

Кафедра электротехники и электромеханики

Электротехника и электроника

Ч. 1. Электротехника

Учебно-методический комплекс

Институт машиностроительно - технологический

Специальности:

- 151001.65** – технология машиностроения
- 150104.65** – литейное производство черных и цветных металлов
- 150202.65** – оборудование и технология сварочного производства
- 150501.65** – материаловедение в машиностроении
- 261001.65** – технология художественной обработки материалов
- 240401.65** – химическая технология органических веществ
- 240301.65** – химическая технология неорганических веществ

Институт приборостроения и систем обеспечения безопасности

Специальности:

- 200101.65** – приборостроение
- 280202.65** – инженерная защита окружающей среды
- 200402.65** – инженерное дело в медико-биологической практике
- 200501.65** – метрология и метрологическое обеспечение

Институт автомобильного транспорта

Специальности:

- 190205.65** – подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование
- 190601.65** – автомобили и автомобильное хозяйство
- 190701.65** – организация перевозок и управление на транспорте

Институт информационных систем и вычислительной техники

Специальность:

- 230101.65** – вычислительные машины, комплексы, системы и сети

Институт радиоэлектроники

Специальности:

- 210201.65** – проектирование и технология радиоэлектронных средств

Институт энергетический

Специальности:

- 140101.65** – тепловые электрические станции
- 140104.65** – промышленная теплоэнергетика

Направления подготовки бакалавра:

- 151000.62, 200100.62, 150100.62, 280200.62, 200500.62, 210200.62, 140100.62, 230100.62, 220100.62

Утверждено редакционно-издательским советом университета
УДК 621.3(07)

Электротехника и электроника. Ч. 1. Электротехника.: учебно-методический комплекс / сост.: А.Л. Виноградов, М.Е. Евсеев, Прокофьев.
–СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 376 с.

Учебно-методический комплекс (УМК) разработан в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

В УМК рассмотрены основы анализа и расчета электрических и магнитных цепей, электрические измерения и электрические машины.

Рассмотрено на заседании кафедры электротехники электромеханики 19 октября 2007 г., одобрено методической комиссией энергетического института 25 октября 2007 г.

Рецензенты: кафедра электротехники и электромеханики (зав кафедрой В. И. Рябуха, д-р техн. наук, проф.); Ю. В. Куклев, канд. техн. наук, доц; С. И. Джаншиев канд. техн. наук, доц.

Составители: А.Л. Виноградов, канд, техн. наук, доц.;
М.Е. Евсеев, канд. техн. наук, доц.;
В.Н. Прокофьев канд, техн. наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2007
© А.Л. Виноградов, М.Е. Евсеев, В.Н. Прокофьев, 2007

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие

Электротехника является областью науки, которая занимается изучением электротехнических и магнитных явлений и их техническим использованием в практических целях.

Дисциплина "Электротехника и электроника" для специальностей 240301.65, 240401.65, 190701.65, 261001.65, 280202.65, 150104.65, 190205.65, 140101.65, 140104.65, 190601.65, 151001.61, 151001.65, 150202.65, 150501.65, 230101.65, 200501.65, 210201.65 состоит из двух частей – часть 1 и часть 2. Часть 1 изучается в первом семестре третьего курса. Областью изучения этой части является электротехника. Часть 2 изучается в следующем семестре третьего курса. Областью изучения этой части является электроника. Данный комплекс посвящен электротехнике.

Специальности **220100.62, 200102.65, 200102.65, 200402.65** изучают дисциплину «Общая электротехника», которая достаточно близка к дисциплине «Электротехника и электроника. Ч. 1». Специальность 080502 изучают дисциплину «Электротехника», которая также близка к дисциплине «Электротехника и электроника. Ч. 1». В дальнейшем в тексте эти дисциплины будем называть общим названием «Электротехника и электроника. Ч. 1» или «Электротехника».

Изучение первой части дисциплины согласно рабочей программе осуществляется с дифференциацией по специальностям (см. рабочую программу).

Целью изучения дисциплины является изучение основных вопросов теории электротехнических цепей, магнитных цепей и электрических машин.

Задачи изучения дисциплины – усвоение и понимание явлений, происходящих в электрических и магнитных цепях и в электрических машинах.

В результате изучения дисциплины студент должен овладеть основами знаний по дисциплине, формируемыми на нескольких уровнях.

Иметь представление:

– об устройстве и принципе действия разнообразной электротехнической аппаратуры, электрических машин и оборудования.

Знать:

- методы расчета цепей постоянного и переменного тока;
- методы расчета магнитных цепей;
- устройство, принцип действия электротехнической аппаратуры, электрических машин постоянного и переменного тока.

Уметь применять полученные знания для изучения последующих дисциплин, использующих теорию электротехники.

Владеть:

- методами расчета цепей постоянного и переменного тока;
- методами расчета магнитных цепей;
- особенностями эксплуатации электрических машин.

Для изучения дисциплины необходимы знания следующих дисциплин и их разделов:

по физике – электричество и магнетизм, колебания и волновое движение, физику твердого тела, физические величины и единицы их измерения;

по высшей математике – дифференциальное и интегральное исчисление, дифференциальные уравнения и методы их решения, ряды, функции комплексной переменной;

по вычислительной математике и программированию – приближенные вычисления, численные методы решения;

по вычислительной технике – основы программирования и функционирования ЭВМ;

по основам метрологии и стандартизации – международную систему единиц (СИ), методы и средства измерения электрических и магнитных величин, условное графическое изображение электрических, магнитных и полупроводниковых элементов, схемы и их выполнение;

по экономике – экономические критерии в электротехнике, повышение коэффициента полезного действия и коэффициента мощности электротехнических устройств, надежность.

Приобретенные знания студентами будут непосредственно использованы при изучении следующих дисциплин: «Электротехника и электроника. Ч. 2», «Метрология, стандартизация и сертификация, взаимозаменяемость» и др. в зависимости от специальности студента.

Изучение дисциплины осуществляется с дифференциацией по специальностям, указанной в табл. 1 и 2.

Структура учебно-методического комплекса представлена на рисунке.

Рабочая программа разбита на 7 разделов, каждый из которых состоит из нескольких тем. Все темы состоят из параграфов, отмеченных соответствующими цифрами 1, 2, 3...

В зависимости от специальности студенты изучают только те параграфы, которые указаны в соответствующем столбце рабочей программы, представленной в виде табл. 2. Так же в зависимости от специальности студенты выпол-

няют лабораторные работы и практические занятия только те, которые указаны в начале каждого раздела опорного конспекта.

В начале каждой темы перечислены ключевые понятия, на которые особенно необходимо обратить внимание.

Для проверки усвоения материала каждая тема опорного конспекта заканчивается *промежуточным тестированием*.

Контролем знания дисциплины является *контрольная работа*, которая состоит из задач, для решения которых необходимо изучить соответствующие разделы. Номера задач с дифференциацией по специальностям указаны в табл. 1. Студенты специальности 080502 контрольные работы не выполняют.

При изучении дисциплины следует руководствоваться табл. 1 и табл. 2.

В табл. 2 приведена рабочая программа.

В столбце 1 табл.1 указан номер шифра специальности.

В столбце 2 указано количество часов, необходимое для изучения дисциплины согласно ГОС.

В столбце 3 указан номер, под которым соответствующая специальность представлена в табл. 2. Например, номеру 4 в табл. 2 соответствует согласно табл. 1 две специальности 140101.65 и 140104.65.

Для студентов различных специальностей в начале каждого раздела указаны темы и номера параграфов, которые необходимо изучить.

В начале каждой темы перечислены ключевые понятия, на которые особенно необходимо обратить внимание.

Для проверки усвоения материала каждая тема опорного конспекта заканчивается **промежуточным тестированием**.

Итоговым контролем является *экзамен* или теоретический *зачет* (зависит от специальности).

Вопросы к экзамену и зачету приведены в разделе «Блок контроля освоения дисциплины».

Таблица 1

Номера задач

Специальность	Объем часов для дневной формы обучения	Номер специальности в табл. 2	Номера задач
1	2	3	4
240401.65	52	1	1, 3, 7, 8
240301.65	52	1	1, 3, 7, 8
261001.65	70	2	1, 3, 7, 8
280202.65	71	2	1, 3, 7, 8
190701.65	72	2	1, 3, 7, 8
140101.65	80	3	1, 3, 7, 8, 9
140104.65	90	3	1, 3, 7, 8, 9
150104.65	100	4	1, 3, 4, 7, 8, 9
190205.65	100	4	1, 3, 4, 7, 8, 9
190601.65	100	4	1, 3, 4, 7, 8, 9
151001.61	119	5	1, 3, 4, 7, 8, 9
151001.65	119	5	1, 3, 4, 7, 8, 9
150202.65	120	5	1, 3, 4, 7, 8, 9
220100.62	136	6	1, 3, 4, 7, 8, 9
200102.65	140	6	1, 3, 4, 7, 8, 9
200102.65	140	6	1, 3, 4, 7, 8, 9
150501.65	142	6	1, 3, 4, 7, 8, 9
230101.65	150	7	1, 3, 5, 7, 8, 9
200402.65	150	7	1, 2, 3, 5, 6, 7
200501.65	170	8	1, 2, 3, 5, 6, 7
210201.65	170	8	1, 2, 3, 5, 6, 7
080502.65	180	8	-

**Структура учебно-методического комплекса
«Электротехника и электроника. Ч. 1»**

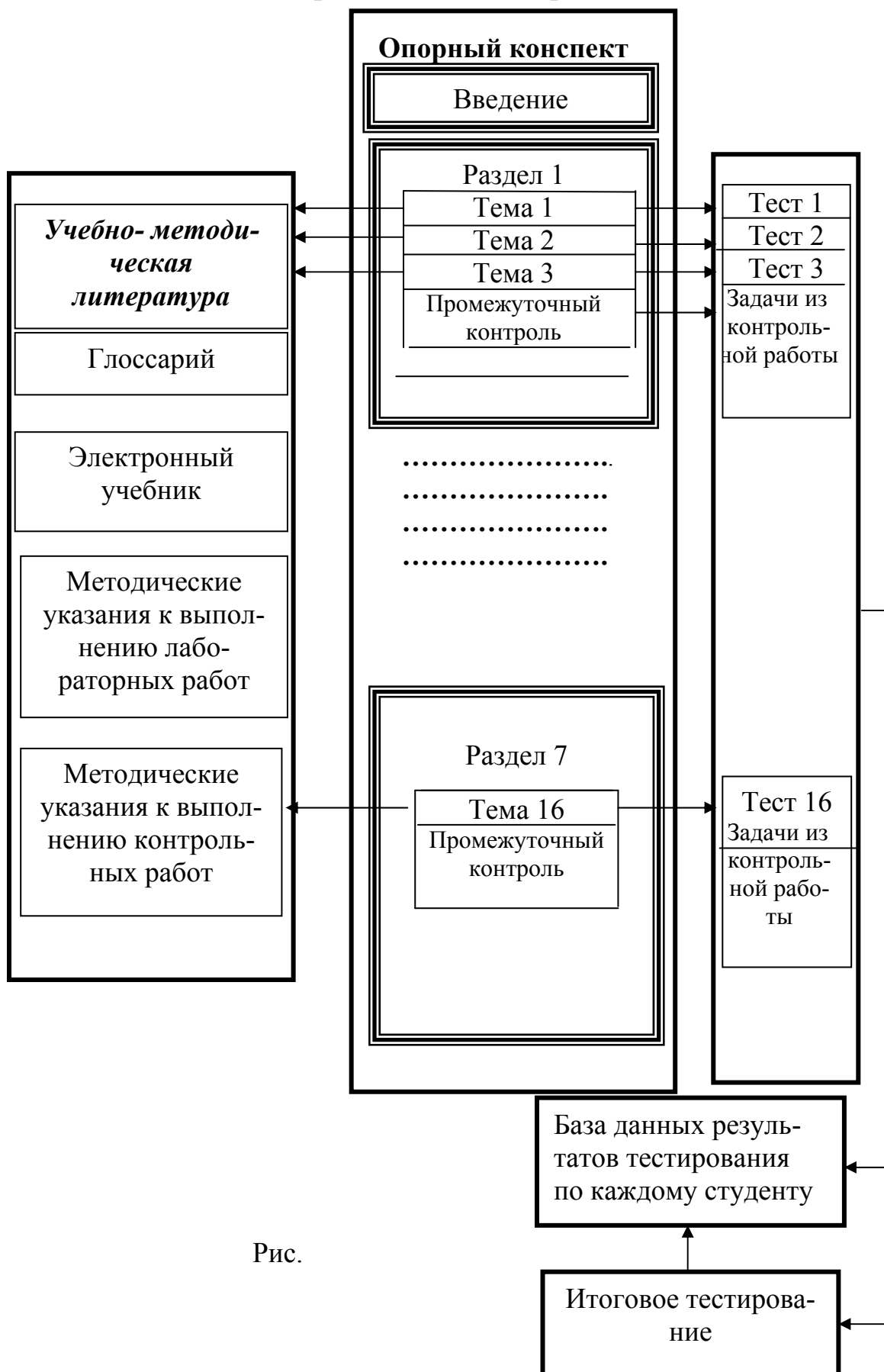


Рис.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

Государственный образовательный стандарт (ГОС)

Общая электротехника и электроника. Введение. Электрические и магнитные цепи. Основные определения, топологические параметры и методы расчета электрических цепей. Анализ и расчет линейных цепей переменного тока. Анализ и расчет электрических цепей с нелинейными элементами. Анализ и расчет магнитных цепей. Электромагнитные устройства и электрические машины. Электромагнитные устройства. Трансформаторы. Машины постоянного тока – МПТ. Асинхронные машины. Синхронные машины. Электрические измерения.

Выше приведен ГОС для специальности 200501.65, который наиболее полно отражает ГОС других специальностей. Вопросы электроники не указаны в этом ГОС, так как они являются предметом изучения второй части дисциплины электротехника и электроника. Имеющаяся дифференциация в ГОС для других специальностей отражена в рабочей программе. Поэтому рабочая программа составлена с учетом этой дифференциации по специальностям.

Объем дисциплины и виды учебной работы

по дисциплине «Электротехника и электроника. Ч. 1» для специальностей, имеющих количество часов по дневной форме обучения в пределах 136–170 часов (220100-62, 200102.65, 200102.65, 150501.65, 200402.65, 230101.65, 200501.65, 2100201.65).

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	Очная	Очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины	170		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	102	102	102
В т.ч. аудиторные занятия:	30	22	12
лекции	12	8	4
практические занятия (ПЗ)	12	8	4
лабораторные работы (ЛР)	0	0	0
семинары (С)			

другие виды аудиторных занятий			
Самостоятельная работа студента	68	68	68
Промежуточный контроль, количество	16	16	16
В т. ч. : курсовой проект (работа)	0	0	0
контрольная работа	0	1	1
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Экзамен		

Объем дисциплины и виды учебной работы

по дисциплине «Электротехника и электроника. Ч. 1» для специальностей, имеющих количество часов по дневной форме обучения в пределах 80–120 часов (150202.65, 151001.65, 151001.61, 190601.65, 190205.65, 150104.65, 140104.65, 140101.65).

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	Очная	Очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины	120		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	72	72	72
В т.ч. аудиторные занятия:	30	22	12
лекции	12	8	4
практические занятия (ПЗ)	12	8	4
лабораторные работы (ЛР)	0	0	0
семинары (С)			
другие виды аудиторных занятий			
Самостоятельная работа студента	48	48	48
Промежуточный контроль, количество	16	16	16
В т. ч.: курсовой проект (работа)	0	0	0
контрольная работа	0	1	1
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Экзамен		

Объем дисциплины и виды учебной работы

по дисциплине «Электротехника и электроника. Ч.1» для специальностей, имеющих количество часов по дневной форме обучения в пределах 52–72 часов (150202.65, 151001.65, 151001.65, 190601.65, 190205.65, 150104.65, 140104.65, 140101.65).

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	Очная	Очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины	72		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	44	44	44
В т.ч. аудиторные занятия:	30	22	12
лекции	12	8	4
практические занятия (ПЗ)	12	8	4
лабораторные работы (ЛР)	0	0	0
семинары (С)			
другие виды аудиторных занятий			
Самостоятельная работа студента	28	28	28
Промежуточный контроль, количество	16	16	16
В т. ч. : курсовой проект (работа)	0	0	0
контрольная работа	0	1	1
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Экзамен		

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа

Таблица 2

РАЗДЕЛ 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока	Номера специальностей							
Введение	Все специальности							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Электрическая цепь и ее характеристики [1], с. 9...32 или [2], с. 7...46 1. Электрическая цепь и ее основные элементы. 2. Приемники электрической энергии и их графическое изображение. 3. Источники электрической энергии: источники тока и напряжения (ЭДС). 4. Идеальные элементы и соотношения в них между током и напряжением.								
	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4	4	4	4
2. Цепи постоянного тока [1], с. 9...32 или [2], с. 7...46 1. Особенности цепей постоянного тока. 2. Законы Кирхгофа в цепях постоянного тока. 3. Расчет цепей постоянного тока с одним источником. 4. Расчет сложных цепей постоянного тока непосредственно по 1-му и 2-му законам Кирхгофа. 5. Баланс мощностей цепи постоянного тока.								
	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3	3	3	3
	—	—	4	4	4	4	4	4
	5	5	5	5	5	5	5	5
3. Цепи синусоидального тока [1], с. 32...78 или [2], с. 46...98 1. Синусоидальные ЭДС, напряжения и токи. Амплитуда, частота и фаза колебаний. 2. Изображение синусоидальных величин вращающимися векторами. Векторные диаграммы, 3. Действующие значения синусоидальных процессов. 4. Элементы в цепи синусоидального тока. Полное, активное и реактивное сопротивления цепи. Цепи с последовательным и параллельным соединением элементов. 5. Мгновенная, активная, реактивная и полная мощности. Коэффициенты мощности и КПД. 6. Эквивалентные параметры линейного пассивного двухполюсника.								
	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4	4	4	4
	5	5	5	5	5	5	5	5

РАЗДЕЛ 2. Методы расчета электрических цепей								
4. Комплексный метод расчета электрических цепей синусоидального тока [1], с. 56...68 или [2], с. 61...72 1. Изображение синусоидальных ЭДС напряжений и токов комплексными числами. Сущность комплексного метода расчета электрических цепей. 2. Изображение в комплексной форме уравнений связи между мгновенными синусоидальными током и напряжением в идеализированных элементах цепи R, L, C . Переход от комплексных токов и напряжений к соответствующим синусоидальным напряжениям и токам. 3. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Комплексные сопротивление, проводимость, мощность. 4. Расчет электрической цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов.		1	1	1	1	1	1	1
		2	2	2	2	2	2	2
		3	3	3	3	3	3	3
		4	4	4	4	4	4	4
5. Методы расчета сложных цепей синусоидального тока [1], с.56...68 или [2], с.61...72 1. Метод расчета, основанный на непосредственном применении 1-го и 2-го законов Кирхгофа 2. Метод контурных токов. 3. Метод узловых напряжений (узловых потенциалов). 4. Метод эквивалентного источника. 5. Метод наложения. 6. Баланс мощностей цепи синусоидального тока.		1	1	1	1	1	1	1
		—	—	2	2	2	2	2
		—	—	—	3	3	3	3
		—	—	—	—	5	5	4
		—	—	—	—	—	5	5
		—	—	—	—	6	6	6
РАЗДЕЛ 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи								
6. Резонансные явления. Индуктивно-связанные цепи [1], с. 42...47 или [2], с. 56...62 1. Определение резонанса. Резонанс в электрической цепи с последовательным соединением элементов R, L, C . Добротность контура. 2. Резонанс в электрических цепях с параллельным соединением элементов. 3. Частотные характеристики. 4. Индуктивно связанные катушки. 5. Расчет электрической цепи при наличии взаимной индуктивности.		1	1	1	1	1	1	1
		—	—	—	2	2	2	2
		—	—	—	—	—	—	3
		—	—	—	—	—	—	4
		5	5	5	5	5	5	5

7. Трехфазные электрические цепи [1], с. 94...110 или [2], с. 107...123 1. Трехфазная система ЭДС. Соединение трехфазной цепи звездой и треугольником и их особенности. Фазные и линейные токи и напряжения. 2. Основные преимущества трехфазных цепей по сравнению с однофазными. 3. Симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. 4. Мощность трехфазной электрической цепи. 5. Общее понятие о вращающемся магнитном поле.	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2
	–	3	3	3	3	3	3
	–	4	4	4	4	4	4
	–	5	5	5	5	5	5
РАЗДЕЛ 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы							
8. Расчет линейных электрических цепей с несинусоидальными периодическими ЭДС, напряжениями и токами (10 часов) [1], с. 121...134 или [2], с. 123...130 1. Особенности установившихся процессов в линейных цепях с несинусоидальными периодическими ЭДС. Основы гармонического анализа. Ряды Фурье. Методика расчета цепи при воздействии на нее несинусоидальных периодических ЭДС. Действующие и средние значения несинусоидальных периодических ЭДС, напряжений и токов.	–	–	–	–	–	1	1
9. Переходные процессы в электрических цепях [1], с. 111...121 или [2], с. 130...142 1. Определение переходных процессов. Приведение задачи о переходном процессе к решению линейного дифференциального уравнения. 2. Законы коммутации. Начальные условия. Классический метод расчета переходных процессов. 3. Операторный метод расчета переходных процессов. 4. Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока с элементами R, L, C . 5. Преобразование Лапласа для анализа цепей.	–	–	–	1	–	–	1
	–	–	–	2	–	–	2
	–	–	–	–	–	–	3
	–	–	–	–	–	–	4
	–	–	–	–	–	–	5

РАЗДЕЛ 5. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля							
10. Нелинейные электрические и магнитные цепи постоянного тока [1], с. 143...166 или [2], с. 24...44 1. Особые свойства нелинейных электрических цепей. Нелинейные элементы: нелинейные сопротивления, нелинейные индуктивности, нелинейные емкости. Их параметры и характеристики. 2. Расчет электрических цепей постоянного тока графическим, аналитическим и численными методами. 3. Параметры магнитных цепей. Законы Кирхгофа для магнитных цепей. 4. Закон полного тока. Расчет магнитных цепей.	1	1	1	1	1	1	1
	—	—	2	2	2	2	2
	—	—	3	3	3	3	3
	—	—	4	4	4	4	4
11. Нелинейные электрические цепи переменного тока [1], т. 2, с. 6...113, 145...162 1. Периодические процессы в нелинейных электрических цепях с инерционными элементами. 2. Особенности периодических процессов в нелинейных цепях с безынерционными элементами. 3. Потери в сердечниках из ферромагнитного материала. 4. Уравнения, векторная диаграмма и эквивалентная схема катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником.	—	—	1	1	1	1	1
	—	—	2	—	—	2	2
	—	—	3	3	3	3	3
	—	—	—	—	4	4	4
РАЗДЕЛ 6. Электрические машины							
12. Трансформаторы [1], с. 257...300 или [2], с. 334...374 1. Назначение и принцип действия. 2. Холостой ход трансформатора. 3. Нагрузка трансформатора. 4. Схема замещения. 5. Внешняя характеристика трансформатора. 6. КПД трансформатора.	1	1	1	1	1	1	1
	—	—	2	2	2	2	2
	—	—	—	—	3	3	3
	—	—	—	—	—	4	4
	—	—	—	—	—	5	5
	—	—	—	—	—	6	6
13. Асинхронные машины [1], с. 257...300 или [2], с. 334...374 1. Устройство трехфазных асинхронных машин. Вращающееся магнитное поле. 2. Режимы работы трехфазной асинхронной машины. 3. Электродвижущие силы, индуцируемые в обмотках статора и ротора. 4. Токи в обмотках ротора. Электромагнитный момент. 5. Активная мощность и К.П.Д. Реактивная мощность и коэффициент мощности. 6. Механическая характеристика. 7. Пуск асинхронных двигателей.	1	1	1	1	1	1	1
	—	—	2	2	2	—	2
	—	—	—	3	3	—	3
	—	—	—	4	4	—	4
	—	—	—	5	5	—	5
	—	—	—	6	6	—	6

14. Синхронные машины [1], с. 300...312 или [2], с. 376...395								
1. Устройство синхронных машин. 2. Работа синхронных машин в режиме двигателя и генератора.	1	1	1	1	1	1	1	1
3. Уравнения электрического состояния и векторная диаграмма синхронного двигателя. 4. Электромагнитный момент и угловая характеристика синхронного двигателя. 5. Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя. 6. U-образные характеристики. 7. Пуск синхронного двигателя.	—	—	—	—	2	—	—	—
	—	—	—	—	3	—	—	—
	—	—	—	—	4	—	—	—
	—	—	—	—	5	—	—	—
	—	—	—	—	6	—	—	—
	—	—	—	—	7	—	—	—
15. Машины постоянного тока [1], с. 226...256 или [2], с. 297...334								
1. Устройство машин постоянного тока и получение ЭДС. 2. Конструктивные элементы современной машины постоянного тока. Режимы работы машины постоянного тока. 3. КПД машины. Электродвижущая сила якоря. Электромагнитный момент. 4. Магнитное поле машины при нагрузке. Основные полюса. Искрение на коллекторе. Добавочные полюса. 5. Способы возбуждения машин постоянного тока. 6. Область применения машин постоянного тока.	1	1	1	1	1	1	1	1
	—	—	—	2	2	2	—	—
	—	—	—	3	3	3	—	—
	—	—	—	4	4	4	—	—
	—	—	—	5	5	5	—	—
	—	—	—	6	6	6	—	—
РАЗДЕЛ 7. Электрические измерения и приборы								
16. Электрические измерения и приборы [1], с. 190...225 или [2], с. 252...292								
1. Процесс измерения. Приборы непосредственной оценки. Приборы электромеханической системы, их устройство и принцип действия. 2. Классы точности приборов. Регистрирующие приборы и осциллографы. 3. Измерения электрических, магнитных и неэлектрических величин. 4. Правила выбора измерительных приборов при проведении измерений. Оценка точности результатов измерений.	1	1	1	1	1	1	1	1
	—	—	2	2	2	2	2	2
	—	—	3	3	3	3	3	3
	—	—	4	4	4	4	4	4

2.2. Тематический план дисциплины

2.2.1. Тематический план дисциплины «Электротехника и электроника. Ч. 1» для очной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятель- ная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Всего	170	30	24	12	12	14	10	68				
1	Раздел 1. Электрические цепи постоянного и сину- соидального тока	37	6						12				
2	Тема 1. Электрическая цепь и ее характеристики			1						1			
3	Тема 2. Цепи постоянного тока			2	2	2				2		№ 1	
4	Тема 3. Цепи синусои- дального тока			4	2	2	2	2		3		№ 2	№ 1
5	Раздел 2. Методы расчета электрических цепей	28	6						12				
6	Тема 4. Комплексный ме- тод расчета электрических цепей синусоидального то- ка			2	2	2	2	2		4		№ 3	№ 2
7	Тема 5. Методы расчета сложных цепей синусои- дального тока									5			
8	Раздел 3. Резонанс, индук- тивно связанные цепи и трехфазные цепи	34	4						12				
9	Тема 6. Резонансные явле- ния. Индуктивно- связанные цепи			2			2	2		6			№ 3
10	Тема 7. Трехфазные элек- трические цепи			4	2	2	2	2		7		№ 4	№ 4
11	Раздел 4. Несинусоидаль- ные токи и напряжения и переходные процессы	12	4						4				
12	Тема 8. Расчет линейных электрических цепей с не- синусоидальными перио- дическими ЭДС, напряже- ниями и токами									8			
13	Тема 9. Переходные про- цессы в электрических це- пях			2			2			9			№ 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	Раздел 5. Нелинейные цепи	22	4						8				
15	Тема 10. Нелинейные электрические и магнитные цепи постоянного тока			2	4	4				10		№ 5	
16	Тема 11. Нелинейные цепи переменного тока									11			
17	Раздел 6. Электрические машины	30	4						16		№ 1		
18	Тема 12. Трансформаторы			2			2	2		12			
19	Тема 13. Асинхронные машины			1			2			13			
20	Тема 14. Синхронные машины									14			
21	Тема 15. Машины постоянного тока			1						15			
22	Раздел 7. Электрические измерения и приборы	7	2	1					4				
23	Тема 16. Электрические измерения и приборы									16			

2.2.2. Тематический план дисциплины «Электротехника и электроника. Ч. 1»
для **очно-заочной** формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Всего	170	22	30	8	16	8	16	70				
1	Раздел 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока	25	2						6				
2	Тема 1. Электрическая цепь и ее характеристики			1						1			
3	Тема 2. Цепи постоянного тока			2	2	2				2		№ 1	
4	Тема 3. Цепи синусоидального тока			4		2	2	2		3		№ 2	№ 1
5	Раздел 2. Методы расчета электрических цепей	34	6						14				
6	Тема 4. Комплексный метод расчета электрических цепей синусоидального тока			2	2	4	2	4		4		№ 3	№ 2

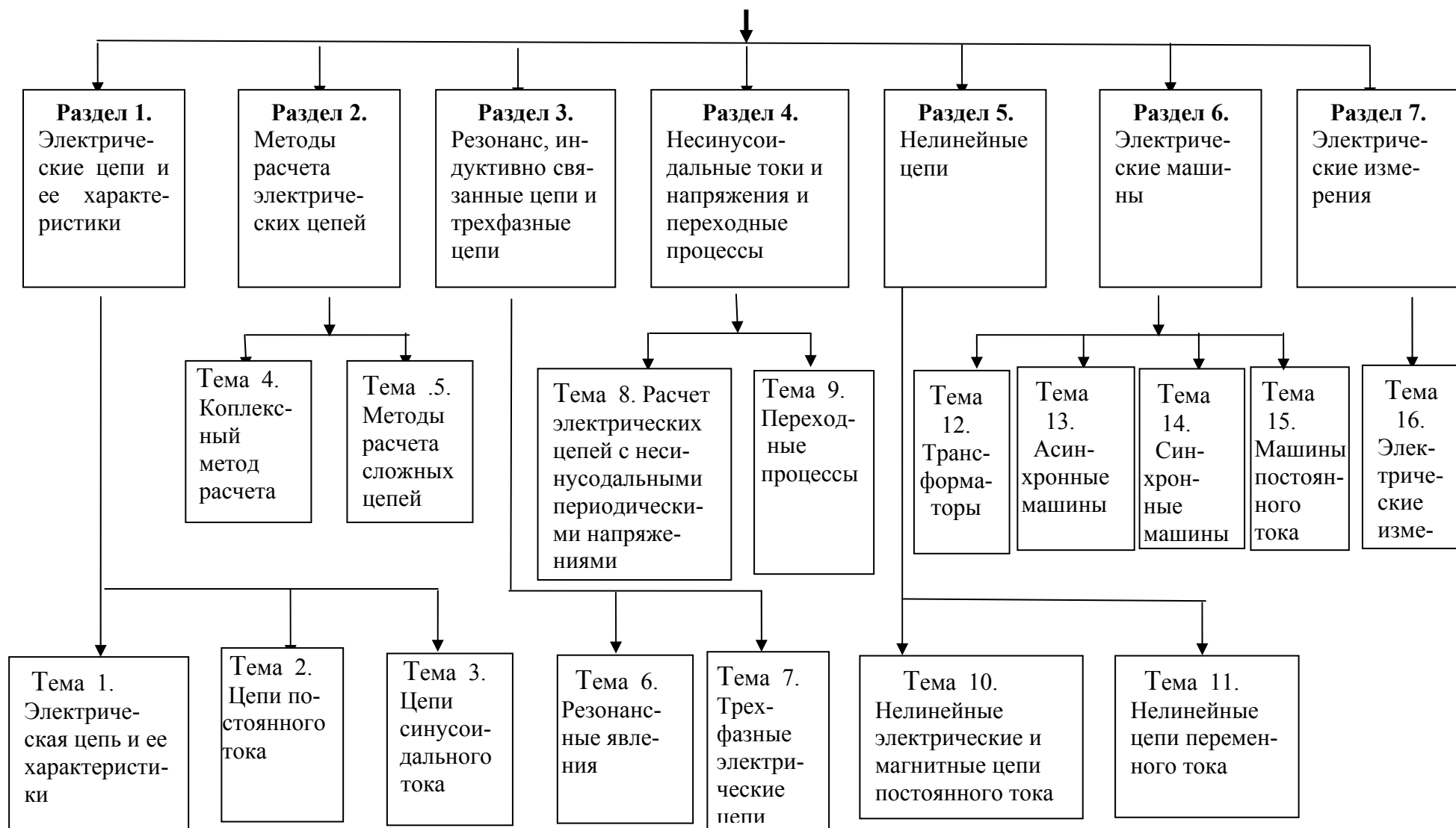
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		12	13	14
7	Тема 5. Методы расчета сложных цепей синусоидального тока									5			
8	Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи	32	2						10				
9	Тема 6. Резонансные явления. Индуктивно-связанные цепи			2				2		6			№ 3
10	Тема 7. Трехфазные электрические цепи			4	2	4	2	2				№ 4	№ 4
11	Раздел 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы	15	4						8	7			
12	Тема 8. Расчет линейных электрических цепей с несинусоидальными периодическими ЭДС, напряжениями и токами									8			
13	Тема 9. Переходные процессы в электрических цепях			1				2		9			№ 5
14	Раздел 5. Нелинейные цепи	22	4						8				
15	Тема 10. Нелинейные электрические и магнитные цепи постоянного тока			2	2	4				10		№ 5	
16	Тема 11. Нелинейные цепи переменного тока			2						11			
17	Раздел 6. Электрические машины	32	4						16		№ 1		
18	Тема 12. Трансформаторы			4				2		12			
19	Тема 13. Асинхронные машины			2			2			13			
20	Тема 14. Синхронные машины									14			
21	Тема 15. Машины постоянного тока			2						15			
22	Раздел 7. Электрические измерения и приборы	10		2					8				
23	Тема 16. Электрические измерения и приборы									16			

2.2.3. Тематический план дисциплины «Электротехника и электроника. Ч.1»
для **заочной** формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятель- ная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Всего	170	12	50	4	16	4	16	68				
1	Раздел 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока	24	2						6				
2	Тема 1. Электрическая цепь и ее характеристики			2						.1			
3	Тема 2. Цепи постоянного тока			4		2				2		№ 1	
4	Тема 3. Цепи синусоидального тока			4		2	2	2		3		№ 2	№ 1
5	Раздел 2. Методы расчета электрических цепей	33	2						14				
6	Тема 4. Комплексный метод расчета электрических цепей синусоидального тока			3	2	4		2		4		№ 3	№ 2
7	Тема 5. Методы расчета сложных цепей синусоидального тока			4						5			
8	Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи	32	2						10				
9	Тема 6. Резонансные явления. Индуктивно-связанные цепи			4				4		6			№ 3
10	Тема 7. Трехфазные электрические цепи			4	2	2	2	2		7		№ 4	№ 4
11	Раздел 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы	16	2						8				
12	Тема 8. Расчет линейных электрических цепей с несинусоидальными периодическими ЭДС, напряжениями и токами			2						8			
13	Тема 9. Переходные процессы в электрических цепях			2				2		9			№ 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	Раздел 5. Нелинейные цепи	22	2						8				
15	Тема 10. Нелинейные электрические и магнитные цепи постоянного тока			4	2	4				10		№ 5	
16	Тема 11. Нелинейные цепи переменного тока			2						11			
17	Раздел 6. Электрические машины	35	2						16		№ 1		
18	Тема 12. Трансформаторы			4				2		12			
19	Тема 13. Асинхронные машины			4				2		13			
20	Тема 14. Синхронные машины			1						14			
21	Тема 15. Машины постоянного тока			4						15			
22	Раздел 7. Электрические измерения и приборы	8		2					6				
23	Тема 16. Электрические измерения и приборы									16			

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «Электротехника и электроника. Ч. 1»



2.4. Временной график изучения дисциплины для очной формы обучения при использовании информационно-коммутационных технологий

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы) (из расчета – 4 часа в день)
1	Раздел 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока	9 дн.
2	Раздел 2. Методы расчета электрических цепей	8 дн.
3	Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи	9 дн.
4	Раздел 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы	2,5 дн.
5	Раздел 5. Нелинейные цепи	5,5 дн.
6	Раздел 6. Электрические машины	6 дн.
7	Раздел 7. Электрические измерения	2,5 дн.
8	Контрольная работа	3 дн.
9	Итого	46 дн.

**Временной график изучения дисциплины для очно-заочной
формы обучения
при использовании информационно-коммутационных технологий**

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы) (из расчета – 4 часа в день)
1	Раздел 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока	7 дн.
2	Раздел 2. Методы расчета электрических цепей	8 дн.
3	Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи	8 дн.
4	Раздел 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы	4 дн.
5	Раздел 5. Нелинейные цепи	5 дн.
6	Раздел 6. Электрические машины	7 дн.
7	Раздел 7. Электрические измерения	2 дн.
8	Контрольная работа	3 дн.
9	Итого	45 дн.

**Временной график изучения дисциплины для заочной формы обучения
при использовании информационно-коммутационных технологий**

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы) (из расчета – 4 часа в день)
1	Раздел 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока	7 дн.
2	Раздел 2. Методы расчета электрических цепей	8 дн.
3	Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи	8 дн.
4	Раздел 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы	4 дн.
5	Раздел 5. Нелинейные цепи	5 дн.
6	Раздел 6. Электрические машины	8 дн.
7	Раздел 7. Электрические измерения	2 дн.
8	Контрольная работа	3 дн.
9	Итого	44 дн.

2.5. Практический блок

Практические занятия

Номер и название раздела (темы)	Наименование практических занятий	Кол-во часов					
		Форма обучения					
		Очная		Очно-заочная		Заочная	
		Ауд. занятия	ДОТ	Ауд. занятия	ДОТ	Ауд. занятия	ДОТ
Тема 1	1. Расчет простых цепей постоянного тока	2	2	2	2	—	2
Тема 2	2. Расчет цепей синусоидального тока с помощью векторных диаграмм	2	2	—	2	—	2
Тема 4	3. Расчет цепей синусоидаль-	2	2	2	4	2	4

	ного тока комплексным методом						
Тема 7	4. Расчет трехфазных электрических цепей	2	2	2	4	2	4
Тема 10	5. Расчет магнитных цепей постоянного тока	4	4	2	4	—	4

Лабораторные работы

Номер и название раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Кол-во часов					
		Форма обучения					
		Очная		Очно-заочная		Заочная	
		Ауд. занятия	ДОТ	Ауд. занятия	ДОТ	Ауд. занятия	ДОТ
Раздел 1. Электрические цепи постоянного и синусоидального тока Тема 3. Цепи синусоидального тока	1. Исследование линейных цепей синусоидального тока, содержащих только сопротивление, только индуктивность и только емкость	2	2	2	2	2	2
Раздел 2. Методы расчета электрических цепей Тема 4. Комплексный метод расчета электрических цепей синусоидального тока	2. Исследование разветвленной цепи синусоидального тока с одним источником энергии	2	2	2	4		2

Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи							
Тема 6. Резонансные явления. Индуктивно связанные цепи	3. Исследование частотных свойств цепи с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости	2	2		2		4
Тема 7. Трехфазные электрические цепи	4. