

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
1-37 01 02 «Автомобилестроение (по направлениям)»
дневной формы обучения*



Могилев 2020

УДК 621.3
ББК 31.2:32.85
Э 45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «22» мая 2020 г.,
протокол № 8

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

Рецензент канд. техн. наук, доц. В. М. Ковальчук

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены
для студентов специальностей дневной формы обучения.

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	Т. А. Рыжикова
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, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

Введение.	4
Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с одним источником питания.	5
Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками питания.	11
Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником питания с применением комплексных чисел.	16
Практическое занятие № 4. Анализ простейших трехфазных цепей с помощью комплексных чисел и векторных диаграмм.	23
Практическое занятие № 5. Расчет переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.	27
Практическое занятие № 6. Полупроводниковые диоды и расчет электронных устройств на их основе.	38
Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей.	42
Практическое занятие № 8. Разработка цифровых комбинационных устройств.	45
Список литературы.	47

Введение

Курс «Электротехника и электроника» предполагает подготовку студентов в области электротехники и электроники. В методических рекомендациях приводятся задачи с решениями по расчету и анализу электрических и электронных схем.

В течение семестра проводится определенное количество практических занятий, студенты выполняют аудиторные контрольные работы. Решение задач и выполнение контрольных работ способствует более глубокому усвоению теоретических закономерностей и получению практических навыков по решению инженерных задач в области электротехники и электроники.

Перед решением задач необходимо изучить соответствующие разделы рекомендуемой литературы и методических рекомендаций по курсу.

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

Основные теоретические соотношения

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

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

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

4 Второй закон Кирхгофа для замкнутого контура

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

где E_k – ЭДС k -го источника контура;

I_i – ток, протекающий через резистор R_i .

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

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 их направления 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 (рисунки 1 и 2);
- преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду и наоборот (рисунок 3).

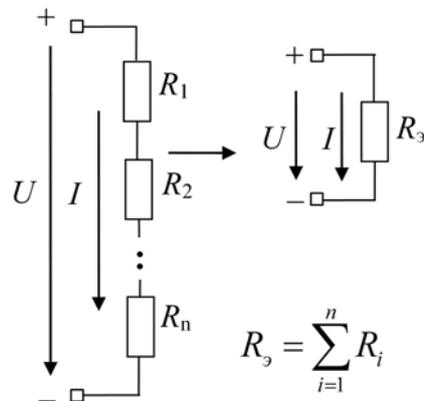
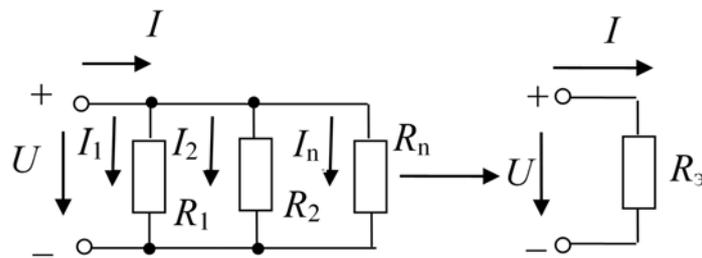


Рисунок 1 – Последовательное соединение резисторов



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

Рисунок 2 – Параллельное соединение резисторов

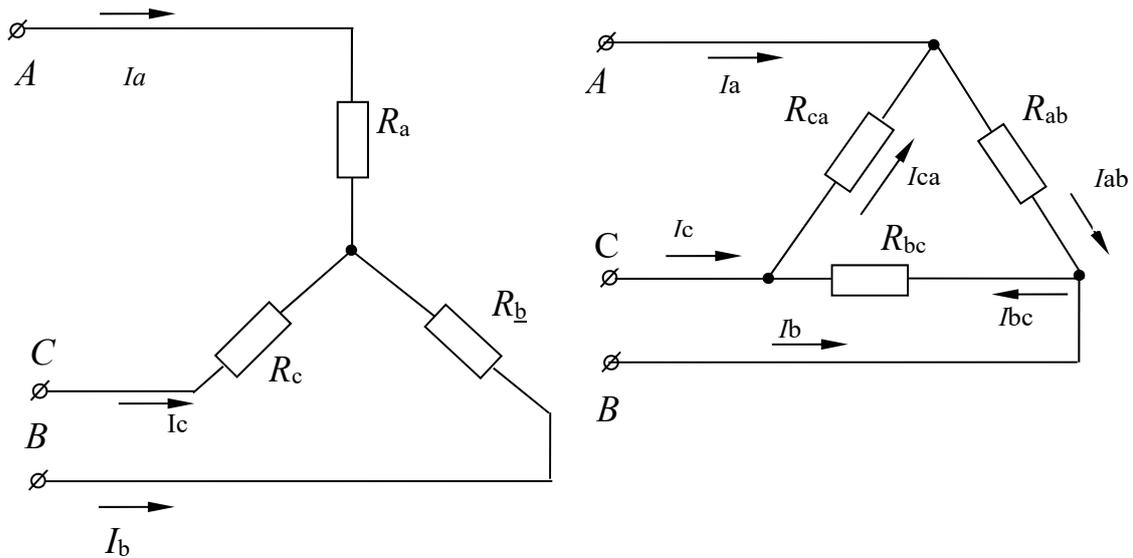


Рисунок 3 – Соединение резисторов звездой и треугольником

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 4), 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.

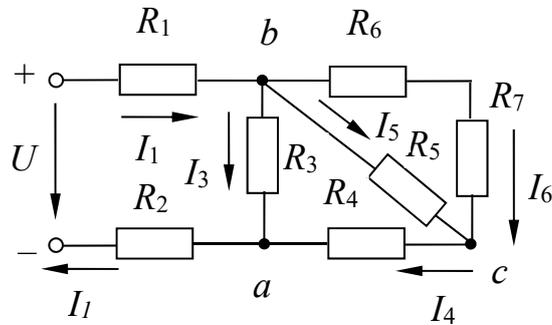


Рисунок 4 – Электрическая цепь постоянного тока

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 .

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

Ток I_1 рассчитаем по закону Ома:

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

Напряжение между точками a и b определим:

– по закону Ома:

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

– по второму закону Кирхгофа:

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

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.

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 (рисунок 5) соответствуют расчётным значениям.

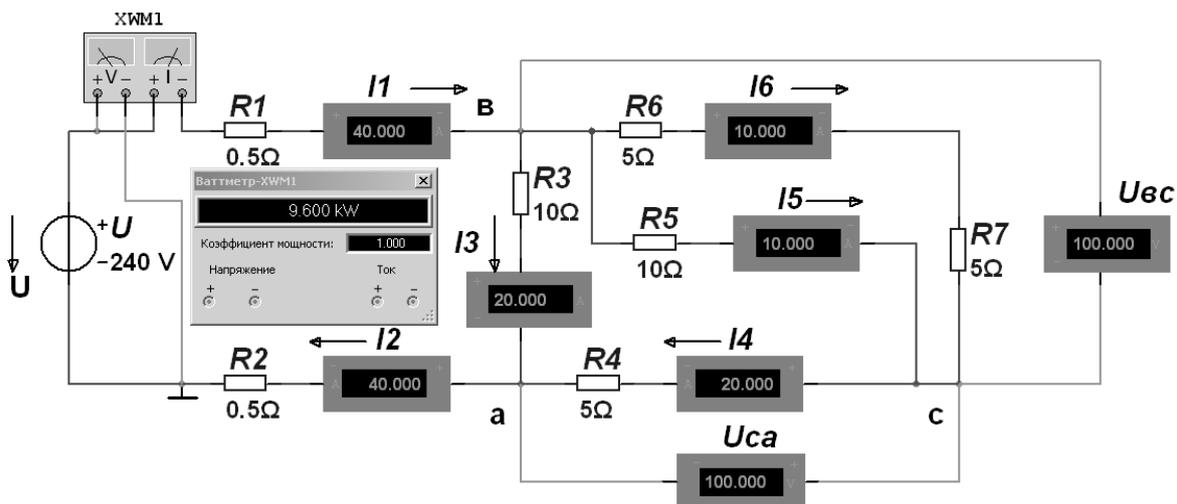


Рисунок 5 – Модель электрической цепи постоянного тока

Самостоятельная работа

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

Задача. Для цепи (рисунок 6) известны значения R_0 (внутреннее сопротивление источника), $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ и ток I_2 . Определить ЭДС источника, а также значения токов в ветвях.

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

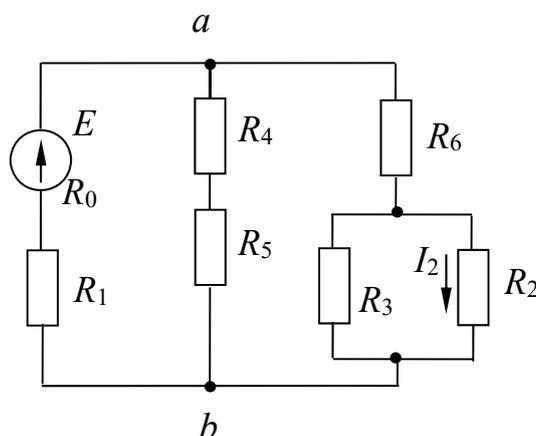


Рисунок 6 – Электрическая цепь

Контрольные вопросы

- 1 Дать информацию о способах определения эквивалентного сопротивления электрической цепи.
- 2 Записать закон Ома для пассивного и активного участков электрической цепи.
- 3 Сформулировать законы Кирхгофа.

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

Основные теоретические соотношения

1 Расчет сложных электрических цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

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

Порядок расчета по этому методу состоит в следующем:

- указывают произвольно положительные направления токов в ветвях, а также направления обхода в выбранных независимых контурах;
- записывают уравнения по первому закону Кирхгофа. Количество уравнений по первому закону Кирхгофа равно $\kappa - 1$, где κ – число узлов электрической цепи;
- записывают уравнения по второму закону Кирхгофа применительно к контуру. Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно $n - (\kappa - 1)$, где n – число ветвей электрической цепи.

Решая систему полученных уравнений, определяют токи ветвей.

Для проверки правильности расчета электрической цепи используют уравнение баланса мощностей.

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

Направления контурных токов выбираются произвольно. При составлении уравнений положительными принимаются ЭДС, совпадающие с направлениями контурных токов. Решая систему уравнений, определяют 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 7) методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов.

