

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности 6-05-0715-07
«Эксплуатация наземных транспортных
и технологических машин и комплексов»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 621.3
ББК 31.2:32.85
Э45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «1» сентября 2025 г.,
протокол № 1

Составитель ст. преподаватель И. А. Черкасова

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н. В. Герасименко

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов специальности 6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных транспортных и технологических машин и комплексов» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

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, 2026

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.....	8
3 Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником питания с применением комплексных чисел.....	13
4 Практическое занятие № 4. Анализ простейших трехфазных цепей с помощью комплексных чисел и векторных диаграмм.....	18
5 Практическое занятие № 5. Расчет параметров трансформатора.....	22
6 Практическое занятие № 6. Расчет параметров электрических машин по паспортным данным.....	31
7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе полупроводниковых приборов.....	36
8 Практическое занятие № 8. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей.....	41
Список литературы.....	46

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

Основные теоретические положения

1 Закон Ома для пассивного участка цепи

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

2 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.

3 Первый закон Кирхгофа для электрического узла

$$\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} = 0,$$

где I_{κ} – ток κ -й ветви, присоединенной к данному узлу, причем втекающие токи в узел берутся со знаком плюс, вытекающие – со знаком минус либо наоборот.

4 Второй закон Кирхгофа для замкнутого контура

$$\sum_{\kappa=1}^n E_{\kappa} = \sum_{i=1}^m I_i R_i,$$

где E_{κ} – ЭДС κ -го источника контура;

I_i – ток, протекающий через резистор R_i .

I_i и E_{κ} берутся со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода контура.

5 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 не совпадают.

6 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. 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 1.1);
- преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду и наоборот (рисунок 1.2).

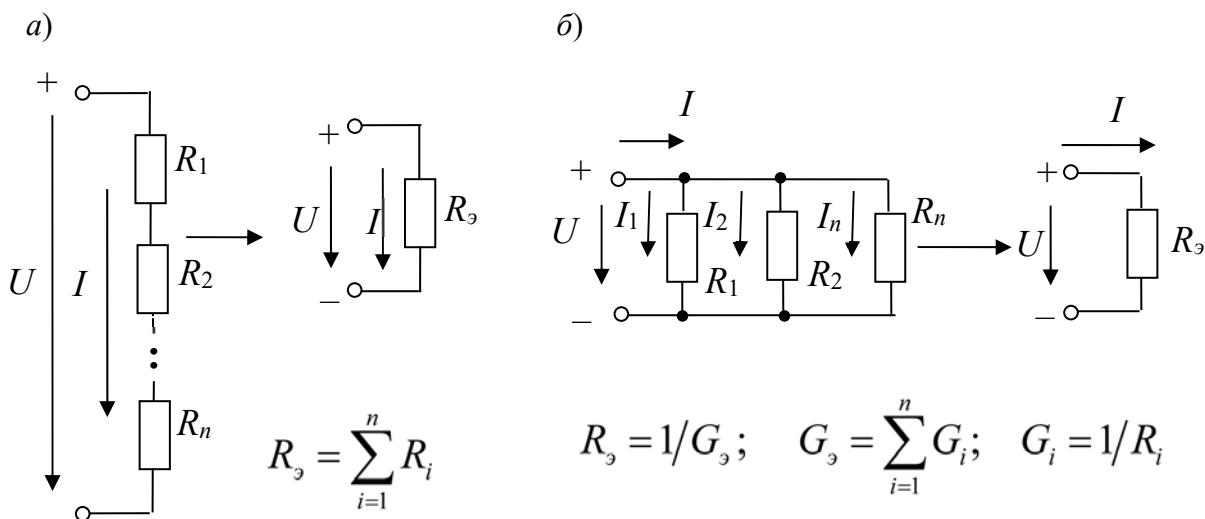


Рисунок 1.1 – Последовательное и параллельное соединение резисторов

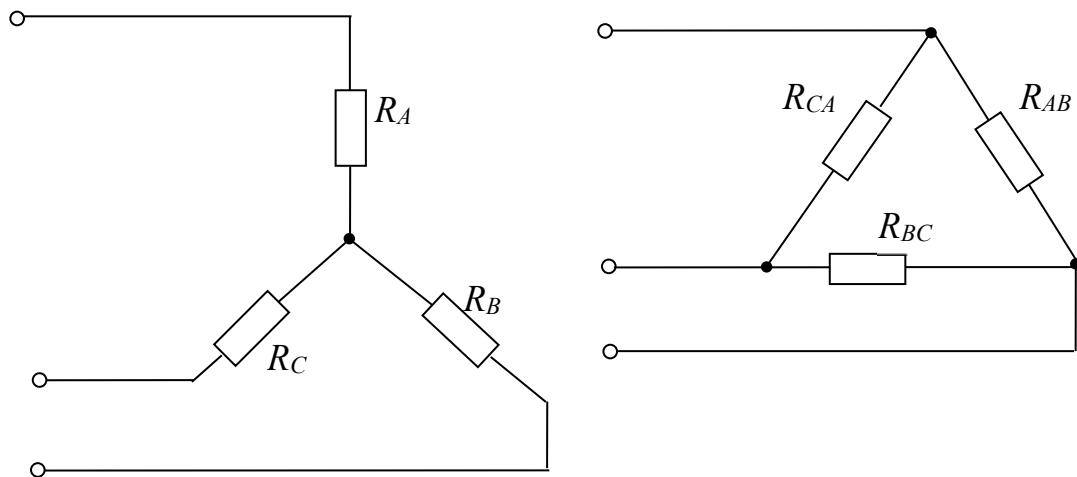


Рисунок 1.2 – Соединение резисторов звездой и треугольником

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)

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

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

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

Примеры решения задач

Задача. Определить токи и напряжения на отдельных участках схемы (рисунок 1.3), 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.

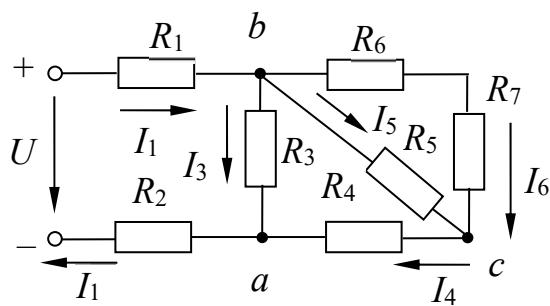


Рисунок 1.3 – Электрическая цепь постоянного тока

Решение

Определим эквивалентное сопротивление схемы:

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

т. к. резисторы R_6 и R_7 соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором R_5 .

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

т. к. резисторы R_{bc} и R_4 соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором R_3 .

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

Ток I_1 определяем по закону Ома:

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

Напряжение между точками a и b определяем:

– по закону Ома как

$$U_{ba} = R_{ba} \cdot I_1 = 40 \cdot 5 = 200 \text{ В;}$$

– по второму закону Кирхгофа как

$$U_{ba} = U - (R_1 + R_2) \cdot I_1 = 200 \text{ В.}$$

Токи

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

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

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

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 1.4).

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.

Показания измерительных приборов соответствуют расчетным значениям.

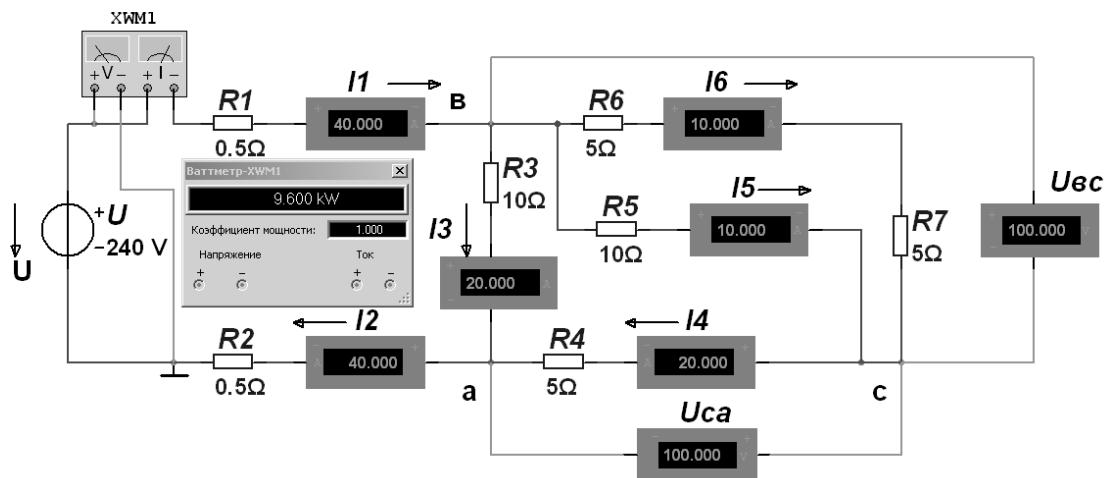


Рисунок 1.4 – Модель электрической цепи постоянного тока

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

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

Основные теоретические положения

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.

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов.

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. Рассмотреть пример расчета электрической цепи (рисунок 2.1) методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов.

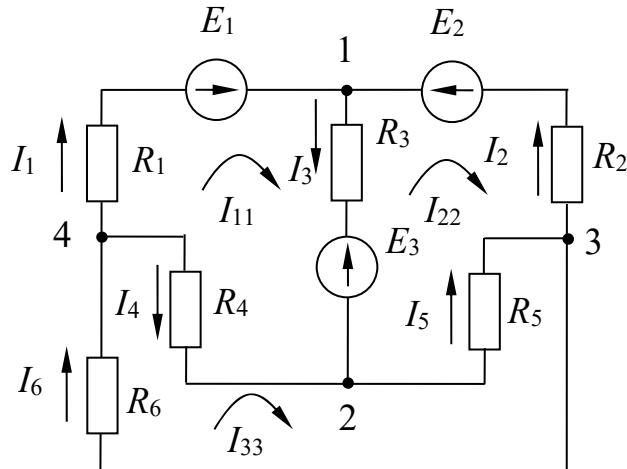


Рисунок 2.1 – Электрическая цепь к примеру расчета методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов

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 $n = 6$.

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

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

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

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

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

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

Метод контурных токов.

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

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

Система уравнений

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

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

Найдем 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:

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

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 плюс, если их направления совпадают с направлением тока рассматриваемой ветви.

Величина U_{AB} находится по формуле

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

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

Задача 2. Составить необходимые уравнения для определения значений токов в ветвях схемы (рисунок 2.2), используя метод двух узлов.

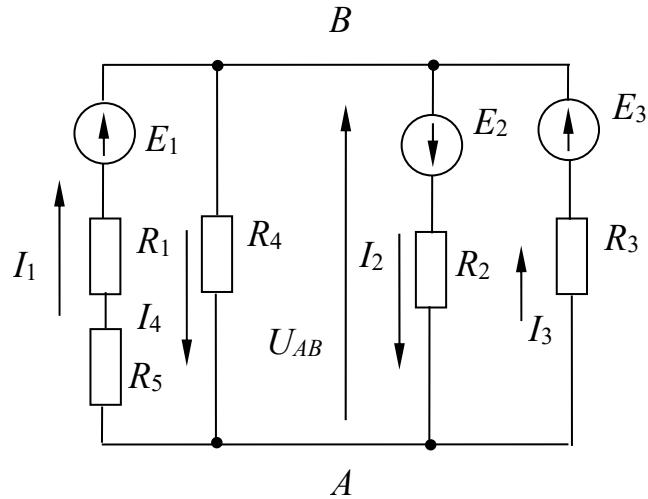


Рисунок 2.2 – Электрическая цепь к примеру расчета методом двух узлов

По закону Ома токи в ветвях

$$I_1 = (E_1 + U_{AB}) \cdot G_1; \quad I_2 = (E_2 - U_{AB}) \cdot G_2; \quad I_3 = (E_3 + U_{AB}) \cdot G_3; \quad I_4 = -U_{AB} \cdot G_4,$$

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

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

Расчет сложных 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_{k3}).

