cdot e^{j156^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 20,4 - j12,8 - 8,4 + j3,8 = 12 - j9 = 15 \cdot e^{-j36^\circ} \text{ A}.$$

Результаты расчёта токов в ветвях совпадают с полученными при решении методом контурных токов.

## 5 Практическое занятие № 5. Анализ простейших трёхфазных цепей с помощью комплексных чисел

**Задача 5.** Определить линейные и фазные токи в трёхфазной цепи. Исходные данные к задаче (линейное напряжение  $U_L$ , симметричная нагрузка в фазах  $\underline{Z}$ ) приведены в таблице 5.1. Задачу решить для подключения нагрузки: а) звездой; б) треугольником (рисунок 5.1). Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

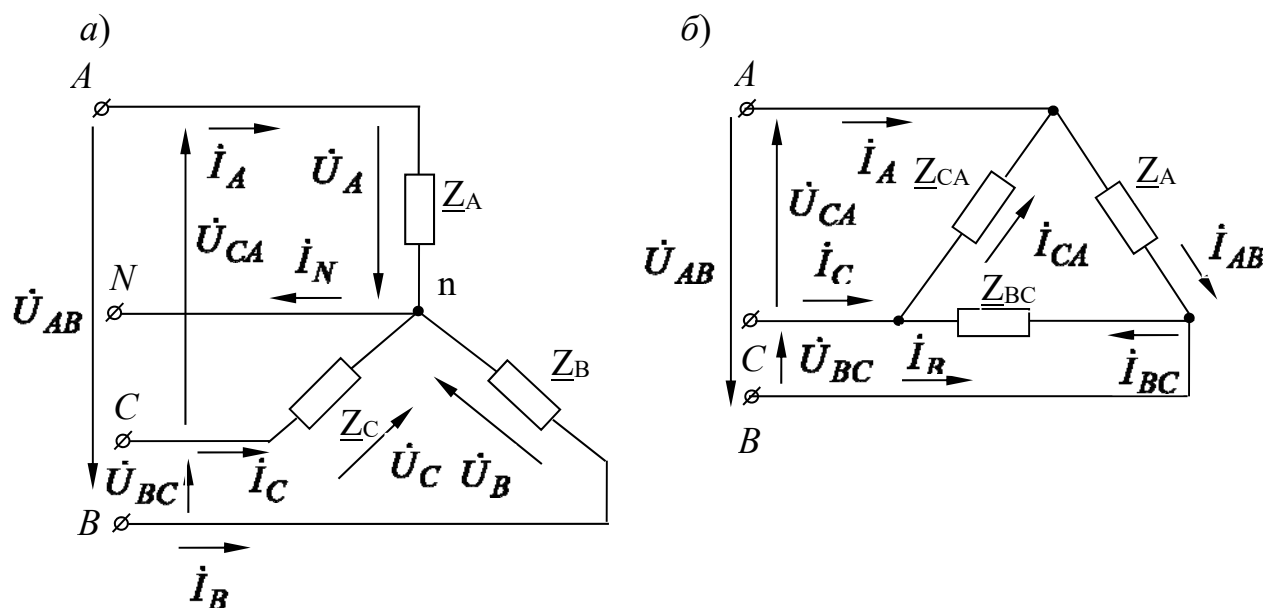


Рисунок 5.1 – Трёхфазные электрические цепи: а- соединение «звезда»; б – соединение «треугольник»

Таблица 5.1 – Исходные данные к задаче 5

Номер варианта	$U_L, В$	$\underline{Z}, Ом$
1	2	3
1	380	$10 - j10$
2	380	$10 + j10$
3	380	$20 - j20$
4	380	$20 + j20$
5	380	$60 - j80$
6	380	$60 + j80$
7	380	$30 - j40$
8	380	$30 + j40$
9	380	$40 - j40$
10	380	$40 + j40$
11	220	$10 - j10$
12	220	$10 + j10$
13	220	$20 - j20$
14	220	$20 + j20$
15	220	$60 - j80$
16	220	$60 + j80$

Окончание таблицы 5.1 – Исходные данные к задаче 5

1	2	3
17	220	$30 - j40$
18	220	$30 + j40$
19	220	$40 - j40$
20	220	$40 + j40$
21	127	$10 - j10$
22	127	$10 + j10$
23	127	$20 - j20$
24	127	$20 + j20$
25	127	$60 - j80$
26	127	$60 + j80$
27	127	$30 - j40$
28	127	$30 + j40$
29	127	$40 - j40$
30	127	$40 + j40$

**Пример решения задачи 5.**

Определить линейные и фазные токи в трёхфазной цепи.

Исходные данные к задаче:

- линейное напряжение  $U_L = 380$  В;
- симметричная нагрузка  $\underline{Z} = 10 + j10$  Ом;

– схема подключения нагрузки:

а) звезда;

б) треугольник (см. рисунок 5.1).

Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

Для соединения звездой (а) фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В,}$$

тогда комплексные значения фазных напряжений

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_A = 220 \text{ В; } \dot{U}_B = U_B \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В;} \\ \dot{U}_C &= U_C \cdot e^{-j240^\circ} = 220 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В.} \end{aligned}$$

Так как нагрузка симметричная,

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} = (10 + j10) \text{ Ом.}$$

Здесь  $R = 10$  Ом,  $X_L = 10$  Ом,  $L = X_L/\omega = 10/314 = 31,85$  мГн.

Токи в нагрузке (линейные токи равны фазным)

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}} = \frac{220}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{j0^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{j75^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 15,56 \cdot e^{-j45^\circ} + 15,56 \cdot e^{-j165^\circ} + 15,56 \cdot e^{j75^\circ} = 0 \text{ А}.$$

Следовательно, при симметричной нагрузке соединённой звездой ток в нейтральном проводе отсутствует.

Для соединения треугольником (б) комплексные значения линейных напряжений

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= U_{AB} = 380 \text{ В}; \quad \dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^\circ} = 380 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}; \\ \dot{U}_{CA} &= U_{CA} \cdot e^{-j240^\circ} = 380 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Так как нагрузка симметричная,

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z} = (10 + j10) \text{ Ом}.$$

Здесь  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_L = 10 \text{ Ом}$ ,  $L = X_L/\omega = 10/314 = 31,85 \text{ мГн}$ .

Фазные токи (токи в нагрузке)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}} = \frac{380}{10 + j10} = \frac{380 \cdot e^{j0^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 26,87 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}} = \frac{380 \cdot e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{380 \cdot e^{-j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 26,87 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}} = \frac{380 \cdot e^{j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{380 \cdot e^{j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 26,87 \cdot e^{j75^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

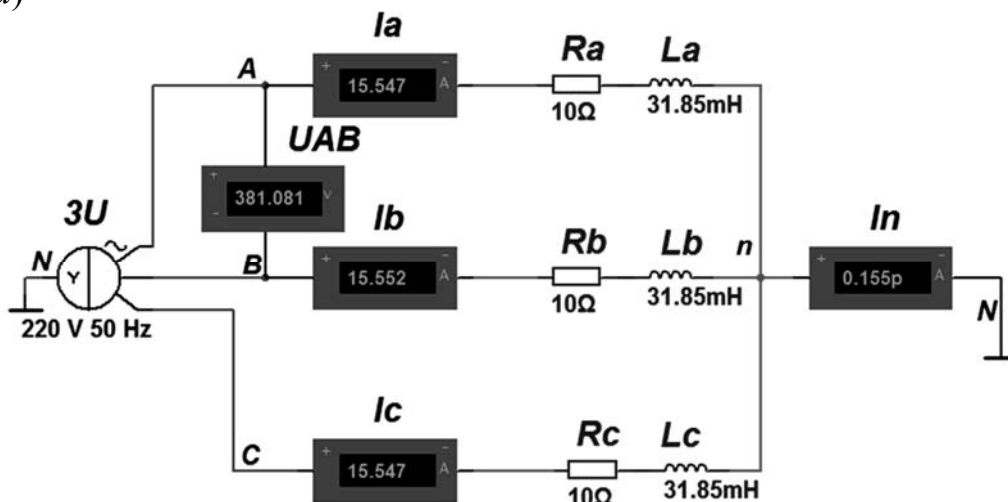
Линейные токи (токи в соединительных проводах)

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 26,87 \cdot e^{-j45^\circ} - 26,87 \cdot e^{j75^\circ} = 46,54 \cdot e^{-j75^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = 26,87 \cdot e^{-j165^\circ} - 26,87 \cdot e^{-j45^\circ} = 46,54 \cdot e^{j165^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 26,87 \cdot e^{j75^\circ} - 26,87 \cdot e^{-j165^\circ} = 46,54 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Не трудно заметить, что фазный ток при соединении треугольником  $I_\phi = 26,87 \text{ А}$  в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного  $I_L = 46,54 \text{ А}$ , а линейный (фазный) ток при соединении звездой  $I_{LY} = 15,56 \text{ А}$  в 3 раза меньше, чем линейный ток при соединении нагрузки треугольником  $I_{L\Delta} = 46,54 \text{ А}$ .