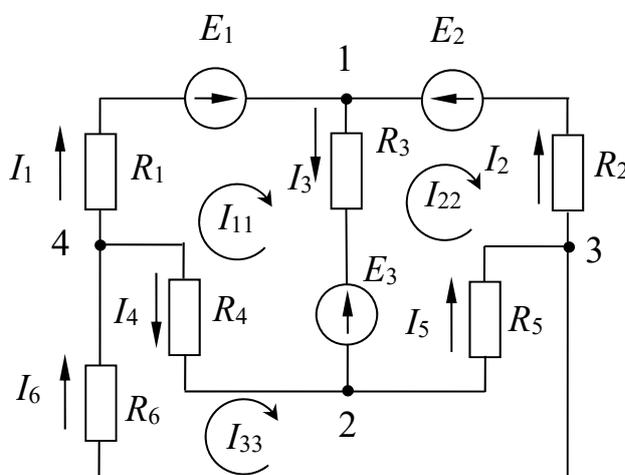


Рисунок 7 – Электрическая цепь к примеру расчета методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

Число узлов $\kappa = 4$. Число ветвей $n = 6$.

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

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

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 $n - (\kappa - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$.

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

Система уравнений

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

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

Найдем значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_{11}; \quad I_4 = I_{33} - I_{11};$$

$$I_2 = -I_{22}; \quad I_5 = I_{33} - I_{22};$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22}; \quad I_6 = I_{33}.$$

Проверим правильность расчета, составив уравнение баланса мощности:

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

3 Расчет сложных электрических цепей методом двух узлов.

Метод двух узлов применяется в тех случаях, если схема имеет два узла и ряд параллельных ветвей между ними. Для нахождения неизвестных токов составим 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.

Величину U_{AB} найдем 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 8), используя метод двух узлов.

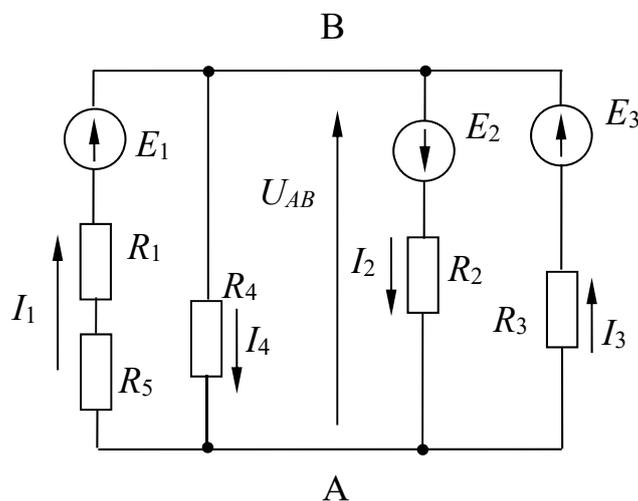


Рисунок 8 – Электрическая цепь к примеру расчёта методом двух узлов

По закону Ома токи в ветвях

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

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

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

4 Расчет сложных электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжений.

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

Ток в i -й ветви рассчитаем по формуле

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

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

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

R_1 – сопротивление резистора, где определяется ток.

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

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

Задача 3. Определить значение тока I_5 в схеме на рисунке 9, а.

Рассчитаем напряжение холостого хода U_{xx} (рисунок 9, б), используя второй закон Кирхгофа

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

Токи в ветвях (см. рисунок 9, б)

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

Определяем значение сопротивления $R_{кз}$ (рисунок 9, в):

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

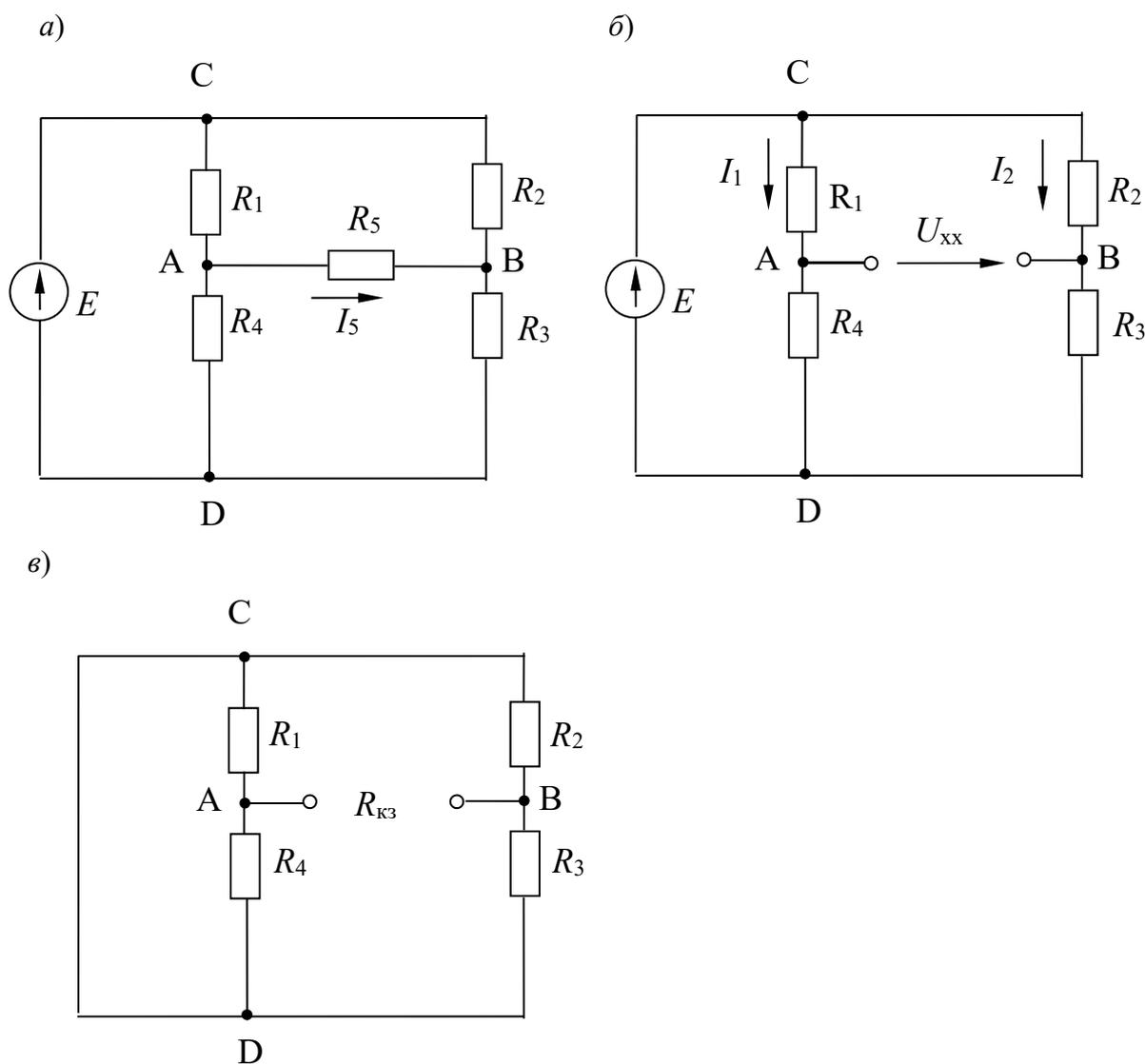


Рисунок 9 – Электрические схемы к примеру расчёта методом эквивалентного генератора

Найдем значение тока I_5 :

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

Самостоятельная работа

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

Задача. Для разветвленной электрической цепи (см. рисунок 9, а), используя законы Кирхгофа, методом контурных токов и методом эквивалентного генератора, определить токи во всех ветвях.

$$E_1 = 24 \text{ В}; E_2 = 48 \text{ В}; E_3 = 96 \text{ В}; R_1 = 16 \text{ Ом}; R_2 = 8 \text{ Ом}; R_3 = 16 \text{ Ом}; R_4 = 8 \text{ Ом}.$$

Контрольные вопросы

1 Составить план расчета сложных электрических цепей методом контурных токов.

2 Составить план расчета сложных электрических цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

3 Составить план расчета сложных электрических цепей методом двух узлов.

4 Составить план расчета сложных электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжений.

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

Основные теоретические соотношения

1 Символический метод расчета цепей переменного тока.

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

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

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

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

Закон Ома в символической форме имеет вид:

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

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

При последовательном соединении элементов R, L, C

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

где

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

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

При параллельном соединении элементов

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

Примеры решения задач

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

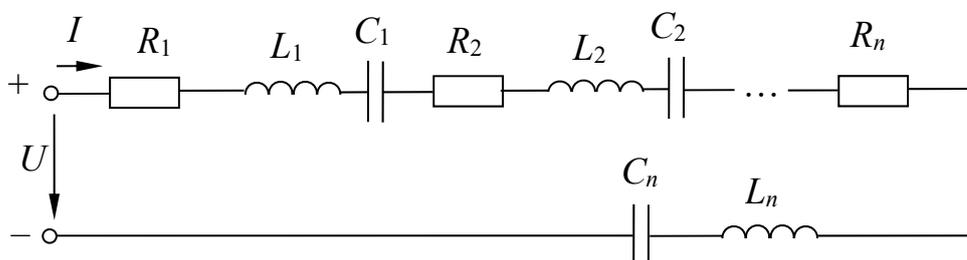


Рисунок 10 – Электрическая цепь с последовательным соединением элементов R, L и C

Решение

Комплекс действующего значения тока в цепи

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

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

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

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

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

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

Определить ток, напряжения на катушке и конденсаторе, мощности катушки, конденсатора и всей цепи. Построить векторную диаграмму напряжений, если напряжение на входе схемы (рисунок 11, а) $U = 127$ В и частота $f = 50$ Гц. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