Ток в i -й ветви определяется по формуле

$$I_i = \frac{U_{xx}}{R_{k3} + R_i},$$

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

R_{k3} – внутреннее сопротивление цепи при отключенной нагрузке и закороченных источниках ЭДС;

R_i – сопротивление резистора, где определяется ток.

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

Сопротивление R_{κ_3} определяется как $R_{\text{экв}}$ электрической цепи относительно точек разрыва и закороченных источников ЭДС.

Задача 3. Определить значение тока I_5 в схеме на рисунке 2.3, а.

Определяем напряжение холостого хода U_{xx} (рисунок 2.3, б), используя второй закон Кирхгофа:

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

Токи в ветвях (см. рисунок 2.3, б)

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

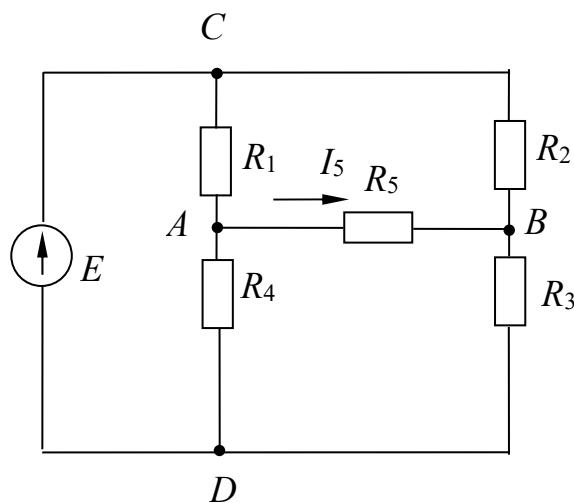
Определяем значение сопротивления R_{κ_3} (рисунок 2.3, в):

$$R_{\kappa_3} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

Определяем значение тока I_5 :

$$I_5 = \frac{U_{xx}}{R_{\kappa_3} + R_5}.$$

а)



б)

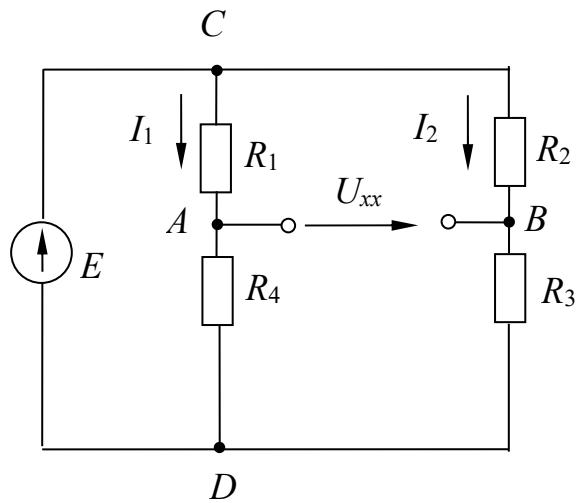
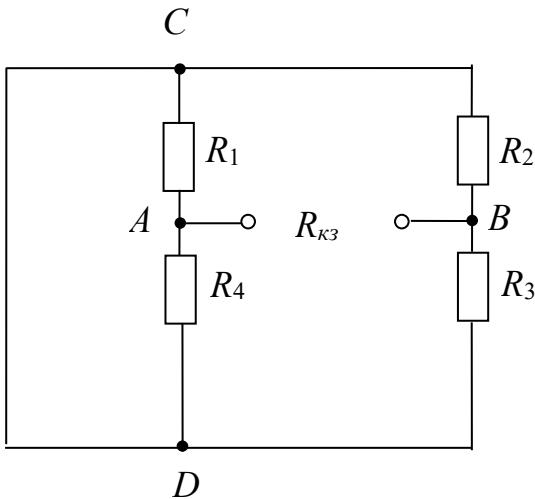


Рисунок 2.3 – Электрические схемы к примеру расчета методом эквивалентного генератора

б)



Окончание рисунка 2.3

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

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

Основные теоретические положения

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 \$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j(\pm\varphi)}\$, а комплекс действующего значения тока \$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm\varphi)}\$. Аналогично

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm\varphi)}.$$

Закон Ома в символьической форме имеет вид

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

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

При последовательном соединении элементов R, L, C

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

$$\text{где } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; \varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

При параллельном соединении элементов

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

Примеры решения задач

Задача 1. 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 3.1, а) $U = 127$ В и частота $f = 50$ Гц. Оуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

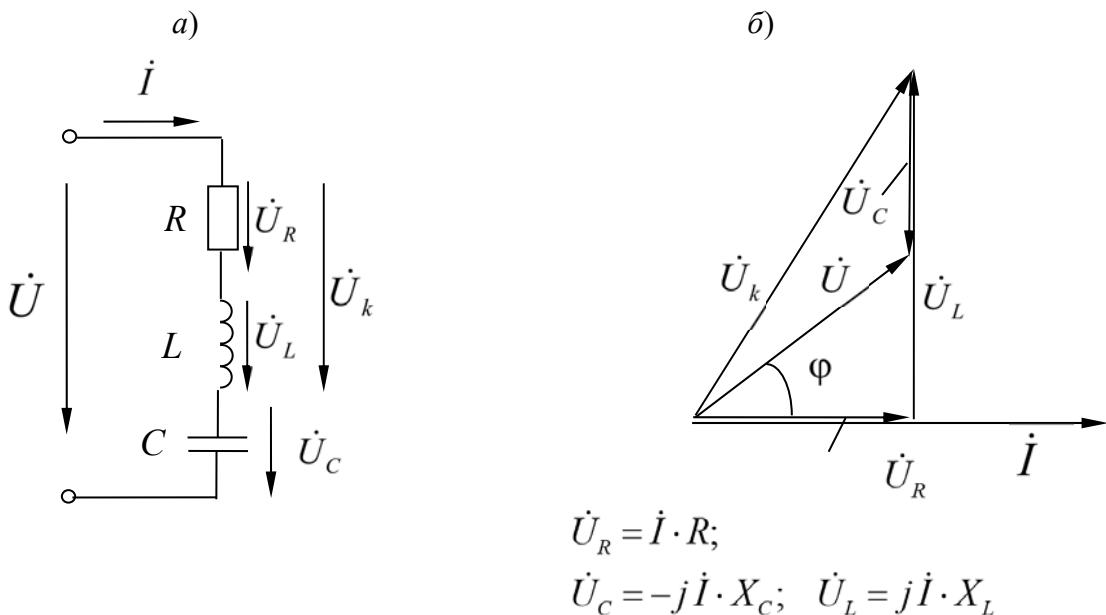


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь переменного тока

Решение

Реактивные сопротивления элементов цепи

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

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

Комплекс полного сопротивления цепи

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

Комплекс полного сопротивления катушки

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

Комплексы напряжения и тока

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

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

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

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

Следовательно, активная мощность цепи $P = 1338$ 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

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

Векторная диаграмма приведена на рисунке 3.1, б.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование ее работы в среде Multisim (рисунок 3.2).

В соответствии с показаниями ваттметра можно записать следующее: $P = 1343$ Вт, $\cos \varphi = 0,707$, $\varphi = 45^\circ$ (напряжение опережает ток по фазе),

$S = P/\cos\varphi = 1900 \text{ B}\cdot\text{A}$, $Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1343 \text{ вар}$, что с небольшой погрешностью соответствует расчетным значениям.

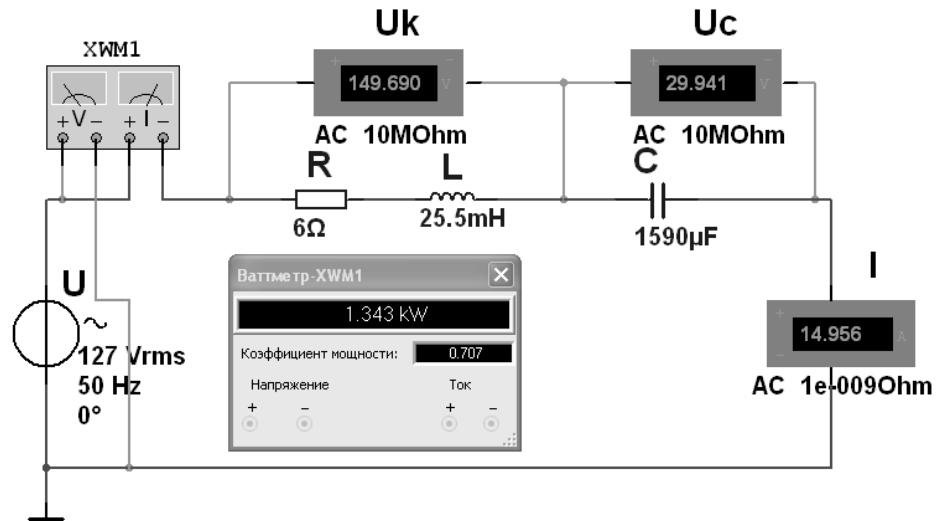


Рисунок 3.2 – Модель электрической цепи переменного тока в среде Multisim

Задача 2. Определить токи в электрической цепи (рисунок 3.3), если напряжение на входе $U_{ab} = 120 \text{ В}$, а значения сопротивлений $X_{L0} = 4 \text{ Ом}$, $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $X_{L1} = 8 \text{ Ом}$, $X_C = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

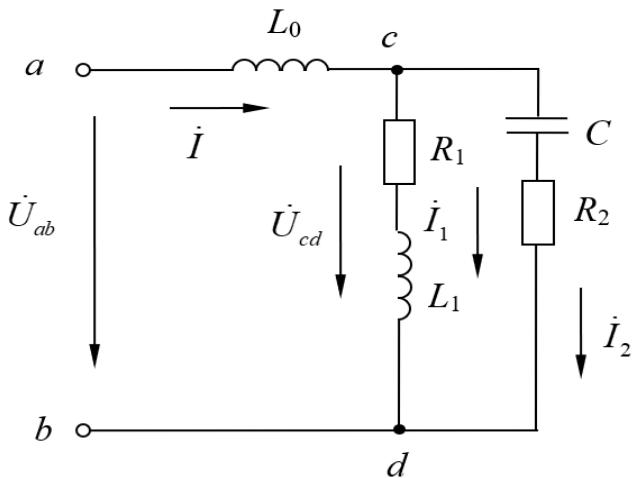


Рисунок 3.3 – Электрическая цепь переменного тока со смешанным соединением элементов

Решение

Входное комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= Z_0 + Z_{cd} = Z_0 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = jX_{L0} + \frac{(R_1 + jX_{L1}) \cdot (R_2 - jX_C)}{R_1 + jX_{L1} + R_2 - jX_C} = \\ &= j4 + \frac{(6 + j8) \cdot (5 - j5)}{6 + j8 + 5 - j5} = 6,15 + j3,23 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Общий ток цепи

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

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

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

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

откуда $P = 1846$ Вт; $Q = 970$ вар.

Модель электрической цепи в среде Multisim приведена на рисунке 3.4. Действующие значения токов I_1, I_2, I_3 , напряжения U_{cd} и активной мощности цепи P с небольшой погрешностью соответствуют расчетным.