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 5.2).

а)



б)

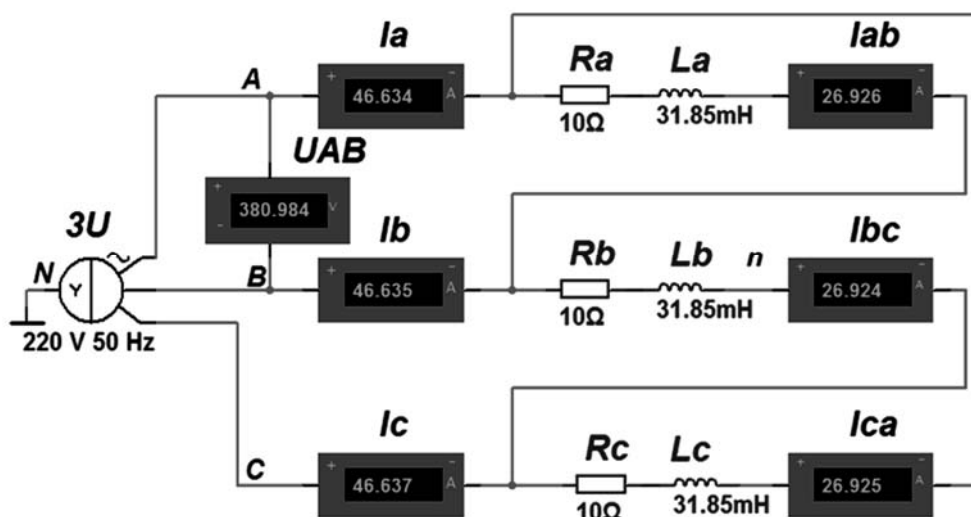


Рисунок 5.2 – Модель трёхфазной электрической цепи переменного тока к задаче 4: а – соединение «звезда»; б – соединение «треугольник»

Показания измерительных приборов соответствуют расчётным значениям.

## 6 Практическое занятие № 6. Расчет параметров трансформатора

**Задача 6.** Построить внешнюю характеристику трансформатора. Исходные данные к задаче (тип трансформатора, номинальная мощность  $S_H$ , номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки  $U_{1H}$ , напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора  $U_{2H}$ , напряжение короткого замыкания  $U_K\%$ , мощность короткого замыкания  $P_K$ , коэффициент мощности нагрузки  $\cos\phi$ , соединение обмоток) приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Исходные данные к задаче 6

Номер варианта	Тип трансформатора	$S_H$	$U_{1H}$ , кВ	$U_{2H}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$P_K$ , кВт	$U_K$ , %	$I_0$ , %	$\cos\varphi_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ТМ-25/6	25	6	0,23	0,13	0,60	4,5	3,2	0,71
2	ТМ-25/10	25	10	0,4	0,13	0,60	4,5	3,2	0,73
3	ТМ-40/6	40	6	0,23	0,175	0,88	4,6	3,0	0,8
4	ТМ-40/10	40	10	0,4	0,175	0,88	4,5	3,0	0,75
5	ТМ-63/6	63	6	0,23	0,24	1,28	4,5	4,5	0,8
6	ТМ-63/10	63	10	0,4	0,24	1,28	4,5	4,5	0,73
7	ТМ-100/6	100	6	0,23	0,33	1,97	6,5	2,6	0,7
8	ТМ-100/10	100	10	0,4	0,33	1,97	6,5	2,6	0,8
9	ТМ-160/6	160	6	0,23	0,51	2,65	4,5	2,4	0,77
10	ТМ-160/10	160	10	0,4	0,51	2,65	4,5	2,4	0,73
11	ТМ-250/6	250	6	0,23	0,74	3,7	4,5	2,3	0,7
12	ТМ-250/10	250	10	0,4	0,74	3,7	4,5	2,3	0,8
13	ТМ-400/6	400	6	0,23	0,93	5,5	4,5	3,3	0,74
14	ТМ-400/10	400	10	0,4	0,93	5,5	4,5	3,3	0,77
15	ТМ-630/6	630	6	0,23	1,31	7,6	5,5	2,5	0,72
16	ТМ-630/10	630	10	0,4	1,31	7,6	5,5	2,5	0,8
17	ТМ-1000/6	1000	6	0,23	2,45	12,2	5,5	1,5	0,73
18	ТМ-1000/10	1000	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,5	0,76
19	ТМ-1600/6	1600	6	0,23	3,3	18,0	5,5	1,3	0,8
20	ТМ-1600/10	1600	10	0,4	3,3	18,0	5,5	1,3	0,74
21	ТСЗ-160/6	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0	0,71
22	ТСЗ-160/10	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	4,0	0,8
23	ТСЗ-250/6	250	6	0,23	1,0	3,8	5,5	3,5	0,7
24	ТСЗ-250/10	250	10	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5	0,73
25	ТСЗ-400/6	400	6	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0	0,78
26	ТСЗ-400/10	400	10	0,4	1,3	5,4	5,5	3,0	0,79
27	ТСЗ-630/6	630	6	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5	0,76
28	ТСЗ-630/10	630	10	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5	0,78
29	ТСЗ-1000/6	1000	6	0,4	3,0	11,2	5,5	1,5	0,7
30	ТСЗ-1000/10	1000	10	0,4	3,0	11,2	5,5	1,5	0,8

**Пример решения задачи 6.**

Построить внешнюю характеристику  $U_2 = f(\beta)$  трансформатора ТМ-100/6.

Исходные данные к задаче:

- номинальная мощность  $S_H = 100$  кВ·А;
- номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора  $U_{1H} = 6$  кВ;
- напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора  $U_{2H} = 0,36$  кВ;
- напряжение короткого замыкания  $U_K\% = 6\%$  от  $U_{1H}$ ;
- мощность короткого замыкания  $P_K = 0,9$  кВт;
- коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi = 0,75$ .

Соединение обмоток трансформатора Y/Y («звезда/звезда») (рисунок 6.1).

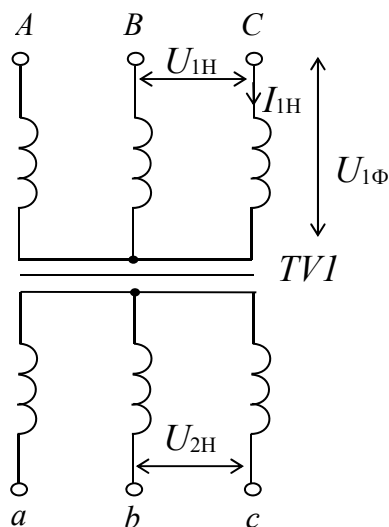


Рисунок 6.1 – Схема трехфазного трансформатора

Для построения зависимости напряжения на вторичной обмотке трансформатора от коэффициента его загрузки  $U_2 = f(\beta)$  – *внешней характеристики* найдем потери напряжения во вторичной обмотке трансформатора  $\Delta U_2\%$  для  $\beta$ , равного 0 и 1:

$$\Delta U_2\% = \beta \cdot (U_{к.а}\% \cdot \cos\phi_2 + U_{к.р}\% \cdot \sin\phi_2),$$