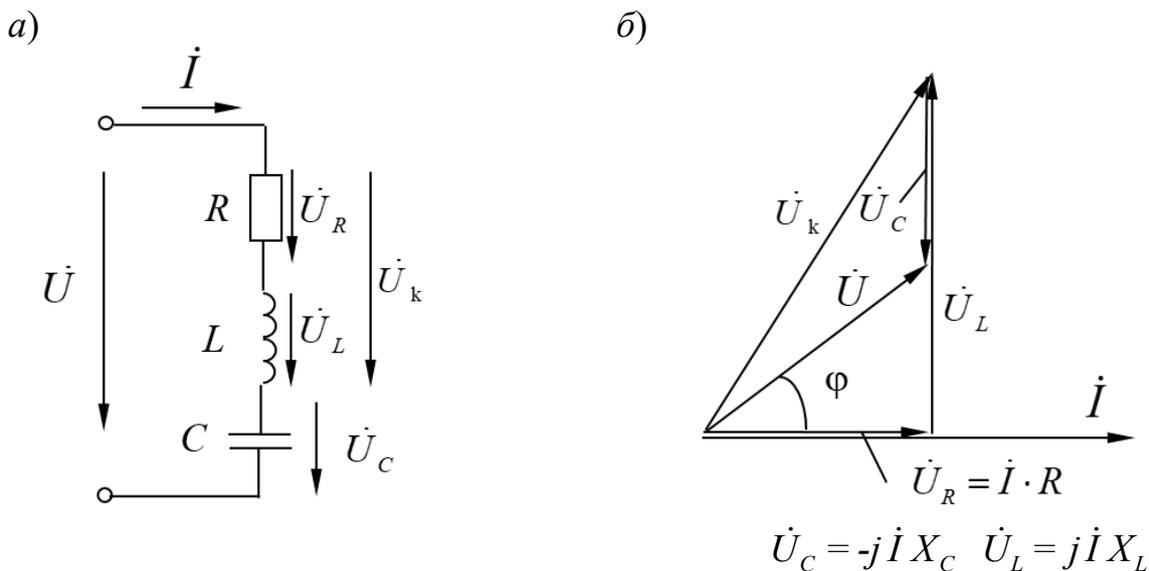


Рисунок 11 – Электрическая цепь переменного тока

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

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

Комплекс полного сопротивления катушки

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

Комплексы напряжения и тока:

$$\dot{U} = 127 \text{ В};$$

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

Комплексные действующие значения напряжений:

– на конденсаторе

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

– на катушке

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

Комплекс полной мощности

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

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

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

Реактивная мощность конденсатора

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

Комплекс полной мощности катушки

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

Векторная диаграмма приведена на рисунке 11, б.

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

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

Измерение мощностей P , S и Q можно провести с помощью ваттметра, который в Multisim, кроме активной мощности, измеряет коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

В соответствии с показаниями ваттметра можно записать:

$$P = 1343 \text{ Вт; } \cos \varphi = 0,707, \varphi = 45^\circ \text{ (напряжение опережает ток по фазе);}$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = 1900 \text{ В} \cdot \text{А}, \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1343 \text{ вар}, \text{ что с небольшой погрешно-}$$

стью соответствует расчетным значениям.

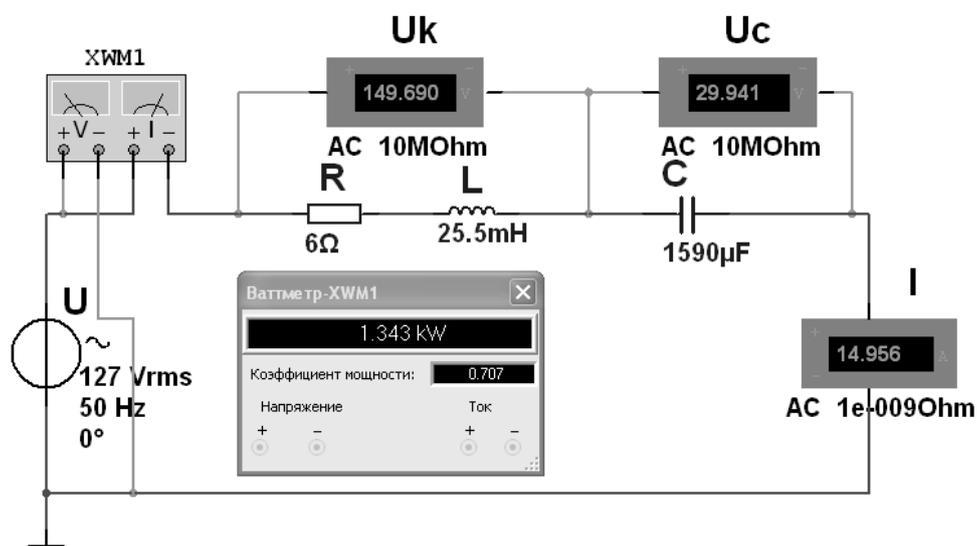


Рисунок 12 – Модель электрической цепи переменного тока в среде Multisim

Задача 3. Определить токи в электрической цепи (рисунок 13), если напряжение на входе $U_{ab} = 120 \text{ В}$, а значение 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.

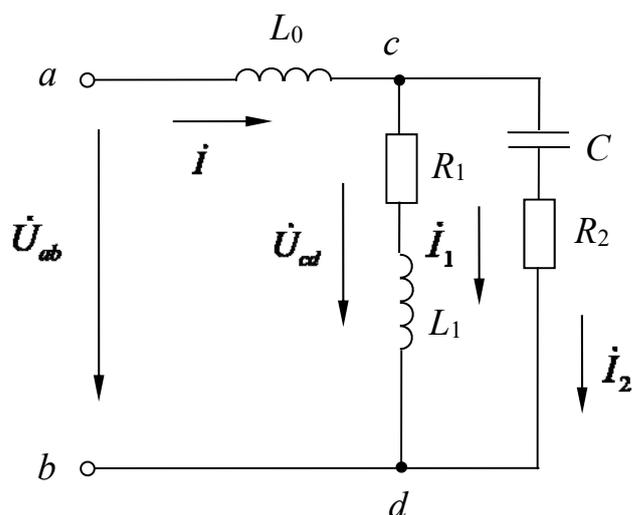


Рисунок 13 – Электрическая цепь переменного тока со смешанным соединением элементов

Решение

Входное комплексное сопротивление цепи

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

Общий ток цепи

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

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

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{cd}}{\underline{Z}_1} = \frac{87,78 - j61,5}{6 + j8} = 0,34 - j10,7 = 10,71 \cdot e^{-j88,2^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{cd}}{\underline{Z}_2} = \frac{87,78 - j61,5}{5 - j5} = 14,92 + j2,64 = 15,2 \cdot e^{j10^\circ} \text{ А.}$$

Комплексная полная мощность всей цепи

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

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

откуда $P = 1846$ Вт; $Q = 970$ вар.

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

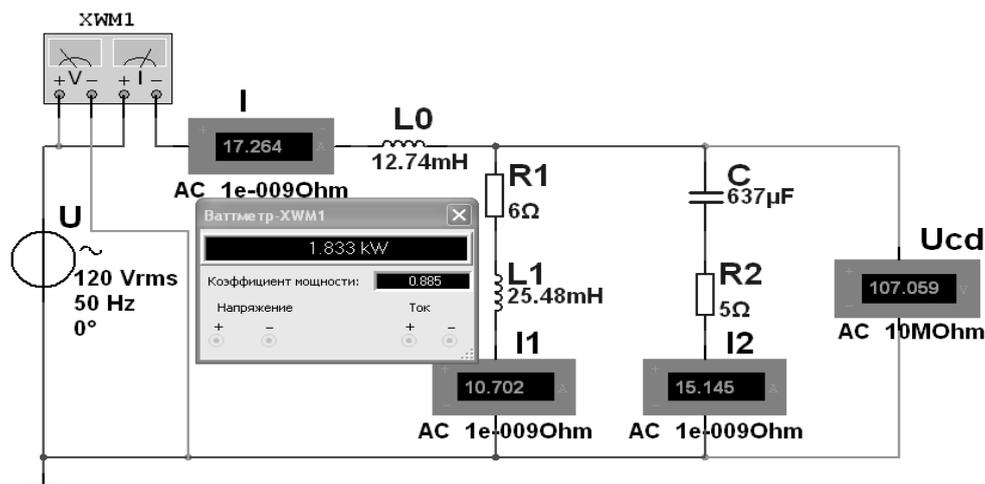


Рисунок 14 – Модель электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов

Самостоятельная работа

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

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

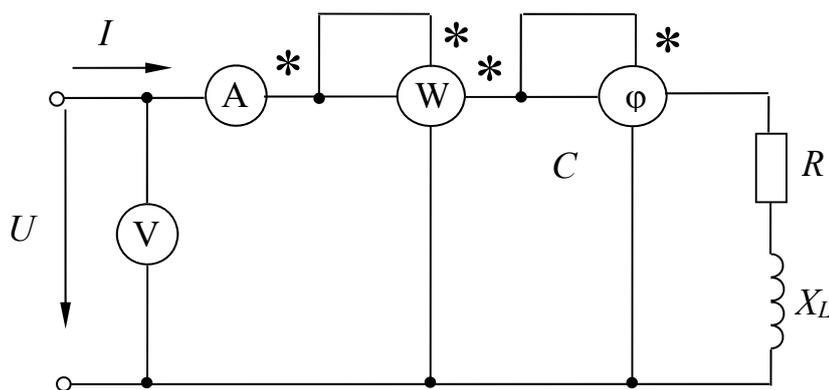


Рисунок 15 – Электрическая цепь с катушкой переменного тока

Контрольные вопросы

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

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

3 Записать комплексное сопротивление двух параллельно соединенных ветвей.

4 Записать формулы для расчета комплексной мощности.