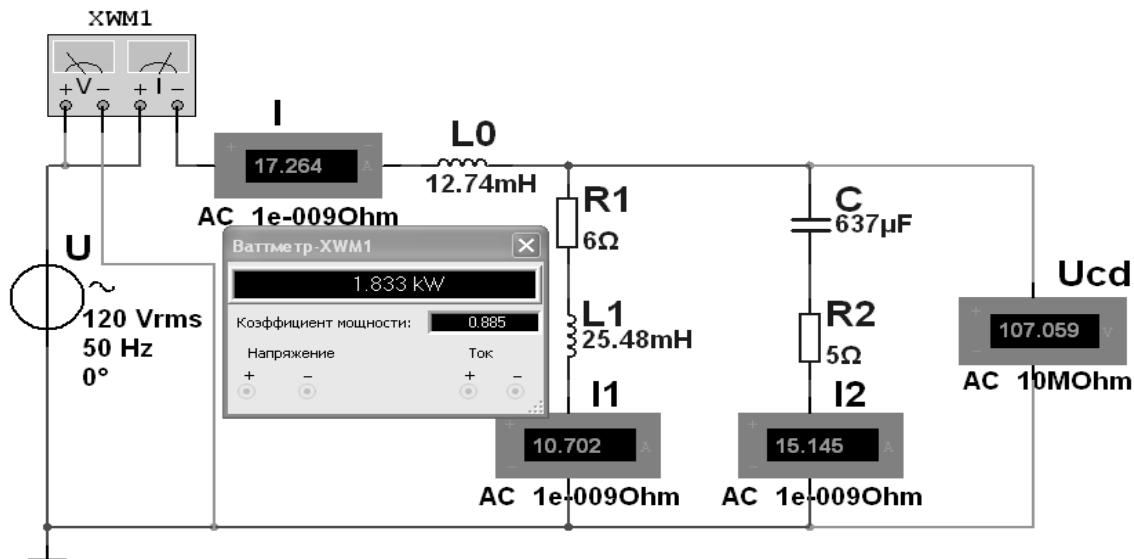


Рисунок 3.4 – Модель электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачу, предложенную преподавателем.

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

Основные теоретические положения

Фазные напряжения для схемы (рисунок 4.1, *a*) 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 $U_A = U_B = U_C = U_\phi = U_\pi / \sqrt{3}$.

Для схемы (рисунок 4.1, *б*) фазные и линейные напряжения

$$U_\pi = U_\phi.$$

В комплексной форме

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

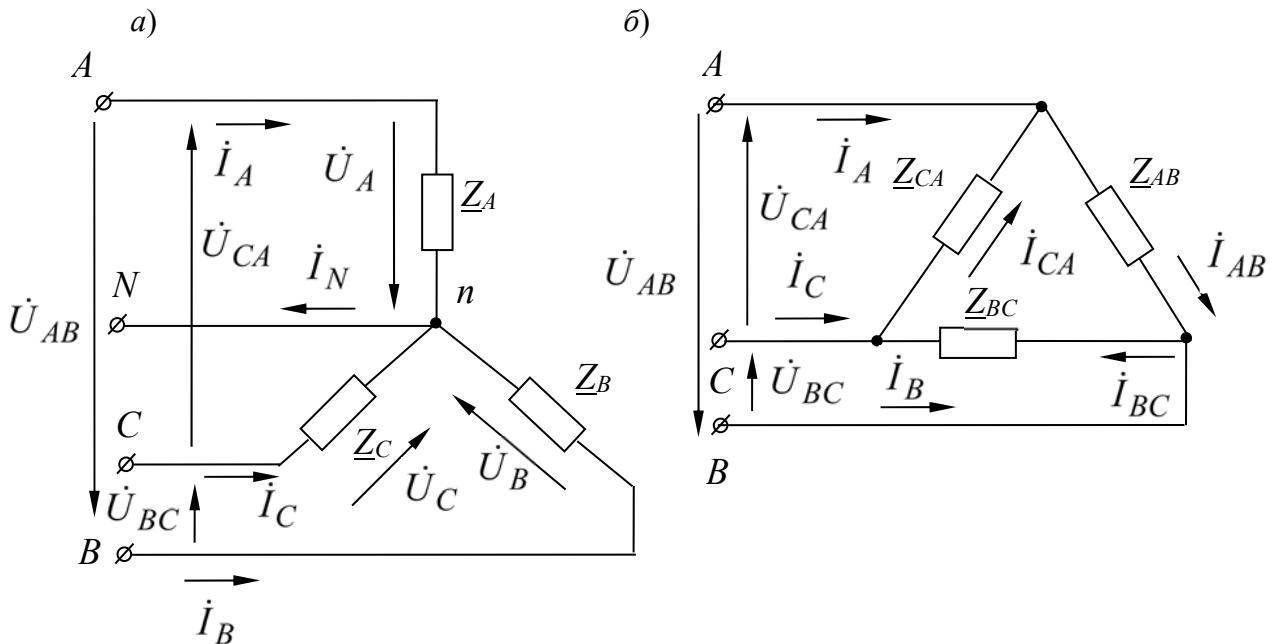


Рисунок 4.1 – Трехфазные электрические цепи

Примеры решения задач

Задача 1. К трехфазной линии электропередачи (рисунок 4.2), линейные напряжения которой симметричны: $\dot{U}_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220$ В, присоединены три приемника энергии по схеме треугольник. Комплексные сопротивления этих приемников $\underline{Z}_{AB} = 22$ Ом, $\underline{Z}_{BC} = 19 - j11$ Ом, $\underline{Z}_{CA} = 19 + j11$ Ом. Определить линейные и фазные токи в цепи и построить векторную диаграмму.

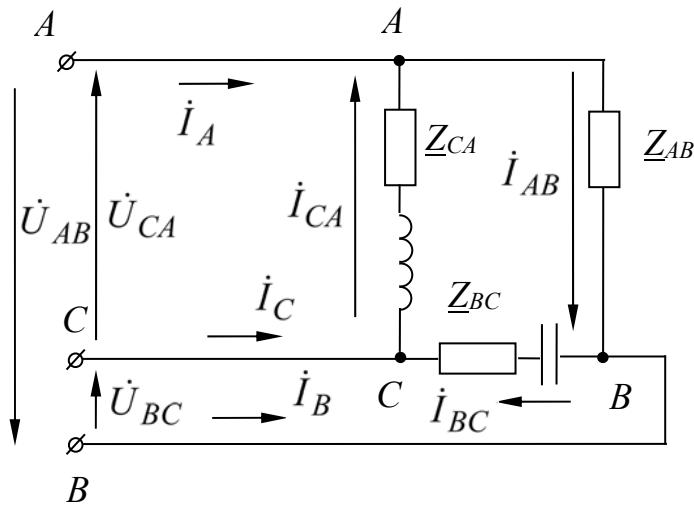


Рисунок 4.2 – Трехфазная электрическая цепь

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:

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

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

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

Применив первый закон Кирхгофа к точкам A , B , C , найдем линейные токи:

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

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = j10 - 10 = 14,1 \cdot e^{-j135^\circ} \text{ A};$$

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

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 4.3), если линейные напряжения на входе в цепь симметричны: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380$ В и нагрузка также симметрична: $\underline{Z} = 10 + j10$ Ом.

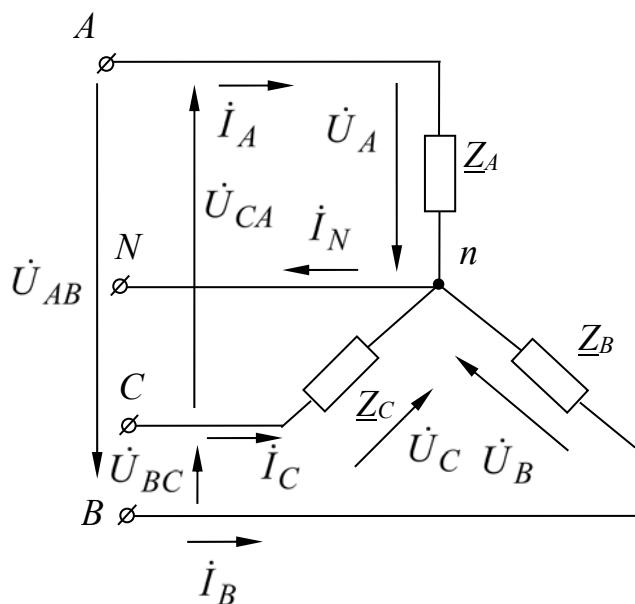


Рисунок 4.3 – Трехфазная электрическая цепь

Решение

Для соединения звездой фазное напряжение

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

Тогда комплексные значения фазных напряжений

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

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)

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{220}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{j0^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{j75^\circ} \text{ A}.$$

Ток в нейтральном проводе

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

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

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 4.4).

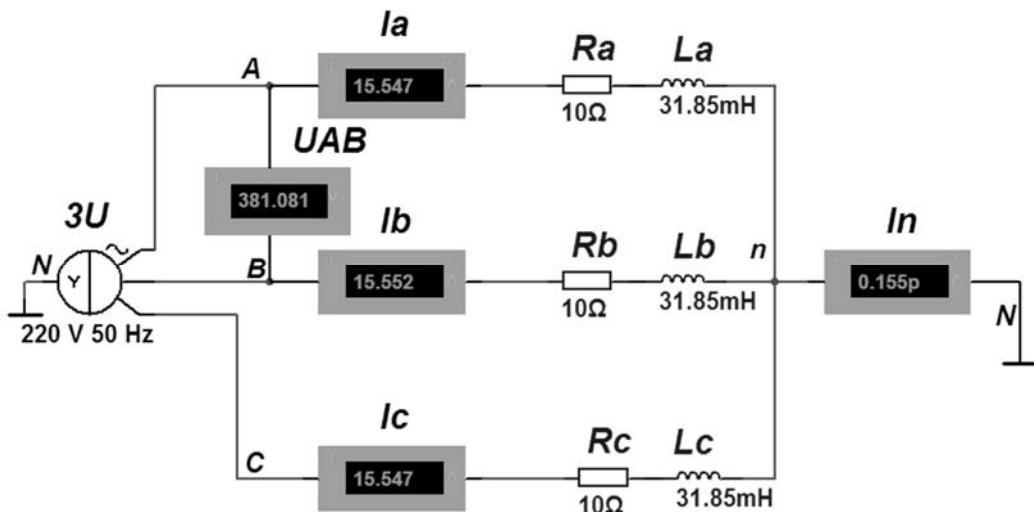


Рисунок 4.4 – Модель трехфазной электрической цепи переменного тока

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем, при аварийных режимах работы сети: обрыв фазы; обрыв линейного провода.

5 Практическое занятие № 5. Расчет параметров трансформатора

Основные теоретические положения

Однофазные трансформаторы.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного по величине напряжения в переменный ток другого по величине напряжения с сохранением частоты преобразуемого напряжения.

К основным параметрам трансформатора относятся:

- номинальная мощность S_n ;
- номинальное напряжение на первичной обмотке U_{1n} ;
- номинальное вторичное напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и номинальном первичном напряжении U_{2n} ;
- номинальный первичный и вторичный токи, протекающие по обмоткам в номинальном режиме работы трансформатора, I_{1n}, I_{2n} .

Отношение $n = E_1 / E_2 = W_1 / W_2 = U_1 / U_2 = I_2 / I_1$ называется коэффициентом трансформации трансформатора.

Номинальные токи обмоток трансформатора

$$I_{1n} = S_n / U_{1n}; \quad I_{2n} = S_n / U_{2n}.$$

Коэффициент загрузки трансформатора

$$\beta = I_1 / I_{1n} = I_2 / I_{2n}.$$

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_k},$$

где $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки;

P_0 – потери мощности в трансформаторе в режиме холостого хода;

P_k – потери мощности в трансформаторе в режиме короткого замыкания, Вт.

$$S_n = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{2n} \cdot I_{2n}.$$

Максимальный КПД соответствует следующему значению коэффициента загрузки трансформатора:

$$\beta_{\max} = \sqrt{P_0 / P_k}.$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_0 = \frac{P_0}{U_{1n} \cdot \cos \varphi_0},$$

где $\cos\varphi_0$ – коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода.
Схемы замещения трансформатора представлены на рисунке 5.1.

