

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

Н.В. Шаврина, С.В. Шлыков

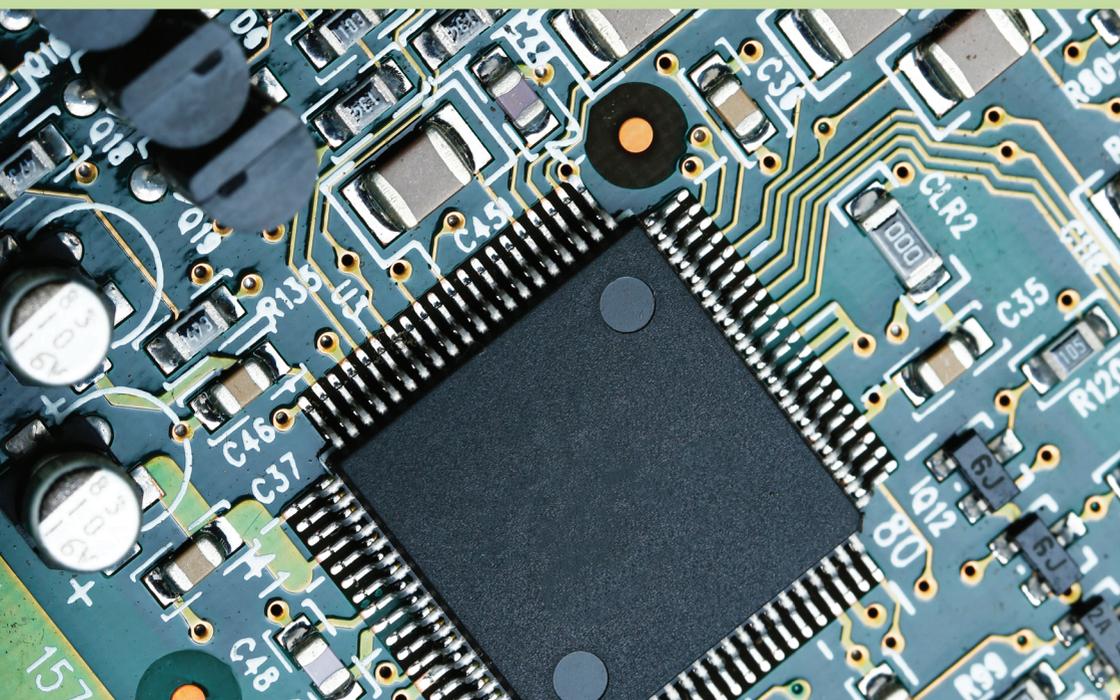
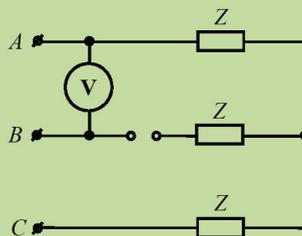
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2023

ISBN 978-5-8259-1310-0



УДК 621.3(075.8)+621.38(075.8)
ББК 31.21я73+32.85я73

Рецензенты:

д-р техн. наук, начальник бюро ИЭМС ОИЭ ДПЭиСА
АО «АВТОВАЗ» П.А. Николаев;

д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного
университета В.В. Вахнина.

Шаврина, Н.В. Электротехника и электроника : практикум /
Н.В. Шаврина, С.В. Шлыков. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023. –
1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1310-0.

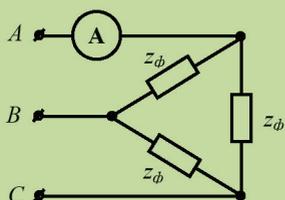
Практикум содержит методические указания по решению типовых задач на практических занятиях по дисциплине «Электротехника и электроника».

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» очной и заочной форм обучения.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.



© Шаврина Н.В., Шлыков С.В., 2023

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2023

Редактор *Е.В. Пилясова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использовано изображение
от xb100 на Freerik

Дата подписания к использованию 17.01.2023.

Объем издания 10,3 Мб.

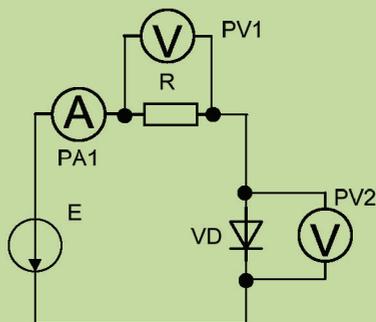
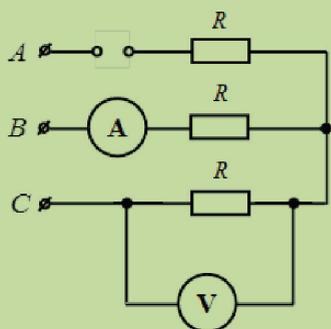
Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-35-21.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru



Содержание

Введение	5
Практическое занятие 1. Анализ электрических цепей постоянного тока	6
Практическое занятие 2. Анализ цепей синусоидального тока	29
Практическое занятие 3. Трехфазные цепи	52
Практическое занятие 4. Электрические машины	67
Практическое занятие 5. Полупроводниковые приборы и устройства	83
Описание текущего контроля	99
Библиографический список	100
Глоссарий	101

Введение

Практикум предназначен для организации практических занятий студентов неэлектротехнических специальностей и направлений подготовки высшего образования, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника», и составлен в соответствии с требованиями, предусмотренными рабочей программой данной дисциплины. В рабочей программе изложены основные цели и задачи дисциплины, такие как: формирование представлений о современных способах получения электрической энергии, ее эффективном использовании в технологических процессах машиностроительных производств, систем автоматизации, управления, контроля и диагностики продукции, достижение которых обеспечивается на основе: понимания принципов функционирования основных электротехнических и электронных элементов, устройств и систем; навыков применения основных законов электрических, магнитных и электронных цепей; методов проведения эксперимента и обработки результатов измерений при выполнении лабораторных работ; навыков самообучения и самообразования.

Цели и задачи практикума: закрепление и углубление знаний студентов в области электротехники и электроники и их использование для практических расчетов; развитие у студентов самостоятельности, стремления к более активному овладению учебным материалом, формирование у них профессиональных качеств будущих специалистов; стимулирование студентов к систематической работе над материалом курса в течение семестра.

Практикум состоит из пяти практических занятий и предполагает решение типовых задач как совместно с преподавателем, так и самостоятельно. Студенты решают одинаковые типовые задачи, но с различными числовыми значениями. Варианты этих числовых значений приведены к каждому заданию.

При подготовке к практическим работам обучающийся должен ознакомиться с планом занятия, изучить конспект лекций, соответствующие разделы учебников и учебных пособий.

Для закрепления изученного материала рекомендуется выполнить задание для самоконтроля.

Практическое занятие 1

Анализ электрических цепей постоянного тока

Цель занятия: приобретение навыков расчета цепей постоянного тока на основе методов эквивалентных преобразований электрических цепей, применения закона Ома и законов Кирхгофа.

Теоретические вопросы

1. Линейная электрическая цепь и ее элементы. Определения: ветвь, узел, контур, ток, напряжение, ЭДС, сопротивление [1–4].
2. Источники и приемники электрической энергии [1–4].
3. Последовательное, параллельное и смешанное соединение приемников [1–4].
4. Закон Ома для пассивного и активного участков цепи [1–3].
5. Законы Кирхгофа. Формулы для определения мощности [1; 2].
6. Основные определения нелинейных электрических цепей постоянного тока [1–4].
7. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений [1–4].
8. Графический способ расчета электрических цепей постоянного тока с нелинейными элементами при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов [1–4].

Методические рекомендации и краткие теоретические сведения

Приступая к выполнению самостоятельной работы, необходимо изучить теоретический материал и разобрать примеры решения задач.

Обратите особое внимание на точное заучивание определений и формулировок законов, теорем и принципов, так как в электротехнике они очень содержательны и часто охватывают не только полный смысл понятия, но и способ его применения при решении задач.

Следует помнить, что:

- условиями протекания токов в электрической цепи являются ее замкнутость и наличие источников питания;
- в каждой ветви схемы течет свой собственный ток и во всех элементах этой ветви он одинаков;

- узлом электрической схемы называется ее часть, где сходятся не менее трех ветвей, а любой замкнутый обход схемы называется контуром;
- источником ЭДС называют источник, который независимо от подключаемой к нему схемы поддерживает на входе схемы напряжение, равное величине ЭДС источника;
- внутреннее сопротивление идеального источника ЭДС равно нулю;
- источником тока называют источник, который независимо от подключаемой к нему схемы поддерживает всегда ток в ветви, в которой он стоит, равным величине тока источника;
- внутреннее сопротивление идеального источника тока равно бесконечности.

Сущность метода эквивалентных преобразований заключается в сведении исходной разветвленной цепи к простейшей. При нахождении общего сопротивления цепи необходимо знать правило свертывания последовательного и параллельного соединения сопротивлений.

Резисторы соединены последовательно, если по ним течет один и тот же ток. Эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из n последовательно соединенных резисторов, равно сумме их сопротивлений:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^n R_k.$$

Резисторы соединены параллельно, если они подключены к одной и той же паре узлов. Эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из n параллельно соединенных резисторов, определяется из выражения

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

В частном случае параллельного соединения двух резисторов эквивалентное сопротивление находится по формуле

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если параллельно соединены n одинаковых резисторов, то их эквивалентное сопротивление в n раз меньше одного из них:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_n}{n}.$$

При изучении темы анализа цепей постоянного тока обратите особое внимание на значение понятий о положительном направлении тока, напряжения и ЭДС:

- положительное направление тока на пассивных элементах всегда совпадает с падением напряжения на них;
- при обозначении двойным индексом падения напряжения порядок букв показывает, какое падение напряжения принято за положительное. Отрицательный знак падения напряжения указывает, что истинное падение напряжения направлено в противоположную сторону;
- при нахождении падения напряжения между двумя точками разветвленной цепи приходится искать *алгебраическую* сумму падений напряжений на каждом элементе вдоль выбранного пути, составленного из участков цепи, соединяющих эти две точки. В этом случае положительное направление падения напряжения выбирается вами произвольно;
- важно помнить, что в обозначении источника ЭДС указано направление электродвижущей силы, при этом падение напряжения на нем всегда направлено в сторону, противоположную направлению указанной электродвижущей силы.

К основным законам электротехники в цепях постоянного тока относятся:

✓ закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС. Позволяет найти ток этого участка по известной разности потенциалов ($U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$) на концах этого участка цепи и имеющейся на этом участке ЭДС E :

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

Напряжение участка цепи и ЭДС берутся со знаком «+», если их направление совпадает с направлением тока, и со знаком «-», если они направлены противоположно току;

✓ первый закон Кирхгофа. Применяется к узлам электрических цепей и выражает баланс токов в них: *в узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю:*

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

Токи, входящие в узел, обычно берутся со знаком «+», а выходящие из узла — со знаком «-»;

✓ второй закон Кирхгофа. Применяется к контурам электрических цепей и выражает баланс напряжений в них: *в контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур*:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m I_k \cdot R_k .$$

При этом падения напряжений, совпадающие с направлением обхода контура, учитываются со знаком «+».

Нелинейные электрические цепи постоянного тока содержат нелинейные сопротивления и в отличие от линейных обладают нелинейными вольтамперными характеристиками. Вольтамперная характеристика (ВАХ) — это зависимость тока, протекающего через сопротивление, от напряжения на нем. ВАХ могут быть заданы графиком, таблицей или математической формулой. Расчет нелинейных цепей постоянного тока производят, как правило, графически.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Определить величину эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{экв}}$ (рис. 1.1), если $R_1 = R_2 = R_3 = 12 \text{ Ом}$.

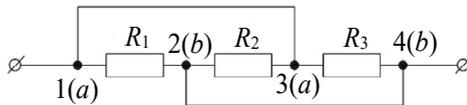


Рис. 1.1. Расчетная электрическая цепь

Решение. Если в ветви, соединяющей два узла, сопротивление отсутствует, тогда

$$R = 0 \Rightarrow IR = \varphi_a - \varphi_b = 0 \Rightarrow \varphi_a = \varphi_b,$$

и, таким образом, потенциалы этих узлов одинаковы.

Такие узлы целесообразно обозначать одинаковыми буквами или цифрами и схему перерисовать так, чтобы каждый узел на ней изображался только один раз. Узлы 1 и 3 соединены проводом, сопротивление которого равно нулю. Потенциалы этих узлов одинаковы, поэтому обозначим их буквой a . Аналогично узлы 2 и 4 обозначим буквой b . Покажем преобразованную схему на рис. 1.2.

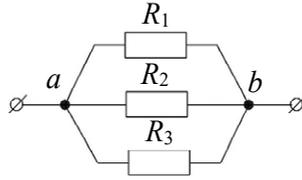


Рис. 1.2. Преобразованная электрическая цепь

Все резисторы R_1 , R_2 и R_3 соединены параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление находим как

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{3} = \frac{12}{3} = 4 \text{ Ом.}$$

Задача 1.2. Определить величину эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{экв}}$ (рис. 1.3), если $R_1 = R_2 = R_3 = 12 \text{ Ом}$, $R_4 = 1 \text{ Ом}$, $R_5 = 3 \text{ Ом}$.

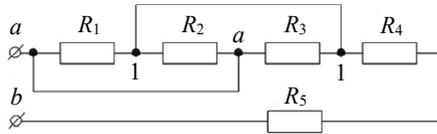


Рис. 1.3. Расчетная электрическая цепь

Решение. Как и в предыдущем примере, резисторы R_1 , R_2 , R_3 соединены параллельно, тогда эквивалентное сопротивление участка « $a - 1$ » определим как

$$R_{a-1} = \frac{R_1}{n} = \frac{R_1}{3} = 4 \text{ Ом.}$$

Заменим участок с параллельным соединением сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 на одно эквивалентное сопротивление R_{a-1} . В результате электрическая цепь упрощается, и ее конфигурация принимает вид, как на рис. 1.4.

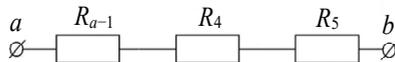


Рис. 1.4. Преобразованная электрическая цепь

Значение эквивалентного сопротивления определяется как для последовательного соединения резисторов R_{a-1} , R_4 и R_5 :

$$R_{\text{экв}} = R_{a-1} + R_4 + R_5 = 4 + 1 + 3 = 8 \text{ Ом.}$$

Задача 1.3. Определить величину эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{эКВ}}$ (рис. 1.5), если $R_1 = R_5 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = R_4 = 16 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$.

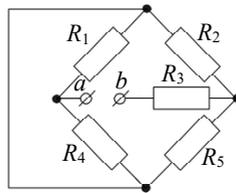


Рис. 1.5. Расчетная электрическая цепь

Решение. Сначала необходимо отыскать участки с последовательным и параллельным типами соединений сопротивлений. Найдем узловые точки, соединенные проводом, и соединим их в один узел.

Перечертим расчетную электрическую цепь и получим упрощенную, конфигурация которой показана на рис. 1.6.

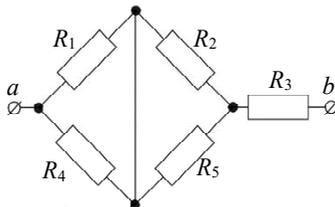


Рис. 1.6. Преобразованная электрическая цепь

Видно, что участки электрической цепи с сопротивлениями $R_1 - R_4$ и $R_2 - R_5$ соединены параллельно. Заменим их на эквивалентные сопротивления этих участков:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{14} &= \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} = \frac{4 \cdot 16}{4 + 16} = 3,2 \text{ Ом}, \\ R_{25} &= \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5} = \frac{4 \cdot 16}{4 + 16} = 3,2 \text{ Ом}. \end{aligned} \right.$$

Получим электрическую цепь, в которой все три сопротивления будут соединены последовательно. Находим эквивалентное сопротивление:

$$R_{\text{эКВ}} = R_{14} + R_{25} + R_3 = 3,2 + 3,2 + 3 = 9,4 \text{ Ом}.$$

Задача 1.4. Определить величину эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{экв}}$ (рис. 1.7), если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 30$ Ом.

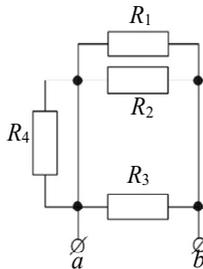


Рис. 1.7. Расчетная электрическая цепь

Решение. Если обозначить буквами узлы с одинаковыми потенциалами, то получим участок с параллельным соединением трех сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 . При этом два вывода сопротивления R_4 присоединяются к одному и тому же узлу a (рис. 1.8), следовательно, в расчете величины эквивалентного сопротивления это сопротивление не участвует.

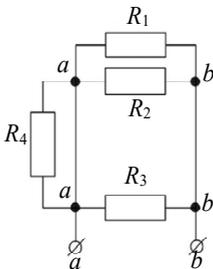


Рис. 1.8. Расчетная электрическая цепь

Таким образом, величина эквивалентного сопротивления всей электрической цепи определится как

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1}{n} = \frac{30}{3} = 10 \text{ Ом.}$$

Задача 1.5. Определить величину эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{экв}}$ (рис. 1.9), если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2$ Ом, $R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = 8$ Ом.

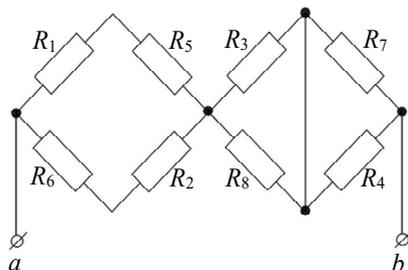


Рис. 1.9. Расчетная электрическая цепь

Решение. Видно, что участки электрической цепи с сопротивлениями $R_1 - R_5$ и $R_2 - R_6$ соединены последовательно. Заменим их на эквивалентные сопротивления этих участков:

$$\left\| \begin{aligned} R_{15} &= R_1 + R_5 = 2 + 8 = 10 \text{ Ом}, \\ R_{26} &= R_2 + R_6 = 2 + 8 = 10 \text{ Ом}. \end{aligned} \right.$$

Также можем заметить, что участки электрической цепи с сопротивлениями $R_3 - R_8$ и $R_4 - R_7$ соединены параллельно. Заменим их на эквивалентные сопротивления этих участков:

$$\left\| \begin{aligned} R_{38} &= \frac{R_3 \cdot R_8}{R_3 + R_8} = \frac{2 \cdot 8}{2 + 8} = 1,6 \text{ Ом}, \\ R_{47} &= \frac{R_7 R_4}{R_7 + R_4} = \frac{8 \cdot 2}{8 + 2} = 1,6 \text{ Ом}. \end{aligned} \right.$$

В результате электрическая цепь упрощается и ее конфигурация принимает вид, как на рис. 1.10.

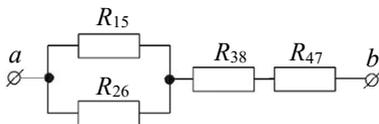


Рис. 1.10. Преобразованная электрическая цепь

В преобразованной электрической цепи видно, что участок с сопротивлениями $R_{15} - R_{26}$ имеет параллельное соединение, поэтому

$$R_{15-26} = \frac{R_{15} \cdot R_{26}}{R_{15} + R_{26}} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \text{ Ом}.$$

Таким образом, величина эквивалентного сопротивления всей электрической цепи равна

$$R_{\text{эkv}} = R_{15-26} + R_{38} + R_{47} = 5 + 1,6 + 1,6 = 8,2 \text{ Ом.}$$

Задача 1.6. Определить величину тока I . Значения параметров электрической цепи: $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 40 \text{ В}$, $\varphi_a = 15 \text{ В}$, $\varphi_b = 25 \text{ В}$, $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$.

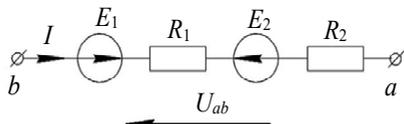


Рис. 1.11. Расчетная электрическая цепь

Решение. Для изображенного участка электрической цепи (рис. 1.11) применим обобщенный закон Ома. Напряжение участка цепи и ЭДС берутся со знаком плюс, если их направление совпадает с направлением тока, и со знаком минус, если они направлены противоположно току.

$$I = \frac{\pm U_{ab} \pm \sum E}{\sum R} = \frac{-(\varphi_a - \varphi_b) + E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{-(15 - 25) + 10 - 40}{8 + 2} = -2 \text{ А.}$$

Отрицательное значение тока определяется тем, что истинное направление тока противоположно условно принятому на рис. 1.11.

Задача 1.7. Определить напряжение U_{ab} . Значения параметров электрической цепи: $E_1 = 30 \text{ В}$, $E_2 = 10 \text{ В}$, $E_3 = 18 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 5 \text{ Ом}$, $I = 2 \text{ А}$.

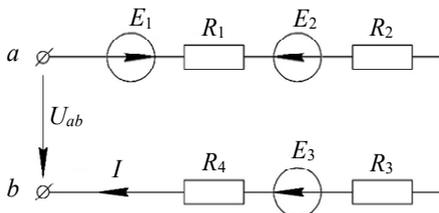


Рис. 1.12. Расчетная электрическая цепь

Решение. Для изображенного на рис. 1.12 участка электрической цепи применим обобщенный закон Ома. Получим уравнение для величины протекающего тока:

$$I = \frac{\pm U_{ab} \pm \sum E}{\sum R} = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Отсюда выражаем напряжение U_{ab} . Получим:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= -E_1 + E_2 - E_3 + I \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = \\ &= -30 + 10 - 18 + 2 \cdot (10 + 10 + 5 + 5) = 22 \text{ В.} \end{aligned}$$

Задача 1.8. Определить напряжение U_{ab} (рис. 1.13), если $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$, $I_1 = 5 \text{ А}$, $I_2 = 2 \text{ А}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$.

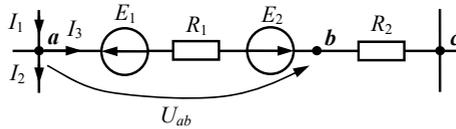


Рис. 1.13. Расчетная электрическая цепь

Решение. Для определения тока I_3 запишем уравнение по первому закону Кирхгофа применительно к узлу a . Токи, подходящие к узлу, берутся со знаком «+», а отходящие от узла – со знаком «-».