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

Основные теоретические соотношения

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

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

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

Для схемы (рисунок 16, б) фазные и линейные напряжения равны:

$$U_l = U_\phi.$$

В комплексной форме

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

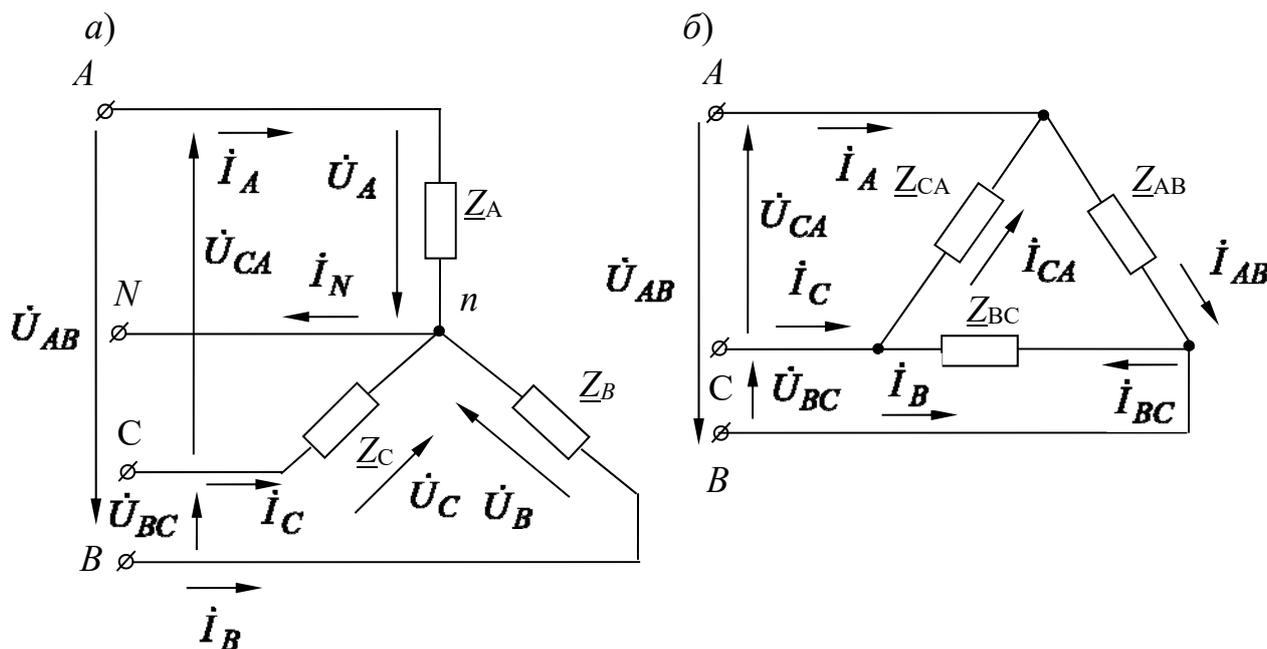


Рисунок 16 – Трехфазные электрические цепи

Примеры решения задач

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

Решение

Запишем значения линейных напряжений в комплексной форме:

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

Тогда

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

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

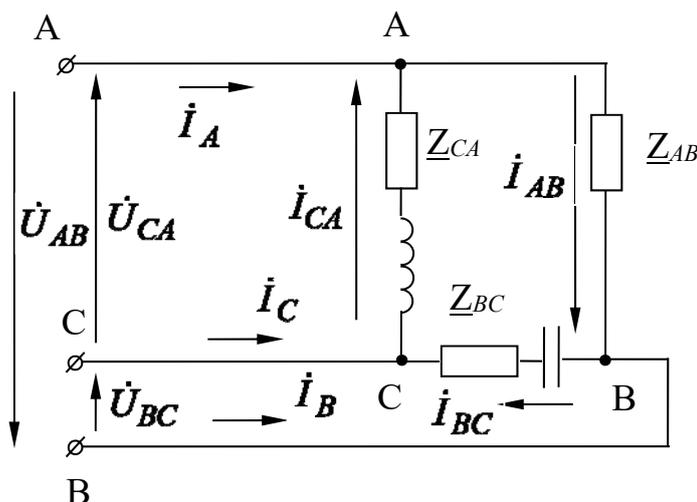


Рисунок 17 – Трехфазная электрическая цепь

На основании закона Ома определим фазные токи:

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

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

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

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

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

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

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

Проверка:

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

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

Задача 2. Определить токи в трехфазной цепи (рисунок 18), если линейные напряжения на входе в цепь симметричны ($U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 \text{ В}$) и нагрузка симметрична ($\underline{Z} = 10 + j10 \text{ Ом}$).

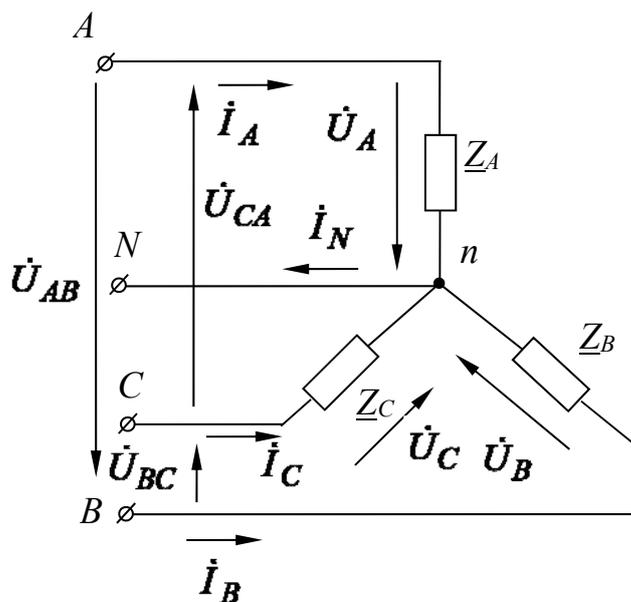


Рисунок 18 – Трехфазная электрическая цепь

Решение

Для соединения звездой фазное напряжение

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

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

Токи в нагрузке (линейные токи равны фазным):

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

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

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

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, соединенной звездой, ток в нейтральном проводе отсутствует.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 19).

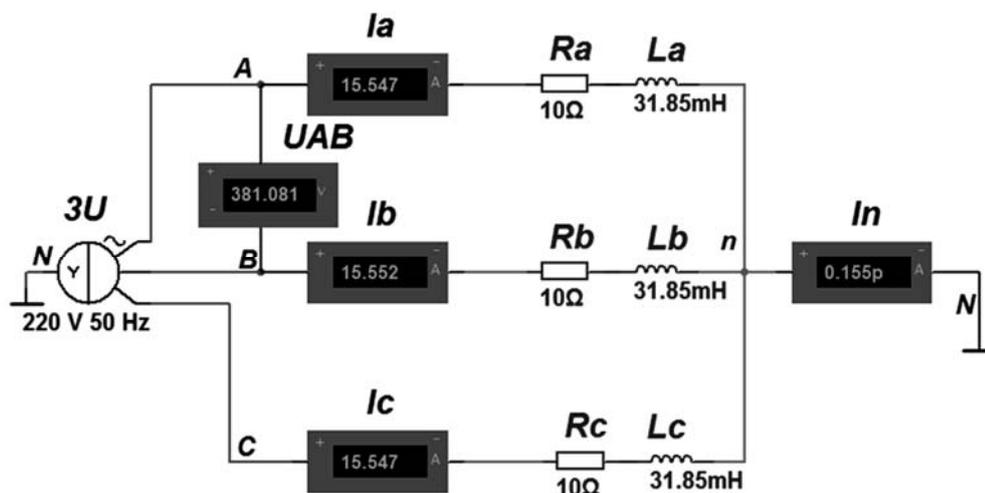


Рисунок 19 – Модель трехфазной электрической цепи переменного тока

Самостоятельная работа

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

Контрольные вопросы

- 1 Записать комплексные выражения для фазных и линейных напряжений при соединении нагрузок звездой и треугольником.
- 2 Объяснить назначение нейтрального провода.
- 3 Записать формулу, определяющую смещение нейтрали и фазные напряжения приемника, фазы которого соединены звездой без нейтрального провода.

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

Основные теоретические соотношения

Любое изменение состояния электрической цепи (включение, отключение, изменение параметров цепи и т. д.) называется коммутацией. Считается, что процесс коммутации осуществляется мгновенно. Энергетическое же состояние цепи не может измениться мгновенно. Возникновение переходных процессов объясняется наличием в цепях индуктивностей и емкостей. При коммутациях энергия электрического и магнитного полей не могут изменяться мгновенно. Отсюда вытекают два следствия.

Первый закон коммутации: ток в индуктивности в момент коммутации не может изменяться мгновенно.

$$i_L(0_-) = i_L(0_+).$$

Второй закон коммутации: напряжение на емкости в момент коммутации не может изменяться мгновенно.

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Классический метод расчета переходных процессов основан на непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений, составленных для цепи, образовавшейся после коммутации.

Рассмотрим методику расчета переходных процессов (рисунок 20) на конкретных примерах.

Расчет переходных процессов в цепи постоянного тока с последовательным соединением элементов R и L .

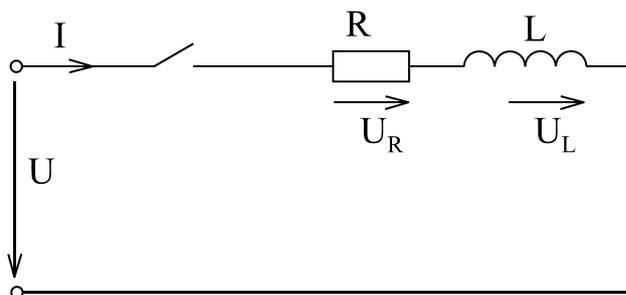


Рисунок 20 – Схема включения катушки индуктивности в цепь постоянного тока

При заданных значениях U, R, L найти закон изменения тока в цепи и напряжения на катушке индуктивности после замыкания ключа.

Составляем дифференциальное уравнение по второму закону Кирхгофа для цепи, образовавшейся после коммутации:

$$u_R + u_L = U; \quad R \cdot i = L \frac{di}{dt} = U.$$

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

$$i = i_{np} + i_{ce}.$$

где i_{np} – принужденная составляющая тока.

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

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

$$U = i_{np} \cdot R + 0.$$

Отсюда $i_{np} = U/R$. Физически это ток установившегося режима после завершения переходного процесса.

i_{ce} – свободная составляющая искомого тока.

Математически это общее решение однородного уравнения, которое имеет вид экспоненты:

$$i_{ce} = Ae^{pt},$$

где A – постоянная интегрирования;

p – корень характеристического уравнения. Это уравнение получают подставив имеющееся решение в однородное уравнение.

$$0 = Ae^{pt} \cdot R + LpAe^{pt}.$$

Сокращая на $Ae^{pt} \neq 0$, получаем характеристическое уравнение

$$R + pL = 0.$$

Его корень $p = -R/L$.

Таким образом, $i_{ce} = Ae^{(-R/L)t}$ уменьшается со временем.

Эта математика соответствует физике процессов в цепи (рисунок 21), лишенной внешнего источника энергии.