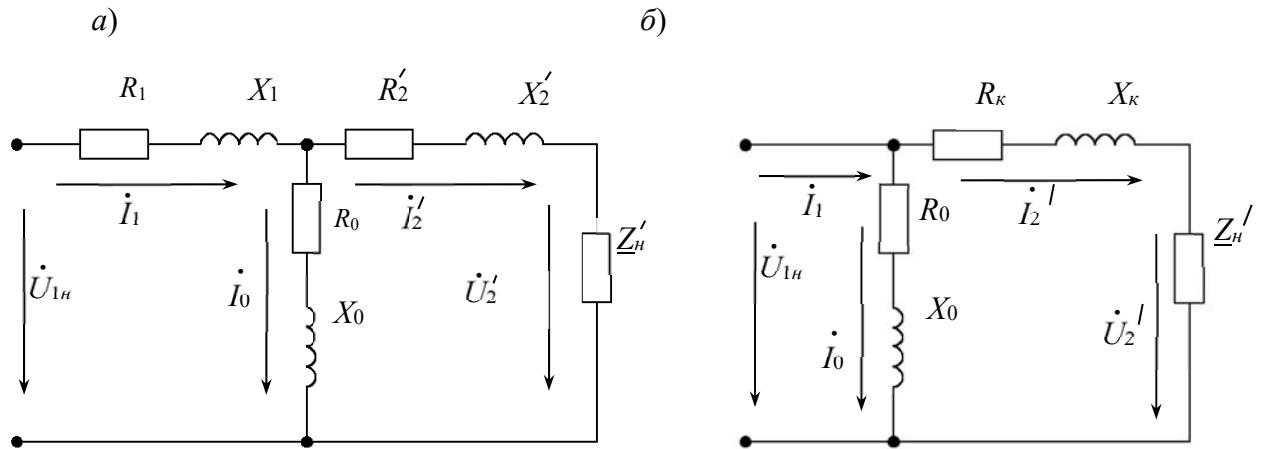


Рисунок 5.1 – Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения трансформатора

Сопротивления намагничивающей цепи

$$Z_0 = U_{1h} / I_0; \quad R_0 = P_0 / (I_0)^2; \quad X_0 = \sqrt{(Z_0)^2 - (R_0)^2}$$

либо

$$R_0 = Z_0 \cdot \cos\varphi_0; \quad X_0 = Z_0 \cdot \sin\varphi_0.$$

Сопротивления короткого замыкания

$$Z_k = U_{1k} / I_{1k}; \quad R_k = P_k / (I_{1k})^2; \quad X_k = \sqrt{(Z_k)^2 - (R_k)^2}$$

либо

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k; \quad X_k = Z_k \cdot \sin\varphi_k,$$

где $\cos\varphi_k$ – коэффициент мощности трансформатора в режиме короткого замыкания.

Сопротивления первичной и вторичной обмоток

$$R_1 = R'_2 = R_k / 2; \quad X_1 = X'_2 = X_k / 2;$$

$$R_2 = R'_1 / n^2; \quad X_2 = X'_1 / n^2.$$

Процентное изменение напряжения на вторичной обмотке

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{ka} \% \cdot \cos\varphi_2 \pm U_{kp} \% \cdot \cos\varphi_2),$$

где $U_{ka} \%$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора, $U_{ka} \% = (R_k \cdot I_{1h} / U_{1h}) \cdot 100 \%$;

$U_{kp}\%$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора, $U_{kp}\% = (X_k \cdot I_{1H} / U_{1H}) \cdot 100\%$ либо

$$U_{kp}\% = \sqrt{(U_k\%)^2 - (U_{ka}\%)^2},$$

где $U_k\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Знак плюс соответствует индуктивной нагрузке, а знак минус – емкостной.
Напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = U_{2H} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_2\%}{100}\right).$$

Приведенное значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_k + R'_H)^2 + (X_k + X'_H)^2}},$$

где R'_H, X'_H – приведенные значения сопротивлений нагрузки, $R'_H = Z'_H \cdot \cos \varphi_2$, $X'_H = Z'_H \cdot \sin \varphi_2$, ($Z'_H = Z_H \cdot n^2$).

Ток во вторичной обмотке $I_2 = I'_2 \cdot n$.

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = I'_2 \cdot Z'_H; \quad U_2 = U'_2 / n.$$

Трехфазные трансформаторы.

Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами:
– при соединении обмоток звездой

$$U_{1H} = U_{1L} = \sqrt{3} \cdot U_{1\phi}; \quad I_{1H} = I_{1L} = I_{1\phi}; \quad U_{2H} = U_{2L} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi}; \quad I_{2H} = I_{2L} = I_{2\phi};$$

– при соединении обмоток треугольником

$$U_{1H} = U_{1L} = U_{1\phi}; \quad I_{1H} = I_{1L} = \sqrt{3} \cdot I_{1\phi}; \quad U_{2H} = U_{2L} = U_{2\phi}; \quad I_{2H} = I_{2L} = \sqrt{3} \cdot I_{2\phi}.$$

Полная мощность

$$S = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_{1L}; \quad S = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{2L} \cdot I_{2L}.$$

Номинальные токи в обмотках

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}; \quad I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}}.$$

Сопротивления короткого замыкания

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_{1\kappa\phi}}; \quad R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa\phi}}{3 \cdot I_{1\kappa\phi}^2}; \quad X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}.$$

Сопротивления намагничивающей цепи

$$Z_0 = \frac{U_{0\phi}}{I_{0\phi}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0\phi}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Сопротивления первичной обмотки

$$R_1 = R'_2 = R_{\kappa} / 2; \quad X_1 = X'_2 = X_{\kappa} / 2.$$

Сопротивления вторичной обмотки

$$R_2 = R'_1 = R_{\phi} / n_{\phi}^2; \quad X_2 = X'_1 = X_{\phi} / n_{\phi}^2,$$

где n_{ϕ} – фазный коэффициент трансформации трехфазного трансформатора.

При соединении обмоток трансформатора «звезда/звезда» и «треугольник/треугольник»

$$n_{\pi} = n_{\phi} = U_{1\pi} / U_{2\pi} = U_{1\phi} / U_{2\phi}.$$

При соединении обмоток трансформатора «звезда/треугольник»

$$n_{\pi} = U_{1\pi} / U_{2\pi}; \quad n_{\phi} = U_{1\phi} / U_{2\phi} = U_{1\pi} / \sqrt{3} \cdot U_{2\pi}.$$

При соединении обмоток трансформатора «треугольник/звезда»

$$n_{\pi} = U_{1\pi} / U_{2\pi}; \quad n_{\phi} = U_{1\phi} / U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{1\pi} / U_{2\pi}.$$

Расчет параметров и характеристик трансформаторов

Задача 1. Однофазный двухобмоточный трансформатор испытали в режиме холостого хода и короткого замыкания. При опытах были получены следующие данные: номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1\pi} = 10000$ В; ток холостого хода $I_0 = 0,25$ А; потери мощности холостого хода $P_0 = 125$ Вт; напряжение на вторичной обмотке $U_{2\pi} = 400$ В; номинальное напряжение короткого замыкания $U_{1\kappa} = 500$ В; номинальный ток первичной обмотки $I_{1\pi} = 2,5$ А; номинальный ток вторичной обмотки $I_{2\pi} = 62,5$ А; потери мощности короткого замыкания $P_{\kappa} = 600$ Вт.

Определить: полную мощность трансформатора; коэффициент трансформации; коэффициент мощности при холостом ходе и опыте короткого замыкания; полное, активное и реактивное сопротивления первичной и вторичной обмоток;

номинальный КПД; напряжение на вторичной обмотке при подключении нагрузки $Z_h = 8 \text{ Ом}$; $\cos\varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер).

Решение

Полная мощность трансформатора

$$S_h = U_{1h} \cdot I_{1h} = 10000 \cdot 2,5 = 25000 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Коэффициент трансформации

$$n = U_{1h} / U_{2h} = 10000 / 400 = 25.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_0 = P_0 / (U_{1h} \cdot I_0) = 125 / (10000 \cdot 0,25) = 0,05.$$

Полное сопротивление намагничивающей цепи

$$Z_0 = U_{1h} / I_0 = 10000 / 0,25 = 40000 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление намагничивающей цепи

$$R_0 = P_0 / I_0^2 = 125 / 0,25^2 = 2000 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление намагничивающей ветви

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{40000^2 - 2000^2} = 39950 \text{ Ом.}$$

Индуктивность намагничивающей цепи

$$L_0 = X_0 / \omega = X_0 / 2 \cdot \pi \cdot f = 39950 / 314 = 127,2 \text{ Гн.}$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании

$$\cos\varphi_k = P_k / (U_{1k} \cdot I_{1h}) = 600 / (500 \cdot 2,5) = 0,48.$$

Полное сопротивление обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$Z_k = U_{1k} / I_{1h} = 500 / 2,5 = 200 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$R_k = P_k / I_{1h}^2 = 600 / 2,5^2 = 96 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{200^2 - 96^2} = 175 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$L_k = X_k / \omega = 175 / 314 = 0,56 \text{ Гн.}$$

Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора

$$R_1 = R'_2 = R_\kappa / 2 = 96 / 2 = 48 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление первичной обмотки трансформатора

$$X_1 = X'_2 = X_\kappa / 2 = 175 / 2 = 87,5 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$R_2 = R'_1 = R_\kappa / n^2 = 48 / 25^2 = 0,0768 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$X_2 = X'_1 = X_\kappa / n^2 = 87,5 / 25^2 = 0,14 \text{ Ом.}$$

Приведенное значение тока трансформатора при заданной нагрузке

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_\kappa + R'_\kappa)^2 + (X_\kappa + X'_\kappa)^2}} = \frac{10000}{\sqrt{(96 + 4000)^2 + (175 + 3000)^2}} = 1,93 \text{ А,}$$

где

$$R'_\kappa = Z_\kappa \cdot \cos \varphi_2 = 8 \cdot 0,8 = 6,4 \text{ Ом;}$$

$$X'_\kappa = Z_\kappa \cdot \sin \varphi_2 = 8 \cdot 0,6 = 2,4 \text{ Ом;}$$

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6;$$

$$R'_\kappa = n^2 \cdot R_\kappa = 25^2 \cdot 6,4 = 4000 \text{ Ом;}$$

$$X'_\kappa = n^2 \cdot X_\kappa = 25^2 \cdot 4,8 = 3000 \text{ Ом;}$$

$$L'_\kappa = X'_\kappa / \omega = 3000 / 314 = 9,55 \text{ Гн.}$$

Приведенное напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U'_2 = I'_2 \cdot \sqrt{(R'_\kappa)^2 + (X'_\kappa)^2} = 1,93 \cdot \sqrt{4000^2 + 3000^2} = 9650 \text{ В.}$$

Ток во вторичной обмотке трансформатора при заданной нагрузке определяется следующим образом:

$$I_2 = I'_2 \cdot n = 1,93 \cdot 25 = 48,25 \text{ А.}$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора при заданной нагрузке определяется по формуле

$$U_2 = I_2 \cdot Z_\kappa = 48,25 \cdot 8 = 386 \text{ В.}$$

Для подтверждения правильности расчетов проведем моделирование работы трансформатора в среде Multisim, воспользовавшись его Г-образной схемой замещения (см. рисунок 5.1, б).

В режиме холостого хода (рисунок 5.2) получаем $I_0 = 0,25 \text{ A}$ и $P_0 = 129,694 \text{ Вт}$, что соответствует заданию.

В режиме короткого замыкания (рисунок 5.3) при $U_k = 500 \text{ В}$ получаем $I_k = I_{1h} = 2,506 \text{ A}$ и $P_k = 597,695 \text{ Вт}$, что соответствует заданию.