где  $U_{к.а}\%$ ,  $U_{к.р}\%$  – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания. Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле

$$U_2 = U_{2н}(100 - \Delta U_2\%)/100.$$

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,623 \text{ А.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1ф}^2} = \frac{900}{3 \cdot 9,623^2} = 3,24 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = \frac{U_{к1ф}}{I_{1ф}} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3} \cdot I_{1ф}} \cdot \frac{U_k\%}{100} = \frac{6000 \cdot 6}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 9,623} = 21,6 \text{ Ом.}$$

Для соединения «звезда/звезда»  $I_{1н} = I_{1ф}$ ,  $U_{1н} = \sqrt{3} \cdot U_{1ф}$



$$\cos\phi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{3,24}{21,6} = 0,15;$$

$$U_{k.a}\% = U_k\% \cdot \cos\phi_k = 6 \cdot 0,15 = 0,9\%;$$

$$U_{k.p}\% = \sqrt{(U_k\%)^2 - (U_{k.a}\%)^2} = \sqrt{6^2 - 0,9^2} = 5,932\%.$$

Для  $\beta = 0$  (точка 1 на рисунке 6.2), для  $\beta = 1$  (точка 2 на рисунке 6.2).

$$U_2 = U_{2H} (100 - \Delta U_2\%) / 100 = 360 \cdot (100 - 0) / 100 = U_{2H} = 360 \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \Delta U_2\% &= \beta \cdot (U_{k.a}\% \cdot \cos\phi_2 + U_{k.p}\% \cdot \sin\phi_2) = \\ &= 1 \cdot (0,9 \cdot 0,75 + 5,932 \cdot \sqrt{1 - 0,15^2}) = 4,599\%; \end{aligned}$$

$$U_2 = U_{2H} (100 - \Delta U_2\%) / 100 = 360 \cdot (100 - 4,599) / 100 = 344,4 \text{ В}.$$

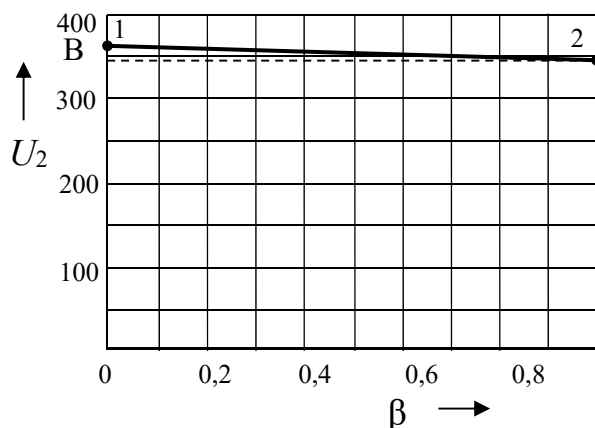


Рисунок 6.2 – Внешняя характеристика трансформатора

## 7 Практическое занятие № 7. Расчет параметров асинхронного двигателя

**Задача 7.** Построить механическую характеристику трёхфазного асинхронного двигателя. Исходные данные к задаче (номинальная мощность двигателя  $P_H$ , номинальное напряжение  $U_H$ , номинальное число оборотов ротора  $n_H$ , номинальный КПД  $\eta_H$ , номинальный коэффициент мощности  $\cos\phi_H$ , кратность пускового тока  $I_{п}/I_H$ , перегрузочная способность двигателя  $m_K$ , число пар полюсов  $p$ ) приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные данные к задаче 7

Номер варианта	Тип двигателя	$U_H$ , В	$P_H$	$\eta_H$ , %	$n_H$ , мин <sup>-1</sup>	$\cos\phi_H$	$m_K$	$I_{п}/I_H$	$p$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	АИР50А4	380	0,09	60	1425	0,75	2,2	4,5	2
2	АИР50В6	220	0,12	63	900	0,75	2,2	4,5	3
3	АИР56А2	380	0,18	68	2500	0,78	2,2	5,0	1

Окончание таблицы 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	АИР56В4	220	0,25	69	1415	0,79	2,2	5,0	2
5	АИР63А6	380	0,37	72	910	0,86	2,2	5,0	3
6	АИР63В2	220	0,55	75	2700	0,85	2,2	5,0	1
7	АИР71А4	380	0,75	78,5	1350	0,83	2,2	6,0	2
8	АИР71В6	220	1,1	79	915	0,83	2,2	6,0	3
9	АИР80А2	380	1,5	81	2800	0,85	2,2	7,0	1
10	АИР80В4	220	2,2	83	1380	0,87	2,2	7,0	2
11	АИР90L6	380	3,0	84,5	880	0,88	2,2	7,0	3
12	АИР100S2	220	4,0	87	2750	0,88	2,2	7,5	1
13	АИР100L4	380	5,5	88	1435	0,89	2,2	7,5	2
14	АИР112M6	220	7,5	87,5	885	0,88	2,2	7,5	3
15	АИР132M2	380	11	88	2650	0,90	2,2	7,5	1
16	АИР160S4	220	15	90	1425	0,89	2,7	7,0	2
17	АИР160M6	380	18,5	90,5	995	0,90	2,7	7,0	3
18	АИР180S2	220	22	90,5	2550	0,89	2,7	7,0	1
19	АИР180M4	380	30	91,5	1450	0,90	3,0	7,5	2
20	АИР200M6	220	37	91,5	955	0,87	2,8	7,0	3
21	АИР200S2	380	45	92	2575	0,88	2,8	7,5	1
22	АИР225M4	220	55	92,5	1410	0,91	2,6	7,5	2
23	АИР250S6	380	75	93	950	0,90	3,0	7,5	3
24	АИР250M2	220	90	93	2675	0,92	3,0	7,5	1
25	АИР250M4	380	90	94	1430	0,83	2,3	7,5	2
26	АИР280S46	220	110	93,5	852	0,83	2,3	7,5	3
27	АИР280M2	380	132	94	2775	0,84	2,3	6,5	1
28	АИР315S4	220	160	93,5	1450	0,86	2,4	6,5	2
29	АИР615M6	380	200	94	882	0,86	2,4	5,5	3
30	АИР355S2	220	250	94,5	2880	0,77	2,4	5,0	1

### Пример решения задачи 7.

Построить механическую характеристику асинхронного двигателя по характерным точкам.

Исходные данные к задаче:

- номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя  $P_H = 10$  кВт;
- номинальное напряжение  $U_H = 380$  В;
- номинальное число оборотов ротора  $n_H = 1420$  мин<sup>-1</sup>;
- номинальный КПД  $\eta_H = 84$  %;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_H = 0,85$ ;
- кратность пускового тока  $I_{п}/I_H = 6,5$ ;
- перегрузочная способность двигателя  $m_K = 1,8$ ;
- число пар полюсов  $p = 2$ .

Асинхронный двигатель  $M$  (рисунок 7.1) малой мощности с короткозамкнутой обмоткой ротора подключается к сети с помощью магнитного пускателя, который состоит из контактора синусоидального тока  $KM$  и встроенных в него тепловых реле  $KK$ .