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = I_1 - I_2 = 5 - 2 = 3 \text{ А.}$$

Напряжение U_{ab} участка найдем по обобщенному закону Ома. Запишем уравнение для величины протекающего тока:

$$I_3 = \frac{\pm U_{ab} \pm \sum E}{\sum R} = \frac{U_{ab} - E_1 + E_2}{R_1}.$$

Отсюда выражаем напряжение U_{ab} . Получим:

$$U_{ab} = E_1 - E_2 + I_3 R_1 = 10 - 5 + 3 \cdot 1 = 8 \text{ В.}$$

Задача 1.9. Составить уравнения по законам Кирхгофа для определения неизвестных токов электрической цепи (рис. 1.14).

Решение. Произвольно выбираем положительные направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками.

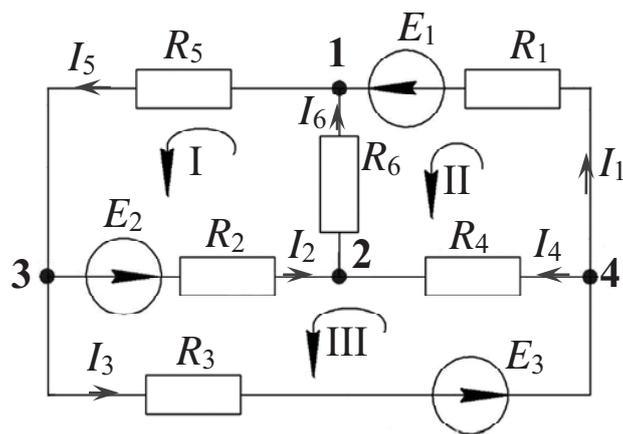


Рис. 1.14. Расчетная электрическая цепь

В заданной схеме 6 ветвей. Необходимо составить систему из 6 уравнений.

По первому закону Кирхгофа составляется количество независимых уравнений, равное $k_I = y - 1$, где y – число узлов в электрической цепи.

В нашей схеме 4 узла, поэтому составляем 3 уравнения.

Токи ветвей, подходящие к узлу, берутся со знаком «+», а отходящие от узла – со знаком «-».

$$\text{Для узла 2: } I_2 + I_4 - I_6 = 0.$$

$$\text{Для узла 3: } I_5 - I_2 - I_3 = 0.$$

$$\text{Для узла 4: } I_3 - I_4 - I_1 = 0.$$

Недостающее число уравнений составляется по второму закону Кирхгофа, их количество определяется как

$$k_{II} = N = b - (y - 1) - b_{\text{ист}} = b - k_I - b_{\text{ист}},$$

где N – количество независимых контуров; b – количество ветвей в расчетной электрической цепи; $b_{\text{ист}}$ – количество ветвей в источниках тока.

Для составления уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо выбрать произвольно положительный обход контура.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа независимые контуры выбираются так, чтобы в каждый из них входила новая ветвь, исключая ветви с источниками тока.

Если направление ЭДС и напряжений на отдельных участках контура совпадает с выбранным направлением контура, то слагаемые в уравнении берутся со знаком «+», в противоположном случае – со знаком «-».

В данной задаче имеем три независимых контура. Таким образом, по второму закону Кирхгофа необходимо составить 3 уравнения.

$$\text{Для контура I: } R_5 I_5 + R_2 I_2 + R_6 I_6 = E_2.$$

$$\text{Для контура II: } R_1 I_1 - R_6 I_6 - R_4 I_4 = E_1.$$

$$\text{Для контура III: } R_4 I_4 - R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_3 - E_2.$$

Решая совместно систему уравнений, составленную из 6 записанных уравнений, находим неизвестные токи ветвей.

Задача 1.10. Определить напряжение между точками a и b (рис. 1.15), указать, в каких режимах работают источники ЭДС, если $E_1 = 60$ В, $E_2 = 10$ В, $R_1 = 30$ Ом, $R_2 = 20$ Ом.

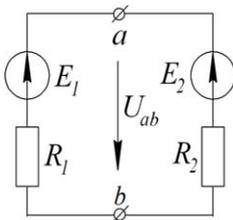


Рис. 1.15. Расчетная электрическая цепь

Решение. Выбираем произвольно направление тока и обход контура (рис. 1.16).

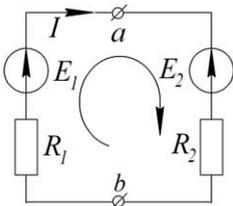


Рис. 1.16. Расчетная электрическая цепь

По второму закону Кирхгофа записываем уравнения:

$$E_1 - E_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I \Rightarrow$$

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 - 10}{30 + 20} = 1 \text{ А.}$$

Направления обхода контуров показаны на рис. 1.17, a и b .

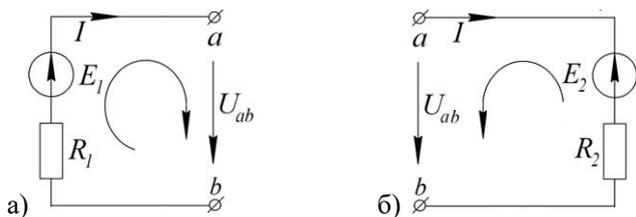


Рис. 1.17. Расчетная электрическая цепь

Для определения напряжения U_{ab} составляем уравнения согласно второму закону Кирхгофа:

$$E_1 = R_1 I + U_{ab}, U_{ab} = E_1 - R_1 I = 60 - 30 \cdot 1 = 30 \text{ В.}$$

$$E_2 = -R_2 I + U_{ab}, U_{ab} = E_2 + R_2 I = 10 + 20 \cdot 1 = 30 \text{ В.}$$

Источник ЭДС может работать в режиме генератора и в режиме приемника. Если мощность источника ЭДС $P = EI$ – величина положительная, то источник работает в режиме генератора, если отрицательная – то в режиме приемника.

$P_1 = E_1 I = 60 \cdot 1 = 60$ Вт – источник ЭДС E_1 работает в режиме генератора;

$P_2 = -E_2 I = -10 \cdot 1 = -10$ Вт – источник ЭДС E_2 работает в режиме приемника.

Задача 1.11. Два одинаковых нелинейных элемента и линейное сопротивление $r = 20$ Ом включены, как показано на рис. 1.18, а, ВАХ одного элемента приведена на графике (рис. 1.18, б). Определите ток I_2 , если $I_1 = 1$ А.

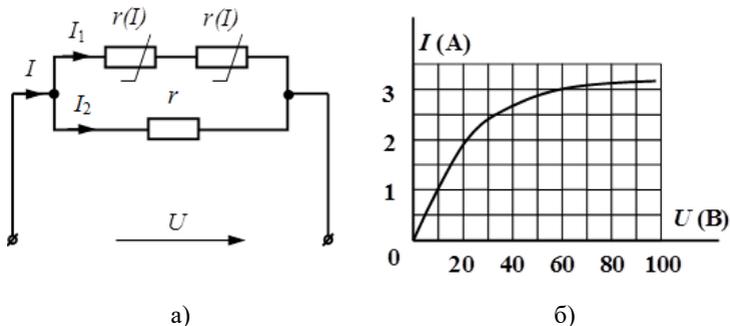


Рис. 1.18. Расчетная электрическая цепь (а) и ВАХ (б)

Решение. Для того чтобы найти ток в линейном элементе, необходимо знать напряжение на нем и его сопротивление. Напряжение на линейном элементе равно сумме напряжений на двух нелинейных элементах. Найдем напряжение на одном нелинейном элементе. Для этого по графику, зная значение тока $I_1 = 1$ А, находим напряжение, равное 10 В. Тогда ток на линейном элементе по закону Ома найдем как

$$I_2 = \frac{U_1 + U_2}{r} = \frac{10 + 10}{20} = 1 \text{ А.}$$

Задача 1.12. Три одинаковых нелинейных элемента включены, как показано на рис. 1.19, а, ВАХ одного элемента приведена на графике (рис. 1.19, б). Определите ток I_1 , если напряжение $U_3 = 20$ В.

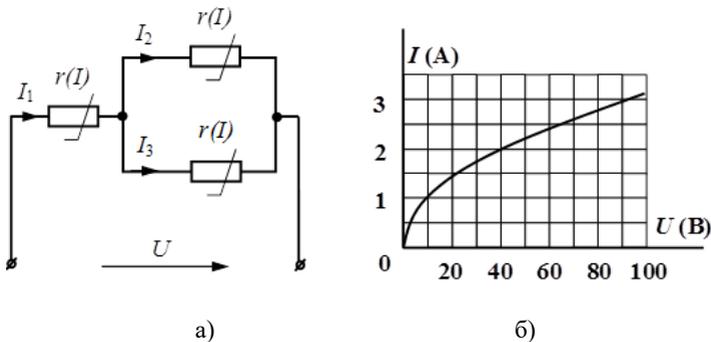


Рис. 1.19. Расчетная электрическая (а) цепь и ВАХ (б)

Решение. Ток I_1 согласно первому закону Кирхгофа равен сумме токов:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

По графику рис. 1.19, б, зная напряжение на третьем нелинейном элементе $U_3 = 20$ В, находим токи:

$$I_2 = I_3 = 1,5 \text{ А.}$$

Так как нелинейные элементы одинаковые, то и токи по ним протекают одинаковые.

Находим ток I_1 :

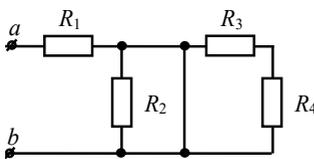
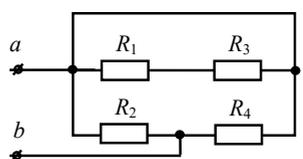
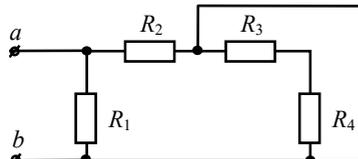
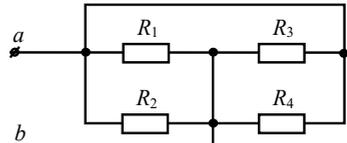
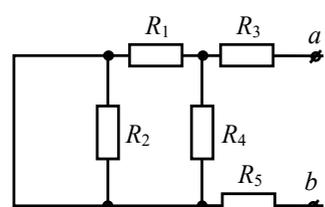
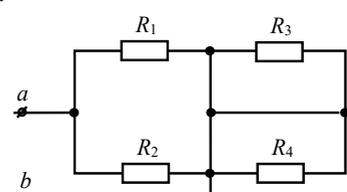
$$I_1 = 1,5 + 1,5 = 3 \text{ А.}$$

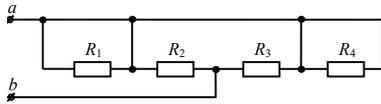
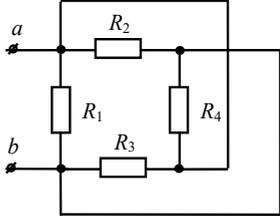
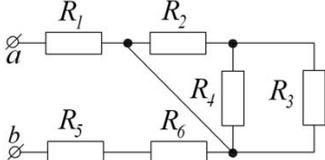
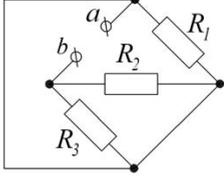
Задачи для самостоятельной работы

Задача 1.13. Определить величину эквивалентного сопротивления электрической цепи $R_{\text{экв}}$, используя данные табл. 1.1. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 1.1

Конфигурация электрической цепи

<p>1.</p>  <p>$R_1 = 15 \text{ Ом}, R_2 = 20 \text{ Ом},$ $R_3 = 5 \text{ Ом}, R_4 = 30 \text{ Ом}$</p>	<p>2.</p>  <p>$R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 40 \text{ Ом},$ $R_3 = 30 \text{ Ом}, R_4 = 40 \text{ Ом}$</p>
<p>3.</p>  <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 80 \text{ Ом}$</p>	<p>4.</p>  <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 40 \text{ Ом}$</p>
<p>5.</p>  <p>$R_1 = R_4 = 40 \text{ Ом},$ $R_2 = R_3 = R_5 = 10 \text{ Ом}$</p>	<p>6.</p>  <p>$R_1 = R_2 = 40 \text{ Ом},$ $R_3 = R_4 = 50 \text{ Ом}$</p>

<p>7.</p>  <p>$R_1 = R_4 = 25 \text{ Ом},$ $R_2 = R_3 = 30 \text{ Ом}$</p>	<p>8.</p>  <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 40 \text{ Ом}$</p>
<p>9.</p>  <p>$R_1 = R_2 = R_3 = 4 \text{ Ом},$ $R_4 = R_5 = R_6 = 7 \text{ Ом}$</p>	<p>10.</p>  <p>$R_1 = R_2 = R_3 = 5 \text{ Ом}$</p>

Задача 1.14. Решить задачу 1.5, используя данные табл. 1.2. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 1.2

Исходные расчетные данные

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1 = R_6, \text{ Ом}$	5	6	7	3	4	8	9	2	5	6
$R_2 = R_5, \text{ Ом}$	7	8	9	7	6	6	3	8	7	8
$R_4 = R_7, \text{ Ом}$	10	20	30	40	50	60	70	80	30	40
$R_3 = R_8, \text{ Ом}$	80	70	60	50	40	30	20	10	60	50

Задача 1.15. Решить задачу 1.8, используя данные табл. 1.3 и 1.4. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 1.3

Конфигурация расчетной электрической цепи

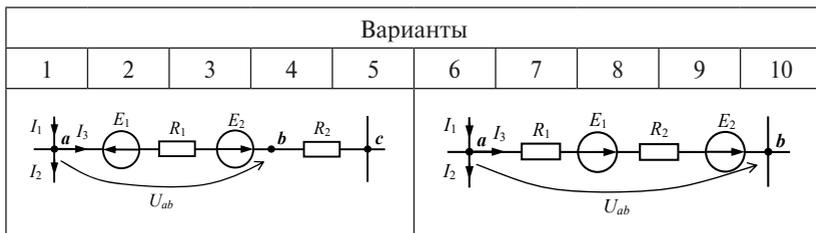


Таблица 1.4

Исходные расчетные данные

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_1, \text{В}$	10	20	30	40	50	5	3	30	30	15
$E_2, \text{В}$	5	8	10	15	20	3	2	20	50	10
$I_1, \text{А}$	5	10	8	15	8	2	5	15	20	6
$I_2, \text{А}$	2	5	6	5	11	1	3	5	10	3
$R_1, \text{Ом}$	1	2	5	1	2	5	5	10	15	3
$R_2, \text{Ом}$	3	5	10	2	5	10	2	10	10	4

Задача 1.16. Составить уравнения по законам Кирхгофа для определения токов (рис. 1.20).

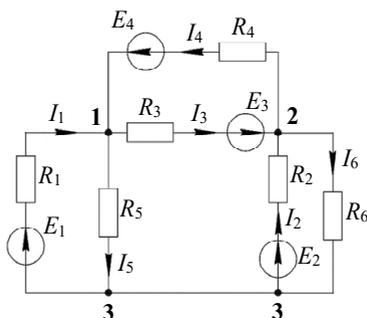


Рис. 1.20. Расчетная электрическая цепь

Задача 1.17. Решить задачу 1.10, используя данные табл. 1.5. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 1.5

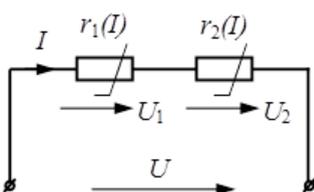
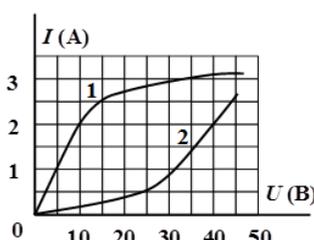
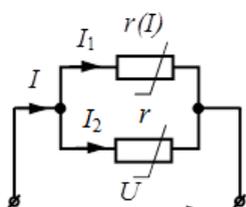
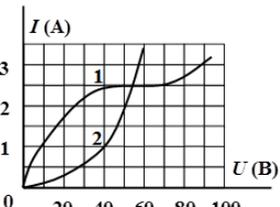
Исходные расчетные данные

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_1, \text{В}$	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$E_2, \text{В}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$R_1, \text{Ом}$	30	40	10	60	40	20	15	35	70	30
$R_2, \text{Ом}$	20	10	40	40	60	30	35	15	30	70

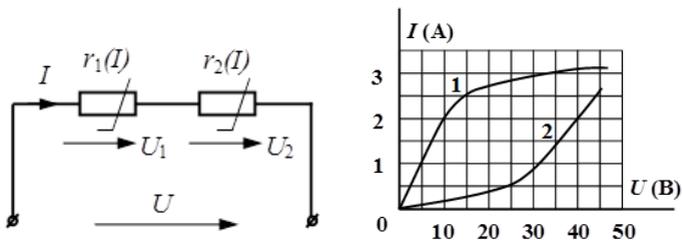
Задача 1.18. Два нелинейных элемента включены последовательно или параллельно, их ВАХ приведены на графике табл. 1.6. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 1.6

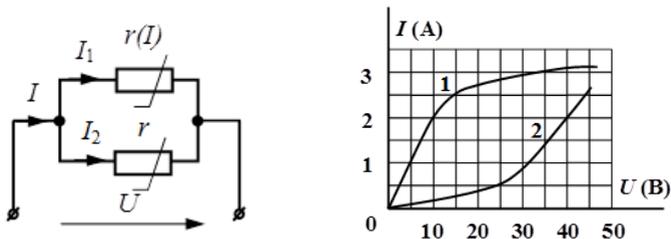
Конфигурация нелинейной электрической цепи

1	<p>Определите напряжение на зажимах цепи U, если напряжение на первом элементе 10 В.</p>  
2	<p>Определите ток I, если напряжение на зажимах цепи равно 50 В.</p>  

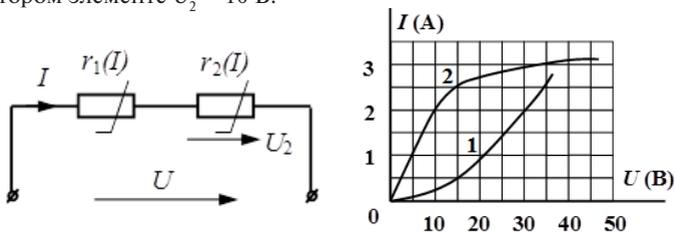
- 3 Определите напряжение на зажимах цепи U , если ток в цепи равен 2 А.



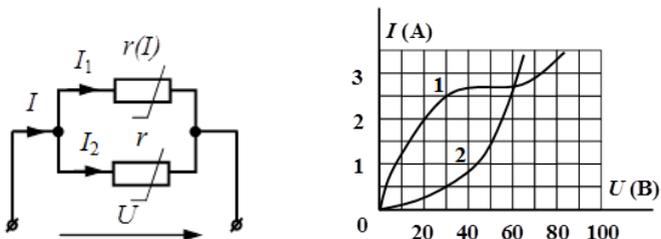
- 4 Определите ток во второй ветви, если ток в первой ветви равен 3 А.



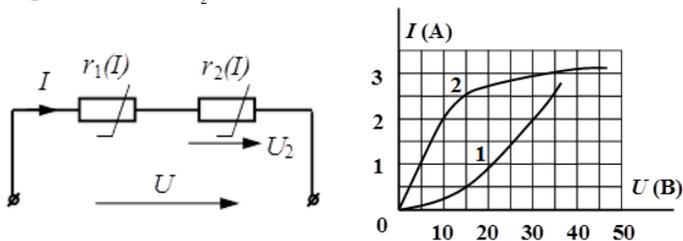
- 5 Определите статическое сопротивление цепи, если напряжение на втором элементе $U_2 = 10$ В.



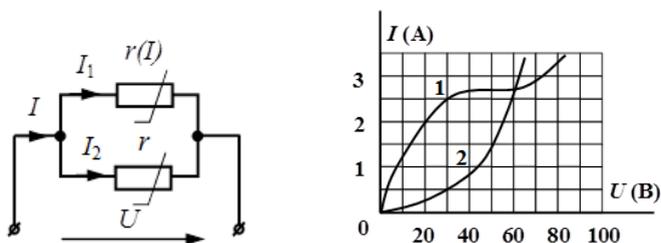
- 6 Определите ток I , если напряжение на зажимах цепи равно 25 В.



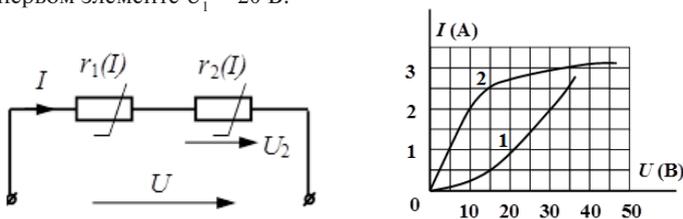
- 7 Определите статическое сопротивление цепи, если напряжение на втором элементе $U_2 = 5$ В.



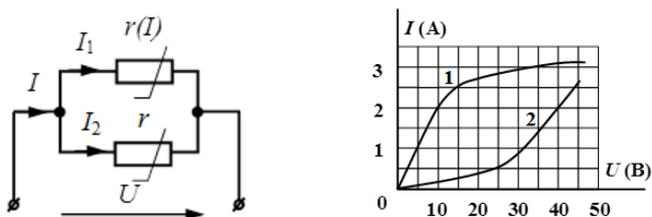
- 8 Определите ток во второй ветви, если ток в первой ветви равен 2,5 А.



- 9 Определите статическое сопротивление цепи, если напряжение на первом элементе $U_1 = 20$ В.

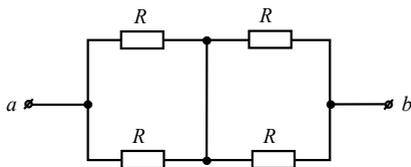


- 10 Определите ток I , если напряжение на первом элементе равно 35 В.