При работе трансформатора под нагрузкой (рисунок 5.4) $Z_h = 8 \text{ Ом}$, $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($R'_h = 4000 \text{ Ом}$, $L'_h = 9,55 \text{ Гн}$) получаем $I'_2 = 1,929 \text{ A}$ и $U'_2 = 9647 \text{ В}$, что соответствует расчетным значениям.

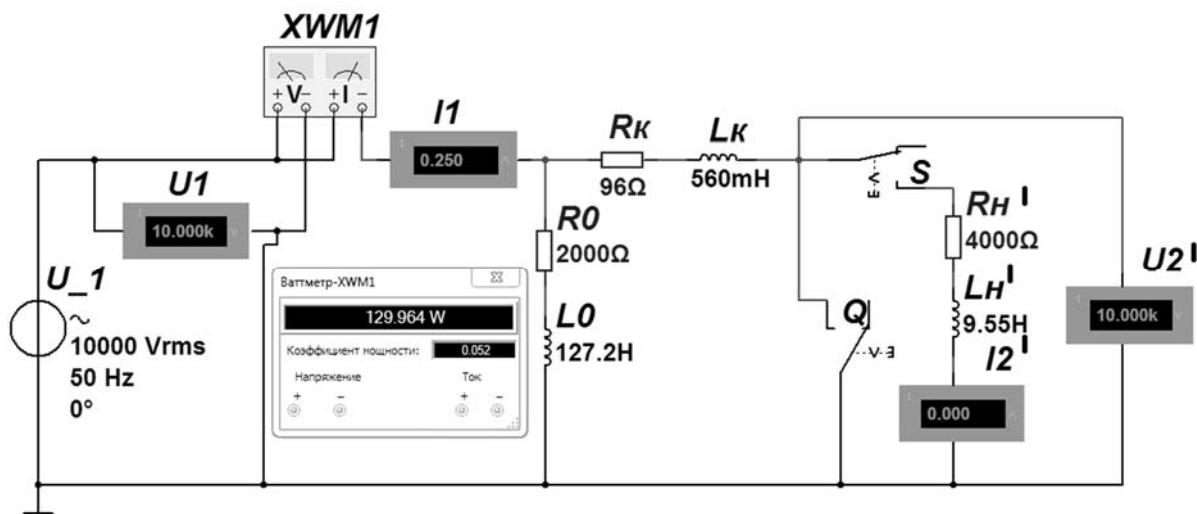


Рисунок 5.2 – Модель трансформатора в режиме холостого хода

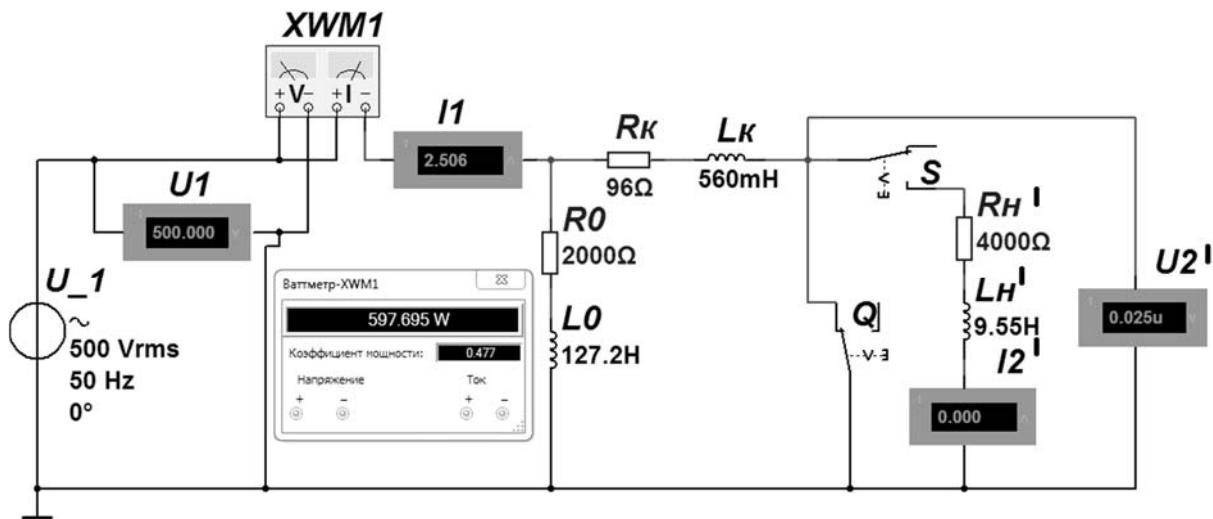


Рисунок 5.3 – Модель трансформатора в режиме короткого замыкания

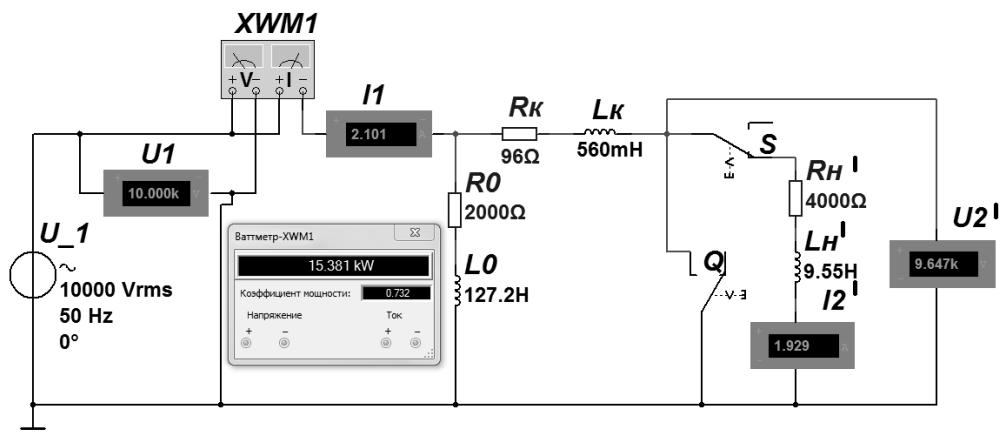


Рисунок 5.4 – Модель трансформатора при работе под нагрузкой

Задача 2. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$ трехфазного трансформатора ТМ-100/6.

Исходные данные к задаче:

- номинальная мощность $S_n = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$;
- номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{1n} = 6 \text{ кВ}$;
- напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{2n} = 0,36 \text{ кВ}$;
- напряжение короткого замыкания $U_k\% = 6 \%$ от U_{1n} ;
- мощность короткого замыкания $P_k = 0,9 \text{ кВт}$;
- коэффициент мощности нагрузки $\cos\phi = 0,75$.

Соединение обмоток трансформатора Y/Y («звезда/звезда») представлено на рисунке 5.5.

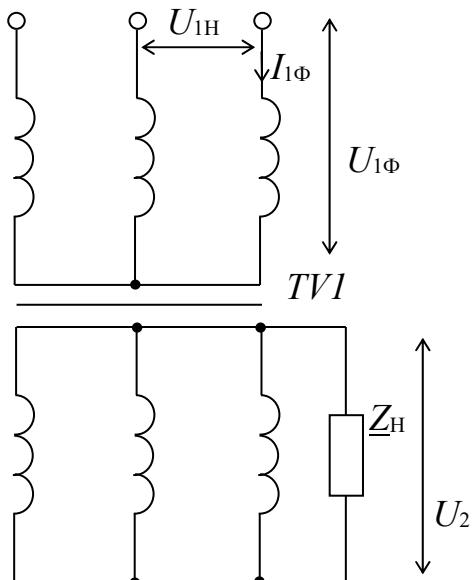


Рисунок 5.5 – Схема трехфазного трансформатора

Решение

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

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{\kappa.a} \% \cdot \cos \varphi_2 + U_{\kappa.p} \% \cdot \sin \varphi_2),$$

где $U_{\kappa.a} \%$, $U_{\kappa.p} \%$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания соответственно.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле

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

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1H} = \frac{S_h}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,623 \text{ A.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_\kappa = \frac{P_\kappa}{3 \cdot I_{1\phi}^2} = \frac{900}{3 \cdot 9,623^2} = 3,24 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_\kappa = \frac{U_{K1\phi}}{I_{1\phi}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot I_{1\phi}} \cdot \frac{U_K \%}{100} = \frac{6000 \cdot 6}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 9,623} = 21,6 \text{ Ом.}$$

Для соединения «звезда/звезда»

$$I_{1H} = I_{1\phi}; \quad U_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_{1\phi};$$

$$\cos \varphi_\kappa = \frac{R_\kappa}{Z_\kappa} = \frac{3,24}{21,6} = 0,15;$$

$$U_{\kappa.a} \% = U_\kappa \% \cdot \cos \varphi_\kappa = 6 \cdot 0,15 = 0,9 \%;$$

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

Для $\beta = 0$ (рисунок 5.6, точка 1)

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

Для $\beta = 1$ (рисунок 5.6, точка 2)

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{\kappa.a} \% \cdot \cos \varphi_2 + U_{\kappa.p} \% \cdot \sin \varphi_2) = \\ 1 \cdot (0,9 \cdot 0,75 + 5,932 \cdot \sqrt{1 - 0,15^2}) = 4,599 \%;$$

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

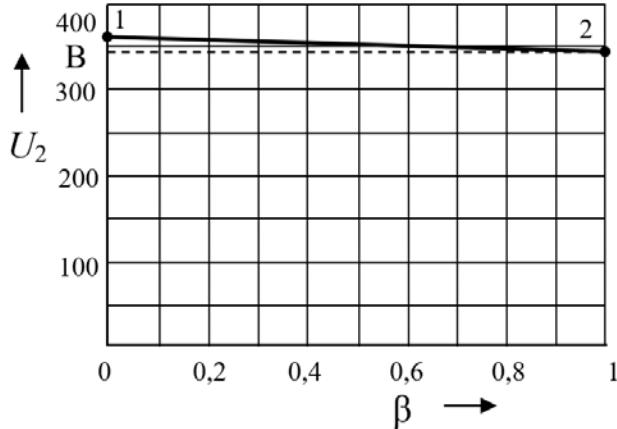


Рисунок 5.6 – Внешняя характеристика трансформатора

Самостоятельная работа

1 По результатам опыта короткого замыкания ($P_k = 800$ Вт, $U_{1k} = 20$ В, $I_{1k} = 100$ А) определить параметры R_k и X_k схемы замещения трансформатора. Нарисовать Г-образную схему замещения трансформатора для данного режима.

2 Определить параметры Г-образной схемы замещения однофазного трансформатора номинальной мощностью 25 кВ·А по данным опытов холостого хода и короткого замыкания: $U_{1H} = 220$ В, $U_{2H} = 127$ В, $I_{1x} = 1,4$ А, $P_0 = 39$ Вт, $U_{1k} = 8,8$ В при $I_{1k} = I_H$; $P_k = 80$ Вт.

6 Практическое занятие № 6. Расчет параметров электрических машин по паспортным данным

Пример решения задач

Задача 1. Расчет трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. 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⁻¹; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_H = 0,85$; номинальный КПД

двигателя $\eta_H = 84\%$; кратность пускового тока $I_P/I_H = 6,5$; перегрузочная способность $m_K = 1,8$; число пар полюсов $p = 2$.

Решение

Асинхронный двигатель M 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 6.1).