Промежуточный ответ

$$i = i_{np} + i_{ce} = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

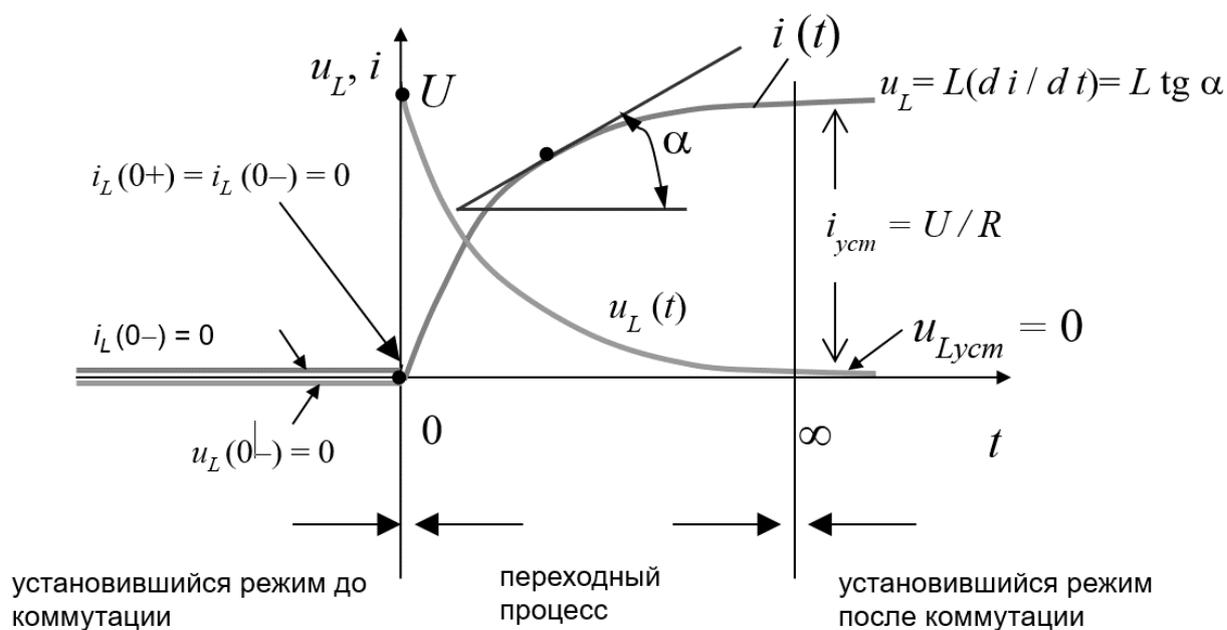


Рисунок 21 – Физика переходного процесса при подключении катушки индуктивности в цепь постоянного тока

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

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

Тогда

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

Для данного примера

$$i(0+) = i(0-) = 0.$$

Следовательно,

$$A = -\frac{U}{R}.$$

Окончательный ответ

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

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

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

Длительность переходного процесса $t = (4 \div 5) \tau$, где

$$\tau = \frac{1}{p} = \frac{L}{R}.$$

Расчёт переходных процессов классическим методом в цепях R, L и R, C при действии синусоидальной ЭДС.

Рассмотрим процесс включения цепи RC под синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$.

Напряжение u_{Cy} в установившемся режиме

$$u_{Cy} = \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + A e^{-t/\tau},$$

где $I_m = \frac{U_m}{Z}$; $Z = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$; $\varphi = \arctg \frac{-1}{R\omega C}$; $\tau = RC$.

Если конденсатор не был заряжен, то $u_C(0_-) = 0$:

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0 = \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2} + A\right);$$

$$A = -\frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right).$$

Напряжение на конденсаторе

$$u_C = \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau}.$$

Ток в переходном режиме

$$i = C \frac{du_C}{dt} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{I_m}{R\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau}.$$

Если конденсатор был предварительно заряжен, то

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = u_C(0) = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left(\psi - \phi - \frac{\pi}{2} \right) + A;$$

$$A = u_C(0) - \frac{I_m}{\omega C} \sin \left(\psi - \phi - \frac{\pi}{2} \right).$$

Из данных выражений видно, что переходный процесс зависит от величины ψ .

Если $\psi = \phi \pm \pi/2$, то переходный процесс не возникает и сразу же наступает установившийся режим, т. к. при этом в момент $t = 0$ установившееся напряжение равно нулю. Таким образом, имеется полное соответствие между запасом энергии в конденсаторе до включения и запасом энергии, который должен быть в установившемся режиме в этот момент.

Если включение происходит при $\psi = \phi$, то свободное напряжение $u_{Cсв}$ будет наибольшим и в начальный момент имеет значение $I_m X_C$. Начальное значение свободного тока при этом $-\frac{I_m}{\omega CR}$. Если $\omega CR > 1$, т. е. $R < X_C$, то в

начальный момент времени происходит большой всплеск тока, намного превосходящий амплитуду I_m . Однако такой большой ток протекает незначительную часть периода, т. к. $\omega CR = 2\pi\tau / T < 1$ и $\tau < T$.

Кривые изменения тока при включении конденсатора под переменное напряжение показаны на рисунке 22.

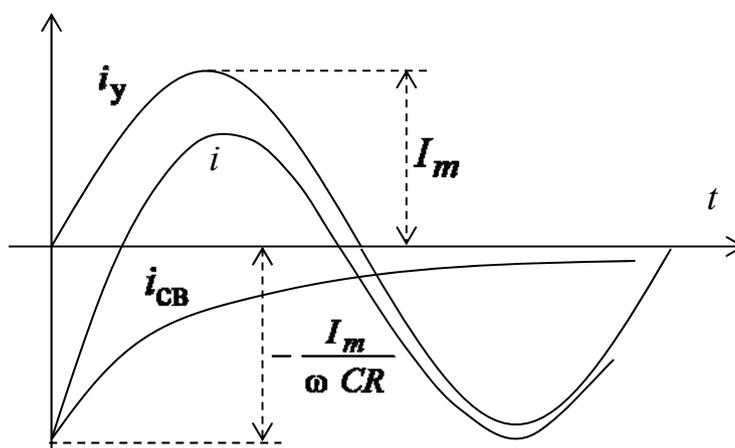


Рисунок 22 – Кривые изменения тока

Максимальное значение напряжение u_C в переходном процессе не превышает удвоенной амплитуды $U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega C}$ напряжения на конденсаторе в установившемся режиме.

Рассмотрим процесс при включении цепи RL под синусоидальное напряжение: $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$.

Ток установившегося режима

$$i_y = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi).$$

Общий ток $i = i_{np} + i_{cs} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-t/\tau}$,

где $I_m = \frac{U_m}{Z}$; $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$; $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$; $\tau = \frac{L}{R}$.

Постоянную интегрирования A определяем из начального условия $i(0-) = 0$.

$$i(0+) = i(0-) = I_m \sin(\psi - \varphi) + A = 0.$$

Общий ток

$$i = i_{np} + i_{cs} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}$$

Кривые изменения тока и напряжения при включении катушки на синусоидальное напряжение представлены на рисунке 23.

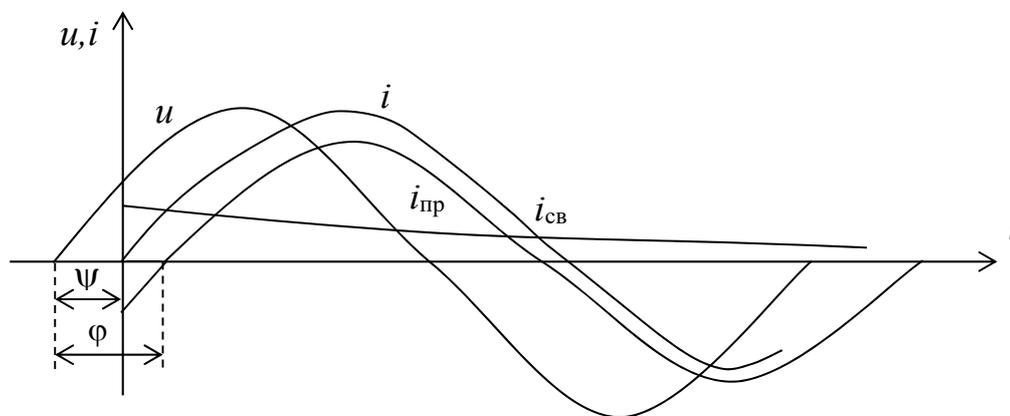


Рисунок 23 – Кривые изменения тока и напряжения при включении катушки на синусоидальное напряжение

Начальное значение свободного тока зависит от начальной фазы ψ напряжения. Наибольшее значение свободного тока, равное амплитуде I_m установившегося тока, имеет место, если $\psi - \varphi = +\pi/2$. Наибольшее значение результирующего тока не превышает двойной амплитуды установившегося тока. Свободный ток не возникает, и сразу наступает установившийся режим при условии $\psi = \varphi$.

Примеры решения задач

Задача 1. Найти закон изменения тока i и напряжения u_C в цепи, изображенной на рисунке 24, после замыкания ключа, если $U = 220$ В, $R = 10$ Ом,

$C = 100$ мкФ. Определить постоянную времени τ и время зарядки конденсатора до напряжения 50 В.

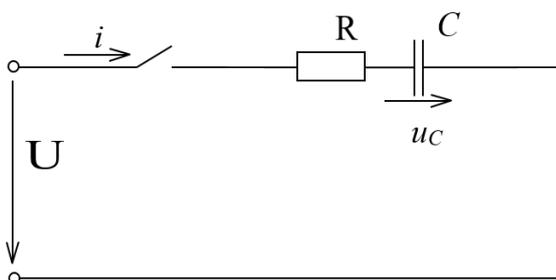


Рисунок 24 – Схема включения конденсатора в цепь постоянного тока

Решение

После коммутации уравнение электрического состояния цепи

$$U = Ri = RC \frac{du_C}{dt} + u_C.$$

Решением его является сумма принужденной u_{Cnp} и свободной $u_{Cсв}$ составляющих:

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв}.$$

Принужденную составляющую находим из расчета цепи в установившемся режиме, т. е. при $t = \infty$:

$$u_{Cnp} = U = 220\text{В},$$

свободную составляющую – из общего решения однородного уравнения:

$$0 = RC \frac{du_{Cсв}}{dt} + u_{Cсв}; u_{Cсв} = Ae^{pt},$$

где $p = -1/(RC)$ – показатель затухания (корень характеристического уравнения $0 = RCp + 1$).