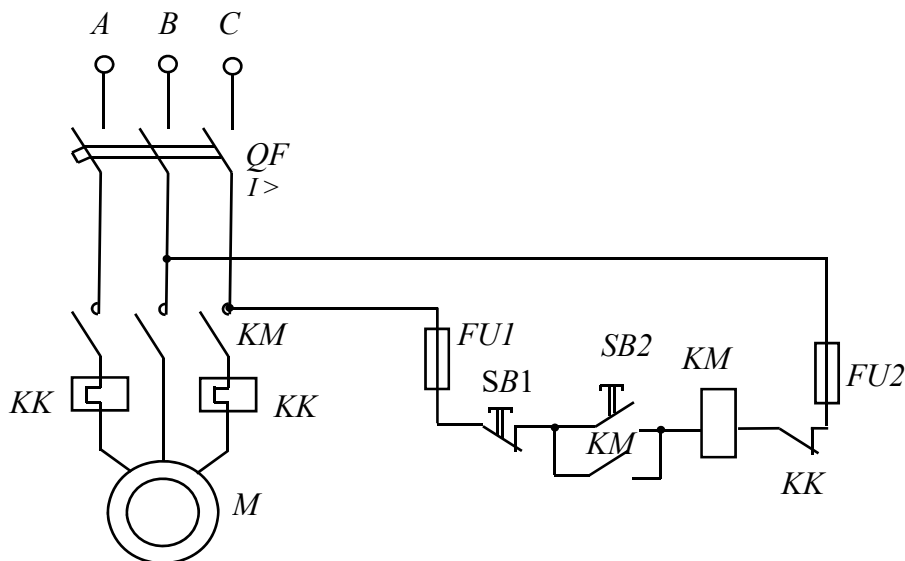


Рисунок 7.1 – Схема пуска асинхронного двигателя

При включенном автоматическом выключателе  $QF$  пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки  $SB2$ . При этом срабатывает контактор  $KM$ . Его главные контакты, замыкаясь, присоединяют обмотки фаз статора к сети. Одновременно в цепи управления замыкаются вспомогательные контакты  $KM$ , блокирующие кнопку  $SB2$  так, что при возврате ее в исходное положение рабочее состояние контактора не изменяется. Нажатием кнопки  $SB1$  двигатель отключается от сети. При этом цепь тока управления контактором размыкается. Автоматический выключатель  $QF$  защищает двигатель от токов короткого замыкания ( $I >$ ), а тепловые реле  $KK$  – от длительных перегрузок.

Потребляемая двигателем мощность

$$P_{1н} = P_n / \eta_n = 10 \cdot 10^3 / 0,84 = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты

$$M_n = 9,55 \cdot P_n / n_n = 9550 \cdot 10 \cdot 10^3 / 1420 = 67,3 \text{ Н·м;}$$

$$M_k = m_k \cdot M_n = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н·м.}$$

Номинальный и пусковой токи

$$I_n = \frac{P_{1н}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_n} = \frac{11,9 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,2 \text{ А;}$$

$$I_n = 6,5 \cdot I_n = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ А.}$$

Синхронная частота вращения поля ротора

$$n_0 = 60 f / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальное скольжение

$$s_n = (n_0 - n_n) / n_0 = (1500 - 1042) / 1500 = 0,053.$$

Формула для определения критического скольжения может быть получена в результате подстановки в уравнение номинального скольжения:

$$s_k = s_n \left( m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right) = 0,053 \cdot \left( 1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от скольжения  $M = f(s)$  – механическая характеристика строится по уравнению

$$M = \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 121}{s/0,175 + 0,175/s}.$$

Расчетные данные сводим в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Результаты расчета механической характеристики

$s$	$M$ , Н·м
0	0
0,053 ( $s_n$ )	67,3 ( $M_n$ )
0,175 ( $s_k$ )	121,0 ( $M_k$ )
1,0	41,2

По данным таблицы строим механическую характеристику (рисунок 7.3).

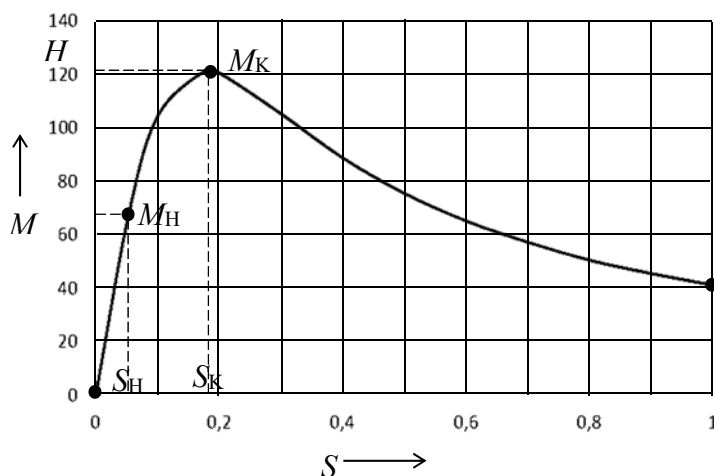


Рисунок 7.3 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

## 8 Практическое занятие № 8. Расчёт схем на основе полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов

**Задача 8.1. Разработка схемы на основе выпрямительного диода.** Разработать схему включения заданного выпрямительного диода, обеспечив протекающий через него ток  $I$  при питании от источника постоянного напряжения  $E_1$ . Исходные данные к задаче приведены в таблице 8.1. Необходимо описать принцип работы схемы, по вольтамперной характеристике диода определить величину ограничивающего сопротивления  $R_1$ , статическое сопротивление диода  $R_{ст}$  в заданной рабочей точке и динамическое сопротивление  $R_{дин}$  при изменении напряжения  $\Delta E_1 = -1$  В, осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

Таблица 8.1 – Исходные данные к задаче 8.1

Номер варианта	Тип диода	$I$ , мА	$E_1$ , В	$\Delta E_1$ , В
1	2	3	4	5
1	1N3600	50	5	+1
2	1N4001	200	10	-2
3	1N4002	200	12	+2
4	1N5400	500	8	-1
5	1N5401	500	9	+3
6	1N3600	60	10	-2
7	1N4001	300	6	+1
8	1N4002	300	8	-2
9	1N5400	600	7	+2
10	1N5401	600	4	-1
11	1N3600	70	3	+1
12	1N4001	400	4	-1
13	1N4002	400	5	+1
14	1N5400	700	15	-3
15	1N5401	700	9	+2
16	1N3600	80	8	-2
17	1N4001	500	10	+3
18	1N4002	500	4	-1
19	1N5400	800	9	+2
20	1N5401	800	8	-2
21	1N3600	90	12	+3
22	1N4001	600	11	-2
23	1N4002	600	15	+3
24	1N5400	800	10	-2
25	1N5401	800	8	+2
26	1N3600	100	12	+3
27	1N4001	700	11	-2
28	1N4002	700	15	+3
29	1N5400	900	10	-2
30	1N5401	900	8	+2

### Пример решения задачи 8.1.

Разработать схему включения выпрямительного диода 1N4148, обеспечив протекающий через него ток  $I=50$  мА при питании от источника постоянного напряжения  $E_1=3$  В. Определить величину ограничивающего сопротивления  $R_1$ , статическое сопротивление диода  $R_{ст}$  в заданной рабочей точке и динамическое сопротивление  $R_{дин}$  при изменении напряжения  $\Delta E_1 = -1$  В, осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

Из справочника (приложение А) определяем основные параметры выпрямительного диода:

$$I_{пр\ max}=150\ \text{мА}; U_{обр\ max}=75\ \text{В}; U_{пр\ max}=1\ \text{В}.$$

Для обеспечения тока  $I=50$  мА диод нужно включить в прямом направлении ( $+E_1$  к аноду, а  $-E_1$  к катоду). Для ограничения прямого тока последовательно с диодом включается сопротивление  $R_1$ .

Разработанная схема приведена на рисунке 8.1.

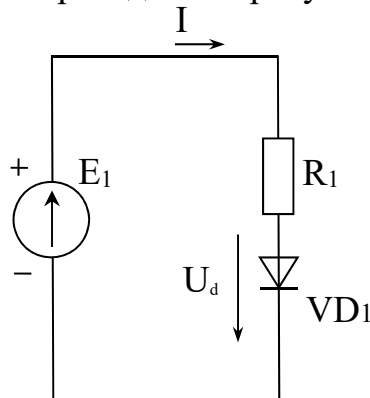


Рисунок 8.1 – Схема подключения выпрямительного диода

Для решения запишем 2-й закон Кирхгофа для цепи:

$$E_1 = I \cdot R_1 + U_d,$$

где  $U_d$  – падение напряжения на диоде. Это уравнение содержит две неизвестные величины:  $R_1$  и  $U_d$ . Для определения  $U_d$  воспользуемся ВАХ диода. Для её построения в среде Multisim используем характеристиограф *XIV1* (рисунки 8.2 и 8.3).

Определяем  $U_d = 0,78$  В.

Тогда

$$R_1 = \frac{E_1 - U_d}{I} = \frac{3 - 0,78}{50 \cdot 10^{-3}} = 44,4 \text{ Ом.}$$

Принимаем из стандартного ряда E24 (приложение Б)  $R_1 = 43$  Ом.