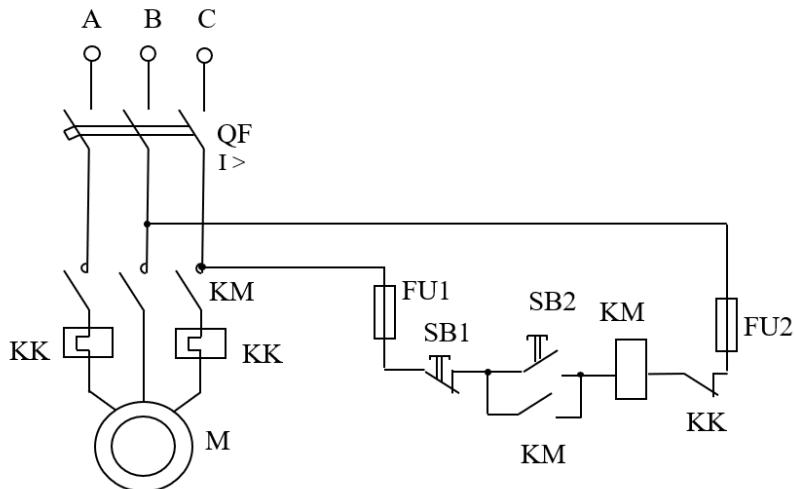


Рисунок 6.1 – Схема пуска асинхронного двигателя

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

$$P_{1H} = P_H / \eta_H = 10000 / 0,84 = 11900 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты

$$M_H = 9,55 \cdot P_H / n_H = 9,55 \cdot 10000 / 1420 = 67,25 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_K = m_K \cdot M_H = 1,8 \cdot 67,25 = 121 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номинальный и пусковой токи

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\phi_H} = \frac{11,9 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,28 \text{ А;}$$

$$I_{\Pi} = 6,5 \cdot I_H = 6,5 \cdot 21,28 = 138,32 \text{ А.}$$

Синхронная частота вращения поля ротора

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

Номинальное скольжение

$$S_H = (n_0 - n_H) / n_0 = (1500 - 1420) / 1500 = 0,053.$$

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

$$S_K = S_H \cdot \left(m_K + \sqrt{m_K^2 - 1} \right) = 0,053 \cdot \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

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

$$M = \frac{\frac{2 \cdot M_K}{S} + \frac{S_K}{S}}{\frac{S_K}{S} + \frac{0,175}{S}} = \frac{2 \cdot 121}{0,175 + \frac{0,175}{S}}.$$

Расчетные данные сводим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчета механической характеристики

S	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$
0	0
0,053 (S_H)	67,25 (M_H)
0,175 (S_K)	121 (M_K)
1,0	41,2

По данным таблицы строим механическую характеристику (рисунок 6.2).

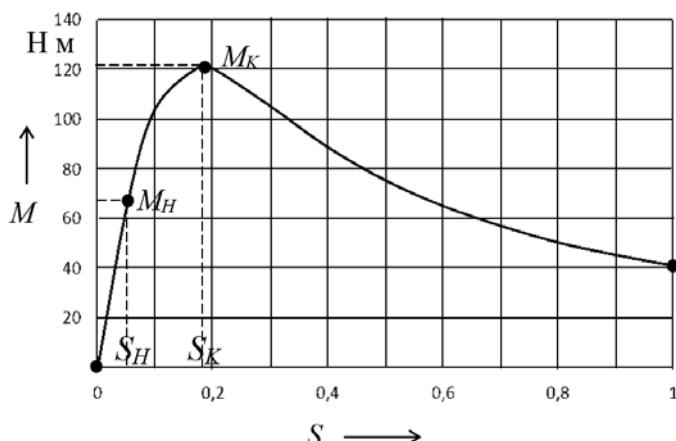


Рисунок 6.2 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Задача 2. Расчет двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Для двигателя M постоянного тока параллельного возбуждения (рисунок 6.3) построить естественную механическую характеристику $n = f(M)$ и механическую характеристику при пуске с пусковым реостатом R_P с током, превышающим номинальный ток двигателя I_H в 2 раза.

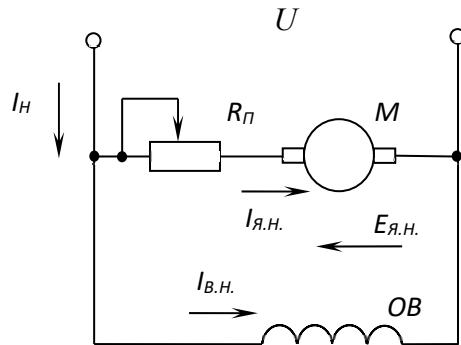


Рисунок 6.3 – Схема включения двигателя параллельного возбуждения

Исходные данные к задаче: номинальная мощность $P_H = 130 \text{ кВт}$; номинальное напряжение $U_H = 220 \text{ В}$; номинальная частота вращения якоря $n_H = 600 \text{ мин}^{-1}$; номинальный КПД $\eta = 92 \%$; сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов в нагретом состоянии $R_{я} = 0,00725 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки возбуждения $R_B = 43,2 \text{ Ом}$.

Решение

Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{1H} = P_H / \eta_H = 130000 / 0,92 = 141304,3 \text{ Вт.}$$

Номинальный ток, потребляемый двигателем из сети,

$$I_H = P_{1H} / U_H = 141304,3 / 220 = 642,3 \text{ А.}$$

Ток в обмотке якоря в номинальном режиме работы (по первому закону Кирхгофа) (см. рисунок 6.3)

$$I_{я.H} = I_H - I_{B.H} = I_H - U_H / R_B = 642,3 - 220 / 43,2 = 637,2 \text{ А.}$$

ПротивоЭДС, индуцируемая в обмотке якоря при номинальной частоте его вращения,

$$E_{я.H} = U_H - R_{я} \cdot I_{я.H} = 220 - 637,2 \cdot 0,00725 = 215,4 \text{ В.}$$

Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{ЭМ.H} = E_{я.H} \cdot I_{я.H} = 215,4 \cdot 637,2 = 137240,3 \text{ Вт.}$$

Номинальный вращающий электромагнитный момент

$$M_H = 9,55 \cdot P_{\text{ЭМ.}H} / n_H = 9,55 \cdot 137240,3 / 600 = 2184,4 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Частота вращения якоря в режиме идеального холостого хода

$$n_0 = n_H \cdot U_H / E_{\text{Я.}H} = 600 \cdot 220 / 215,4 = 612,9 \text{ мин}^{-1}.$$

Пусковой ток якоря при введении в цепь якоря пускового реостата

$$I_{\text{Я.}H} = 2 \cdot I_H - I_{B,H} = 2 \cdot 642,3 - 5,09 = 1279,5 \text{ А.}$$

Сопротивление пускового реостата

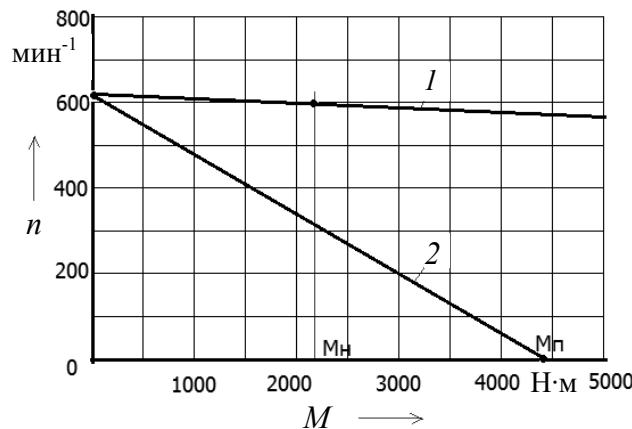
$$R_{\Pi} = \frac{U_H}{I_{\text{Я.}H}} - R_{\text{Я}} = \frac{220}{1279,5} - 0,00725 = 0,165 \text{ Ом.}$$

При $U = \text{const}$ будут постоянными ток возбуждения I_B и магнитный поток Φ , из чего следует

$$\frac{M_{\Pi}}{M_H} = \frac{C_M \cdot I_{\text{Я.}H} \cdot \Phi}{C_M \cdot I_{\text{Я.}H} \cdot \Phi} = \frac{I_{\text{Я.}H}}{I_{\text{Я.}H}};$$

$$M_{\Pi} = I_{\text{Я.}H} \cdot M_H / I_{\text{Я.}H} = 1279,5 \cdot 2184,4 / 637,2 = 4386,3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость частоты вращения вала от момента $n = f(M)$ и может быть построена по двум точкам. Первая точка соответствует режиму холостого хода $n = n_0$ ($M = 0$), вторая – для естественной характеристики $n = n_H$ ($M = M_H$), для искусственной характеристики при пуске $n = 0$ ($M = M_{\Pi}$). Механические характеристики двигателя представлены на рисунке 6.4.



1 – естественная; 2 – искусственная при пуске

Рисунок 6.4 – Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе полупроводниковых приборов

Пример решения задач

Задача 1. Расчет схемы выпрямителя. Разработать схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах с индуктивно-емкостным LC-фильтром для выпрямления однофазного синусоидального напряжения. Напряжение сети $U_1 = 220$ В; частота питающего напряжения $f = 50$ Гц; номинальное напряжение нагрузки $U_d = 50$ В; номинальная мощность нагрузки $P_d = 30$ Вт; допустимый коэффициент пульсаций $K_H = 0,007$. Необходимо выбрать тип вентилей, рассчитать параметры фильтра.

Схема однофазного мостового выпрямителя с LC-фильтром приведена на рисунке 7.1.

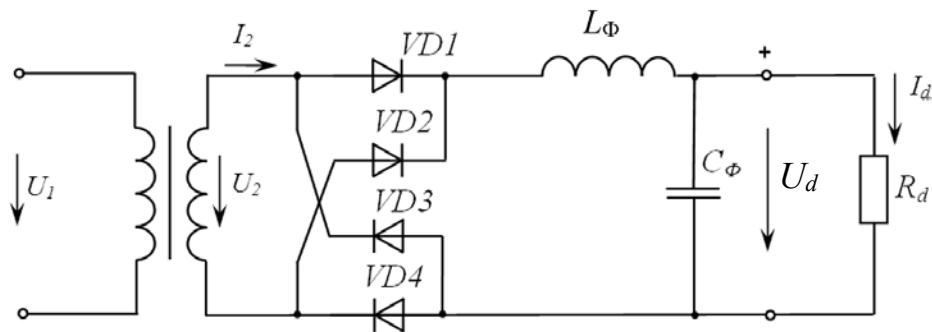


Рисунок 7.1 – Схема однофазного мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным LC-фильтром

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

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

Выбираем выпрямительные диоды 1N4934 с параметрами:

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

Для однофазного мостового выпрямителя действующее значение вторичного напряжения определяется следующим образом:

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

Тогда коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{57,5} = 3,67.$$

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

Требуемый коэффициент пульсации $K_H = 0,007$.

Коэффициент сглаживания фильтра

$$S_{LC} = \frac{K_P}{K_H} = \frac{0,67}{0,007} = 95,71.$$

Для LC-фильтра

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

где m – число пульс 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 7.2.

Результаты моделирования $U_2 = 59,921 \text{ В}$, $I_d = 0,606 \text{ А}$, $U_d = 52,04 \text{ В}$ (задано $U_d = 50 \text{ В}$), что соответствует заданию. Осциллограммы напряжений в контрольных точках приведены на рисунке 7.3.