Напряжение конденсатора в переходном режиме

$$u_C = U + Ae^{-t/(RC)},$$

Постоянную интегрирования A находим из начальных условий с помощью второго закона коммутации при $t = 0$:

$$u_C(0) = 0 = U + A,$$

откуда $A = -U$. Тогда напряжение на конденсаторе

$$u_C = U(1 - e^{-t/(RC)}) = 220(1 - e^{-t/(0,001)})\text{В},$$

ТОК В ЦЕПИ

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} e^{-t/(RC)} = 22e^{-t/(0,001)}\text{А}.$$

Постоянная времени

$$\tau = -\frac{1}{p} = RC = 10^{-3}\text{с}.$$

Диаграммы $u_C(t)$ и $i(t)$ приведены на рисунке 25.

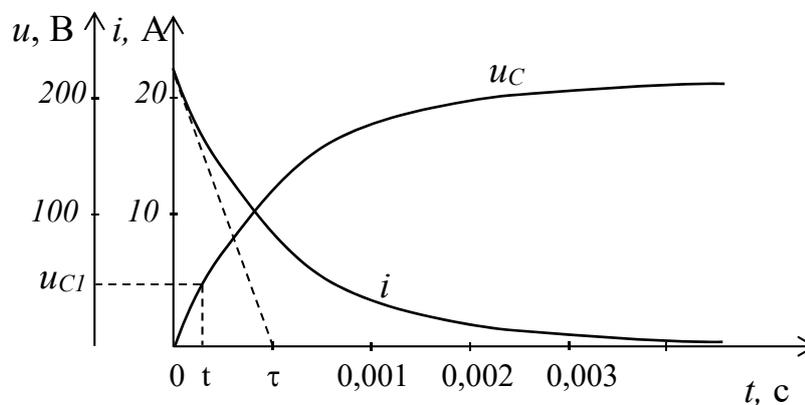


Рисунок 25 – Кривые изменения тока и напряжения

Для определения времени, за которое конденсатор зарядится до напряжения 50 В, воспользуемся общим выражением для u_C :

$$50 = 220(1 - e^{-t/(0,001)})\text{В},$$

откуда

$$e^{-1000t_1} = 0,772; \quad 1000t_1 = \ln 0,772;$$

$$t_1 = \frac{\ln 0,772}{-1000} = \frac{-0,258}{-1000} = 258 \cdot 10^{-6}\text{с}.$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 26).

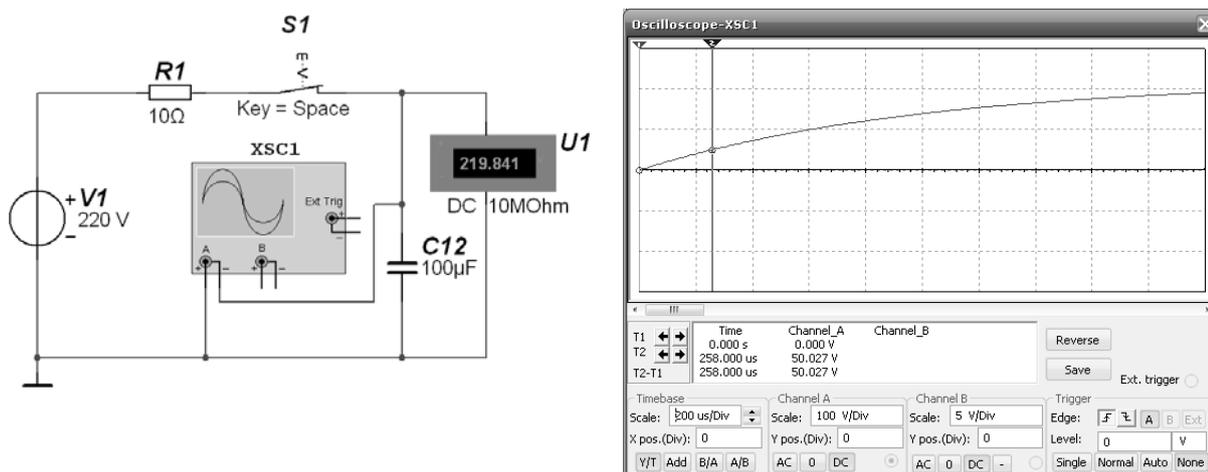


Рисунок 26 – Модель процесса зарядки конденсатора и осциллограмма в среде Multisim

Задача 2. Найти закон изменения тока i в цепи, изображенной на рисунке 27 после замыкания ключа. Цепь содержит источник синусоидальной ЭДС $e(t)$. До коммутации в цепи действует установившийся режим. $R_1 = R_2 = 2 \text{ Ом}$; $X_L = 3 \text{ Ом}$. $e(t) = 127\sin(\omega t - 50^\circ)$; В. $\omega = 314 \text{ рад/с}$.

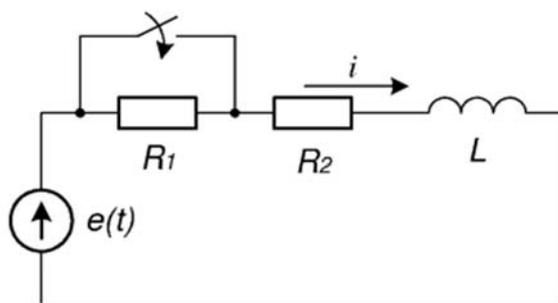


Рисунок 27 – Схема включения R и L в цепь переменного тока

Решение

Перейдем от мгновенного значения ЭДС к его комплексному амплитудному значению.

Найдем комплексное амплитудное значение ЭДС.

$$\dot{E}_m = 127e^{-j50^\circ} \text{ В.}$$

Комплексная амплитуда тока в цепи до коммутации

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{R_1 + R_2 + jX_L} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{2 + 2 + j3} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{5e^{j36,87^\circ}} = 25,4e^{-j86,87^\circ} \text{ А.}$$

Мгновенное значение тока до коммутации $i(t)$, А, определяется как

$$i(t) = 25,4 \sin(\omega t - 86,87^\circ).$$

В момент значения тока до коммутации ($t = 0_-$)

$$i(0_-) = 25,4 \sin(-86,87^\circ) = -25,36 \text{ А.}$$

Принужденный ток после коммутации

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{R_2 + jX_L} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{2 + j3} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{3,606e^{j56,31^\circ}} = 35,22e^{-j106,31^\circ} \text{ А.}$$

Мгновенное значение принужденного тока

$$i_{np}(t) = 35,22 \sin(\omega t - 106,31^\circ).$$

В момент после коммутации ($t = 0_+$)

$$i_{np}(0_+) = 35,22 \sin(-106,31^\circ) = -33,8 \text{ А.}$$

По первому закону коммутации

$$i(0_-) = i(0_+) = -25,36 \text{ А,}$$

но так как $i(0_+) = i_{np}(0_+) + i_{cs}(0_+)$, то

$$i_{cs}(0_+) = i(0_+) - i_{np}(0_+) = -25,36 - (-33,8) = 8,44 \text{ А.}$$

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни.

$$Z(p) = R_2 + pL = 0$$

$$p = -\frac{R_2}{L} = -\frac{R_2}{\omega L / \omega} = -\frac{\omega R_2}{X_L} = -\frac{314 \cdot 2}{3} = -209,3 \text{ с}^{-1}.$$

Используя значения тока в цепи до коммутации $i(t)$ и мгновенное значение тока, принужденного после коммутации, $i_{np}(t)$, $i_{cs}(0_+)$ получим

$$i(t) = i_{np}(t) + i_{cs}(t) = 35,22 \sin(\omega t - 106,31^\circ) + 8,44e^{-209,3t}.$$

Строим график изменения искомой величины тока в цепи от функции времени (рисунок 28).

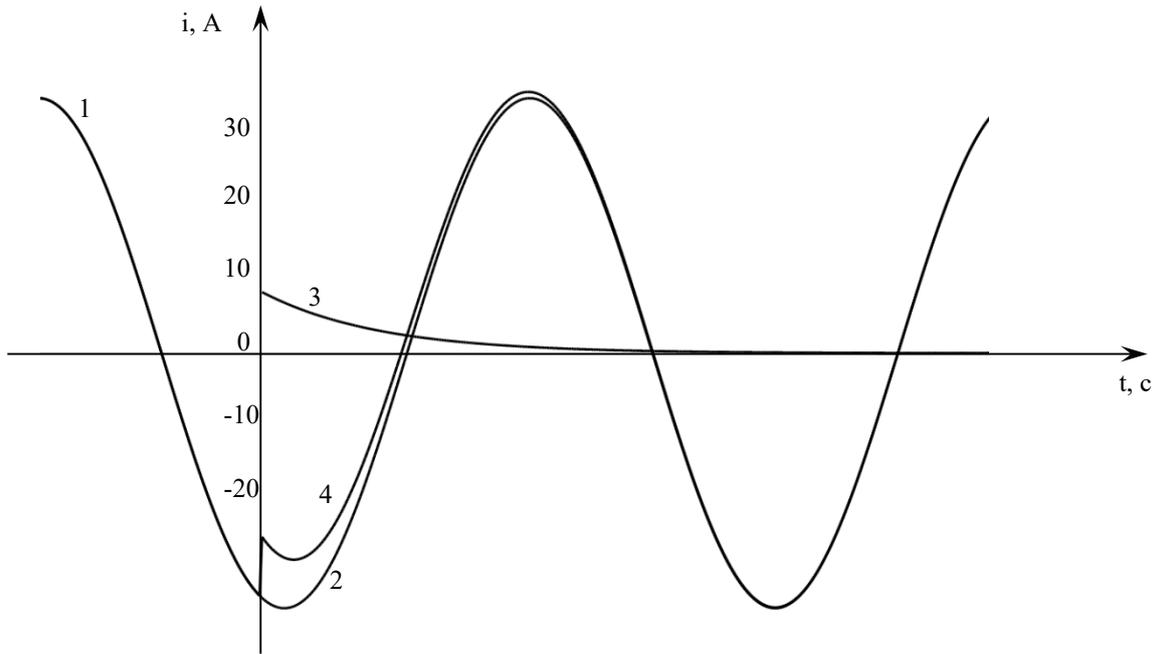


Рисунок 28 – Кривые изменения тока.