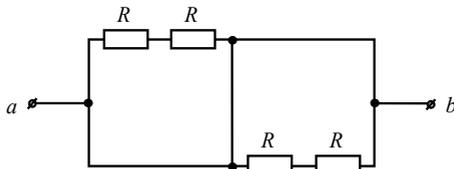


Тесты для самоконтроля

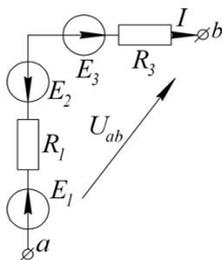
1. В линейной электрической цепи постоянного тока $R = 2$ Ом.
Величина эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{экв}} = \dots$ Ом.



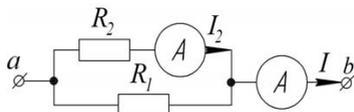
2. В линейной электрической цепи постоянного тока $R = 1$ Ом.
Величина эквивалентного сопротивления цепи $R_{\text{экв}} = \dots$ Ом.



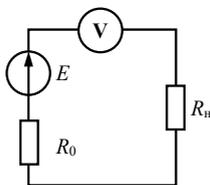
3. Дано: $R_1 = 8$ Ом, $R_3 = 4$ Ом, $E_1 = 10$ В, $E_2 = 40$ В, $E_3 = 12$ В,
 $I = 1$ А. Определить U_{ab} .



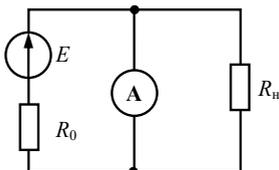
4. Дано: $R_1 = 3$ Ом, показания амперметров: $I = 25$ А, $I_2 = 5$ А.
Определить R_2 .



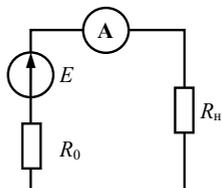
5. Определить показания вольтметра, если $E = 15 \text{ В}$, $R_{\text{н}} = 7 \text{ Ом}$, $R_0 = 4 \text{ Ом}$.



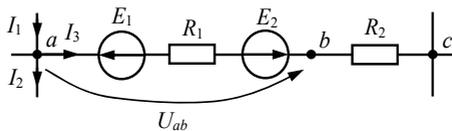
6. Определить показания амперметра, если $E = 30 \text{ В}$, $R_{\text{н}} = 10 \text{ Ом}$, $R_0 = 5 \text{ Ом}$.



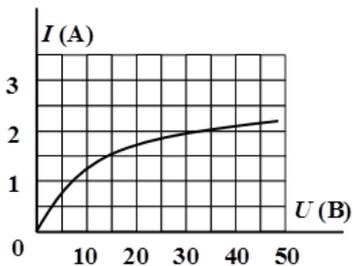
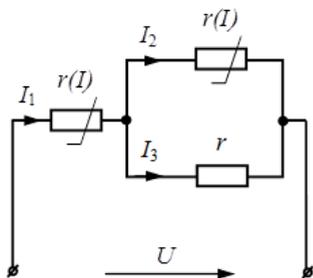
7. Определить E в режиме согласования нагрузки, если $I = 1 \text{ А}$, $R_0 = 5 \text{ Ом}$.



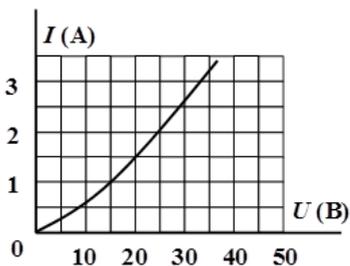
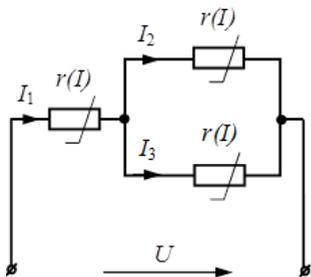
8. Определить напряжение U_{ab} , если $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$, $I_1 = 5 \text{ А}$, $I_2 = 2 \text{ А}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$.



9. В нелинейной электрической цепи постоянного тока $U_2 = 35 \text{ В}$, $r = 5 \text{ Ом}$. Определите I_1 .



10. В нелинейной электрической цепи постоянного тока $U_3 = 15 \text{ В}$. Определите статическое сопротивление всей цепи $R_{\text{ЭКВ}}$.



Практическое занятие 2

Анализ цепей синусоидального тока

Цель занятия: освоить символический метод расчета цепей синусоидального тока.

Теоретические вопросы

1. Источники электрической энергии синусоидального тока [1–3].
2. Максимальное, среднее и действующее значения синусоидальных ЭДС, напряжений и токов [1–4].
3. Различные представления синусоидальных величин [1–4].
4. Векторные диаграммы [1–4].
5. Элементы электрической цепи синусоидального тока: индуктивность, емкость [1–4].
6. Закон Ома в комплексной форме для резистивного, индуктивного, емкостного элементов [1–4].
7. Электрическая цепь с реальной катушкой индуктивности, треугольник напряжений, треугольник сопротивлений, треугольник мощностей [1–3].
8. Комплексное сопротивление. Комплексная проводимость. Закон Ома для цепи синусоидального тока [1–4].
9. Символический метод анализа цепей синусоидального тока. Комплексные числа. Основные уравнения электрических цепей в комплексной форме [1; 2].
10. Неразветвленная RLC -цепь синусоидального тока. Условие возникновения режима резонанса напряжений [1–4].
11. Электрическая цепь синусоидального тока с параллельным соединением RLC -элементов. Условие возникновения резонансов токов [1–4].

Методические рекомендации и краткие теоретические сведения

Приступая к решению задач для самостоятельной работы, необходимо изучить теоретический материал и разобрать примеры решения задач.

При изучении темы «Анализ цепей синусоидального тока» необходимо точно усвоить понятия о параметрах синусоидального тока:

мгновенное значение, амплитуда, фаза, период, начальная фаза, угловая частота. Важно понимать, что ни один элемент линейной электрической цепи не меняет частоту проходимого сигнала (тока, напряжения), т. е. частота всех токов и напряжений цепи одинакова и равна частоте источника.

Решение задач анализа установившегося синусоидального режима удобно проводить символическим, или комплексным, методом расчета цепей синусоидального тока, как более простым и понятным. Метод называют символическим потому, что мгновенные синусоидальные токи и напряжения заменяют их комплексными изображениями или символами. Поэтому важно свободно владеть переходом от тригонометрической записи мгновенного значения синусоидального тока к его комплексной форме и наоборот. Следует запомнить формулы, связывающие алгебраическую и показательную формы записи комплексного числа. Основные обозначения и понятия, используемые в символическом методе расчета цепей синусоидального тока, сведены в табл. 2.10 и 2.11.

Необходимо знать свойства пассивных элементов линейных цепей синусоидального тока резистора, индуктивности и емкости:

- величина резистивного элемента не зависит от частоты, ток и напряжение на нем совпадают по фазе, комплексное сопротивление в этом случае имеет только действительную составляющую, такое сопротивление называют активным;
- величина индуктивного сопротивления прямо пропорциональна частоте, напряжение на идеальном индуктивном элементе опережает по фазе ток на 90 градусов;
- величина емкостного сопротивления обратно пропорциональна частоте, а напряжение на идеальном емкостном элементе отстает от тока на 90 градусов;
- так как комплексные сопротивления индуктивности и емкости имеют только мнимые составляющие, их называют реактивными. В том случае, когда в цепь входят активные и реактивные сопротивления, полное сопротивление следует находить как геометрическую сумму активной и реактивной составляющих. Свойства пассивных элементов цепи синусоидального тока приведены в табл. 2.12–2.14.

Простейшая электрическая схема, в которой наблюдается резонанс напряжения, представляет собой последовательное соединение сопротивления, индуктивности и емкости.

Важно запомнить, что резонанс напряжений в цепи имеет место при условии, что мнимая часть комплексного сопротивления всей цепи равна нулю. При этом общее сопротивление цепи будет чисто активным, а сдвиг фаз между током и приложенным напряжением станет равным нулю.

При изучении резонанса в параллельном колебательном контуре необходимо запомнить, что условием наступления резонанса токов в цепи является равенство нулю мнимой части комплексной проводимости всей цепи.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Получить выражения мгновенных значений тока и напряжения, а также найти их действующие значения, если ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону с частотой $f = 50$ Гц, амплитуды тока и напряжения $I_m = 15$ А, $U_m = 800$ В, начальные фазы тока и напряжения $\Psi_i = -45^\circ$, $\Psi_u = 30^\circ$.

Решение. Напряжение $u(t)$ и ток $i(t)$ изменяются по синусоидальному закону с одной частотой, следовательно, мгновенные значения тока и напряжения в цепи записываются следующим образом:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) \text{ А,}$$

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) \text{ В.}$$

Рассчитываем угловую частоту тока и напряжения:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

Тогда согласно заданным параметрам можно записать мгновенные значения тока и напряжения, в результате получим выражения:

$$i(t) = 15 \cdot \sin(314 \cdot t - 45^\circ) \text{ А,}$$

$$u(t) = 800 \cdot \sin(314 \cdot t + 30^\circ) \text{ В.}$$

Действующие значения тока и напряжения отличаются от амплитудного в $\sqrt{2}$ раз, поэтому получим выражения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{800}{\sqrt{2}} \approx 564 \text{ В,}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{15}{\sqrt{2}} \approx 10,61 \text{ А.}$$

Задача 2.2. Задана синусоидальная функция тока, записанная мгновенным значением: $i(t) = 1,0 \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$ А. Записать выражение для комплексного амплитудного и действующего значения тока, построить данные вектора на комплексной плоскости.

Решение. Выпишем амплитуду и начальную фазу тока при известном выражении мгновенного значения. Запишем выражение комплексной амплитуды тока:

$$I_m = 1 \text{ А}, \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_m = I_m \cdot e^{j\psi_i} = 1 \cdot e^{j \cdot 120^\circ} \text{ А.}$$

$$\psi_i = 120^\circ.$$

Получили выражение комплексной амплитуды тока в показательной форме, представим ее в алгебраической форме записи:

$$\underline{I}_m = 1 \cdot e^{j \cdot 120^\circ} = 1 \cdot (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) =$$

$$= 1 \cdot (-0,5 + j0,87) = -0,5 + j0,87 \text{ А.}$$

Выпишем действующее значение и начальную фазу тока при известном выражении мгновенного значения. Запишем выражение комплекса действующего значения тока в показательной форме записи:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71 \text{ А,}$$

$$\Rightarrow \underline{I} = I \cdot e^{j\psi_i} = 0,71 e^{j \cdot 120^\circ} \text{ А.}$$

$$\psi_i = 120^\circ.$$

Построим вектор на комплексной плоскости, соответствующий комплексной амплитуде тока (рис. 2.1).

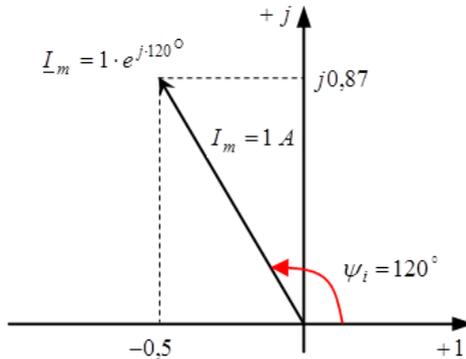


Рис. 2.1. Изображение комплексной амплитуды тока

Задача 2.3. Записать выражения для комплексного амплитудного и действующего значений, если дано синусоидальное напряжение $u = 100 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ)$ В.

Решение. Запишем комплексное амплитудное значение напряжения в показательной и алгебраической формах:

$$\underline{U}_m = 100e^{j30^\circ} = 100 \cdot \cos 30^\circ + j100 \cdot \sin 30^\circ = 50\sqrt{3} + j50 = 86,6 + j50 \text{ В.}$$

Комплексное действующее значение напряжения в показательной и алгебраической формах:

$$\underline{U} = \frac{100}{\sqrt{2}}e^{j30^\circ} = \frac{100}{\sqrt{2}} \cos 30^\circ + j \frac{100}{\sqrt{2}} \sin 30^\circ = 61,2 + j35,5 \text{ В.}$$

Задача 2.4. Записать выражение для мгновенных значений тока, если комплексное действующее значение тока $\underline{I} = 5 - j5$ А.

Решение. Представим комплексное действующее значение тока в показательной форме:

$$\underline{I} = 5 - j5 = 5\sqrt{2}e^{-j45^\circ},$$

где $\sqrt{5^2 + 5^2} = 5\sqrt{2}$, $\arctg \frac{-5}{5} = -45^\circ$.

Отсюда мгновенное значение запишется как

$$i = 5\sqrt{2}\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 45^\circ) = 10 \cdot \sin(\omega t - 45^\circ) \text{ А.}$$

Задача 2.5. Задано изображение синусоидальной функции комплексным напряжением: $\underline{U} = -10 + j10$ В. Записать выражение мгновенного значения напряжения.

Решение. Представим комплексное напряжение в показательной форме:

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\psi_u} = 10 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j135^\circ} \text{ В,}$$

$$U = \sqrt{(-10)^2 + 10^2} = 10 \cdot \sqrt{2} \text{ В,}$$

$$\psi_u = \pi + \arctg \frac{b}{a} = \pi + \arctg(-1) = \pi - \frac{\pi}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{4} = 135^\circ.$$

Мгновенное значение напряжения определится следующим образом:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u) = \\ &= 10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 135^\circ) = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t + 135^\circ) \text{ В.} \end{aligned}$$

Задача 2.6. Мгновенные значения тока и напряжения на входе приемника определяются выражениями:

$$u(t) = 141 \cdot \sin(314t - 30^\circ) \text{ В}, \quad i(t) = 2,82 \cdot \sin(314t + 45^\circ) \text{ А}.$$

Определить полное сопротивление цепи и угол сдвига фаз. Построить схему замещения цепи, определить характер и величину сопротивления приемника.

Решение. Запишем действующие значения напряжения и тока:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{141}{\sqrt{2}} = 100 \text{ В}, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{2,82}{\sqrt{2}} = 2 \text{ А}.$$

Представим $u(t)$ и $i(t)$ в комплексной форме для действующего значения:

$$\underline{U} = Ue^{j\psi_u} = 100e^{-j30^\circ} \text{ В}, \quad \underline{I} = Ie^{j\psi_i} = 2e^{j45^\circ} \text{ А}.$$

Определим комплексное сопротивление цепи:

$$\underline{Z} = z e^{j\varphi} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{100e^{-j30^\circ}}{2e^{j45^\circ}} = 50e^{-j75^\circ} \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление цепи $z = 50$ Ом, угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока (фазовый сдвиг)

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -30^\circ - 45^\circ = -75^\circ.$$

В алгебраической форме записи комплексное сопротивление цепи имеет вид:

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= z e^{j\varphi} = z \cos \varphi + jz \sin \varphi = R + jx = \\ &= 50 \cos(-75^\circ) + j50 \sin(-75^\circ) = 12,94 - j48,3 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Здесь $\text{Re}(\underline{Z}) = R = 12,94$ Ом – это действительная часть (активное сопротивление цепи), а $\text{Im}(\underline{Z}) = x = -48,3$ Ом – мнимая часть комплексного сопротивления цепи \underline{Z} .

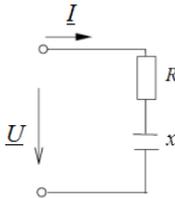


Рис. 2.2. Схема замещения расчетной цепи

Схема замещения цепи (рис. 2.2) представляется последовательным соединением активного и емкостного сопротивлений, так как мнимая часть комплексного сопротивления цепи имеет отрицатель-

ный знак. Цепь носит активно-емкостный характер. Об этом также свидетельствует отрицательный знак угла сдвига фаз. Вектор тока опережает вектор напряжения по фазе.

Задача 2.7. Записать в алгебраической и показательной форме выражение для комплексного сопротивления катушки индуктивности с параметрами $R_K = 3$ Ом, $L = 12,7$ мГн, $f = 50$ Гц. Построить на комплексной плоскости треугольник сопротивлений.

Решение. Схема замещения реальной индуктивной катушки (рис. 2.3) содержит соединенные последовательно элементы R_K и L .

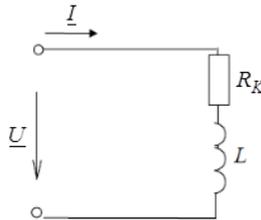


Рис. 2.3. Схема замещения реальной индуктивной катушки

Комплексное сопротивление цепи катушки индуктивности в алгебраической форме записи:

$$\underline{Z}_K = R_K + jx_K = 3 + j4 \text{ Ом},$$

где $x_K = x_L = \omega L = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление, Ом;

$$x_K = 2\pi \cdot 50 \cdot 12,7 \cdot 10^{-3} = 4 \text{ Ом}.$$

На рис. 2.4 представлен треугольник сопротивлений.

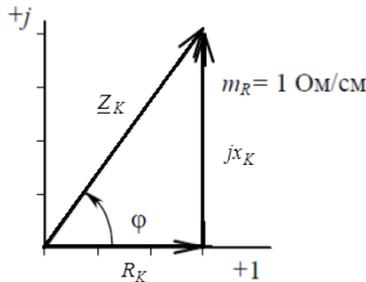


Рис. 2.4. Треугольник сопротивлений

В показательной форме комплексное сопротивление цепи индуктивной катушки запишется как

$$\underline{Z}_K = z_K \cdot e^{j\varphi} \text{ Ом.}$$

Из простых геометрических соображений очевидно:

$$z_K = \sqrt{R_K^2 + x_K^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом; } \varphi = \arctg \frac{x_K}{R_K} = \arctg \frac{4}{3} = 53^\circ,$$

где z_K — полное сопротивление цепи; φ — разность фаз между напряжением и током, следовательно, $\underline{Z}_K = 5 \cdot e^{j53^\circ}$ Ом.

Так как $\varphi > 0 (+53^\circ)$, то, как и все положительные углы, он откладывается от оси вещественных чисел против часовой стрелки (рис. 2.4).

Задача 2.8. По показаниям приборов (рис. 2.5) определить параметры: R , L катушки, если $I = 0,2$ А, $U = 3$ В, $P = 0,36$ Вт, $f = 300$ Гц. Построить векторную диаграмму тока и напряжений.

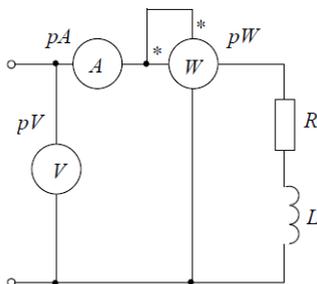


Рис. 2.5. Электрическая схема

Решение. Электроизмерительные приборы показывают действующие значения тока и напряжения.

В рассматриваемой цепи именно в резистивном элементе происходит безвозвратное (активное) потребление мощности — энергия выделяется в виде тепла и рассеивается в окружающую среду. Ваттметр измеряет именно эту мощность:

$$P_w = P = U_R I = R I^2 = UI \cos \varphi.$$

Следовательно,

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{0,36}{(0,2)^2} = 9 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление цепи можно определить как

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{3}{0,2} = 15 \text{ Ом.}$$

В то же время

$$Z = \sqrt{R^2 + x_L^2}, \varphi = \arctg \frac{x_L}{R} = \arccos \frac{R}{Z},$$

где $x_L = \omega L = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление элемента, Ом.

Тогда x_L и φ можно определить как

$$x_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{15^2 - 9^2} = 12 \text{ Ом}, \varphi = \arctg \frac{x_L}{R} = \arctg \frac{12}{9} = 53^\circ.$$

Индуктивность L определяется следующим образом:

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{12}{2 \cdot \pi \cdot 300} = 6,37 \text{ мГн}.$$

Для построения векторной диаграммы тока и напряжений цепи изобразим схему замещения (рис. 2.6).

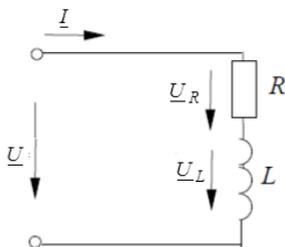


Рис. 2.6. Схема замещения расчетной цепи

В соответствии со вторым законом Кирхгофа в комплексной форме:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L.$$

Примем начальную фазу синусоидального тока равной нулю. Тогда комплексный ток цепи можно определить как

$$\underline{I} = I \cdot e^{j\psi_i} = 0,2e^{j0^\circ} \text{ А}.$$

Комплексные напряжения на элементах цепи в соответствии с законом Ома в комплексной форме:

$$\underline{U}_R = R\underline{I} = 9 \cdot 0,2e^{j0^\circ} = 1,8e^{j0^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_L = jx_L\underline{I} = j12 \cdot 0,2e^{j0^\circ} = j2,4 = 2,4e^{j90^\circ} \text{ В}.$$

Построение векторной диаграммы начнем с изображения в выбранном масштабе вектора (комплекса) тока \underline{I} . Располагаем его вдоль оси вещественных чисел (+1), так как $\psi_i = 0$ (рис. 2.7).

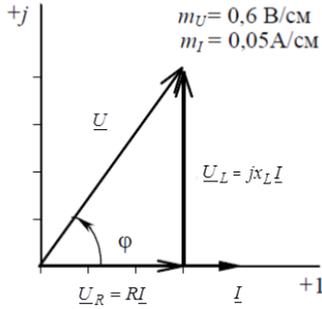


Рис. 2.7. Векторная диаграмма тока и напряжений

Вектор комплексного напряжения на резистивном элементе \underline{U}_R (изображается в своем масштабе) располагается также вдоль оси вещественных чисел, так как ток и напряжение резистивного элемента совпадают по фазе. Вектор комплексного напряжения на индуктивном элементе \underline{U}_L располагается вдоль оси мнимых чисел ($+j$), так как напряжение на индуктивном элементе по фазе опережает ток на 90° .

Построение ведем в соответствии со вторым законом Кирхгофа. К концу вектора \underline{U}_R прибавляем вектор \underline{U}_L и, соединив его конец с началом координат, получаем вектор напряжения \underline{U} на входе цепи.