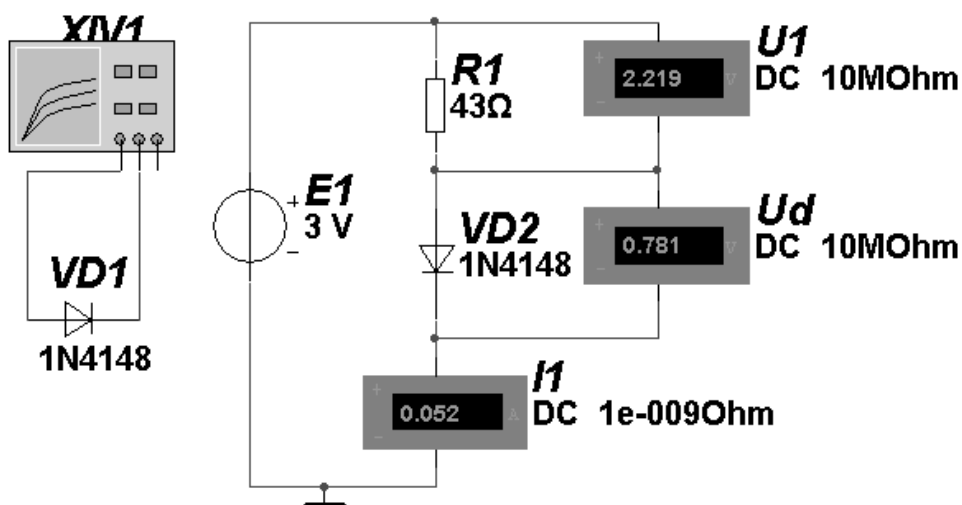


Рисунок 8.2 – Модель схемы подключения выпрямительного диода

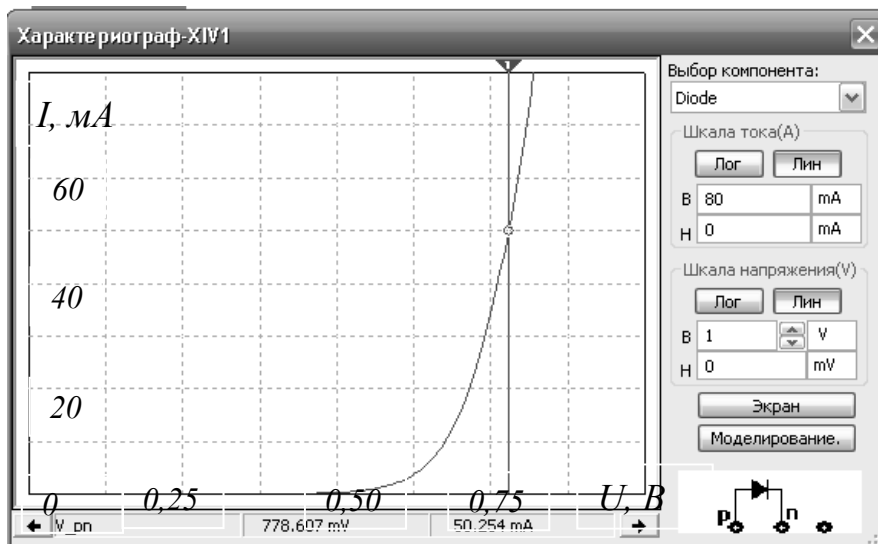


Рисунок 8.3 – ВАХ выпрямительного диода

Статическое сопротивление в рабочей точке определим по результатам моделирования (см. рисунок 8.2):

$$R_{ст} = \frac{U_d}{I} = \frac{0,781}{52 \cdot 10^{-3}} = 15 \text{ Ом.}$$

Для определения динамического сопротивления произведём моделирование работы схемы при  $E_1 = 3 - 1 = 2 \text{ В}$ . В результате  $I = 29 \text{ мА}$ ,  $U_d = 0,74 \text{ В}$ .

Тогда

$$R_{дин} = \frac{\Delta U_d}{\Delta I} = \frac{0,781 - 0,762}{(52 - 40) \cdot 10^{-3}} = 1,58 \text{ Ом.}$$

**Задача 8.2. Расчёт электронного ключа на биполярном транзисторе.** Разработать схему электронного ключа на биполярном транзисторе. Исходные данные к задаче (напряжение питания  $U_{п}$ , сопротивление нагрузки  $R_{н}$ , входные (управляющие) напряжения  $U_{у}$ , соответствующие включенному и отключенному состоянию нагрузки) приведены в таблице 8.2.

Необходимо осуществить выбор биполярного транзистора, определить и выбрать из стандартного ряда (приложение Б) сопротивление в цепи базы  $R_{б}$ . Осуществить моделирование работы ключа в среде Multisim, определить длительность фронта  $t_f$  и среза импульса  $t_c$  выходного напряжения.

Таблица 8.2 – Исходные данные к задаче 8.2

Номер варианта	$U_{п}$ , В	$R_{н}$ , Ом	$U_{у}$ , В
1	2	3	4
1	10	5	-2,5; +2,5
2	12	5	-2; +2
3	15	5	-2; +5
4	18	5	-5; +5
5	24	5	+0,4; +5

Окончание таблицы 8.2

1	2	3	4
6	10	20	-2,5; +2,5
7	12	20	-2; +2
8	15	20	-2; +5
9	18	20	-5; +5
10	24	20	+0,4; +5
11	10	50	-2,5; +2,5
12	12	50	-2; +2
13	15	50	-2; +5
14	18	50	-5; +5
15	24	50	+0,4; +5
16	10	100	-2,5; +2,5
17	12	100	-2; +2
18	15	100	-2; +5
19	18	100	-5; +5
20	24	100	+0,4; +5
21	10	150	-2,5; +2,5
22	12	150	-2; +2
23	15	150	-2; +5
24	18	150	-5; +5
25	24	150	+0,4; +5
26	10	200	-2,5; +2,5
27	12	200	-2; +2
28	15	200	-2; +5
29	18	200	-5; +5
30	24	200	+0,4; +5

### Пример решения задачи 8.2.

Разработать схему электронного ключа на биполярном транзисторе.

Исходные данные к задаче:

- напряжение питания  $U_{П} = 16$  В;
- сопротивление нагрузки  $R_{Н} = 5$  Ом;
- входные (управляющие) напряжения  $U_{У} = +0,4$  В; +5 В.

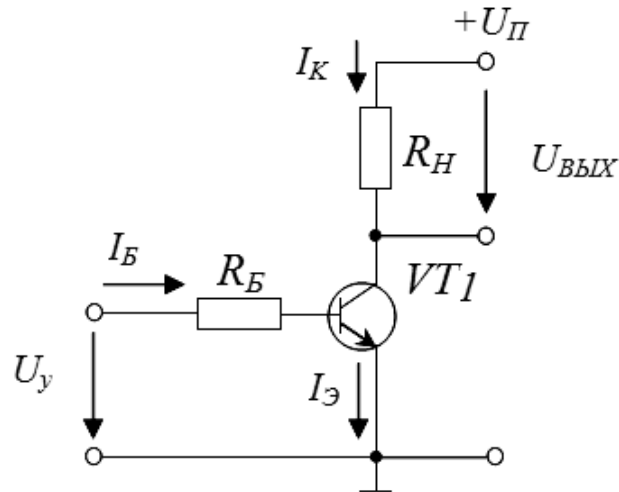
Необходимо осуществить выбор биполярного транзистора, определить и выбрать из стандартного ряда (см. приложение Б) сопротивление в цепи базы  $R_{Б}$ . Осуществить моделирование работы ключа в среде Multisim, определить длительность фронта  $t_{ф}$  и среза импульса  $t_{с}$  выходного напряжения.

Схема электронного ключа приведена на рисунке 8.4.

Биполярный транзистор  $VT1$  подключен по схеме с общим эмиттером. Напряжение управления  $U_{У}$  подается на базу транзистора. Ток базы  $I_{Б}$  задается сопротивлением  $R_{Б}$  в его цепи. Нагрузка  $R_{Н}$  включена в цепь коллектора транзистора с током  $I_{К}$ . Отношение тока коллектора к току базы называется коэффициентом передачи по току транзистора:  $\beta = I_{К} / I_{Б}$ .