На графике кривые: 1 – ток в цепи до коммутации; 2 – принужденный ток после коммутации; 3 – свободная составляющая тока; 4 – полный ток (как результирующий кривых 2 и 3).

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение установившегося и переходного процессов в электрической цепи.
- 2 Дайте определение постоянной времени электрической цепи.
- 3 Поясните, в течение какого промежутка времени почти заканчивается переходной процесс в электрической цепи.
- 4 Укажите, от каких параметров зависит постоянная времени неразветвленных RL - и RC -цепей.
- 5 Назовите устройства, в которых используются явления, возникающие при переходных процессах в электрических цепях.
- 6 Дайте определения законов коммутации.

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

Задача. 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 $K_n = 0,007$. Необходимо выбрать тип вентиля, рассчитать параметры фильтра.

Схема однофазного мостового выпрямителя с LC -фильтром приведена на рисунке 29.

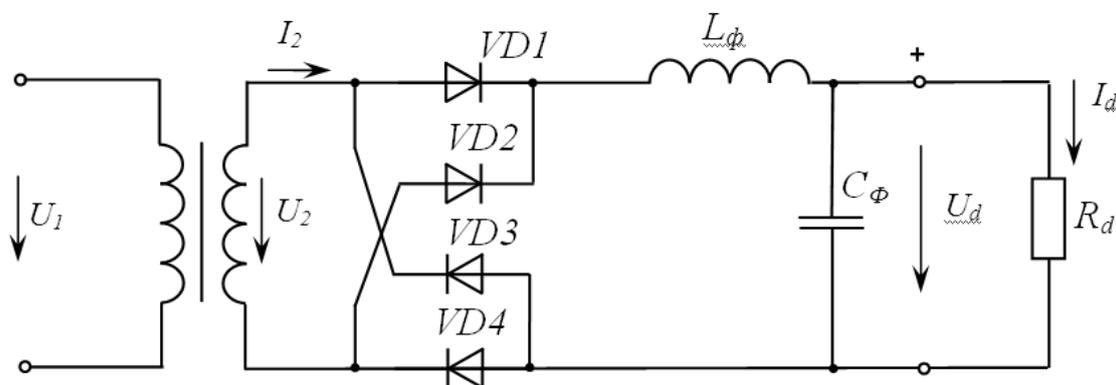


Рисунок 29 – Схема однофазного мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным LC -фильтром

Решение

Ток нагрузки

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

Сопротивление нагрузки

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

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

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

Обратное максимальное напряжение на вентиле равно:

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

Выбираем вентили (выпрямительные диоды) 1N4934 с параметрами:

– максимальный прямой ток $I_{np\max} = 1\text{A} > I_a = 0,3\text{A}$;

– максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\max} = 100\text{В} > U_{a\text{обр}\max} = 78,5\text{В}$;

– максимальное напряжение в открытом состоянии $U_{np\max} = 1,1\text{В}$.

Для однофазного мостового выпрямителя действующее значение вторичного напряжения

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

Расчётная мощность трансформатора

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

Выбираем трансформатор ТПП 271–127/220–50:

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

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

Тогда коэффициент трансформации

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

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

Требуемый коэффициент пульсации $K_n = 0,007$.

Коэффициент сглаживания фильтра:

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

Для LC-фильтра

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

где m – число пульса выпрямленного напряжения за период.

Зададимся $C_\phi = 200$ 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 $C_\phi = 200$ мкФ, $L_\phi = 1,23$ 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 30.

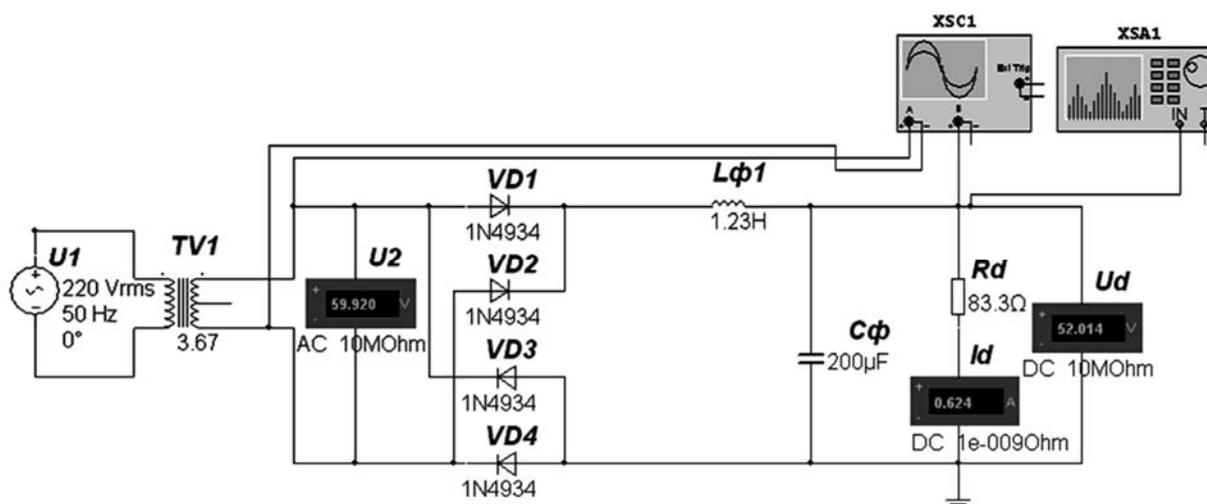


Рисунок 30 – Модель мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

Результаты моделирования: $U_2 = 59,921$ В, $I_d = 0,606$ А, $U_d = 52,04$ В (задано $U_d = 50$ В), что соответствует заданию. Осциллограммы напряжений в контрольных точках приведены на рисунке 31.

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 31).

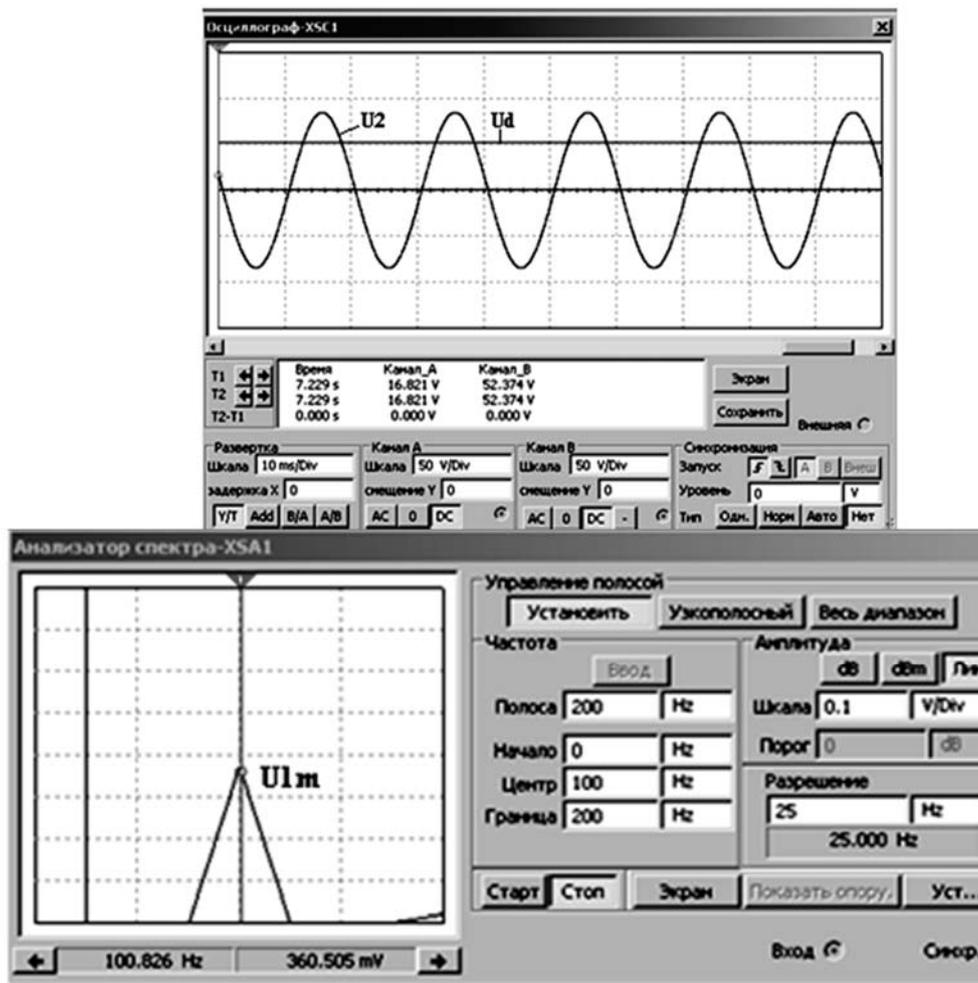


Рисунок 31 – Осциллограммы напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 , выпрямленного напряжения U_d и значение первой гармоники U_{1m} выпрямленного напряжения

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите, какие требования предъявляются к диодам, используемым в выпрямительных устройствах.
- 2 Изобразите временные диаграммы напряжений и токов нагрузки одно- и двухполупериодных схем выпрямления без сглаживающих фильтров.
- 3 Назовите основные типы сглаживающих фильтров.
- 4 Поясните назначение выпрямительных диодов.

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

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

Решение

Параметры операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8):

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

Разработанная схема инвертирующего усилителя низкой частоты приведена на рисунке 32 (цепи балансировки нуля NC и частотной коррекции FC не используются).