Задача 2.9. Для изображенной электрической цепи синусоидального тока (рис. 2.8) необходимо определить мгновенные значения тока и напряжений на каждом элементе электрической цепи. Построить векторную диаграмму тока и напряжений. Входное напряжение изменяется по закону: $u(t) = 141 \cdot \sin 314t$ В. Значения параметров электрической цепи: $R = 30$ Ом, $x_L = 60$ Ом, $x_C = 20$ Ом.

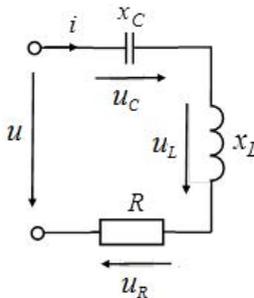


Рис. 2.8. Расчетная электрическая цепь

Решение. Запишем выражение и рассчитаем значение комплексного сопротивления электрической цепи:

$$\underline{Z} = R + j \cdot (x_L - x_C) = 30 + j \cdot (60 - 20) = 30 + j40 = 50 \cdot e^{j53^\circ} \text{ Ом.}$$

Запишем изображение мгновенного значения входного напряжения как комплексную амплитуду напряжения:

$$u(t) = 141 \cdot \sin 314t \text{ В} \Rightarrow \underline{U}_m = 141 \cdot e^{j0^\circ} \text{ В.}$$

По закону Ома в комплексной форме рассчитываем комплексную амплитуду тока электрической цепи:

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} = \frac{141 \cdot e^{j0^\circ}}{50 \cdot e^{j53^\circ}} = 2,82 e^{-j53^\circ} \text{ А.}$$

Запишем выражение мгновенного значения тока в цепи, воспользовавшись комплексной амплитудой тока:

$$\underline{I}_m = 2,82 e^{-j53^\circ} \text{ А} \Rightarrow i(t) = 2,82 \cdot \sin(314 \cdot t - 53^\circ) \text{ А.}$$

Применяя закон Ома, определим комплексные амплитуды напряжений на каждом элементе электрической цепи:

$$\underline{U}_{Rm} = R \cdot \underline{I}_m = 30 \cdot 2,82 \cdot e^{-j53^\circ} = 84,6 \cdot e^{-j53^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{Lm} = jX_L \cdot \underline{I}_m = j60 \cdot 2,82 \cdot e^{-j53^\circ} = 169,2 \cdot e^{j37^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{Cm} = -jX_C \cdot \underline{I}_m = -j20 \cdot 2,82 \cdot e^{-j53^\circ} = 56,4 \cdot e^{-j143^\circ} \text{ В.}$$

Запишем выражение мгновенных значений напряжений на каждом элементе электрической цепи:

$$\underline{U}_{Rm} = 84,6 \cdot e^{-j53^\circ} \text{ В} \Rightarrow u_R(t) = 84,6 \cdot \sin(314 \cdot t - 53^\circ) \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{Lm} = 169,2 \cdot e^{j37^\circ} \text{ В} \Rightarrow u_L(t) = 169,2 \cdot \sin(314 \cdot t + 37^\circ) \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{Cm} = 56,4 \cdot e^{-j143^\circ} \text{ В} \Rightarrow u_C(t) = 56,4 \cdot \sin(314 \cdot t - 143^\circ) \text{ В.}$$

Векторные диаграммы напряжений и тока в неразветвленной цепи синусоидального тока (рис. 2.9) строят на комплексной плоскости в соответствии с уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа и с учетом фазовых сдвигов напряжений \underline{U}_R , \underline{U}_L , \underline{U}_C и тока \underline{I} во времени: $\underline{U} = \underline{U}_C + \underline{U}_L + \underline{U}_R$.

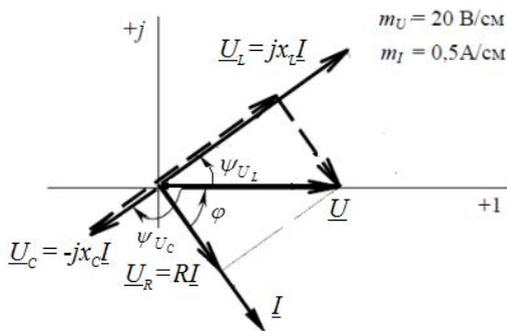


Рис. 2.9. Векторная диаграмма напряжений и тока

Задача 2.10. В электрической цепи переменного тока напряжение и ток изменяются во времени в соответствии с выражениями $u(t) = 28,2 \sin(628t + 4\pi/9)$ В и $i(t) = 2,82 \sin(628t + 5\pi/18)$ А. Определить активную P , реактивную Q , полную S мощности и коэффициент мощности цепи.

Решение. Найдем угол сдвига фаз между напряжением и током:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{4\pi}{9} - \frac{5\pi}{18} = \frac{\pi}{6}.$$

Активная мощность цепи

$$P = UI \cos \varphi = \frac{28,2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2,82}{\sqrt{2}} \cos \frac{\pi}{6} = 34,4 \text{ Вт.}$$

Реактивную мощность найдем как

$$Q = UI \sin \varphi = \frac{28,2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2,82}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{6} = 19,9 \text{ вар.}$$

Полная мощность

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = \frac{28,2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2,82}{\sqrt{2}} = 39,7 \text{ ВА.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866 \text{ или } \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{34,4}{39,7} = 0,866.$$

Задача 2.11. Для заданной электрической цепи (рис. 2.10) определить частоту, ток в цепи, напряжение на зажимах индуктивности и на зажимах конденсатора при резонансе напряжений, если $R = 50$ Ом, $L = 1,5$ Гн, $C = 42$ мкФ, напряжение, действующее в цепи, $U = 100$ В.

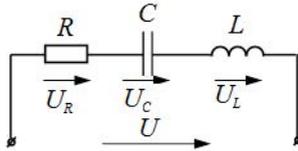


Рис. 2.10. Расчетная электрическая цепь

Решение. Резонанс напряжений наступает в цепи при равенстве реактивных сопротивлений цепи, т. е. $x_L = x_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$.

Отсюда резонансная частота цепи

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,5 \cdot 42 \cdot 10^{-6}}} = 20 \text{ Гц.}$$

Действующее значение тока в цепи при резонансе

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{R} = \frac{100}{50} = 2 \text{ А.}$$

Напряжение на индуктивности при резонансе

$$U_L = x_L I = \omega L I = 2\pi f_0 L I = 2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 2 = 378 \text{ В.}$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = I \cdot \frac{1}{\omega C} = I \cdot \frac{1}{2\pi f_0 C} = 2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 42 \cdot 10^{-6}} = 378 \text{ В.}$$

Построим векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 2.11).

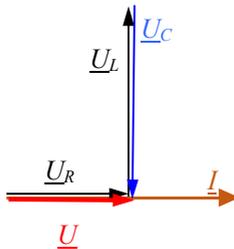


Рис. 2.11. Векторная диаграмма тока и напряжений

Задача 2.12. В сеть напряжением 220 В и частотой 50 Гц включены последовательно катушка с активным сопротивлением $R = 10$ Ом и индуктивностью 159 мГн, а также батарея конденсаторов. Определить емкость батареи, при которой в цепи установится резонанс напряжений. Найти ток в цепи и напряжения на индуктивном и емкостном элементах.

Решение. Сопротивления реактивных элементов при резонансе равны

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_{\text{рез}}},$$

отсюда

$$C_{\text{рез}} = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 159 \cdot 10^{-3}} = 63,5 \text{ мкФ и}$$

$$x_L = x_C = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 159 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ Ом.}$$

Комплексное входное сопротивление цепи при резонансе будет чисто активным:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = R + jx_L - jx_C = 10 + j50 - j50 = 10 \text{ Ом.}$$

Ток в цепи при резонансе равен

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{R} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А.}$$

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах равны между собой и значительно превышают входное напряжение:

$$U_L = U_C = x_L I = 50 \cdot 22 = 1100 \text{ В.}$$

Задачи для самостоятельной работы

Задача 2.13. Получить выражения мгновенных значений тока и напряжения, а также найти их действующие значения, если ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону с частотой f , амплитуды тока и напряжения — I_m , U_m , начальные фазы тока и напряжения — ψ_i , ψ_u , используя данные табл. 2.1. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.1

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_m , В	141	14,1	282	28,2	42,3	56,4	84,6	98,7	42,3	141
I_m , А	5,64	0,846	42,3	1,41	0,564	0,987	5,64	4,23	2,82	28,2
f , Гц	100	50	25	400	40	50	100	400	100	50
ψ_u , рад	$-\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{10}$	$\frac{\pi}{9}$	$-\frac{\pi}{8}$	$-\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{8}$	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{4}$
ψ_i , рад	$\frac{\pi}{8}$	$-\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{8}$	$-\frac{\pi}{8}$	$-\frac{\pi}{5}$	$\frac{\pi}{7}$	$-\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{10}$	$\frac{\pi}{8}$	$-\frac{\pi}{6}$

Задача 2.14. Записать мгновенное значение $u(t)$ и выражения для комплексного амплитудного и действующего значений, используя данные табл. 2.2. Построить вектор амплитудного значения напряжения на комплексной плоскости. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.2

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_m, \text{ В}$	10	20	30	40	50	70	60	80	90	100
$\psi_u, \text{ град}$	0	-30	45	60	90	-60	-45	-90	110	30

Задача 2.15. Задано изображение синусоидальной функции комплексным напряжением \underline{U} и тока \underline{I} . Записать выражения их мгновенных значений, используя данные табл. 2.3. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.3

Вариант	Параметры	Вариант	Параметры
1	$\underline{I} = -j5$	6	$\underline{I} = -j8$
	$\underline{U} = -8 + j6$		$\underline{U} = 5 + j12$
2	$\underline{I} = 5$	7	$\underline{I} = 8$
	$\underline{U} = 8 + j6$		$\underline{U} = -5 - j12$
3	$\underline{I} = j5$	8	$\underline{I} = j8$
	$\underline{U} = 8 - j6$		$\underline{U} = -5 + j12$
4	$\underline{I} = -5$	9	$\underline{I} = -8$
	$\underline{U} = -8 - j6$		$\underline{U} = 5 - j12$
5	$\underline{I} = -j7$	10	$\underline{I} = j7$
	$\underline{U} = 12 - j16$		$\underline{U} = 12 + j16$

Задача 2.16. Решить задачу 2.6, используя данные табл. 2.4. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.4

Вариант	Параметры	Вариант	Параметры
1	$u(t) = 141 \sin(314t - 45^\circ)$ $i(t) = 5,64 \sin(314t + 45^\circ)$	6	$u(t) = 14,1 \sin(314t + 30^\circ)$ $i(t) = 0,846 \sin(314t + 90^\circ)$
2	$u(t) = 282 \sin(314t + 90^\circ)$ $i(t) = 42,3 \sin(314t + 30^\circ)$	7	$u(t) = 28,2 \sin(314t + 18^\circ)$ $i(t) = 1,41 \sin(314t - 42^\circ)$
3	$u(t) = 42,3 \sin(314t - 20^\circ)$ $i(t) = 0,564 \sin(314t + 40^\circ)$	8	$u(t) = 56,4 \sin(314t - 22^\circ)$ $i(t) = 0,987 \sin(314t - 52^\circ)$
4	$u(t) = 98,7 \sin(314t + 15^\circ)$ $i(t) = 4,23 \sin(314t + 45^\circ)$	9	$u(t) = 84,6 \sin(314t - 45^\circ)$ $i(t) = 5,64 \sin(314t + 15^\circ)$
5	$u(t) = 42,3 \sin(314t - 30^\circ)$ $i(t) = 2,82 \sin(314t - 60^\circ)$	10	$u(t) = 141 \sin(314t - 30^\circ)$ $i(t) = 28,2 \sin(314t + 60^\circ)$

Задача 2.17. Решить задачу 2.7, используя данные табл. 2.5. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.5

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_k , Ом	4	6	3	8	12	16	24	18	4	6
L_k , мГн	4,78	25,5	3,18	2,39	51	19,1	14,3	9,55	9,55	12,7
f , Гц	100	50	200	400	50	100	200	400	50	100

Задача 2.18. Решить задачу 2.8, используя данные табл. 2.6. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.6

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I , А	0,4	2	3	0,8	1,2	1,6	2,4	1,8	2	4
U , В	20	48	60	12	36	90	120	360	10	20
P , Вт	6	60	45	10	12	72	180	450	16	64
f , Гц	100	50	200	400	50	100	200	400	50	100

Задача 2.19. Решить задачу 2.9, используя данные табл. 2.7.
Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.7

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_m , В	141	14,1	282	28,2	42,3	56,4	70,5	84,6	98,7	112,8
ψ_u , град	-45	30	90	60	-60	-30	0	45	-90	0
x_C , Ом	60	12	60	4	12	24	6	24	12	8
x_L , Ом	30	6	120	12	4	8	12	12	24	24
R , Ом	40	8	80	6	6	12	8	16	16	12

Задача 2.20. Решить задачу 2.10, используя данные табл. 2.4.
Номер варианта выдается преподавателем.

Задача 2.21. Решить задачу 2.11, используя данные табл. 2.8.
Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.8

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U , В	100	10	200	20	30	40	50	60	70	80
R , Ом	50	5	100	10	15	20	25	30	35	40
L , Гн	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
C , мкФ	40	20	30	40	50	60	70	20	40	25

Задача 2.22. Решить задачу 2.12, используя данные табл. 2.9.
Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 2.9

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R , Ом	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
L , мГн	318	127	191	223	255	286	159	318	127	223

Таблица 2.10

Синусоидальные величины и их символическое изображение

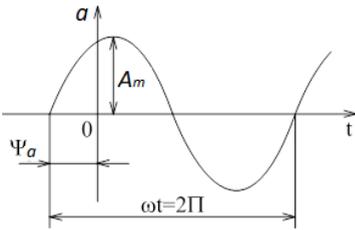
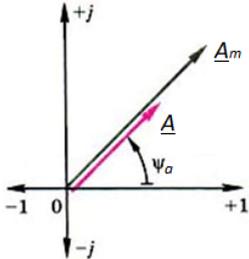
Мгновенные значения синусоидальной величины	Комплексное число
 <p>$a = A_m \sin(\omega t + \psi_a) = A\sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_a)$</p>	 <p>$\underline{A}_m = A_m e^{j\psi_a}, \underline{A} = \frac{A_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_a}$</p>
<p>A_m – амплитуда; A – действующее значение; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, c^{-1}; $f = 1 / T$ – частота, Гц; T – период колебаний, с; $(\omega t + \psi_a)$ – фаза, рад; ψ_a – начальная фаза, рад. i, u, e – мгновенные значения тока, напряжения, ЭДС. $\underline{I}_m, \underline{U}_m, \underline{E}_m$ – комплексные амплитудные значения тока, напряжения, ЭДС. $\underline{I}, \underline{U}, \underline{E}$ – комплексные действующие значения тока, напряжения, ЭДС.</p>	

Таблица 2.11

Формы записи комплексного числа

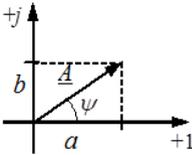
	$\underline{A} = \underbrace{Ae^{j\psi}}_{\text{показательная форма}} = \begin{cases} a = A \cos \psi_a \\ b = A \sin \psi_a \end{cases} = \underbrace{a + jb}_{\text{алгебраическая форма}}$
<p>$\text{Re}(\underline{A}) = a$ – действительная (вещественная) часть. $\text{Im}(\underline{A}) = b$ – мнимая часть</p>	$\underline{A} = \underbrace{a + jb}_{\text{алгебраическая форма}} = \begin{cases} A = \sqrt{a^2 + b^2} \\ \psi = \begin{cases} \arctg \frac{b}{a}, a > 0 \\ \pi + \arctg \frac{b}{a}, a < 0 \end{cases} \end{cases} = \underbrace{Ae^{j\psi}}_{\text{показательная форма}}$

Таблица 2.12

Закон Ома для элементов цепи синусоидального тока

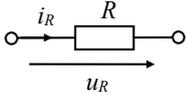
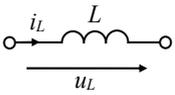
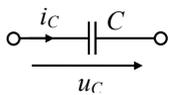
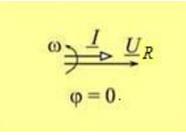
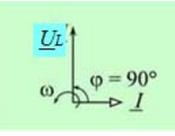
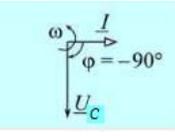
Название элемента			
Тип сопротивления (Ом)	Активное сопротивление R	Индуктивное сопротивление $x_L = \omega \cdot L$	Емкостное сопротивление $x_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$
Комплексное сопротивление (Ом)	$Z_R = R$	$Z_L = jx_L$	$Z_C = -jx_C$
Тип проводимости (См)	Активная проводимость $g = \frac{1}{R}$	Индуктивная проводимость $b_L = \frac{1}{\omega L}$	Емкостная проводимость $b_C = \omega C$
Комплексная проводимость (См)	$Y_R = g$	$Y_L = -jb_L$	$Y_C = jb_C$
Связь между мгновенными значениями напряжения и тока	$u_R = R \cdot i$	$u_L = L \frac{di}{dt}$	$u_C = u(t_1) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i dt$
Закон Ома в комплексной форме	$\underline{U}_R = R \cdot \underline{I}$	$\underline{U}_L = jX_L \cdot \underline{I}$	$\underline{U}_C = -jX_C \cdot \underline{I}$
Фазовое состояние	Векторы \underline{I} и \underline{U}_R совпадают по фазе	Вектор \underline{I} отстает от вектора \underline{U}_L на 90°	Вектор \underline{I} опережает вектор \underline{U}_C на 90°
Векторные диаграммы			

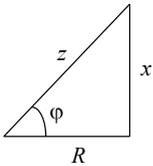
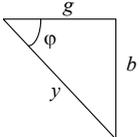
Таблица 2.13

Активная, реактивная и полная мощность

Активная мощность	Реактивная мощность	Полная мощность
Представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени в виде теплоты на участке цепи в сопротивлении R	Является энергией, которой обмениваются генератор и приемник	Определяет эксплуатационные возможности электротехнических устройств, для которых она указывается в качестве номинальной
$P = UI \cos \varphi \text{ (Вт)},$ $P = I^2 R.$ <p>Всегда положительна и не зависит от знака угла φ.</p> <p>Измеряется ваттметром</p>	$Q = UI \sin \varphi \text{ (вар)},$ $Q = I^2 x.$ <p>При индуктивной нагрузке ($\varphi > 0$) положительная ($Q > 0$), при емкостной нагрузке ($\varphi < 0$) отрицательная ($Q < 0$).</p> <p>Измеряется варметром</p>	$S = UI \text{ (В} \cdot \text{А)},$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$ <p>Комплексная мощность или комплекс полной мощности.</p> $\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ,$ <p>\underline{I}^* – комплексное сопряженное значение тока \underline{I}</p>

Таблица 2.14

Треугольники сопротивлений, проводимостей и мощностей

<p>Треугольник сопротивлений</p> 	<p>Модуль комплексного сопротивления</p> $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + x^2},$ $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}$	<p>Активное сопротивление</p> $r = z \cos \varphi.$ <p>Реактивное сопротивление</p> $x = z \sin \varphi$
<p>Треугольник проводимостей</p> 	<p>Модуль комплексной проводимости</p> $y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{g^2 + b^2},$ $\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}$	<p>Активная проводимость</p> $g = y \cos \varphi.$ <p>Реактивная проводимость</p> $b = y \sin \varphi$

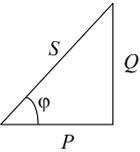
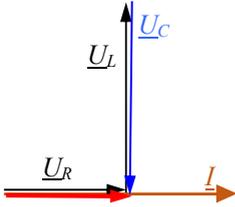
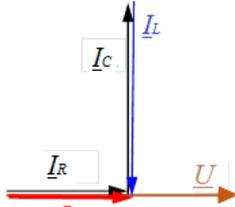
<p>Треугольник мощностей</p> 	<p>Модуль полной мощности</p> $S = \sqrt{P^2 + Q^2},$ $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$	<p>Активная мощность $P = S \cos \varphi.$</p> <p>Реактивная мощность $Q = S \sin \varphi$</p>
--	---	--

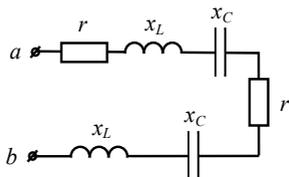
Таблица 2.15

Резонанс в цепях переменного тока

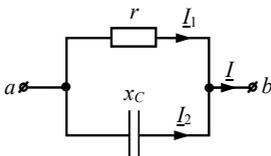
Резонанс напряжений	Резонанс токов
<p>Возможен в цепи при последовательном соединении R, L, C-элементов</p>	<p>Возможен в цепи, содержащей параллельно соединенные R, L, C-элементы</p>
<p>Общее комплексное сопротивление цепи $\underline{Z} = R + j(x_L - x_C)$</p>	<p>Общая комплексная проводимость цепи $\underline{Y} = g - j(b_L - b_C)$</p>
<p>Условие резонанса напряжений $\operatorname{Im}(\underline{Z}) = 0,$ $x_L - x_C = 0, x_L = x_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$</p>	<p>Условие резонанса токов $\operatorname{Im}(\underline{Y}) = 0,$ $b_L - b_C = 0, b_L = b_C$</p>
$\left\ \begin{aligned} \underline{I} &= \frac{\underline{U}}{R + j(x_L - x_C)} = \frac{\underline{U}}{R}, \\ I &= I_{\max}, \\ \varphi &= 0, \cos \varphi = 1, \\ Q &= 0, S = P. \end{aligned} \right.$	$\left\ \begin{aligned} \underline{I} &= \underline{U} \cdot [g - j(b_L - b_C)] = \underline{U} \cdot g, \\ I &= I_{\min}, \\ \varphi &= 0, \cos \varphi = 1, \\ Q &= 0, S = P \end{aligned} \right.$
 <p>$U = U_R, U_L = U_C$</p>	 <p>$I = I_R, I_L = I_C$</p>

Тесты для самоконтроля

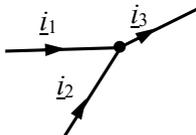
1. Определить полное сопротивление цепи, если $r = 3 \text{ Ом}$, $x_L = 4 \text{ Ом}$, $x_C = 2 \text{ Ом}$. Построить векторную диаграмму напряжений и тока.