а)



б)

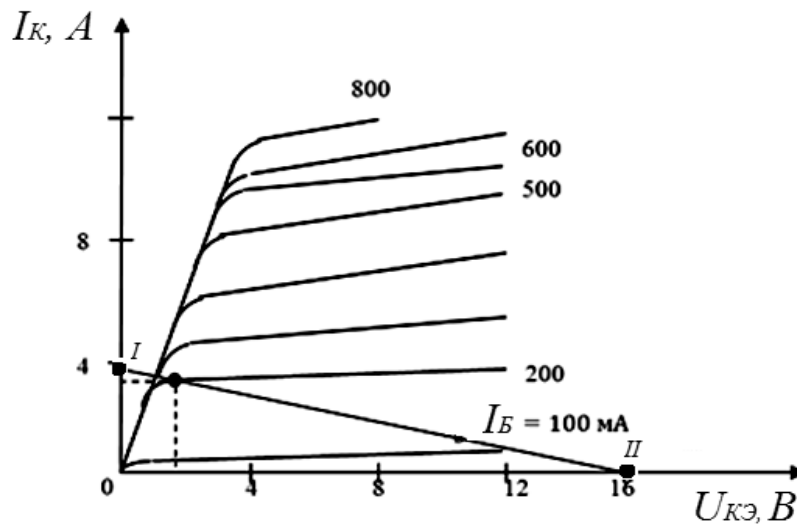


Рисунок 8.4 – Схема электронного ключа (а) и выходные характеристики биполярного транзистора (б)

В случае подачи на базу транзистора отрицательного или низкого напряжения управления  $U_y$ , ток базы  $I_B$  минимален. Рабочая точка транзистора (пересечение выходной статической характеристики при определённом токе базы с нагрузочной прямой) стремится к положению II – режим отсечки транзистора (рисунок 8.4, б). Ток коллектора  $I_C$  при этом стремится к нулю (транзистор закрыт), напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭ}$  приближается к напряжению питания  $U_{П}$ , а напряжение на нагрузке  $U_{ВЫХ}$  стремится к нулю.

В случае подачи на базу транзистора большого положительного напряжения управления  $U_y$ , ток базы  $I_B$  достаточно большой. Рабочая точка транзистора стремится к положению I – режим насыщения транзистора (рисунок 8.4, б). Ток коллектора  $I_C$  при этом стремится к насыщению  $I_{Кнас} = U_{П}/R_H$  (транзистор

полностью открыт), напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭ}$  стремится к нулю, а напряжение на нагрузке приближается к напряжению питания  $U_{П}$ .

Ток коллектора насыщения для данной задачи в режиме короткого замыкания транзистора  $VT1$  составляет:

$$I_{Кнас} = \frac{U_{П}}{R_{Н}} = \frac{16}{5} = 3,2 \text{ А.}$$

Максимальное напряжение между коллектором и эмиттером транзистора должно быть больше напряжения питания:

$$U_{КЭ \max} > U_{П} = 16 \text{ В.}$$

Выбираем транзистор 2N3879 (аналог КТ908А) со следующими параметрами (приложение В):

- максимальный ток коллектора  $I_{К\max} = 7 \text{ А} > I_{Кнас} = 3,2 \text{ А}$ ;
- максимальное напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭ \max} = 75 \text{ В} > U_{П} = 16 \text{ В}$ ;
- коэффициент передачи тока биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером  $\beta = 12$ ;
- постоянное напряжение между выводами эмиттера и базы при заданном обратном токе коллектора, равно нулю,  $U_{Б0} = 0,6 \text{ В}$ ;
- постоянный обратный ток коллектора  $I_{К0} = 1,5 \text{ мА}$ ;
- сопротивление цепи базы  $r_{\beta} = 1,5 \text{ Ом}$ .

Определим параметры входной цепи транзистора (сопротивление  $R_{Б}$ ), обеспечивающие его включенное состояние в режиме насыщения, по формуле

$$R_{Б} = \frac{U_{у \text{ нас}} - (U_{Б0} + I_{Б \text{ нас}} \cdot r_{\beta})}{I_{Б \text{ нас}}} = \frac{5 - (0,6 + 0,32 \cdot 1,5)}{0,32} = 12,25 \text{ Ом,}$$

где  $U_{у \text{ нас}}$  – максимальное напряжение управления для режима насыщения;

$I_{Б \text{ нас}}$  – ток базы насыщения,

$$I_{Б \text{ нас}} = (I_{К \text{ нас}} / \beta) \cdot q_{нас} = (3,2 / 15) \cdot 1,5 = 0,32 \text{ А};$$

$q_{нас}$  – коэффициент насыщения, определяющий превышение базового тока насыщения транзистора над его граничным значением. Принимается  $q_{нас} = 1,5 \dots 2,0$ .

Выбираем  $R_{Б} = 12 \text{ Ом}$  из стандартного ряда Е24 (см. приложение Б).

Определяем параметры входной цепи, обеспечивающие режим запираания транзистора (режим отсечки).

Для обеспечения режима глубокой отсечки сопротивление  $R_{Б}$  должно удовлетворять неравенству

$$R_{Б} < \frac{U_{у \text{ отс}}}{I_{К0}} = \frac{0,4}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 267 \text{ Ом.}$$

Окончательно выбираем  $R_B = 12 \text{ Ом}$ .

Для проверки правильности расчёта осуществим моделирование работы ключа в среде Multisim.

Модель электронного ключа в среде Multisim приведена на рисунках 8.5 (режим насыщения – нагрузка включена) и 8.6 (режим отсечки – нагрузка отключена). Питание осуществляется от источника  $U_{y1}$ .

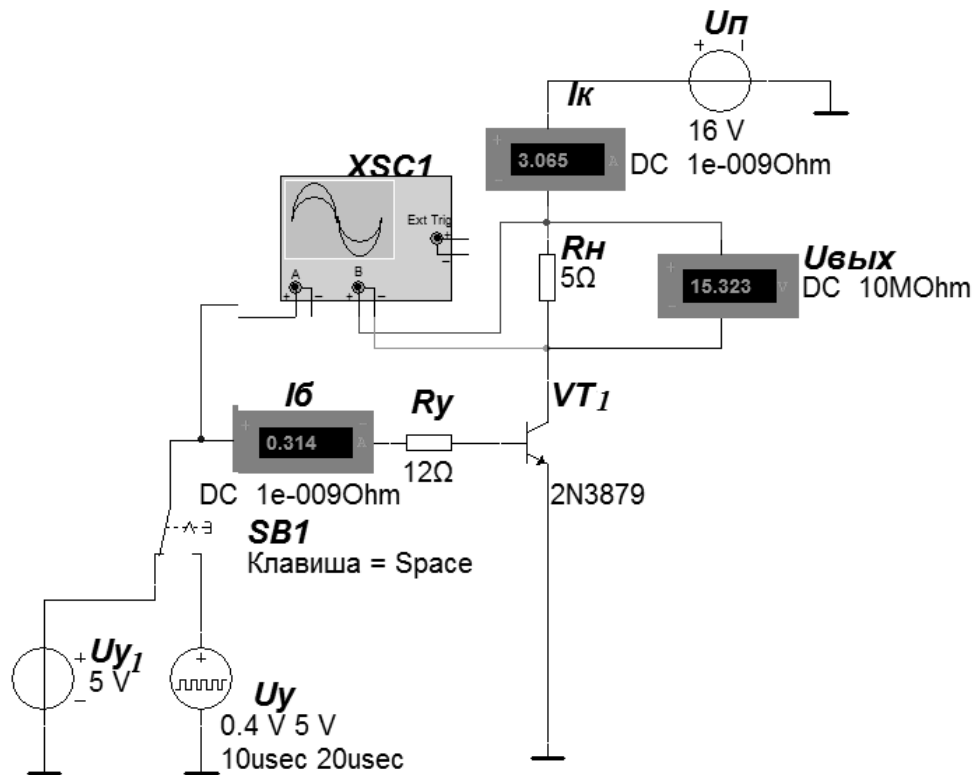


Рисунок 8.5 – Модель электронного ключа на биполярном транзисторе в режиме насыщения

Результаты моделирования:  $I_{B \text{ нас}} = 0,314 \text{ А}$ ;  $I_{K \text{ нас}} = 3,065 \text{ А}$ ;  $U_{\text{вых}} = 15,323 \text{ В}$  (режим насыщения);  $I_{B \text{ отс}} = 4,829 \text{ мкА}$ ;  $I_{K \text{ отс}} = 0,021 \text{ мА}$ ;  $U_{\text{вых}} = 0,104 \text{ мВ}$  (режим отсечки) хорошо согласуются с расчётными значениями.

Подав на вход схемы прямоугольные импульсы от источника  $U_y$ , получаем временные диаграммы работы электронного ключа (рисунок 8.7). В результате определяем: время фронта  $t_\phi = 1 \text{ мкс}$ ; время среза  $t_c = 1,42 \text{ мкс}$ .

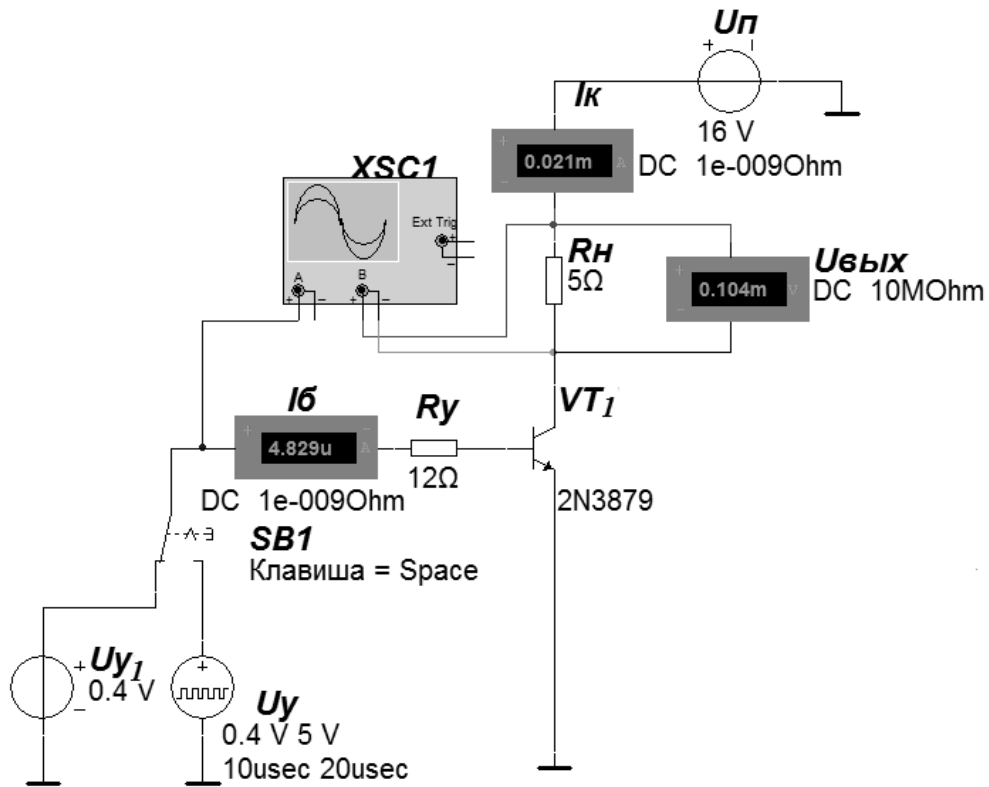


Рисунок 8.6 – Модель электронного ключа на биполярном транзисторе в режиме отсечки

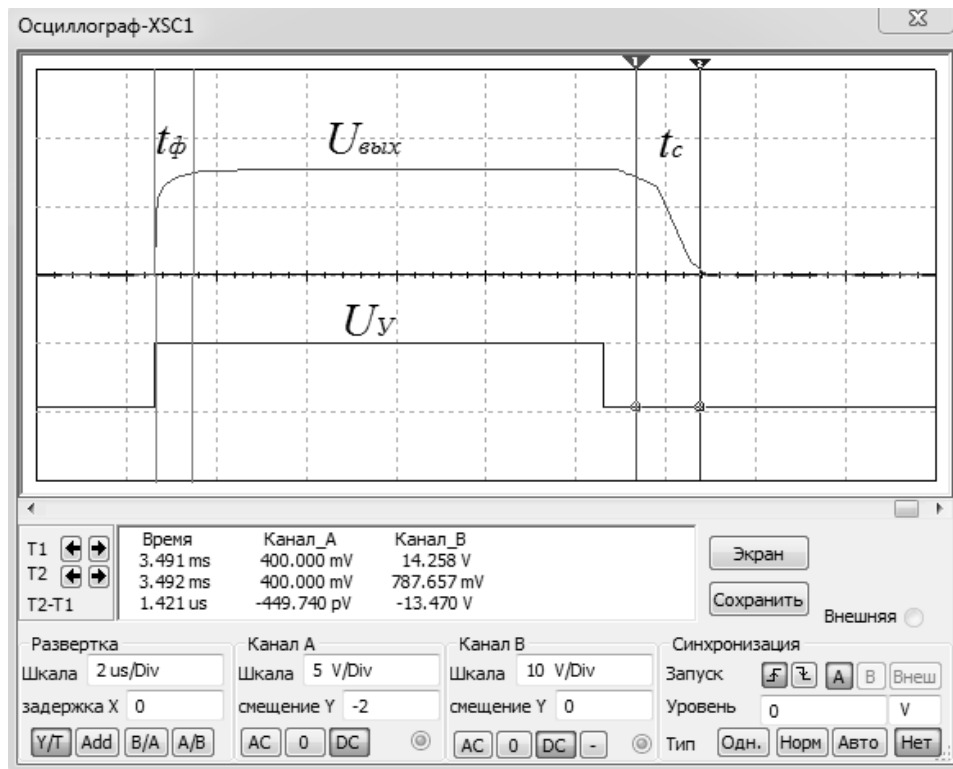


Рисунок 8.7 – Временные диаграммы работы электронного ключа

**Задача 8.3. Расчёт режима работы схемы включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ) по постоянному току.** Выполнить расчёт и выбор элементов схемы включения заданного полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом с общим истоком (ОИ) по постоянному току при работе в режиме класса А при напряжении источника питания  $E_C$  и  $I_C = 0,5 \cdot I_{C\max}$ . Исходные данные к задаче приведены в таблице 8.3. Необходимо описать работу схемы, по аналитическим зависимостям определить сопротивление автоматического смещения  $R_{II}$ , сопротивление в цепи стока  $R_C$  и цепи затвора  $R_3$ , осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

Таблица 8.3 – Исходные данные к задаче 8.3

Номер варианта	Тип транзистора	$E_C$ , В
1	2	3
1	2N3970	5
2	2N3972	5
3	2N4860	5
4	2N5432	5
5	2N5434	5
6	2N3970	8
7	2N3972	8
8	2N4860	8
9	2N5432	8
10	2N5434	8
11	2N3970	10
12	2N3972	10
13	2N4860	10
14	2N5432	10
15	2N5434	10
16	2N3970	12
17	2N3972	12
18	2N4860	12
19	2N5432	12
20	2N5434	12
21	2N3970	15
22	2N3972	15
23	2N4860	15
24	2N5432	15
25	2N5434	15
26	2N3970	20
27	2N3972	20
28	2N4860	20
29	2N5432	20
30	2N5434	20

### Пример решения задачи 8.3.

Транзистор 2N3972 имеет канал  $n$ -типа и работает при  $U_C > 0$  и  $U_{ЗИ} \leq 0$ . Такой режим может быть обеспечен одним источником питания с применением так называемого «автоматического смещения». Схема имеет вид, показанный на рисунке 8.8.