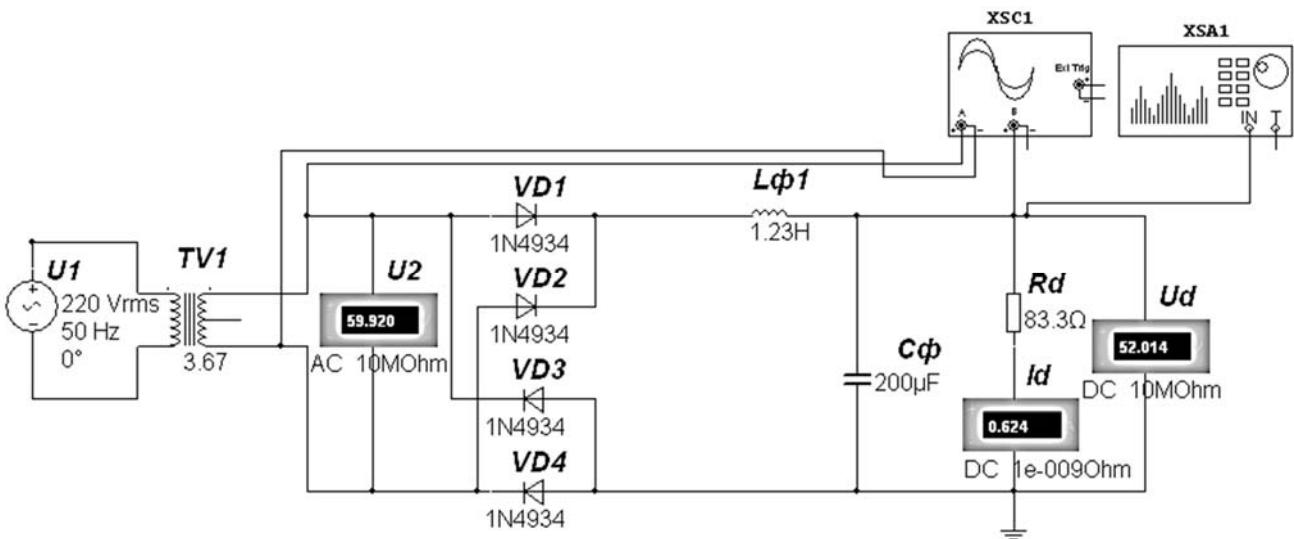


Рисунок 7.2 – Модель мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

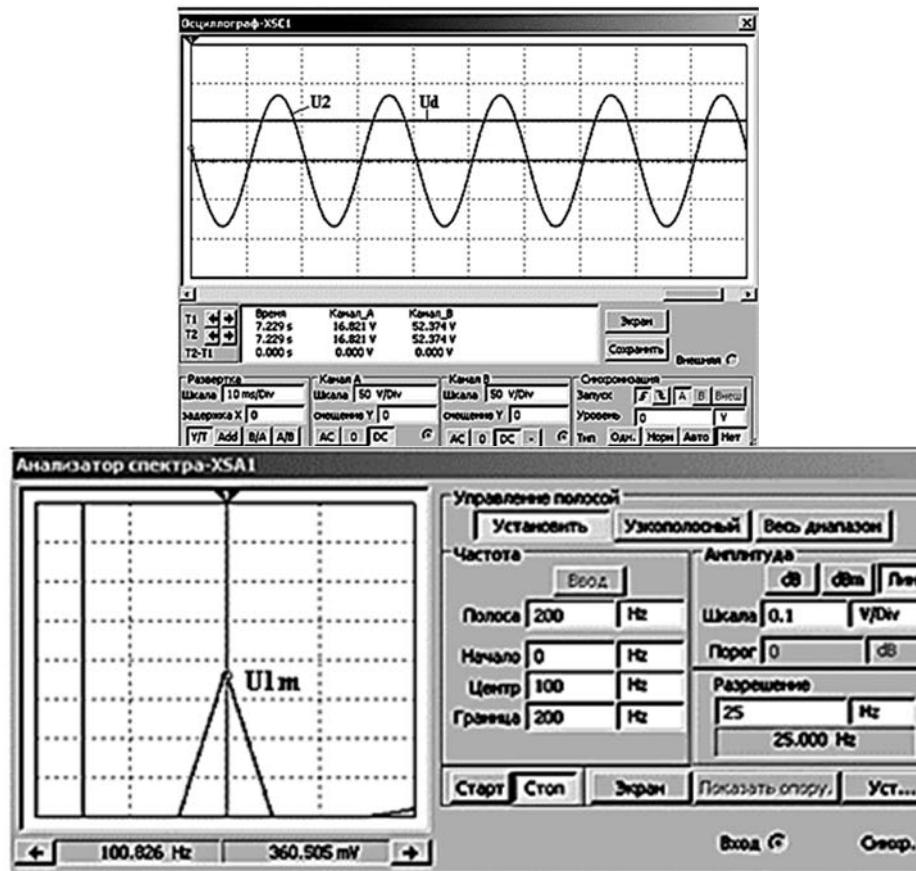


Рисунок 7.3 – Осциллограммы напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 , выпрямленного напряжения U_d и значение первой гармоники U_{1m} выпрямленного напряжения

Коэффициент пульсаций в нагрузке

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

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

Амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения U_{1m} находится с помощью анализатора спектра XSA1 на удвоенной частоте питающего напряжения $f_1 = 2 \cdot f = 2 \cdot 50 = 100$ Гц (см. рисунок 7.3).

Задача 2. Расчет параметрического стабилизатора напряжения. Разработать схему, выполнить расчет и выбор элементов параметрического стабилизатора напряжения для обеспечения заданного напряжения на нагрузке U_H . Необходимо определить величину балластного сопротивления R_δ , осуществить моделирование ее работы в среде Multisim, проверить работоспособность схемы во всем диапазоне изменения входного напряжения, определить коэффициент стабилизации.

Решение

Схема параметрического стабилизатора напряжения приведена на рисунке 7.4.

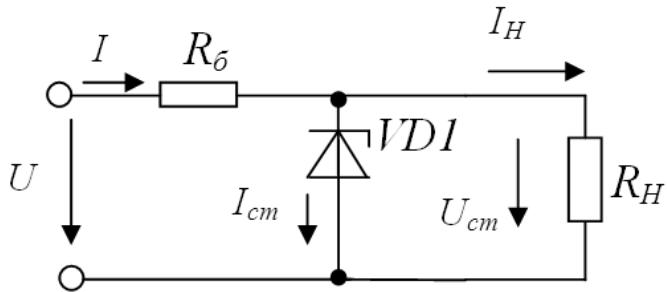


Рисунок 7.4 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Выбираем стабилитрон 1N4736A по заданному напряжению на нагрузке U_H с параметрами:

- напряжение стабилизации $U_{cm} = 6,8$ В;
- минимальный ток стабилизации $I_{cm, min} = 21$ мА (в справочнике I_{cm});
- максимальный ток стабилизации $I_{cm, max} = 660$ мА.

Найдем среднее значение напряжения источника U_{cp} и тока стабилитрона $I_{cp, cm}$:

$$U_{cp} = \frac{U_{min} + U_{max}}{2} = \frac{12 + 14}{2} = 13 \text{ В};$$

$$I_{cp, cm} = \frac{I_{cm, min} + I_{cm, max}}{2} = \frac{21 \cdot 10^{-3} + 660 \cdot 10^{-3}}{2} = 340,5 \text{ мА.}$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$U_{cp} = IR_\delta + U_{cm} = (I_{cp, cm} + I_H)R_\delta + U_{cm}.$$

Из чего определим балластное сопротивление:

$$R_\delta = \frac{U_{cp} - U_{cm}}{I_{cp, cm} + I_H} = \frac{13 - 6,8}{340,5 \cdot 10^{-3} + 620 \cdot 10^{-3}} = 6,45 \text{ Ом},$$

где I_H – номинальный ток нагрузки,

$$I_H = \frac{U_{cm}}{R_H} = \frac{6,8}{11} = 0,62 \text{ A} = 620 \text{ mA}.$$

Принимаем из стандартного ряда Е24 $R_\delta = 6,2 \Omega$. Рассмотрим, будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения:

$$U_{BX,min} = U_{cm} + R_\delta (I_{cm,min} + I_H) = 6,8 + 6,2 \cdot (21 + 620) \cdot 10^{-3} = 10,77 \text{ В};$$

$$U_{BX,max} = U_{cm} + R_\delta (I_{cm,max} + I_H) = 6,8 + 6,2 \cdot (660 + 620) \cdot 10^{-3} = 14,74 \text{ В.}$$

Таким образом, стабилизация обеспечивается во всем диапазоне изменения входного напряжения (12...14 В).

Модель параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim приведена на рисунке 7.5. Необходимо привести результаты моделирования при минимальном входном напряжении U_{min} , максимальном входном напряжении U_{max} .

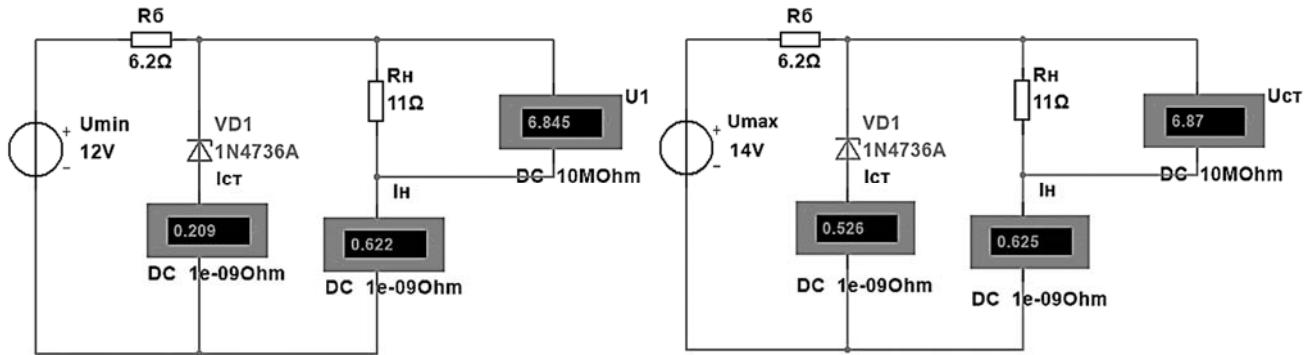


Рисунок 7.5 – Модель параметрического стабилизатора напряжения

Стабилизация обеспечивается во всем диапазоне входных напряжений:

$$U_{cm,min} = 6,845 \text{ В при } U_{min} = 12 \text{ В; } U_{cm,max} = 6,870 \text{ В при } U_{max} = 14 \text{ В.}$$

Коэффициент стабилизации

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}/U_{cp}}{\Delta U_{cm}/U_{cm}} = \frac{2/13}{0,025/6,8} = 41,85,$$

где

$$\Delta U_{ex} = U_{max} - U_{min} = 14 - 12 = 2 \text{ В;}$$

$$\Delta U_{cm} = U_{cm,max} - U_{cm,min} = 6,870 - 6,845 = 0,025 \text{ В.}$$

8 Практическое занятие № 8. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей

Пример решения задач

Задача 1. Построение схемы усилителя. На основе операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8) разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления $K_u = 20$ и минимальным входным напряжением $U_{ex. min} = 5 \text{ мВ}$. Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала $U_{ex. max}$, при котором не будет значительных искажений выходного сигнала.

Решение

Параметры операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8):

- номинальное напряжение питания $U_{num. nom} = \pm 15 \text{ В}$;
- коэффициент усиления $K_{u OY} = 30000$;
- максимально допустимое выходное напряжение $U_{vых. max} = 12 \text{ В}$;
- разность входных токов $\Delta I_{ex} = 0,2 \text{ мкА}$;
- входное сопротивление $R_{ex} = 0,4 \text{ МОм}$;
- минимальное сопротивление нагрузки $R_H min = 2 \text{ кОм}$.

Разработанная схема инвертирующего усилителя низкой частоты приведена на рисунке 8.1 (цепи балансировки нуля – NC и частотной коррекции – FC не используются).

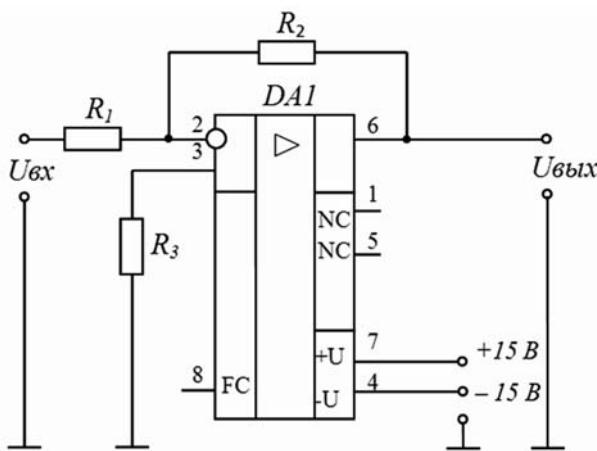


Рисунок 8.1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ КР140УД11

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

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

Принимаем из стандартного ряда Е24 $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$. Тогда

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

Сопротивление обратной связи

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

Принимаем $R_2 = 100 \text{ кОм}$.