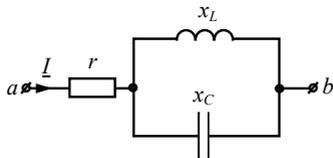
2. Определить I , если $I_2 = 3 \text{ А}$, $x_C = 12 \text{ Ом}$, $r = 9 \text{ Ом}$.



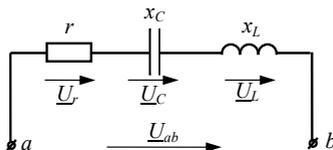
3. Определить мгновенное значение тока i_3 , если $i_1 = 3\sin(\omega t)$, $i_2 = 4\sin(\omega t + 90^\circ)$.



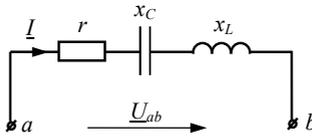
4. Определить I , если $u_{ab} = 200\sin(\omega t + 45^\circ)$, $r = x_C = x_L = 2 \text{ Ом}$.



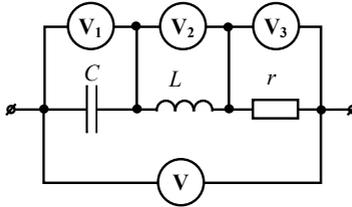
5. Определить U_{ab} , если $U_r = 20 \text{ В}$, $U_C = 20 \text{ В}$, $U_L = 20 \text{ В}$.



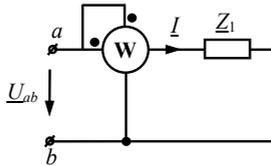
6. Определить x_C , если $U_L = 40$ В, $u_{ab} = 20\sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ)$, $i = 10\sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ)$.



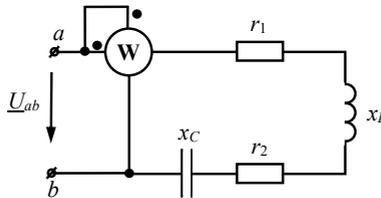
7. Определить коэффициент мощности цепи, если $U_{V_1} = U_{V_2} = U_{V_3} = 20$ В.



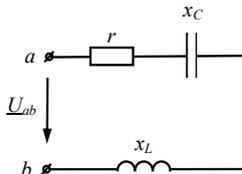
8. Определить показания ваттметра, если $U_{ab} = 10$ В, $Z_1 = 3 - j4$ Ом.



9. Определить показания ваттметра, если $U_{ab} = 120$ В, $r_1 = r_2 = 6$ Ом, $x_C = x_L = 10$ Ом.



10. Определить полную мощность цепи, если $r = x_C = x_L = 20$ Ом, $U_{ab} = 60$ В.



Практическое занятие 3

Трехфазные цепи

Цель занятия: приобретение навыков анализа и расчета трехфазных цепей и построения векторных диаграмм токов и напряжений.

Теоретические вопросы

1. Трехфазная система ЭДС [1–4].
2. Основные схемы соединения трехфазных цепей [1–4].
3. Определения: линейные и фазные напряжения и токи, смещение нейтрали, ток нейтрали. Соотношения между линейными и фазными величинами [1–4].
4. Активная, реактивная и полная мощность трехфазной симметричной системы [1–4].
5. Измерение активной мощности трехфазной системы [1–3].
6. Расчет трехфазной цепи при соединении «звезда – звезда» с нулевым проводом [1–4].
7. Расчет трехфазной цепи при соединении «звезда – звезда» без нулевого провода [1–4].
8. Расчет трехфазной цепи при соединении «звезда – треугольник» [1–4].

Методические рекомендации и краткие теоретические сведения

При изучении темы следует понимать, что трехфазная цепь – это совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол 120° . В качестве трехфазных источников напряжения используют трехфазные синхронные генераторы. Отдельные электрические цепи, образующие трехфазную цепь, а также обмотки синхронных генераторов называются фазами. Фазы обозначают буквами A , B , C .

Необходимо хорошо усвоить все определения трехфазной цепи: фазные и линейные токи, напряжения симметричной и несимметричной цепи.

В трехфазной цепи обмотки генератора и фазы приемников соединяются «звездой» или «треугольником».

Важным свойством трехфазной цепи является то, что независимо от характера нагрузки сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

Система трехфазных напряжений источника всегда симметрична, в отличие от трехфазного приемника, который в общем случае является несимметричным. У симметричных приемников комплексные сопротивления фаз равны между собой.

Трехфазная цепь при соединении приемников «звездой» выполняется с нейтральным проводом (четырёхпроводная цепь) и без него (трехпроводная цепь).

Напряжения между началом и концом любой из фаз или между любым линейным и нулевым проводом называются фазным напряжением. Оно обозначается U_a , U_b , U_c или U_ϕ .

Напряжение между началами двух фаз или между любыми двумя линейными проводами называется линейным напряжением. Оно обозначается U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} или U_L . Если линейные напряжения симметричны, что характерно для промышленных сетей, то в системе с нейтральным проводом фазные напряжения при любой нагрузке также симметричны и в $\sqrt{3}$ раз меньше линейных: $U_L = \sqrt{3}U_\phi$.

Токи, протекающие в фазах приемника, называются фазными токами. Они обозначаются I_ϕ . Токи в линейных проводах называются линейными токами. Они обозначаются I_A , I_B , I_C или I_L .

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и нагрузки, называется нейтральным или нулевым проводом. Ток, протекающий по нему, I_N — током нейтрали. Его положительное направление — от нагрузки к генератору.

При соединении приемника «звездой» с нулевым проводом фазы работают независимо друг от друга. В этом случае по нулевому проводу протекает ток, действующее значение которого равно векторной сумме действующих значений токов в фазах: $I_N = I_A + I_B + I_C$.

Симметричный режим характеризуется следующими соотношениями: $I_L = I_\phi$; $U_L = \sqrt{3}U_\phi$; $I_N = 0$. Следовательно, при симметричной нагрузке нулевой провод не нужен. Если же сопротивления фаз нагрузки несимметричны, то через нулевой провод протекает некоторый ток $I_N \neq 0$.

Предельными случаями несимметрии нагрузки является обрыв проводов или короткое замыкание одной из фаз трехфазной цепи.

В схеме «треугольник» нагрузка каждой фазы включается на линейное напряжение, которое в данном случае равно фазному. Соотношение между линейными фазными токами при симметричной нагрузке $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$.

Примеры решения задач

Задача 3.1. Записать комплексные действующие значения линейных напряжений \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} трехфазного симметричного генератора, если мгновенное значение $u_A = 220\sqrt{2} \sin(\omega t)$.

Решение. В трехфазной цепи в каждой фазе действуют синусоидальные напряжения одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол 120° . В качестве трехфазных источников напряжения используют трехфазные синхронные генераторы, фазы которого соединены «звездой».

Запишем мгновенные значения напряжения каждой фазы симметричного генератора:

$$\begin{cases} u_A = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 0^\circ) \text{ В,} \\ u_B = 220\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ В,} \\ u_C = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ) \text{ В.} \end{cases}$$

Фазные напряжения в комплексной форме для действующих значений записываются следующим образом:

$$\underline{U}_A = 220e^{j0^\circ}; \quad \underline{U}_B = 220e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_C = 220e^{j120^\circ}.$$

Напряжения между двумя линейными проводами называются линейными напряжениями ($U_{\text{л}}$). Линейные напряжения определяются как разность соответствующих фазных напряжений трехфазного источника:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_{\text{л}}e^{j30^\circ}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_{\text{л}}e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_{\text{л}}e^{j150^\circ}. \end{aligned}$$

Симметричный режим при соединении фаз «звездой» характеризуется следующими соотношениями: $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$; $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$; $I_{\text{N}} = 0$.

Таким образом, комплексные действующие значения линейных напряжений запишутся так:

$$\underline{U}_{AB} = 220\sqrt{3}e^{j30^\circ}; \underline{U}_{BC} = 220\sqrt{3}e^{-j90^\circ}; \underline{U}_{CA} = 220\sqrt{3}e^{j150^\circ}.$$

Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений симметричного генератора показана на рис. 3.1.

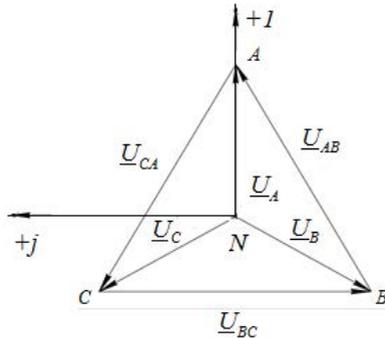


Рис. 3.1. Векторная диаграмма напряжений симметричного источника

Задача 3.2. Определить действующие значения фазных токов и напряжений, построить векторную диаграмму напряжений и токов, если $U_{\text{л}} = 380$ В, $R = 11\sqrt{3}$ Ом, $x_L = 11$ Ом.

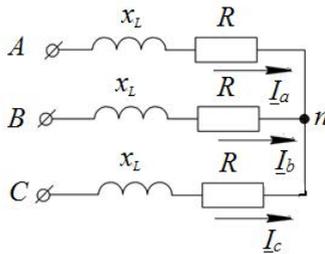


Рис. 3.2. Расчетная электрическая цепь

Решение. Запишем фазные напряжения в комплексной форме для действующих значений:

$$\underline{U}_A = 220e^{j0}; \underline{U}_B = 220e^{-j120^\circ}; \underline{U}_C = 220e^{j120^\circ}.$$

Найдем сопротивление каждой фазы:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R + jx_L = 11\sqrt{3} + j11 = 22e^{j30^\circ} \text{ Ом.}$$

Приемники, комплексные сопротивления фаз которых равны между собой: $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, называются симметричными (рис. 3.2).

Ток в фазе А

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220e^{j0^\circ}}{22e^{j30^\circ}} = 10e^{-j30^\circ} = 5\sqrt{3} - j5 \text{ A.}$$

Аналогично можно найти ток и в других фазах. Так как источник и приемник симметричны, то действующие комплексные значения фазных токов одинаковы по величине, но отличаются лишь фазовым сдвигом:

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22e^{j30^\circ}} = 10e^{-j150^\circ} = -5\sqrt{3} - j5 \text{ A,}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{22e^{j30^\circ}} = 10e^{-j90^\circ} = j10 \text{ A.}$$

При отсутствии нейтрального провода всегда $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$.

Проверим: $5\sqrt{3} - j5 - 5\sqrt{3} - j5 + j10 = 0$.

Векторная диаграмма симметричного режима трехфазного приемника показана на рис. 3.3.

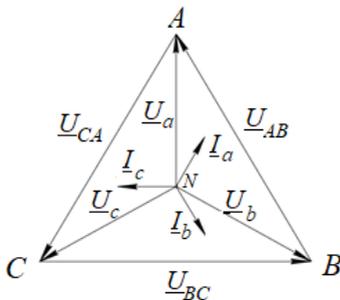


Рис. 3.3. Векторная диаграмма трехфазной цепи с симметричной нагрузкой

Задача 3.3. В симметричной трехфазной цепи линейное напряжение $U_{\text{л}} = 90 \text{ В}$. Сопротивление фазы приемника $R = 15 \text{ Ом}$. Определить показания приборов электромагнитной системы при обрыве провода А.

Решение. В трехпроводной цепи (рис. 3.4) при обрыве фазы «а» две другие фазы оказываются включенными последовательно на линейное напряжение U_{BC} . Ток в оборванном проводе будет равен нулю: $\underline{I}_A = 0$.

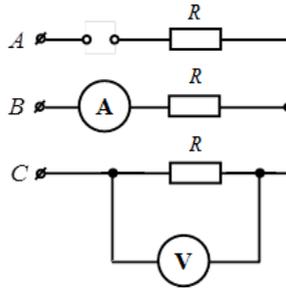


Рис. 3.4. Расчетная электрическая цепь

В оставшихся подключенных к трехфазному источнику фазам приемника токи будут одинаковыми, а напряжение на них будет зависеть от сопротивлений нагрузок:

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_b + \underline{Z}_c}.$$

Приборы электромагнитной системы всегда показывают действующее значение. Поэтому амперметр покажет

$$I_b = \frac{U_{BC}}{R + R} = \frac{90}{15 + 15} = 3 \text{ A},$$

а вольтметр – напряжение, равное

$$U_c = I_c \cdot R = 3 \cdot 15 = 45 \text{ В}, \text{ или } U_c = \frac{U_{\text{л}}}{2} = \frac{90}{2} = 45 \text{ В}.$$

Задача 3.4. В симметричной трехфазной цепи линейное напряжение $U_{\text{л}} = 170 \text{ В}$, сопротивление фаз «b» и «c» $R = 17 \text{ Ом}$, сопротивление фазы «a» закорочено. Чему будут равны фазные напряжения и токи?

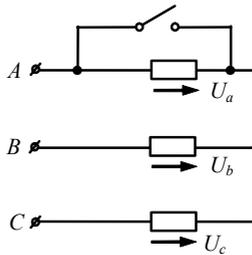


Рис. 3.5. Расчетная электрическая цепь

Решение. В режиме короткого замыкания фазы «а» приемника напряжение на этой фазе приемника равно нулю: $U_a = 0$, а напряжение на фазах «b» и «с» увеличивается до линейного: $U_b = U_c = U_{\text{л}} = 170 \text{ В}$ (рис. 3.5).

Фазные токи I_b и I_c приемника найдем по закону Ома:

$$\underline{I}_b = \frac{-\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_b} = \frac{-170e^{j30^\circ}}{17} = \frac{170e^{-j150^\circ}}{17} = 10e^{-j150^\circ} = -5\sqrt{3} - j5 \text{ А};$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_c} = \frac{170e^{j150^\circ}}{17} = 10e^{j150^\circ} = -5\sqrt{3} + j5 \text{ А}.$$

Действующие значения токов равны $I_b = I_c = 10 \text{ А}$.

Фазный ток I_a определим по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0,$$

$$\underline{I}_a = -(\underline{I}_b + \underline{I}_c),$$

$$\underline{I}_a = -(\underline{I}_b + \underline{I}_c) = -(-5\sqrt{3} - j5 - 5\sqrt{3} + j5) = 10\sqrt{3} \text{ А}.$$

Задача 3.5. В симметричной трехфазной цепи линейное напряжение $U_{\text{л}} = 50 \text{ В}$. Определить показание амперметра электромагнитной системы, если сопротивление фазы $z_{\phi} = 20 \text{ Ом}$. Ответ округлить до целых чисел.

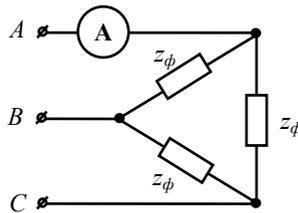


Рис. 3.6. Расчетная электрическая цепь

Решение. Рассмотрим схему соединения фаз приемника в «треугольник» (рис. 3.6).

Фазные токи приемника найдем по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Линейные токи направлены от источника к приемнику и определяются через фазные токи в соответствии с первым законом Кирхгофа по выражениям:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Если трехфазный приемник является симметричным, то линейные и фазные токи связаны соотношением $I_L = \sqrt{3}I_\Phi$.

Амперметр электромагнитной системы показывает действующее значение линейного тока. Так как источник и приемник симметричные и действующее значение тока в каждой фазе одинаковое. Поэтому

$$I_\Phi = \frac{U_L}{Z_\Phi} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ А.}$$

Значит, амперметр покажет значение тока, равное

$$I_L = \sqrt{3}I_\Phi = 2,5\sqrt{3} \approx 4 \text{ А.}$$

Задача 3.6. В симметричной трехфазной цепи (рис. 3.7) линейное напряжение $U_L = 100 \text{ В}$. Сопротивление фазы приемника $r = 10 \text{ Ом}$. Найти действующие значения линейных токов после обрыва провода A . Как при этом изменятся фазные напряжения?

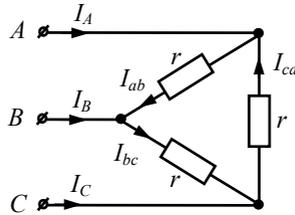


Рис. 3.7. Расчетная электрическая цепь

Решение. При обрыве линейного провода A трехфазная цепь, соединенная в схему «треугольник», преобразуется в однофазную цепь с двумя параллельными ветвями, включенными на одно линейное напряжение \underline{U}_{BC} .

По фазам приемника с сопротивлениями \underline{Z}_{ab} и \underline{Z}_{ca} протекают токи, определяемые как

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = \frac{-\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{ca}} = \frac{-100e^{-j90^\circ}}{10 + 10} = -5e^{-j90^\circ} = 5e^{j90^\circ} = j5 \text{ А.}$$

Ток в фазе «bc» остается неизменным:

$$I_{bc} = \frac{U_{BC}}{Z_{bc}} = \frac{100e^{-j90^\circ}}{10} = 10e^{-j90^\circ} = -j10 \text{ A.}$$

Величины комплексных линейных токов I_B и I_C определяются следующим образом:

$$I_B = I_{bc} - I_{ab} = -j10 - j5 = -j15 = 15e^{-j90^\circ} \text{ A,}$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc} = j5 - (-j10) = j15 = 15e^{j90^\circ} \text{ A.}$$

Они равны по модулю, но противоположны по направлению.

Действующие значения линейных токов равны: $I_A = 0 \text{ A}$, $I_B = I_C = 15 \text{ A}$, при этом напряжение на сопротивлении Z_{bc} не изменится: $U_{bc} = 100 \text{ В}$, а на сопротивлениях Z_{ab} и Z_{ca} будет в два раза меньше: $U_{ab} = U_{ca} = 50 \text{ В}$.

Задача 3.7. В симметричной трехфазной цепи (рис. 3.8) показания приборов вольтметра и амперметра соответственно равны $U_V = \frac{80}{\sqrt{3}} \text{ В}$, $I_A = 5 \text{ А}$. Найти показания ваттметра и активную мощность всей цепи.

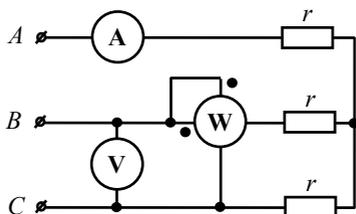


Рис. 3.8. Расчетная электрическая цепь

Решение. С помощью ваттметра можно измерить активную мощность в электрической цепи. Для каждой из фаз справедливо выражение

$$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = I_\Phi^2 R_\Phi,$$

где φ — угол сдвига фаз между фазными напряжением и током.

Эти формулы справедливы для четырехпроводной трехфазной цепи, где мощность в цепи измеряется с помощью трех ваттметров и мощность трехфазной системы определяется как сумма активных мощностей всех фаз приемника: $P = P_A + P_B + P_C + P_0$. При сим-

метричных генераторе и приемнике (в симметричной трехфазной системе) при любой схеме их соединений для каждой фазы мощности источника энергии и приемника одинаковы. Активная мощность системы в этом случае $P = 3P_{\phi}$.

В трехпроводной трехфазной цепи мощность можно измерить с помощью двух ваттметров. При этом значение напряжения и тока в формуле будет зависеть от расположения ваттметра в цепи.

Ваттметр покажет мощность $P_w = U_{BC} I_b \cos \varphi$, где $U_{BC} = \frac{80}{\sqrt{3}}$ В, $I_b = 5$ А, угол φ между напряжением U_{BC} и током I_b найдем из диаграммы (рис. 3.9).

$$P_w = \frac{80}{\sqrt{3}} \cdot 5 \cos 30^\circ = 200 \text{ Вт.}$$

Активная мощность всей цепи равна $P = 2P_w = 2 \cdot 200 = 400$ Вт.

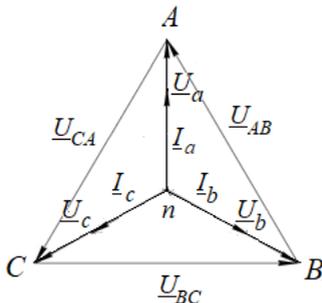


Рис. 3.9. Векторная диаграмма трехфазной цепи с симметричной активной нагрузкой

Задачи для самостоятельной работы

Задача 3.8. Задано линейное напряжение $U_{л}$ трехфазной сети (рис. 3.10), питающей симметричный трехфазный потребитель, фазы которого соединены «звездой» без нулевого провода. Решить задачу 3.8, используя данные табл. 3.1. Номер варианта выдается преподавателем.

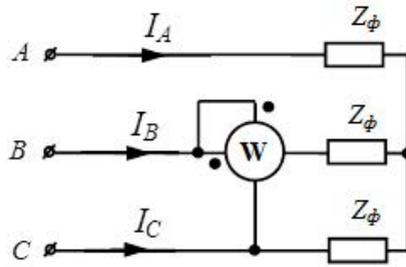


Рис. 3.10. Расчетная электрическая цепь

Таблица 3.1

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{л}, \text{В}$	460	420	380	340	300	260	220	180	140	100
$Z_{\phi} = R, \text{Ом}$	15	22	20	14	17,3	30	12,7	21	9	8
Обрыв провода	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>B</i>
К. з. фазы	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Обрыв провода и к. з. фазы	<i>C,</i> <i>a</i>	<i>B,</i> <i>c</i>	<i>C,</i> <i>b</i>	<i>A,</i> <i>c</i>	<i>B,</i> <i>a</i>	<i>C,</i> <i>a</i>	<i>A,</i> <i>c</i>	<i>B,</i> <i>a</i>	<i>C,</i> <i>b</i>	<i>B,</i> <i>c</i>

1. Записать комплексные действующие значения линейных и фазных напряжений трехфазного симметричного генератора.
2. Определить действующие значения фазных токов и напряжений, если сопротивление фазы симметричного трехфазного потребителя Z_{ϕ} .
3. Определить действующие значения фазных токов и напряжений, если оборван провод (см. свой вариант).
4. Определить действующие значения фазных токов и напряжений, если произойдет короткое замыкание фазы.
5. Определить действующие значения фазных токов и напряжений, если провод оборван, а сопротивление фазы закорочено.
6. Определить показание ваттметра, если сопротивление фазы симметричного трехфазного потребителя Z_{ϕ} .
7. Определить активную мощность всей цепи.