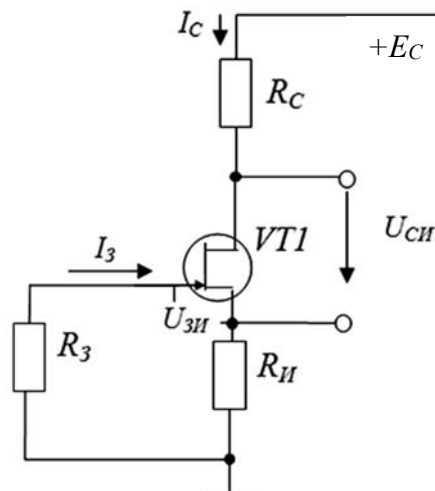


Рисунок 8.8 – Схема включения полевого транзистора с ОИ

Параметры транзистора 2N3972 (приложение Г):

– максимальное напряжение сток–исток  $U_{СИ\max} = -40$  В;

– напряжение отсечки  $U_{омс} = -0,5$  В;

– максимальный ток стока  $I_{C\max} = 30$  мА.

Аналитическая зависимость  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = \text{const}$  имеет вид:

$$I_C = I_{C\max} (1 - |U_{ЗИ}| / |U_{омс}|)^2.$$

Откуда

$$U_{ЗИ} = U_{омс} (1 - \sqrt{I_C / I_{C\max}}).$$

Пусть ток стока в рабочей точке вдвое меньше максимального тока  $I_{C\max}$ , т. е.  $I_C = 30/2 = 15$  мА. Тогда

$$U_{ЗИ} = -0,5 \left[ 1 - \sqrt{15 \cdot 10^{-3} / (30 \cdot 10^{-3})} \right] = -0,15 \text{ В.}$$

Найдем сопротивление автоматического смещения. Так как  $I_3 \ll I_C$ , напряжение затвор–исток равно падению напряжения на  $R_H$ , поэтому

$$R_H = |U_{ЗИ}| / I_C = 0,15 / (15 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом.}$$

Ближайший номинал из стандартного ряда E24 (см. приложение Б) равен 10 Ом.

Сопротивление резистора  $R_3$  выбираем из условия

$$I_3 R_3 = 0,01 U_{ЗИ}, \text{ приняв } I_3 = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ А.}$$

Отсюда получаем

$$R_3 = 0,01U_{3H} / I_3 = 0,01 \cdot 0,15 / 1,5 \cdot 10^{-8} = 100 \text{ кОм.}$$

Выбираем из ряда номиналов резистор с сопротивлением 100 кОм.

Сопротивление резистора  $R_C$  находим из уравнения токов и напряжений в схеме:

$$E_c = I_c(R_H + R_C) + U_{CH}.$$

Считаем, что усилитель работает в режиме класса А, и принимаем

$$U_{CH} \approx E_c / 2 = 10 \text{ В.}$$

Решаем уравнение относительно  $R_C$ :

$$R_C = \frac{E_c - U_{CH} - I_c R_H}{I_c} = \frac{20 - 10 - 75 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{15 \cdot 10^{-3}} = 657 \text{ кОм.}$$

Выбираем ближайший из ряда E24 номинал  $R_C = 680 \text{ кОм.}$

Модель схемы включения полевого транзистора в среде Multisim приведена на рисунке 8.9. Результаты моделирования:  $I_3 = 0,015 \text{ мкА}$ ;  $U_{3H} = -0,147 \text{ В}$ ,  $I_c = 15 \text{ мА}$  (задано  $I_c = 15 \text{ мА}$ );  $U_{CH} = 9,753 \text{ В}$  хорошо согласуются с расчётами.

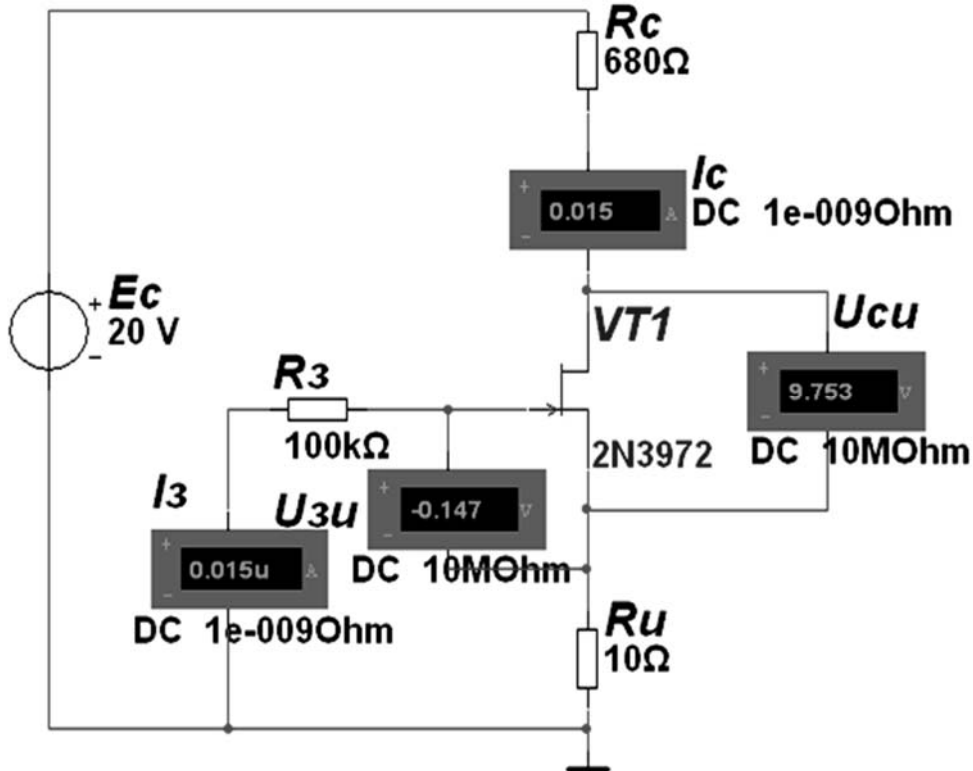


Рисунок 8.9 – Модель схемы включения полевого транзистора для обеспечения заданного выходного напряжения

## Список литературы

- 1 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд. – Москва: Форум; ИНФРА-М, 2017. – 480 с.
- 2 **Забродин, Ю. С.** Промышленная электроника: учебник / Ю. С. Забродин. – 2-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2016. – 496 с.
- 3 **Иванов, В. Н.** Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В. Н. Иванов, И. О. Мартынова. – Москва: Академия, 2016. – 288 с.
- 4 **Лачин, В. И.** Электроника: учебное пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 703 с.
- 5 Справочник по полупроводниковым приборам: транзисторам, тиристорам, диодам, оптоэлектронным приборам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://radio-hobby.org/modules/tdmdownloads/singlefile.php?cid=9&lid=49>. – Дата доступа: 01.11.2020.
- 6 **Москатов, Е. А.** Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – Москва: Радио, 2005. – 208 с.
- 7 **Марченко, А. Л.** Основы электроники: учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. – Москва: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.
- 8 **Кузовкин, В. А.** Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim: учебное пособие / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 336 с.



## Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Параметры выпрямительных диодов

Тип диода	$I_{np \max}, A$	$U_{обр \max}, B$	$U_{np \max}, B$
1N4148	0,15	75	1
1N3600	0,2	50	1
1N4001	1	50	1,1
1N4002	1	100	1,1
1N4934	1	100	1,1
1N5400	3	50	1,1
1N5401	3	100	1,1

## 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.

## Приложение В (справочное)

Таблица В.1 – Параметры биполярных транзисторов

Тип транзистора	$I_{K \max}, A$	$U_{KЭ \max}, B$	$h_{21Э}$	$I_{K0}, мкА$	$R_{б}, Ом$	$U_{Б0}, B$
BC547A (КТ3102Б)	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
2N3879 (КТ908А)	7	75	12	1,5	1,5	0,6

## Приложение Г (справочное)

Таблица Г.1 – Параметры полевых транзисторов

Тип транзистора	$U_{си \max}, B$	$I_{с \max}, A$	$U_{отс}, B$
2N3970	-40	0,150	-4,0
2N3972	-40	0,03	-0,5
2N4860	-30	0,1	-2,0
2N5432	-25	0,150	-4,0
2N5434	-25	0,03	-1,0