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 $R_3 = 4,7 \text{ кОм}$.

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

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

Модель инвертирующего усилителя на ОУ в среде Multisim приведена на рисунке 8.2. Результаты моделирования при напряжении, не превышающем $U_{ex\ max}$, $U_{ex} = 0,2 \text{ В}$ и $U_{vых} = 3,92 \text{ В}$.

Коэффициент усиления

$$K_U = \frac{U_{vых}}{U_{ex}} = \frac{3,92}{0,2} = 19,6 \approx 20,$$

что соответствует заданию.

Временные диаграммы работы усилителя при различных уровнях входного сигнала представлены на рисунке 8.3. Выходное напряжение $U_{vых}$ смешено относительно входного U_{ex} на 180° (инвертирующий усилитель). При входном напряжении, не превышающем $U_{ex\ max}$, искажение выходного сигнала не происходит (см. рисунок 8.2, а). При входном напряжении $U_{ex} = 1 \text{ В}$, превышающем $U_{ex\ max}$, наблюдается ограничение выходного напряжения на уровне $U_{vых\ max} = 12 \text{ В}$ (см. рисунок 8.3, б).

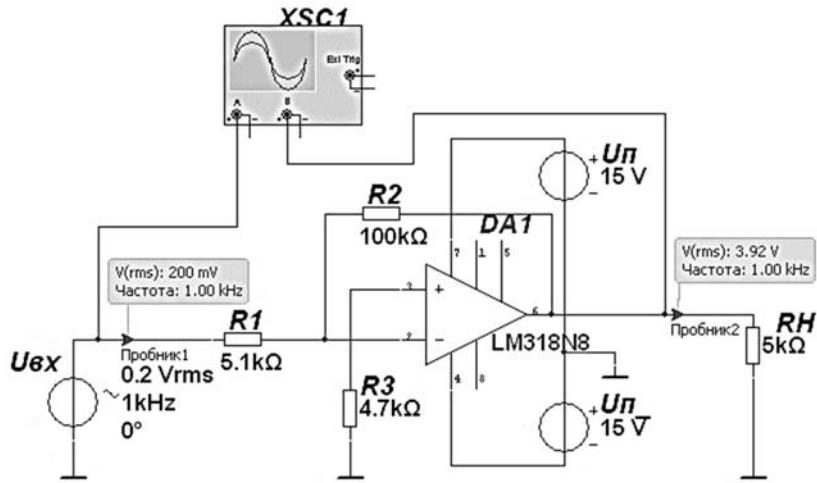
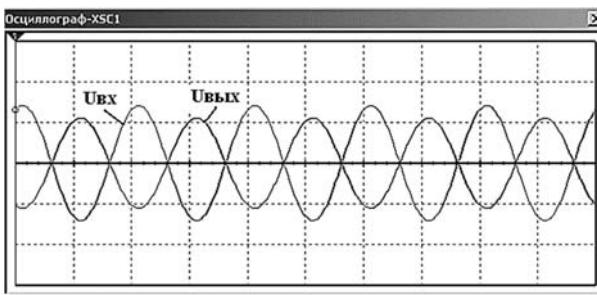


Рисунок 8.2 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ

a)



б)

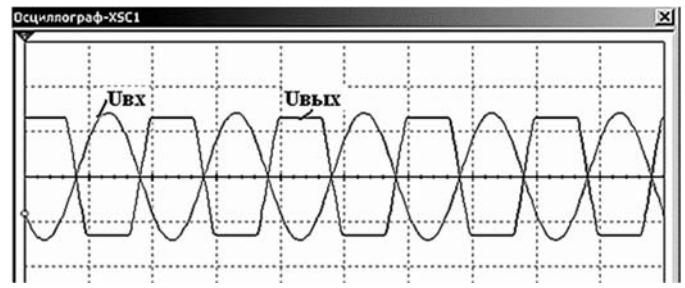


Рисунок 8.3 – Временные диаграммы работы инвертирующего усилителя на ОУ при входном напряжении $U_{ex, max} = 0,2$ В (*а*) и $U_{ex, max} = 1$ В (*б*)

Задача 2. Расчет сумматора на основе операционного усилителя. На основе заданного операционного усилителя разработать схему сумматора для выполнения заданной операции при сопротивлении обратной связи R_{oc} . Оуществить моделирование ее работы при $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 100$ мВ. Исходные данные к задаче: операция $6U_1 + U_2 - 2U_3 - 3U_4$; $R_{oc} = 51$ кОм; тип операционного усилителя – КР140УД11 (LM318N8).

Решение

Схема параллельного сумматора для реализации заданной функции приведена на рисунке 8.4. Количество неинвертирующих входов соответствует числу положительных, а число инвертирующих – числу отрицательных членов функции.

Выходное напряжение параллельного сумматора

$$U_{вых} = \sum K_{ih} \cdot U_{ih} - K_{iu} \cdot U_{iu},$$

где K_{ih} , U_{ih} , K_{iu} , U_{iu} – коэффициенты усиления и входные напряжения по каждому из неинвертирующих и инвертирующих входов.

$$K_i = \frac{R_{oc}}{R_i},$$

где R_{oc} – сопротивление обратной связи (резистор R_5);
 R_i – сопротивление в цепи данного входа.

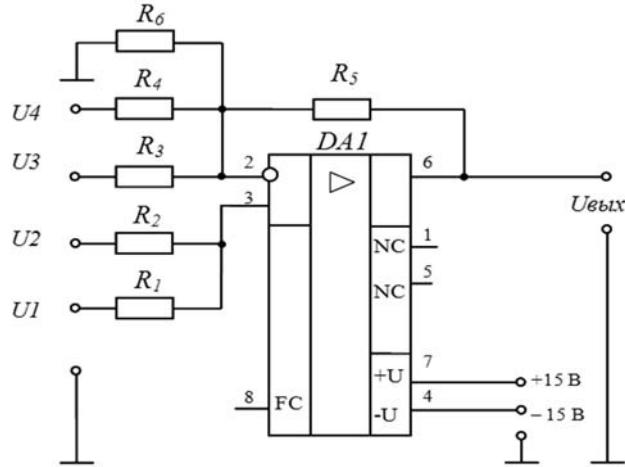


Рисунок 8.4 – Схема параллельного сумматора на ОУ КР140УД11

По заданному значению R_5 и весовым коэффициентам входов ($K_1 = 6$, $K_2 = 1$, $K_3 = 2$, $K_4 = 3$) определяем следующее:

$$R_1 = \frac{R_5}{K_1} = \frac{51}{6} = 8,5 \text{ кОм}; R_2 = \frac{R_5}{K_2} = \frac{51}{1} = 51 \text{ кОм};$$

$$R_3 = \frac{R_5}{K_3} = \frac{51}{2} = 25,5 \text{ кОм}; R_4 = \frac{R_5}{K_4} = \frac{51}{3} = 17 \text{ кОм}.$$

Принимаем сопротивления из стандартного ряда Е24: $R_1 = 8,2 \text{ кОм}$, $R_2 = 51 \text{ кОм}$, $R_3 = 24 \text{ кОм}$, $R_4 = 16 \text{ кОм}$.

Для нормальной работы сумматора надо уравнять сопротивления по обоим входам. В противном случае входные токи ОУ вызовут на них неодинаковое падение напряжений и на выходе ОУ появится разностный сигнал, который будет им усилен. На выходе будет $U_{вых}$ при отсутствии $U_{вх}$.

Входное сопротивление:

– по инвертирующему входу

$$\frac{1}{R_H} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{24} + \frac{1}{17} + \frac{1}{51} = 0,124 \text{ мОм}^{-1} (R_H = 8 \text{ кОм});$$

– по неинвертирующему входу

$$R_H = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{8,2 \cdot 51}{8,2 + 51} = 7 \text{ кОм}.$$

Для уравнивания входных сопротивлений параллельно инвертирующему входу надо включить резистор R_6 так, чтобы

$$R_H = \frac{R_6 \cdot R_H}{R_6 + R_H};$$

$$R_6 = \frac{R_H \cdot R_H}{R_H - R_H} = \frac{8 \cdot 7}{8 - 7} = 56 \text{ кОм.}$$

Выходное напряжение для данной операции $U_{\text{вых}} = 6U + U - 2U - 3U = 2U$.

При единичном входном напряжении 100 мВ выходное напряжение сумматора

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}} + U_{\text{вых3}} + U_{\text{вых4}} = 600 + 100 - 200 - 300 = 200 \text{ мВ.}$$

Модель параллельного сумматора на ОУ в среде Multisim приведена на рисунке 8.5. Результаты моделирования схемы при заданных входных напряжениях $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 100 \text{ мВ}$ и $U_{\text{вых}} = 191 \text{ мВ} \approx 200 \text{ мВ}$, что соответствует расчету.

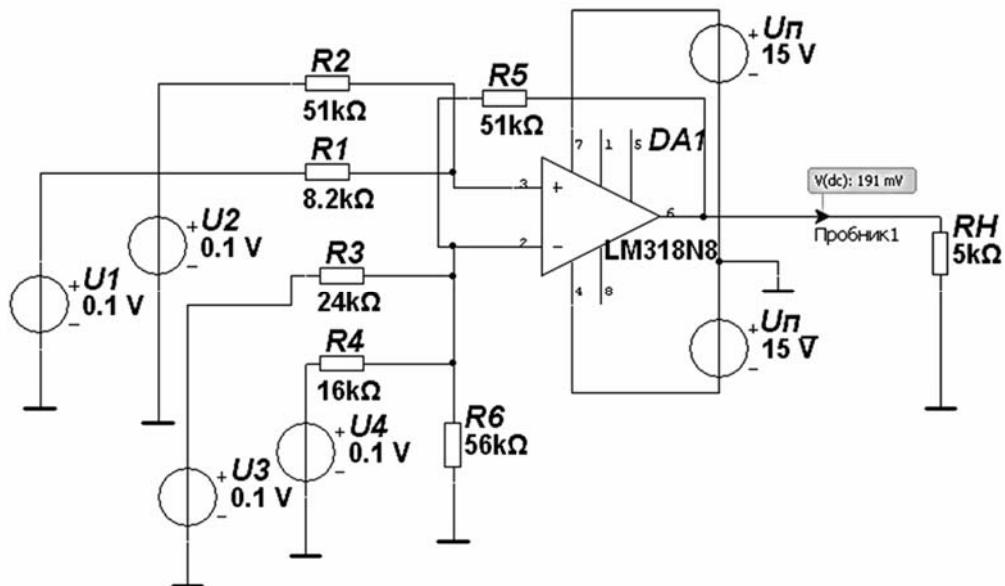


Рисунок 8.5 – Модель параллельного сумматора на ОУ

Список литературы

- 1 Сборник задач по электротехнике и основам электроники / под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1987. – 288 с.
- 2 **Касаткин, А. С.** Курс электротехники: учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2005. – 541 с.
- 3 **Иванов, И. И.** Электротехника : учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Лань, 2003. – 496 с.
- 4 **Панфилов, Д. И.** Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Лаборатория на компьютере / Д. И. Панфилов, В. С. Иванов, И. Н. Чепурин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МЭИ, 2004. – 304 с.
- 5 **Лачин, В. И.** Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 703 с.
- 6 **Марченко, А. Л.** Основы электроники : учеб. пособие / А. Л. Марченко. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 296 с.
- 7 **Москатов, Е. А.** Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – М. : Радио, 2005. – 208 с.