Задача 3.9. Задано линейное напряжение $U_{\text{л}}$ трехфазной сети, питающей симметричный трехфазный потребитель, фазы которого соединены «треугольником» (рис. 3.11).

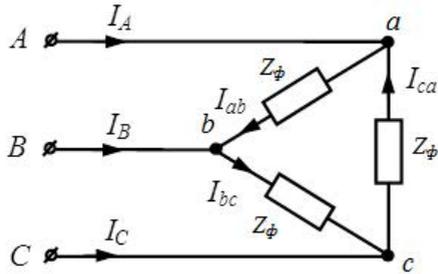


Рис. 3.11. Расчетная электрическая цепь

Используя данные табл. 3.2, определить:

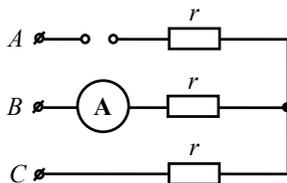
1. Действующие значения фазных и линейных токов, если сопротивление фазы симметричного трехфазного потребителя Z_{ϕ} .
2. Действующие значения фазных и линейных токов при условии, что провод оборван.
3. Действующие значения фазных и линейных токов при условии, что произошел обрыв фазы.

Таблица 3.2

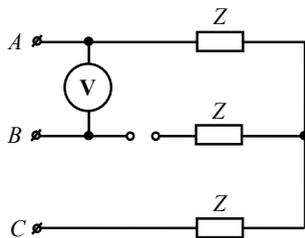
Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{л}}, \text{В}$	460	420	380	340	300	260	220	180	140	100
$Z_{\phi} = R, \text{Ом}$	15	22	20	14	17,3	30	12,7	21	9	8
Обрыв линии	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
К. з. фазы	<i>ca</i>	<i>bc</i>	<i>ab</i>	<i>ca</i>	<i>bc</i>	<i>ab</i>	<i>ca</i>	<i>bc</i>	<i>ab</i>	<i>ca</i>

Тесты для самоконтроля

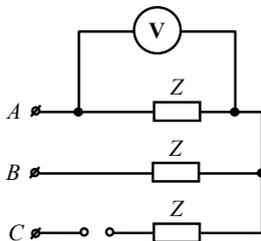
1. Какую силу тока покажет амперметр, включенный в цепь симметричного трехфазного потребителя, если линейное напряжение питающей сети равно $U_{\text{л}} = 100 \text{ В}$, $r = 10 \text{ Ом}$, а провод A оборван?



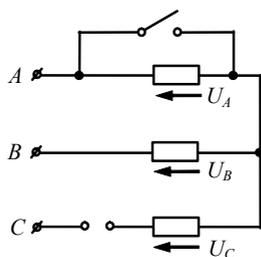
2. Задано линейное напряжение $U_{\text{л}} = 10 \text{ В}$ трехфазной сети, питающей симметричный трехфазный потребитель. Определить напряжение, которое покажет вольтметр, если провод B оборван.



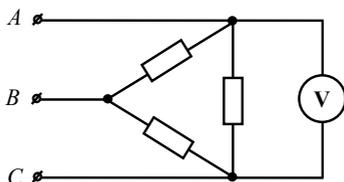
3. Что покажет вольтметр, включенный в цепь симметричного трехфазного потребителя, если линейное напряжение питающей сети равно $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$, а провод C оборван?



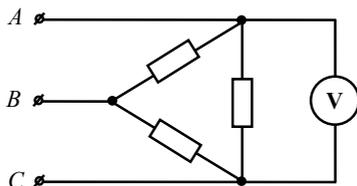
4. Задано линейное напряжение $U_{\text{л}} = 100 \text{ В}$ трехфазной сети, питающей симметричный трехфазный потребитель. Каким станет фазное напряжение $U_{\text{ф}}$, если сопротивление фазы A закорочено?



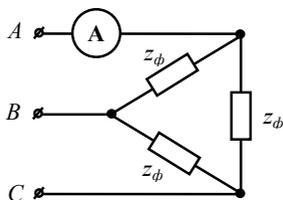
5. Трехфазная сеть, питающая симметричный потребитель, имеет линейное напряжение $U_{\text{л}} = 100$ В. Что покажет вольтметр, подключенный к фазе CA , если провод C оборван?



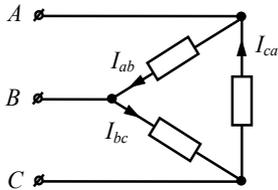
6. Трехфазная сеть, питающая симметричный потребитель, имеет линейное напряжение $U_{\text{л}} = 127$ В. Что покажет вольтметр, подключенный к фазе CA , если провод B оборван?



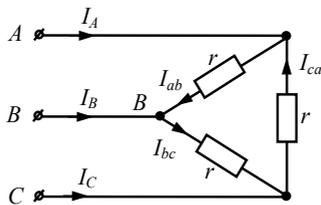
7. Система синусоидальных линейных напряжений питающей сети симметрична. Определить показания электромагнитного амперметра, если известно, что $U_{\text{л}} = 200$ В, $Z_{\phi} = 20$ Ом.



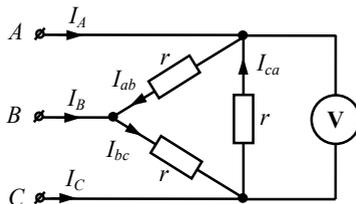
8. Фазные токи симметричного трехфазного потребителя равны $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = 12$ А. Каким будет ток I_{bc} в случае, если провод A оборван?



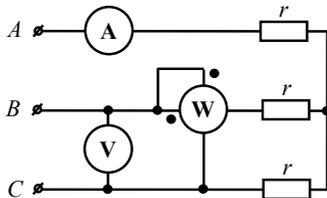
9. Фазные токи симметричного трехфазного потребителя равны 12 А. Каким будет ток I_C , если фаза BC оборвана?



10. Вольтметр показывает 380 В, $r = 10$ Ом. Определить ток в линии B при условии, что провод A оборван.



11. Определить показание ваттметра, если $U_V = 100\sqrt{3}$ В, $I_A = 3$ А.



Практическое занятие 4

Электрические машины

Цель занятия: изучение устройства и принципа действия электрических машин постоянного и переменного тока, их основных характеристик; приобретение навыков расчета параметров электрических машин.

Теоретические вопросы

1. Конструкция и принцип действия машин постоянного тока. Режимы работы: генератора, двигателя, электромагнитного тормоза [1–4].
2. Способы возбуждения машин постоянного тока [1–4].
3. Генератор независимого возбуждения, схема включения, основные параметры и характеристики [1–4].
4. Генераторы с последовательным, параллельным и смешанным возбуждением. Схемы включения, основные параметры и характеристики [1–4].
5. Двигатели постоянного тока. Способы пуска, торможения и регулирования частоты вращения [1–4].
6. Асинхронные двигатели. Устройство трехфазного двигателя. Режимы работы, параметры и характеристики [1–4].
7. Синхронные генераторы: устройство и принцип действия [1–4].

Методические рекомендации и краткие теоретические сведения

Электрические машины представляют собой электромеханические устройства, в которых происходят преобразования энергии. В генераторах механическая энергия преобразуется в электрическую, в двигателях — электрическая энергия в механическую. Каждая электрическая машина обладает свойством обратимости, т. е. может работать в качестве двигателя и генератора. По роду тока электрические машины подразделяются на машины переменного тока и машины постоянного тока.

Электрические машины постоянного тока

ЭДС якоря машины постоянного тока пропорциональна скорости вращения якоря и магнитному потоку полюса машины:

$$E_{\text{я}} = c_e n \Phi = \frac{pN}{60a} n \Phi, \quad (1)$$

где $c_e = \frac{pN}{60a}$ — постоянная, зависящая от конструктивных данных машины; n — частота вращения якоря; Φ — результирующий магнитный поток; p — число пар полюсов статора; N — число активных проводников обмотки якоря; $2a$ — число пар параллельных ветвей обмотки.

Вращающий (электромагнитный) момент двигателя или тормозной момент генератора пропорционален току якоря и магнитному потоку машины:

$$M = \frac{pN}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi = c_m I_{\text{я}} \Phi, \quad (2)$$

где $c_m = \frac{pN}{2\pi a} = 9,55c_e$ — величина, постоянная для данной машины.

Мощность в случае преобразования механической энергии в электрическую в генераторе или электрической энергии в механическую в двигателе:

$$P_{\text{мех}} = M\omega = M \frac{2\pi n}{60} = \frac{Mn}{9,55}, \quad (3)$$

где M — вращающий момент на валу ротора с якорной обмоткой; n — частота вращения ротора.

Подставив в (3) выражения (1) и (2), получим:

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}},$$

где $E_{\text{я}}$ — ЭДС якорной обмотки; $I_{\text{я}}$ — ток в якорной обмотке.

Таким образом, мощность, развиваемая якорем машины постоянного тока при работе ее как генератором, так и двигателем, равна произведению тока и ЭДС в обмотке якоря.

Коэффициент полезного действия (КПД) машины постоянного тока находится как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} 100\%,$$

где P_1 — потребляемая мощность; P_2 — полезная или отдаваемая мощность; $\sum P$ — суммарная мощность потерь.

Суммарные, или полные, потери представляют собой сумму всех потерь:

$$\sum P = p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{эл}} + p_{\text{д}},$$

где $p_{\text{мх}}$ — механические; $p_{\text{мг}}$ — магнитные; $p_{\text{эл}}$ — электрические; $p_{\text{д}}$ — добавочные потери.

По способу возбуждения генераторы постоянного тока подразделяют на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением. У генераторов с независимым возбуждением (рис. 4.1, а) цепь возбуждения питается от независимого постороннего источника, которым может служить другая машина постоянного тока или аккумулятор. У генераторов с самовозбуждением (рис. 4.1, б, в, г) цепь возбуждения питается непосредственно от самого генератора. Генераторы постоянного тока с самовозбуждением делятся в свою очередь на генераторы с параллельным возбуждением, генераторы с последовательным возбуждением и генераторы со смешанным возбуждением.

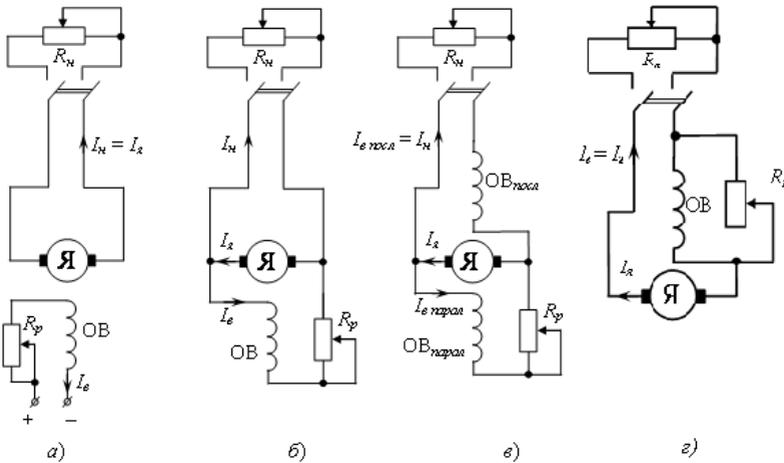


Рис. 4.1. Схемы генераторов и двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (а), параллельным возбуждением (б), смешанным возбуждением (в), последовательным возбуждением (г)

Напряжение между выводами цепи якоря генератора:

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

где $R_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре обмоток $t = +75^\circ\text{C}$.

У генераторов с параллельным возбуждением (рис. 4.1, б) цепь возбуждения подключается к щеткам якоря генератора параллельно внешней цепи:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}} + I_{\text{в}},$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якоря; $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки; $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения.

У генераторов с последовательным возбуждением (рис. 4.1, в) обмотка возбуждения соединяется последовательно с цепью якоря и цепью внешней нагрузки: $I_{\text{я}} = I_{\text{н}} = I_{\text{в}}$.

У генераторов со смешанным возбуждением (рис. 4.1, в) имеются две обмотки возбуждения: одна включается параллельно, а другая – последовательно с внешней цепью.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Независимо от способа возбуждения уравнение электрического состояния цепи якоря двигателя имеет следующий вид:

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

В двигателях направление действия ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ противоположно направлению тока якоря $I_{\text{я}}$, и в режиме двигателя всегда $U > E_{\text{я}}$.

Ток якоря в двигателе равен $I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ и при прямом пуске недопустимо велик.

Для ограничения пускового тока до предельно допустимого пуск в ход двигателей при питании от источника постоянного напряжения осуществляется с помощью реостата $R_{\text{н}}$, включаемого в цепь якоря. Тогда ток якоря с включенным реостатом равен $I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}$, а в начальный момент пуска при $n = 0$ и $E = 0$ будет $I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}$.

Учитывая, что $E_{\text{я}} = c_e \Phi n$, получим уравнение скоростной (частотной) характеристики $n = f(I_{\text{я}})$ двигателя:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_e \Phi n}{R_{\text{я}}}, \quad n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \Phi}.$$

Зная выражение для электромагнитного момента машины $M = c_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}$, получим уравнение механической характеристики $n = f(M)$ двигателя:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{я} M}{c_e c_M \Phi^2},$$

которое определяет зависимость скорости вращения двигателя от развиваемого момента вращения при $U = \text{const}$. Вид механической характеристики зависит от того, как с изменением нагрузки или M изменяется поток машины Φ , и различен для двигателей с различными способами возбуждения. Это же справедливо и для скоростных характеристик.

Таким образом, частоту вращения двигателя можно регулировать тремя способами:

- введением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря $R_{\text{доб}}$;
- изменением магнитного потока Φ , изменяя соответственно ток возбуждения I_B ;
- изменением напряжения цепи якоря U .

Электрические машины переменного тока

Машины переменного тока подразделяются на синхронные и асинхронные. Асинхронные машины используются в основном как двигатели. В режиме торможения они работают как генераторы. Синхронные машины переменного тока получили наибольшее распространение как трехфазные генераторы, в основном это все генераторы на современных электрических станциях. Трехфазные синхронные двигатели преимущественно применяются в качестве привода мощных производственных машин.

Работа асинхронной машины основана на использовании вращающегося магнитного поля.

Одной из важнейших величин, характеризующих работу асинхронного двигателя, является скольжение ротора, под которым понимают отношение

$$s \% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 \%,$$

где n_2 – частота вращения ротора; $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ – частота вращения магнитного поля; f_1 – частота питающего напряжения или частота тока цепи обмоток статора; p – число пар полюсов двигателя.

Для большинства современных типов асинхронных двигателей скольжение ротора при номинальной нагрузке заключено в пределах 2–6 %.

КПД асинхронного двигателя:

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1}.$$

Здесь $\sum P = p_{\text{ст}} + p_{\text{пр1}} + p_{\text{пр2}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{доб}}$, где $p_{\text{ст}}$ – потери из-за гистерезиса и вихревых токов в сердечнике статора; $p_{\text{пр1}}$ – потери на нагрев обмоток статора; $p_{\text{пр2}}$ – потери на нагрев обмотки ротора; $p_{\text{мех}}$ – механические потери; $p_{\text{доб}}$ – добавочные потери.

Величина КПД асинхронных двигателей составляет от 0,7 до 0,9 и выше.

Механическая мощность ротора:

$$P_{\text{мех}} = M\omega_p = M \frac{2\pi n_2}{60},$$

где M – вращающий момент двигателя; ω_p – угловая скорость вращения ротора.

Если пренебречь потерями и принять $P_2 \approx P_{\text{мех}}$, то получаем

$$M = \frac{P_2}{\omega_p}.$$

Подставив в это выражение $\omega_p = \frac{2\pi n_2}{60}$, получим формулу для вычисления вращающего момента асинхронного двигателя:

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}.$$

Для расчета зависимости вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения с достаточной точностью применяется упрощенная формула:

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

где M_{max} – максимальный вращающий момент; $s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение, при котором вращающий момент достигает своего максимального значения, его величина зависит от активного сопротивления цепи ротора.

При известном номинальном скольжении критическое скольжение определяется по формуле

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} \right)^2 - 1} \right).$$

Отношение $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$ характеризует перегрузочную способность двигателя.

Обычно $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 1,6 - 2,5$ и не должно быть меньше 1,6.

Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, приложенного к зажимам двигателя: $M \cong U^2$.

Если считать, что при номинальном напряжении, принятом за единицу ($U_{\text{ном}} = 1$), момент также равен единице ($M_{\text{ном}} = 1$), то при уменьшении напряжения на 10 %, т. е. до $U = 0,9U_{\text{ном}}$, момент упадет до $M = 0,81M_{\text{ном}}$, или на 19 %.

Пусковые качества двигателей характеризуются коэффициентами кратности пускового тока $\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$ и пускового момента $\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$.

При запуске двигателя через автотрансформатор уменьшение пускового тока в цепи произойдет в k^2 раз, где k – коэффициент трансформации автотрансформатора.

В синхронном двигателе частота вращения двигателя равна частоте вращения магнитного поля: $n_2 = n_1 = \frac{60f_1}{p}$.

Выражение для электромагнитного момента синхронного двигателя и синхронного генератора записывается одинаково:

$$M_{\text{эм}} = 3E_0I \cos \varphi \frac{9,55}{n_2} = 3E_0U \sin \theta \frac{9,55}{n_2 x},$$

где θ – угол между векторами E_0 и напряжением U , который называется углом нагрузки; E_0 – ЭДС, индуцируемая током возбуждения; U – напряжение генератора или двигателя; x – полное индуктивное сопротивление двигателя.

Синхронная машина может работать в двух режимах:

- как синхронный генератор – $\theta < 0$;
- как синхронный двигатель – $\theta > 0$.

Примеры решения задач

Задача 4.1. Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения заданы следующие номинальные параметры: $P_{\text{ном}} = 130$ кВт, $U_{\text{ном}} = 220$ В, $n = 600$ об/мин, $\eta = 92\%$, $R_{\text{я}} = 0,01$ Ом, $c_{\text{м}} = 65$. Определить номинальный ток якоря, ЭДС и вращающий момент двигателя, магнитный поток одного полюса и электромагнитную мощность.

Решение. Так как в паспорте на двигателе указывается номинальная механическая мощность P_2 , то потребляемая $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{130}{0,92} = 141$ кВт. Ток якоря находим (при независимом возбуждении) из соотношения

$$I_{\text{я}} = \frac{P_{1\text{н}}}{U_{\text{н}}} = \frac{141 \cdot 10^3}{220} = 645 \text{ А.}$$

ЭДС определяем по формуле

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}};$$

$$E_{\text{я}} = 220 - 645 \cdot 0,01 = 213,5 \text{ В.}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = 213,5 \cdot 645 = 137 \text{ кВт.}$$

Вращающий момент двигателя и магнитный поток найдем как:

$$M = c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi, \quad \Phi = \frac{E}{n \cdot c_{\text{е}}} = 9,55 \frac{E}{n \cdot c_{\text{м}}}.$$

Окончательно:

$$\Phi = 9,55 \frac{213,5}{600 \cdot 65} = 0,052 \text{ Вб и } M = 65 \cdot 645 \cdot 0,052 = 2,2 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Задача 4.2. Определить номинальный момент на валу $M_{\text{ном}}$, номинальные суммарные потери мощности $\sum P_{\text{ном}}$ и номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$ электродвигателя постоянного тока типа П62 с параллельным возбуждением при номинальном режиме работы, если номинальные данные, указанные на его щитке: полезная мощность на валу $P_{2\text{ном}} = 8$ кВт; напряжение $U_{\text{ном}} = 200$ В; частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин; ток, потребляемый из сети, $I_{\text{ном}} = 43$ А.

Решение. Номинальный момент на валу электродвигателя:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \frac{8 \cdot 10^3}{1000} = 76,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальная мощность, подведенная к электродвигателю из сети:

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} = 220 \cdot 43 = 9,46 \text{ кВт.}$$

Номинальные суммарные потери мощности в электродвигателе:

$$\sum P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 9,46 - 8 = 1,46 \text{ кВт.}$$

Номинальный КПД электродвигателя:

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{8}{9,46} = 0,85 \text{ или } \eta_{\text{ном}} \% = 85 \%.$$

Задача 4.3. Определить мощность, потребляемую трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором, а также суммарную мощность всех потерь. Номинальные параметры двигателя: полезная мощность на валу $P_2 = 30$ кВт; $\eta = 88$ %.

Решение. Активная мощность, потребляемая двигателем, равна

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{30}{0,88} = 34,1 \text{ кВт.}$$

Суммарную мощность всех потерь найдем из соотношения

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1}.$$

Таким образом, получим

$$\sum P = P_1 - \eta P_1 = 34,1 - 0,88 \cdot 34,1 = 4,1 \text{ кВт.}$$

Задача 4.4. Для привода лифта использован трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, питающийся от трехфазной сети с частотой напряжения $f_1 = 50$ Гц, с числом пар полюсов $p = 1$ и частотой вращения ротора $n_2 = 0,96n_1$. Определить частоту вращения n_1 и скольжение s ротора, частоту тока в роторе при пуске $f_{2\text{пуск}}$ и в рабочем режиме f_2 , а также частоту вращения ротора n'_2 , частоту тока f'_2 в роторе при возрастании нагрузки на валу двигателя с учетом того, что частота вращения ротора n'_2 при этом уменьшилась на 5 % и составляет $0,95n_2$.

Решение. Частота вращения магнитного поля при числе пар полюсов $p = 1$:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения ротора двигателя:

$$n_2 = 0,96n_1 = 0,96 \cdot 3000 = 2880 \text{ об/мин.}$$

Скольжение ротора двигателя:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04.$$

Частота тока в роторе двигателя при пуске ($n_{\text{пуск}} = 0, s_{\text{пуск}} = 1$):

$$f_{2\text{пуск}} = f_1 s_{\text{пуск}} = 50 \cdot 1 = 50 \text{ Гц.}$$

Частота тока ротора в рабочем режиме двигателя ($n_2 = 2880$ об/мин, $s = 0,04$):

$$f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Гц.}$$

Частота вращения ротора при возросшей нагрузке на валу двигателя:

$$n'_2 = 0,95n_2 = 0,95 \cdot 2880 = 2736 \text{ об/мин.}$$

Скольжение ротора при возросшей нагрузке:

$$s' = \frac{n_1 - n'_2}{n_1} = \frac{3000 - 2736}{3000} = 0,088.$$

Частота тока ротора при возросшей нагрузке:

$$f'_2 = f_1 s' = 50 \cdot 0,088 = 4,4 \text{ Гц.}$$

Задача 4.5. Для пуска восьмиполюсного асинхронного двигателя с фазным ротором и номинальными параметрами: $n_{\text{ном}} = 720$ об/мин, $M_{\text{max}} = 1,8 \cdot M_{\text{ном}}$ и $R_{\text{я}} = 0,2$ Ом — используется пусковой реостат. Определить сопротивление R_n фазы пускового реостата, чтобы при пуске двигатель развивал максимальный момент, если частота напряжения сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение. Номинальное скольжение определяется по формулам:

$$n_2 = n_1(1 - s), \quad n_1 = \frac{60f_1}{p},$$

согласно которым $n_1 = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750$ об/мин, $s_{\text{ном}} = \frac{750 - 720}{750} = 4\%$.

Критическое скольжение равно

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\frac{M_{\text{max}}}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{M} \right)^2 - 1} \right) = 4 \cdot \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 13,2\%.$$

Пусковое сопротивление определяется из соотношения

$$\frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}} = \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_n},$$

отсюда

$$R_n = R_{\text{я}} \cdot \left(\frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}} - 1 \right) = 0,2 \cdot \left(\frac{13,2}{4} - 1 \right) = 0,46 \text{ Ом.}$$

Задача 4.6. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие паспортные данные: $U_{\text{ном}} = \frac{U_{\Delta}}{U_Y} = \frac{220}{380} \text{ В}$, $P_{\text{ном}} = 40 \text{ кВт}$, $n_2 = 980 \text{ об/мин}$, $\eta = 91,5 \%$, $\cos \varphi = 0,91$. Кратность пускового тока $k_1 = 5$, частота напряжения питания $f_1 = 50 \text{ Гц}$. Определить число пар полюсов, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмоток статора в «треугольник» и «звезду».

Решение. Ближайшая стандартная синхронная частота $n_1 = 1000 \text{ об/мин}$, следовательно, число пар полюсов $p = \frac{60f_1}{n_1} = 3$, т. е. машина шестиполюсная.

Скольжение равно:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \% = \frac{1000 - 980}{1000} \cdot 100 \% = 2 \%.$$

Мощность потребления двигателя:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{40}{0,915} = 43,7 \text{ кВт.}$$

Номинальный момент:

$$M = 9550 \frac{P_2}{n_2} = 9550 \cdot \frac{40}{980} = 389,8 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

При соединении обмоток «треугольником» номинальный ток равен:

$$I_{\text{ном}\Delta} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_{\Delta} \cdot \cos \varphi} = \frac{43,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,91} = 126,3 \text{ А,}$$

пусковой ток:

$$I_{n\Delta} = 5I_{\text{ном}\Delta} = 629,5 \text{ А.}$$

При соединении обмоток «звездой»:

$$I_{\text{ном}Y} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_Y \cos \varphi} = \frac{43,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,91} = 73 \text{ А,}$$

пусковой ток:

$$I_{nY} = 5I_{\text{ном}Y} = 365 \text{ А,}$$

т. е. пусковой ток в этом случае в $\sqrt{3}$ раз меньше.

Задача 4.7. Синхронный шестиполюсный двигатель имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 73$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин, $U_{\text{ном}} = 660$ В, $I_{\text{ном}} = 125$ А, $x = 1$ Ом. Определить номинальный и максимальный моменты двигателя, если ЭДС двигателя равна 670 В.

Решение. Номинальный момент определяется по формуле

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 9,55}{n_{\text{ном}}} = 6,97 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент при $\sin \theta = 1$ равен:

$$M_{\text{max}} = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U \cdot 9,55}{n_2 \cdot x}.$$

Подставляя исходные данные, получаем:

$$M = \frac{3 \cdot 670 \cdot 660 \cdot 9,55}{1000 \cdot 1} = 12,7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Задачи для самостоятельной работы

Решить задачи 4.8–4.17 самостоятельно, используя данные таблиц. Номер варианта выдается преподавателем.

Задача 4.8. Напряжение на зажимах генератора постоянного тока с параллельным возбуждением U (В), сопротивление всей цепи якоря $R_{\text{я}}$ (Ом), величина тока в якоре $I_{\text{я}}$ (А). Величина ЭДС генератора равна ... В.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U , В	180	230	185	250	230	150	160	180	160	190
$R_{\text{я}}$, Ом	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,1	0,2	0,15	0,2	0,1
$I_{\text{я}}$, А	200	100	100	150	150	50	50	200	200	250

Задача 4.9. Напряжение на зажимах генератора постоянного тока с параллельным возбуждением U (В), сопротивление параллельной обмотки возбуждения R_B (Ом), сопротивление цепи нагрузки R_H (Ом). Величина тока в якоре генератора I_A равна ... А.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U , В	230	220	200	240	210	250	200	220	230	240
R_B , Ом	115	55	40	40	30	50	50	110	115	60
R_H , Ом	2,3	2,75	2	2	7	5	2	5	5	4

Задача 4.10. При частоте вращения якоря генератора постоянного тока $n_{\text{ном}}$ (об/мин) ЭДС в обмотке E (В). Если частота вращения n (об/мин), то величина ЭДС генератора при неизменном магнитном потоке равна ... В.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n_{\text{ном}}$, об/мин	1500	3000	1000	2000	1000	1625	2000	2500	3200	1375
E , В	120	150	150	140	120	130	140	150	160	110
n , об/мин	2100	4200	1700	2600	1600	2000	2700	3100	3700	1800

Задача 4.11. Номинальные параметры двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: полезная мощность на валу $P_{2\text{ном}}$ (кВт), номинальный ток $I_{\text{ном}}$ (А), номинальное напряжение U (В). КПД двигателя в номинальном режиме равно ... %.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{2\text{ном}}$, кВт	8	8,5	9	54	57	51	48	51	90	95
$I_{\text{ном}}$, А	50	50	50	100	100	100	150	150	200	200
U , В	200	200	200	600	600	600	400	400	500	500

Задача 4.12. Номинальные параметры двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: номинальный ток $I_{\text{ном}}$ (А), сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ (Ом), напряжение сети U (В). Если пусковой ток не должен превышать $1,5I_{\text{ном}}$, то величина сопротивления пускового реостата равна ... Ом.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	100	180	100	120	140	100	160	110	120	150
$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
$U, \text{В}$	165	594	465	216	441	480	264	363	558	495

Задача 4.13. Определить частоту вращения ротора асинхронного двигателя n_2 (об/мин) в номинальном режиме, если число пар полюсов p , частота питающего напряжения f_1 (Гц), а величина скольжения $s = 2\%$.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4
$f_1, \text{Гц}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$s, \%$	4	4	2	4	2	2	4	8	6	6

Задача 4.14. Определить номинальный момент на валу, развиваемый асинхронным двигателем M (кН · м), если его номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ (кВт), а частота вращения ротора n_2 (об/мин).

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	25	30	20	50	40	25	40	30	50	10
$n_2, \text{об/мин}$	955	1910	955	1900	1900	1250	955	1146	1910	955

Задача 4.15. На сколько процентов уменьшится пусковой момент асинхронного двигателя, если напряжение питания U_1 статорной обмотки уменьшилось на $m\%$ по сравнению с номинальным напряжением.

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m, \%$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Задача 4.16. Определить полезную отдаваемую мощность P_2 (МВт) трехфазного синхронного генератора, если его КПД η (%), а суммарная мощность всех потерь ΣP (МВт).

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\eta, \%$	80	90	92	80	90	92	80	70	70	90
$\Sigma P, \text{МВт}$	10	5	10	40	45	115	20	30	15	25

Задача 4.17. Пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямом включении в сеть I_n (А). Определить величину пускового тока при включении двигателя через автотрансформатор с коэффициентом трансформации k .

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_n, \text{А}$	40	45	32	20	96	112	18	144	90	108
k	2	1,5	2	2	4	4	1,5	4	3	3

Тесты для самоконтроля

1. Уравнение, описывающее электрическое состояние цепи якоря машины постоянного тока в режиме двигателя, имеет вид: ...
2. Для уменьшения пускового тока в двигателе постоянного тока необходимо...
3. Номинальная частота вращения двигателя переменного тока – это...
4. Как найти скольжение?
5. Частота вращения асинхронного двигателя при увеличении нагрузки на валу – ...
6. Определить частоту вращения магнитного поля n_1 асинхронного двигателя с числом пар полюсов $p = 2$, если частота питающего напряжения $f_1 = 50$ Гц.
7. Определить частоту f_1 питающего напряжения асинхронного двигателя с числом пар полюсов $p = 3$, если синхронная частота вращения магнитного поля $n_1 = 1000$ об/мин.
8. Критическое скольжение в электрической машине переменного тока – это режим работы, при котором...
9. В синхронном двигателе частота вращения двигателя равна...
10. В синхронном двигателе углом нагрузки называется...

Практическое занятие 5

Полупроводниковые приборы и устройства

Цель занятия: знакомство с полупроводниковыми приборами и устройствами, освоение методики расчета их основных параметров.

Теоретические вопросы

1. Полупроводники. Примесная проводимость. Свойство и ВАХ $p-n$ -перехода. Типы полупроводниковых диодов и их применение [1–3].
2. Полупроводниковые транзисторы. Основные схемы включения транзисторов. Усилительные свойства транзисторов. Общие сведения о тиристорах [1–4].
3. Источники вторичного электропитания. Назначение. Структурная схема. Типы выпрямителей. Назначение фильтров [1–4].

Методические рекомендации и краткие теоретические сведения

Работа электронных полупроводниковых приборов основана на свойственном полупроводниковым материалам явлении, когда при сплавлении двух полупроводников с различным типом проводимости на границе раздела образуется область, называемая электронно-дырочным или $p-n$ -переходом и обладающая вентильным свойством.

$P-n$ -переходы, а также переходы между металлом и полупроводником являются основными элементами полупроводниковых приборов, количество их определяет основные функции и особенности применения прибора.

Полупроводниковые диоды

Прибор с одним $p-n$ -переходом получил название диода. В полупроводниковых диодах используется свойство $p-n$ -переходов хорошо проводить электрический ток в одном направлении и плохо — в обратном. Эти токи и соответствующие им напряжения между выводами диода называются прямым и обратным токами, прямым и обратным напряжениями.

По функциональному назначению полупроводниковые диоды делятся на выпрямительные, импульсные, стабилитроны, фотодиоды, светоизлучающие диоды и т. д.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. Условное изображение выпрямительного диода и его вольтамперная характеристика приведены на рис. 5.1.

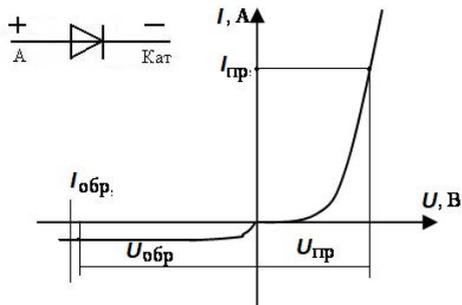


Рис. 5.1. Диод и его вольтамперная характеристика

Прямой ток диода направлен от анодного (А) к катодному (Кат) выводу.

Импульсные диоды предназначены для работы в цепях формирования импульсов напряжения и тока.

Сопротивление полупроводникового диода постоянному току в проводящем направлении определяют по формуле

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}},$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжение на диоде в прямом направлении; $I_{\text{пр}}$ — сила тока в диоде в прямом направлении.

Сопротивление полупроводникового диода постоянному току в обратном (непроводящем) направлении определяют по формуле

$$R_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}},$$

где $U_{\text{обр}}$ — напряжение на диоде в обратном направлении; $I_{\text{обр}}$ — сила тока в диоде в обратном направлении.

Для идеального диода $U_{\text{пр}} = 0$, $I_{\text{обр}} = 0$, соответственно, $R_{\text{пр}} = 0$ и $R_{\text{обр}} = \infty$.

Для стабилизации тока и напряжения применяют стабилитроны, называемые также опорными диодами. Условное изображение стабилитрона и ВАХ приведены на рис. 5.2.

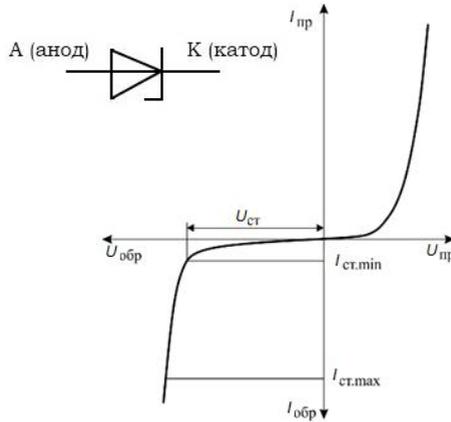


Рис. 5.2. ВАХ стабилитрона и его условное обозначение

В этих диодах используется явление неразрушающего электрического пробоя (лавинного пробоя) $p-n$ -перехода при определенных значениях обратного напряжения $U_{обр} = U_{проб}$. Стабилитрон всегда включается в цепь в обратном направлении, при прямом включении он работает как обычный диод.

На рис. 5.3 приведена схема параметрического стабилизатора напряжения. Такой стабилизатор напряжения обеспечивает стабилизацию выходного напряжения $U_{вых}$ при изменении напряжения питания и тока нагрузки I_n .

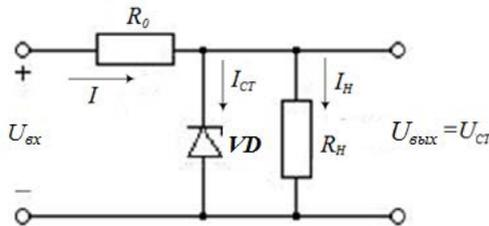


Рис. 5.3. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Качество стабилитрона оценивается его динамическим сопротивлением (сопротивление стабилитрона переменному току):

$$R_d = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}},$$

где $\Delta U_{ст}$ и $\Delta I_{ст}$ — изменение напряжения и тока стабилизации.

Стабилизирующая способность схемы стабилизатора оценивается коэффициентами стабилизации по напряжению и по току:

$$k_{стU} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх.ном}} / \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.ном}}, \quad k_{стI} = \frac{\Delta I_{н}}{I_{н.ном}} / \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.ном}},$$

где $\Delta U_{вх}$ и $\Delta U_{вых}$ — изменения напряжения на входе и на выходе стабилизатора; $U_{вх.ном}$ и $U_{вых.ном}$ — напряжения на входе и на выходе стабилизатора.

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами, образованными тремя областями проводимостей типа $p-n-p$ или $n-p-n$ (рис. 5.4). Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей зарядов обоих знаков (свободных электронов и дырок).

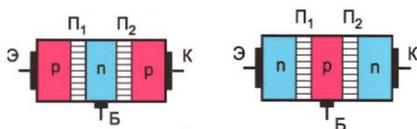


Рис. 5.4. Структура биполярного транзистора

Средняя, тонкая область транзистора называется базой (Б), одна крайняя область — эмиттером (Э), другая крайняя область — коллектором (К). Каждый слой имеет вывод, при помощи которого транзистор включается в цепь.

На электрических схемах транзистор $p-n-p$ -типа изображают, как показано на рис. 5.5, а, а транзисторы $n-p-n$ -типа — в соответствии с рис. 5.5, б.



Рис. 5.5. Условно-графические обозначения биполярного транзистора

Для транзистора выполняется первый закон Кирхгофа: $i_э = i_к + i_б$.

В этом соотношении ток базы много меньше тока эмиттера и тока коллектора, поэтому $i_э \approx i_к$.

Различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК) (рис. 5.6).

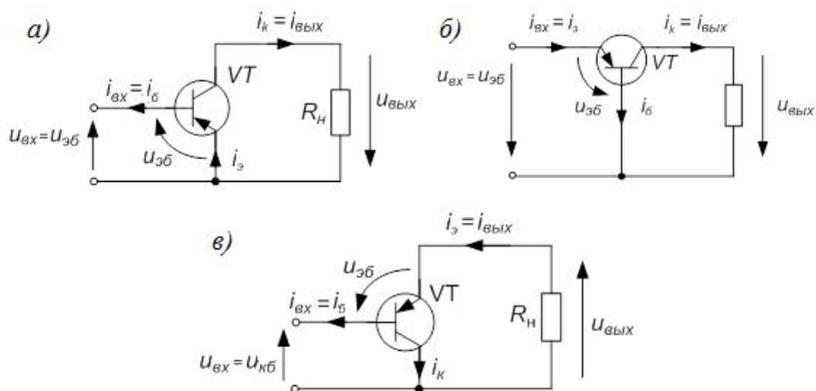


Рис. 5.6. Схемы включения транзистора:
 а – ОЭ; б – ОБ; в – ОК

В схеме с ОЭ осуществляется усиление по току, напряжению и мощности. При этом выходное напряжение $U_{кз}$ находится в противофазе с входным напряжением $U_{эб}$.

В схеме с ОБ отсутствует усиление по току. Выходное напряжение $U_{кб}$ совпадает по фазе с входным напряжением $U_{эб}$.

В схеме с ОК не происходит усиление по напряжению. При этом выходное напряжение совпадает по фазе с входным. Поэтому очень часто такую схему включения называют эмиттерным повторителем.

Соотношение между токами в транзисторе характеризуется следующими параметрами:

– коэффициентом передачи тока эмиттера в схеме с общей базой:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э};$$

– коэффициентом усиления тока базы в схеме с общим эмиттером:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_б},$$

где ΔI_k , $\Delta I_б$, $\Delta I_э$ – изменения токов в цепи коллектора, базы и эмиттера.

Связь между коэффициентом усиления тока базы и коэффициентом передачи тока эмиттера транзистора определяется по формуле

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Полевые транзисторы

Принцип действия полевых транзисторов основан на использовании носителей зарядов только одного знака (электронов или дырок). Полевые транзисторы управляются электрическим полем (напряжением).

Различают полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом (рис. 5.7) и с изолированным затвором на основе конструкции металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-транзистор).

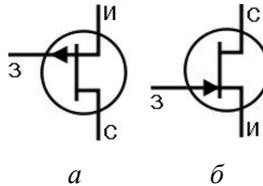


Рис. 5.7. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом:
а – p -канал; *б* – n -канал

Электроды полевого транзистора называются: исток (И) – электрод, из которого в канал входят основные носители заряда; сток (С) – электрод, через который из канала уходят основные носители заряда; затвор (З) – электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала.

По типу проводимости канала различают полевые транзисторы с n -каналом и p -каналом. Полярности напряжений смещения, подаваемых на электроды транзисторов с n - и с p -каналом, противоположны.

Полевой транзистор в каскаде усиления сигнала можно включать по одной из трех основных схем: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ).

Полевые МДП-транзисторы отличаются от полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом тем, что в них электрод затвора

изолирован от канала слоем диэлектрика. Поэтому наряду с термином МДП пользуются термином МОП, отражающим структуру металл – оксид – полупроводник. Благодаря диэлектрику МДП-транзисторы обладают высоким входным сопротивлением.

Тиристоры

Полупроводниковый прибор с четырехслойной структурой $n-p-n-p$ -типа и тремя переходами называется тиристором. Различают управляемые (или триодные) и неуправляемые (или диодные) тиристоры.

Диодный тиристор имеет два вывода – анодный (А) и катодный (Кат). Структура такого тиристора и его условное изображение приведены на рис. 5.8.

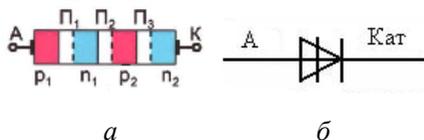


Рис. 5.8. Структура диодного тиристора (а) и его условное изображение (б)

Триодный тиристор кроме анодного и катодного выводов имеет еще вывод управляющего электрода (УЭ). Различают катодное и анодное управление. Первое подключение более распространено. Структура тиристора с катодным управлением и его условное изображение приведены на рис. 5.9.

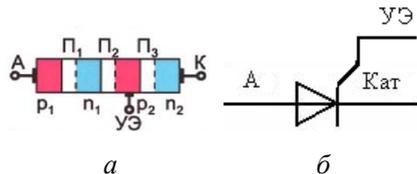


Рис. 5.9. Структура тиристора с катодным управлением (а) и его условное изображение (б)

Классификация полупроводниковых устройств

Полупроводниковые устройства по своим функциональным задачам можно разделить на три группы: 1) преобразовательные, в том числе выпрямительные; 2) усилительные; 3) импульсные, включая логические.

Преобразовательные устройства осуществляют преобразование напряжения и тока источника энергии в напряжение и ток, необходимые приемнику энергии. Для преобразования синусоидальных напряжений и токов в постоянные служат выпрямительные устройства. Обратное преобразование осуществляют инверторы, а изменение значений постоянного напряжения и частоты синусоидального тока – преобразователи напряжения и частоты. Преобразовательные устройства широко применяются в электроприводе, устройствах электросварки, электротермии и т. д.

В усилительных устройствах те или иные параметры сигналов увеличиваются до значений, необходимых для работы исполнительных органов. При помощи импульсных и логических устройств создают различные системы управления.

Выпрямители

По числу фаз источника выпрямленного синусоидального напряжения различают однофазные и многофазные (чаще трехфазные) выпрямители. По схемотехническому решению – с выводом нулевой точки трансформатора и мостовые. По возможностям регулирования выпрямленного напряжения – неуправляемые и управляемые.

В неуправляемых выпрямителях для выпрямления синусоидального напряжения включаются диоды, т. е. неуправляемые вентили, а для сглаживания выпрямленного напряжения – как правило, обычные емкостные фильтры.

В цепи диода однополупериодного выпрямителя (рис. 5.10) ток может протекать только при положительной полярности приложенного к диоду напряжения. При изменении полярности напряжения диод запирается и ток прекращается. В результате при синусоидальном входном напряжении $u_{вх}$ в нагрузке протекает пульсирующий ток одного направления. Такую же форму имеет и выходное (выпрямленное) напряжение на нагрузке $u_{вых}$.

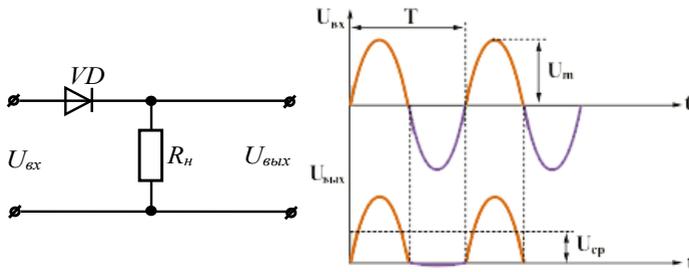


Рис. 5.10. Схема однополупериодного выпрямителя

Напряжение на нагрузке состоит из положительных полувольт, его среднее значение (постоянная составляющая) для однополупериодного выпрямителя без фильтра равно

$$U_0 = \frac{U_{вх. max}}{\pi} = 0,45U_{вх},$$

где $U_{вх. max}$, $U_{вх}$ – амплитудное и действующее значения синусоидального входного напряжения соответственно.

Для увеличения среднего напряжения на нагрузке используют двухполупериодные схемы выпрямления (мостовые).

В однофазной мостовой схеме выпрямления (рис. 5.11), когда источник переменного напряжения включен в одну диагональ, а нагрузка – в другую, диоды работают попарно.

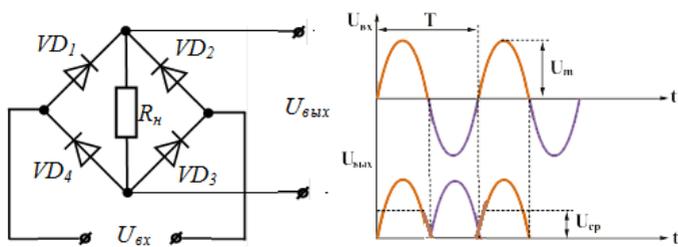


Рис. 5.11. Схема двухполупериодного выпрямителя

В первый период, когда от источника действует положительная полуволна, диоды 1 и 3 проводят ток, а 2 и 4 закрыты. Во второй полупериод диоды 2 и 4 открыты, а 1 и 3 не пропускают ток. Ток через нагрузку протекает все время в одном и том же направлении.

По сравнению с однополупериодным в два раза увеличивается постоянная составляющая выпрямленного напряжения:

$$U_0 = \frac{2U_{\text{вх. max}}}{\pi} = 0,9U_{\text{вх}}.$$

Работа выпрямительного устройства характеризуется коэффициентом пульсации. Коэффициентом пульсации напряжения (тока) называют величину, равную отношению амплитудного значения (максимальной величины) переменной составляющей выпрямленного напряжения (тока) $U_{m\sim}$ к постоянной составляющей (среднему значению) U_0 :

$$k_n = \frac{U_{m\sim}}{U_0} = \frac{\sqrt{2}U_{\sim}}{U_0}.$$

Коэффициент пульсации для однополупериодного выпрямителя без фильтра:

$$k_n = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Коэффициент пульсации для двухполупериодного выпрямителя без фильтра:

$$k_n = \frac{\pi}{4} = 0,785.$$

Примеры решения задач

Задача 5.1. VD – идеальный диод. Какие значения покажут приборы (рис. 5.12), если $R = 10 \text{ Ом}$, $E = 25 \text{ В}$?

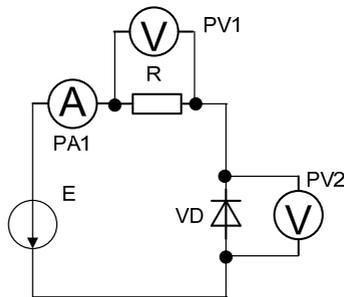


Рис. 5.12. Расчетная электрическая цепь

Решение. Сопротивление идеального диода току в прямом направлении равно нулю. Поэтому значение силы тока найдем как

$$I = \frac{E}{R} = \frac{25}{10} = 2,5 \text{ A.}$$

Вольтметр PV2 покажет напряжение ноль, а все напряжение источника будет приложено к резистору, и вольтметр PV1 покажет 25 В.

Задача 5.2. VD – идеальный диод. Что покажут приборы (рис. 5.13), если $R = 10 \text{ Ом}$, $E = 10 \text{ В}$?

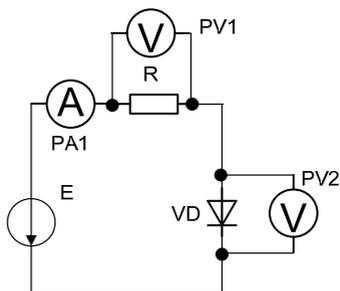


Рис. 5.13. Расчетная электрическая цепь

Решение. Сопротивление идеального диода току в обратном направлении равно бесконечности. Поэтому значение силы тока в цепи равно нулю. Напряжение на резисторе, соответственно, будет равно нулю, а вольтметр PV2 покажет напряжение ЭДС 10 В.

Задача 5.3. Напряжение стабилизации стабилитрона СГП при силе тока $I = 30 \text{ мА}$ составляет 152,5 В, при силе тока $I = 5 \text{ мА}$ равно 150 В. Вычислить наибольшее и наименьшее сопротивление стабилитрона постоянному току.

Решение. Наименьшее сопротивление стабилитрона постоянному току

$$R_{\text{мин}} = \frac{U_{\text{СТ}}}{I_{\text{макс}}} = \frac{152,5}{30 \cdot 10^{-3}} = 5083 \text{ Ом.}$$

Наибольшее сопротивление стабилитрона постоянному току

$$R_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{СТ}}}{I_{\text{мин}}} = \frac{150}{5 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ кОм.}$$

Задача 5.4. Известны динамическое сопротивление стабилитрона $R_d = 24 \text{ Ом}$, его ток $I_{CT} = I_H = 5 \text{ мА}$, а также напряжения $U_{CT} = 10 \text{ В}$ и $U_{вх} = 15 \text{ В}$. Определить необходимое балластное сопротивление, коэффициент стабилизации и КПД стабилизатора (рис. 5.3).

Решение. Так как входное напряжение $U_{вх} = U_{вых} + I \cdot R_0$, а общий ток цепи $I = I_{CT} + I_H$, то искомое балластное сопротивление

$$R_0 = \frac{U_{вх} - U_{CT}}{I_{CT} + I_H} = \frac{5}{5 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Ом}.$$

Коэффициент стабилизации определяется из соотношения

$$k_{стU} = \frac{R_0 U_{CT}}{R_d U_{вх}} = \frac{500 \cdot 10}{24 \cdot 15} = 14.$$

КПД стабилизатора определяется как соотношение мощности, выделяемой в нагрузку, к мощности входного источника, т. е.

$$\eta = \frac{I_H U_{CT}}{I U_{вх}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{0,01 \cdot 15} = 0,33.$$

Задача 5.5. Вычислить силу тока коллектора биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой, если напряжение $U_H = -20 \text{ В}$, а сопротивление нагрузки $R_H = 5000 \text{ Ом}$.

Решение. Сила тока коллектора биполярного транзистора (рис. 5.6, в) равна

$$I_K = \frac{U_K}{R_H} = \frac{20}{5000} = 4 \text{ мА}.$$

Задача 5.6. В транзисторе КТ315А, включенном по схеме с общим эмиттером, ток базы изменился на $0,1 \text{ мА}$. Определить изменение тока эмиттера, если коэффициент передачи тока базы $\alpha = 0,975$.

Решение. Определяем изменение тока коллектора:

$$\Delta I_K = \beta \Delta I_B = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \Delta I_B = \frac{0,975 \cdot 0,1}{1 - 0,975} = 3,9 \text{ мА}.$$

Находим изменение тока эмиттера:

$$\Delta I_E = \Delta I_K + \Delta I_B = 3,9 + 0,1 = 4 \text{ мА}.$$

Задача 5.7. Напряжение на коллекторе транзистора равно 50 В , а мощность рассеивания на нем составляет 3 Вт . Определить силу тока в цепи коллектора.

Решение. Мощность потерь на коллекторе $P_k = I_k U_k$, отсюда сила тока в цепи коллектора

$$I_k = \frac{P_k}{U_k} = \frac{3}{50} = 0,06 \text{ А} = 60 \text{ мА}.$$

Задача 5.8. Заданы коэффициент передачи биполярного транзистора $\beta = 50$, обратный ток коллектор – база $I_{кб} = 10 \text{ мкА}$. Найти токи $I_k, I_э, I_б$ при включениях с ОБ и ОЭ, если ток коллектора одинаков в обоих случаях, а соотношение между управляющими токами $I_э = 55I_б$.

Решение. Воспользовавшись соотношениями токов в схемах с ОБ и ОЭ и соотношениями между коэффициентами передачи α и β , запишем систему уравнений:

$$\begin{aligned} I_k &= 50(I_б + 10), \text{ мкА}; \\ I_k &= 0,98 \cdot 55 \cdot I_б + 10, \text{ мкА}. \end{aligned}$$

Решив систему относительно тока базы, получим $I_б = 0,122 \text{ мА}$. Ток эмиттера $I_э = 55I_б = 6,7 \text{ мА}$, ток коллектора $I_k = 6,6 \text{ мА}$.

Задача 5.9. В схеме однополупериодного выпрямителя (рис. 5.14) через диод проходит выпрямленный ток $I_0 = 75 \text{ мА}$. Определить сопротивление нагрузки R_n , если амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2r} = 200 \text{ В}$.

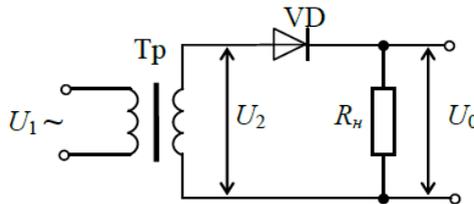


Рис. 5.14. Расчетная электрическая цепь

Решение. Выпрямленное напряжение на нагрузке для однополупериодного выпрямителя:

$$U_0 = \frac{U_{2r}}{\pi}.$$

Сопротивление нагрузки:

$$R_n = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_{2r}}{\pi I_0} = \frac{200}{3,14 \cdot 75 \cdot 10^{-3}} = 849 \text{ Ом}.$$

Задача 5.10. Для схемы двухполупериодного выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром (рис. 5.15) определить коэффициент сглаживания q , если известно, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U'_{2\tau} = 300$ В, выпрямленный ток, проходящий через нагрузку, $I_0 = 200$ мА, частота сети $f_c = 50$ Гц, индуктивность дросселя $L_\phi = 10$ Гн.

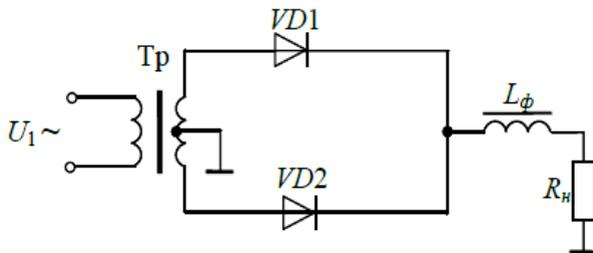


Рис. 5.15. Расчетная электрическая цепь

Решение. Выпрямленное напряжение на нагрузке:

$$U_0 = \frac{2U'_{2\tau}}{\pi} = \frac{2 \cdot 300}{3,14} = 191 \text{ В.}$$

Сопротивление нагрузки:

$$R_n = \frac{U_0}{I_0} = \frac{191}{200 \cdot 10^{-3}} = 955 \text{ Ом.}$$

Частота пульсации на выходе двухполупериодного выпрямителя:

$$f_n = 2f_c = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Гц.}$$

Индуктивное сопротивление фильтра по основной гармонике:

$$x_{1\phi} = 2\pi f_n L_\phi = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10 = 6280 \text{ Ом.}$$

Тогда коэффициент сглаживания индуктивного фильтра определяется как

$$q = \frac{x_{1\phi}}{R_n} = \frac{6280}{955} = 6,6.$$

Задача 5.11. Действующее значение входного напряжения выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, — 390 В. При сопротивлении нагрузочного резистора 1400 Ом постоянная составляющая выпрямленного напряжения равна 350 В. Найти постоянную составляющую выпрямленного тока. Определить число последова-

тельно включенных диодов в плече мостовой схемы, если максимально допустимое обратное напряжение каждого диода — 300 В.

Решение. Амплитудное значение входного напряжения $U_{m\text{ вх}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{вх}} \approx 550$ В. Значение максимального обратного напряжения в схеме будет $U_{\text{обр}} = 550$ В.

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_0 = \frac{U_0}{R_{\text{н}}} = \frac{350}{1400} = 0,25 \text{ А.}$$

Число последовательно включенных диодов в плече схемы определяется отношением максимально обратного напряжения схемы к максимально допустимому напряжению диода:

$$N \geq \frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{макс.доп}}} = \frac{550}{300} = 1,83.$$

Принимаем $N = 2$.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 5.12. Для питания установки требуется стабилизированное напряжение $U = 120$ В при силе тока 10 мА. Определить величину ограничительного сопротивления, если для стабилизации напряжения используется стабилитрон, у которого $U_{\text{СТ}} = 150$ В.

Задача 5.13. Для стабилизатора напряжения (рис. 5.3) заданы входное напряжение 48 В и сопротивление нагрузки 50 Ом. Параметры стабилитрона: $U_{\text{СТ}} = 12$ В и $I_{\text{СТ}} = 200$ мА. Определить величину необходимого балластного сопротивления.

Задача 5.14. Изменение напряжения в цепи эмиттера $\Delta U_{\text{э}} = 0,0125$ В, а изменение силы тока в этой же цепи равно 0,5 мА. Вычислить входное сопротивление биполярного транзистора с общей базой (рис. 5.6, б).

Задача 5.15. Амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора двухполупериодной схемы выпрямителя (рис. 5.16) $U'_{2\text{т}} = 210$ В. Определить выпрямленный ток I_0 , проходящий через каждый диод, если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 510$ Ом.

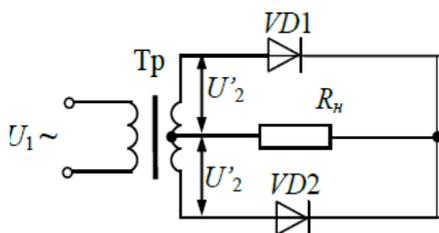


Рис. 5.16. Расчетная электрическая цепь

Тесты для самоконтроля

1. Как условно изображаются: диод, стабилитрон, биполярный транзистор, полевой транзистор и тиристор?
2. Каково соотношение между прямым $R_{пр}$ и обратным $R_{обр}$ сопротивлениями полупроводникового диода?
3. Какие диоды работают в режиме пробоя?
4. Как вычисляются динамическое сопротивление и коэффициент стабилизации стабилитрона?
5. Какие функции выполняют эмиттер и коллектор в транзисторе?
6. Что такое коэффициенты α и β . Какова их взаимосвязь?
7. Как определить величину среднего значения напряжения в нагрузке выпрямителей при известном напряжении вторичной обмотки трансформатора?

Описание текущего контроля

Формы и виды текущего контроля успеваемости студентов определяются рабочими программами. Текущий контроль успеваемости студентов является постоянным, осуществляется в течение семестра по итогам участия студентов в практических занятиях и посредством реализации балльной-рейтинговой системы.

В ходе практических занятия выясняется степень усвоения студентами понятий и терминов по заданным темам, умение студентов применять полученные знания для решения типовых задач по заданной теме.

При оценивании работы студента на практическом занятии обращается внимание на правильность ответов при решении типовых задач. На занятии студенту предлагается решить определенное количество задач на заданную тему.

Критерии оценки:

- *2 балла* выставляется студенту, если решены правильно все задачи;
- *1 балл* выставляется студенту, если задачи решены с ошибками;
- *0 баллов* выставляется студенту, если он не решил предложенные ему задачи.

Библиографический список

1. Нагаев, Д. А. Электротехника и электроника / Д. А. Нагаев, С. В. Шлыков ; Тольяттинский государственный университет. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – URL: edu.rosdistant.ru/course/view.php?id=332 (дата обращения: 27.09.2022).
2. Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники : учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. – 10-е изд., стер. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2019. – 735 с. – URL: e.lanbook.com/book/112073 (дата обращения: 27.09.2022). – ISBN 978-5-8114-0523-7.
3. Анисимова, М. С. Электротехника и электроника : курс лекций / М. С. Анисимова, И. С. Попова ; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – Москва : МИСиС, 2019. – 131 с. – URL: e.lanbook.com/book/116939 (дата обращения: 27.09.2022). – ISBN 978-5-907061-32-3.
4. Ермуратский, П. В. Электротехника и электроника : учебник / П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин. – 2-е изд. – Саратов : Профобразование, 2019. – 416 с. – URL: www.iprbookshop.ru/88013.html (дата обращения: 27.09.2022). – ISBN 978-5-4488-0135-8.
5. Комиссаров, Ю. А. Общая электротехника и электроника : учебник / Ю. А. Комиссаров, Г. И. Бабокин ; под ред. П. Д. Саркисова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 478, [1] с. – (Высшее образование – Бакалавриат). – URL: znanium.com/catalog/product/1093351 (дата обращения: 27.09.2022). – ISBN 978-5-16-010416-4.

Глоссарий

Векторная диаграмма — это совокупность расположенных на комплексной плоскости векторов, изображающих синусоидальные функции времени — напряжения и тока.

Ветвь — это часть схемы, содержащая один или несколько последовательно соединенных элементов цепи, через которые течет одинаковый ток, и заключенная между двумя узлами.

Действующее значение периодического тока равно по величине такому постоянному току, который, проходя через неизменное сопротивление R , за период времени T выделяет то же количество тепла, что и данный ток i .

Емкостное сопротивление — это сопротивление элемента, связанное с созданием внутри и вокруг него переменного электрического поля. Оно зависит от материала элемента, его размеров, конфигурации и частоты тока.

Индуктивное сопротивление — это сопротивление элемента, связанное с созданием вокруг него переменного или изменяющегося магнитного поля. Оно зависит от конфигурации и размеров элемента, его магнитных свойств и частоты тока.

Источники электрической энергии — гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы и другие устройства, в которых происходит процесс преобразования химической, тепловой, механической или другого вида энергии в электрическую.

Источник тока — элемент, ток которого не зависит от параметров цепи, которую он питает.

Источник ЭДС — это элемент, напряжение между зажимами которого не зависит от величины тока, отдаваемого во внешнюю цепь.

Контур (замкнутый контур) — совокупность ветвей, образующих путь, при перемещении вдоль которого мы можем вернуться в исходную точку, не проходя более одного раза по каждой ветви и по каждому узлу.

Мгновенное значение тока (напряжения) — значение тока (напряжения) в данный момент времени.

Напряжение (U) — это величина, численно равная работе по перемещению единицы электрического заряда между двумя произвольными точками электрической цепи. Напряжение измеряется в вольтах (В).

Независимый контур — это замкнутый участок электрической цепи, проложенный через ветви цепи, содержащий хотя бы одну новую ветвь, не использованную при поиске других независимых контуров. Имеет не менее одной новой ветви и не получается из контуров, для которых уже написаны уравнения, путем удаления из этих контуров общих ветвей.

Параллельное соединение элементов цепи — такое соединение, когда ветви цепи присоединяются к одной паре узлов. Параллельные ветви находятся под общим напряжением.

Переменный ток — ток, который периодически изменяется как по величине, так и по знаку. Переменные токи подразделяются на синусоидальные и несинусоидальные.

Период (T) — время, по истечении которого мгновенные значения периодических величин повторяются.

Последовательное соединение элементов цепи — такое соединение, при котором через все эти элементы протекает один и тот же ток.

Постоянный ток — ток, неизменный во времени.

Приемники электрической энергии (или так называемая нагрузка) — электрические лампы, электронагревательные приборы, двигатели и другие устройства, в которых электрическая энергия превращается в световую, тепловую, механическую.

Проводимость — величина, обратная сопротивлению.

Резонанс — это такой режим электрической цепи, содержащей емкости и индуктивности, при котором общее входное сопротивление или входная проводимость цепи будут чисто активными.

Резонанс напряжений — это резонанс при последовательном соединении участков цепи с индуктивным и емкостным характером.

Резонанс токов — это резонанс при параллельном соединении участков цепи с индуктивным и емкостным характером.

Синусоидальный ток — ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону.

Сопротивление — это способность элемента электрической цепи противодействовать в той или иной степени прохождению по нему электрического тока. Сопротивление, в общем случае, зависит от материала элемента, его размеров, температуры, частоты тока и измеряется в омах (Ом).

Узел электрической цепи – место (точка) соединения трех и более ветвей.

Частота – величина, обратная периоду. Единицей измерения частоты служит герц (Гц).

Электрическое поле – это частная форма проявления электромагнитного поля. Оно создается электрическими зарядами или переменным магнитным полем.

Электрическая схема – это графическое изображение электрической цепи.

Электрический ток – это направленное движение электрических зарядов в веществе или вакууме под воздействием электрического поля. Ток характеризуется силой, измеряемой в амперах (А). Для установившихся режимов различают два вида токов: постоянный и переменный.

Электрическая цепь – совокупность устройств, предназначенных для прохождения электрического тока.

Элементы электрической цепи – источники электрической энергии, активные и реактивные сопротивления.

Электродвижущая сила (ЭДС) – это сила, способная совершать работу по перемещению в электрической цепи электрических зарядов. ЭДС измеряется в вольтах (В) и обозначается латинской буквой *E*.