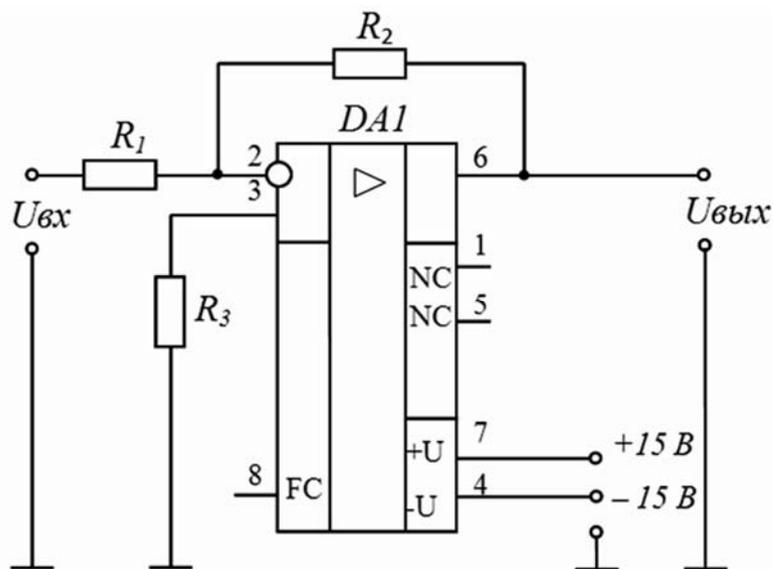


Рисунок 32 – Схема инвертирующего усилителя на операционном усилителе КР140УД11

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

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

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

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

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

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

Модель инвертирующего усилителя на ОУ в среде Multisim приведена на рисунке 32. Результаты моделирования при напряжении, не превышающем $U_{\text{ex max}}$: $U_{\text{ex}}=0,2 \text{ В}$; $U_{\text{вых}}=3,92 \text{ В}$.

Коэффициент усиления

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

что соответствует заданию.

Временные диаграммы работы усилителя при различных уровнях входного сигнала представлены на рисунке 34. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ смещено относительно входного U_{ex} на 180° (инвертирующий усилитель). При входном напряжении, не превышающем $U_{\text{ex max}}$, искажение выходного сигнала не происходит (см. рисунок 34, а). При входном напряжении $U_{\text{ex}}=1 \text{ В}$, превышающем $U_{\text{ex max}}$, наблюдается ограничение выходного напряжения на уровне $U_{\text{вых max}} = 12 \text{ В}$ (см. рисунок 34, б).

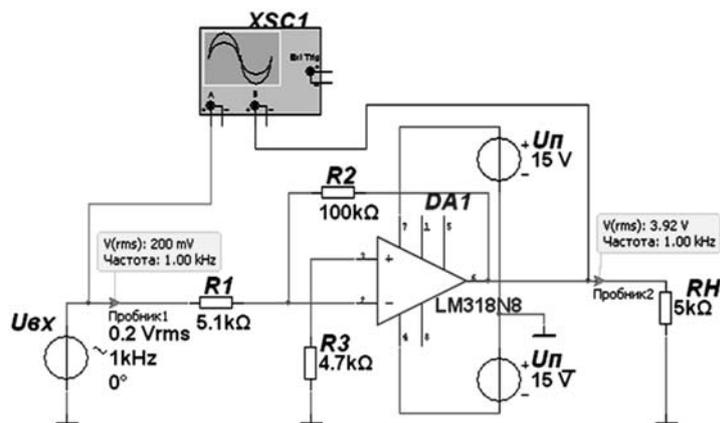
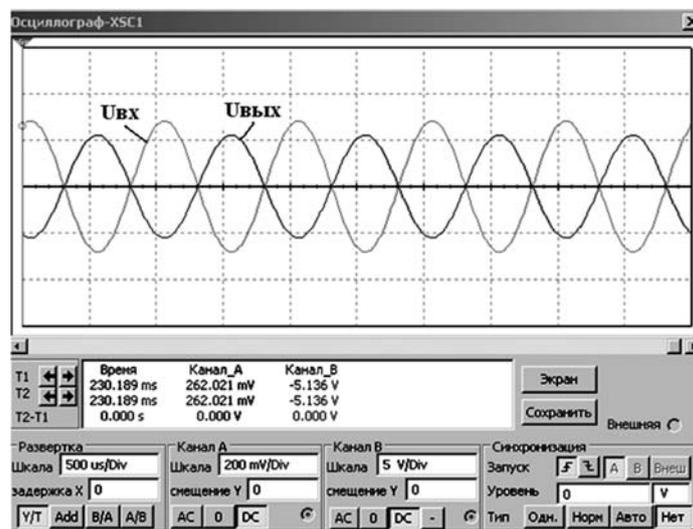
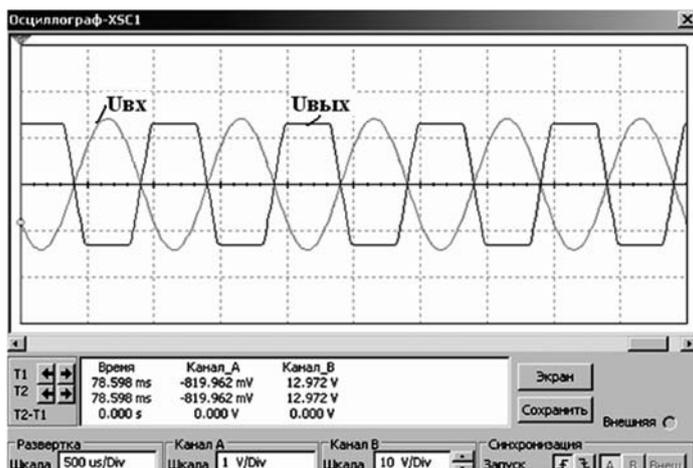


Рисунок 33 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ

а)



б)

Рисунок 34 – Временные диаграммы работы инвертирующего усилителя на ОУ при входном напряжении $U_{вхmax} = 0,2$ В (а) и $U_{вхmax} = 1$ В (б)

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

Контрольные вопросы

- 1 К какому классу усилителей относится ОУ?
- 2 Чем объясняется широкое использование ОУ?
- 3 Что такое обратные связи в усилителях и как они используются при построении конкретных устройств на базе ОУ?
- 4 Какие основные характеристики ОУ и какой они имеют вид?
- 5 Поясните принцип построения инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ.
- 6 Как определяется их коэффициент усиления?
- 7 Особенности АЧХ. Что такое и как определяется полоса пропускания?

Практическое занятие № 8. Разработка цифровых комбинационных устройств

Задача 1. Разработать устройство управления механизмом на логических элементах серии К555 (74LS), работа которого контролируется по пяти параметрам. Параметры могут принимать значение 0 и 1. Значения параметров определяются двоичным, соответствующему 28 в десятичном коде. При несовпадении хотя бы одного из параметров механизм отключается. Составить схему управления механизмом, используя только логические элементы 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ. Осуществить моделирование работы схемы при комбинации логических сигналов на входах, соответствующих включенному состоянию механизма. Описать работу схемы.

Решение

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

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

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

Используемые логические элементы выполняют следующие функции:

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

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

Преобразуемая функция F содержит пять переменных, а у каждого из логических элементов можно использовать не более двух входов. Поэтому надо произвести декомпозицию функции F , т. е. представить ее в виде набора функций F_1 и F_2 , каждая из которых должна содержать не более 2 переменных. Подобные преобразования проводят, используя законы и теоремы алгебры и логики. Применяв закон ассоциативности, исходную функцию представим в следующем виде:

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

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

$$F = \overline{\overline{X_1 \cdot X_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot \bar{X}_5 \cdot X_4}} = \overline{\overline{X_1 \cdot X_2} + \overline{X_3} + \overline{X_5} \cdot X_4}.$$

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

Модель разработанной схемы реализации логической функции в среде Multisim приведена на рисунке 35.

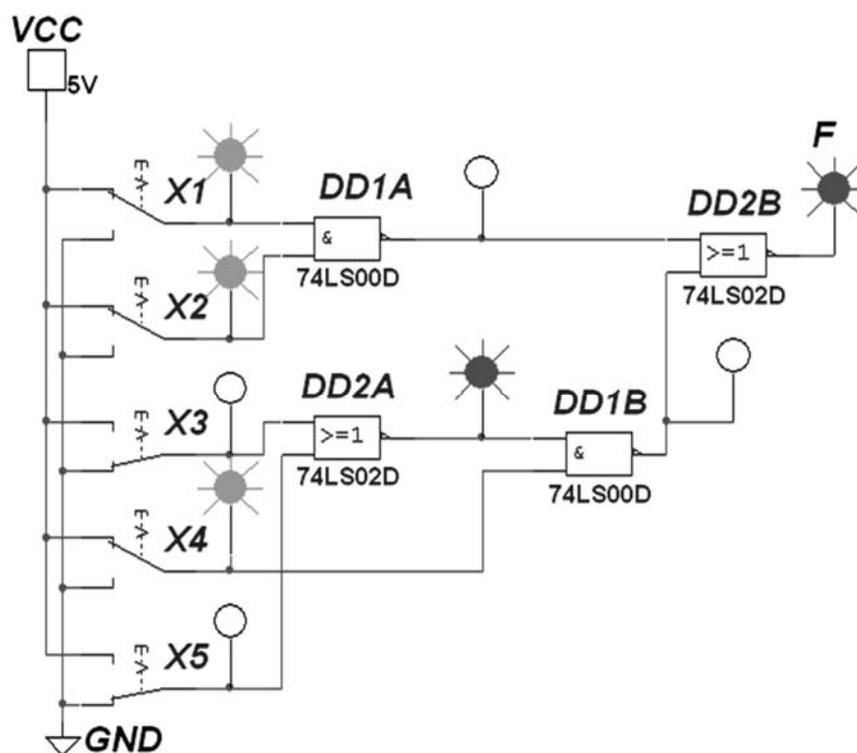


Рисунок 35 – Модель устройства управления механизмом на логических элементах серии 74LS

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

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

Контрольные вопросы

- 1 Какие операции и тождества алгебры логики Вы знаете?
- 2 Перечислите логические функции одного и двух аргументов, покажите примеры реализации.
- 3 Что представляет собой серия цифровых (логических) ИС?
- 4 Приведите примеры простейших цифровых устройств на основе логических элементов.
- 5 Реализуйте несколько функций, заданных таблицей истинности.
- 6 Какой набор логических элементов называют функционально полным (базовым)?
- 7 Поясните работу базового логического элемента.

Список литературы

- 1 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: учебник / А. Л. Марченко. – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 574 с.
- 2 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2017. – 480 с.
- 3 Сборник задач по электротехнике и электронике: учебное пособие / Ю. В. Бладыко [и др.]; под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск: Вышэйшая школа, 2012. – 480 с.
- 4 **Жаворонков, М. А.** Электротехника и электроника: учебное пособие для студентов высшего профессионального образования / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – Москва: ИЦ Академия, 2013. – 400 с.
- 5 **Миленина, С. А.** Электротехника, электроника и схемотехника: учебник и практикум для среднего профессионального образования / С. А. Миленина, Н. К. Миленин. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 399 с.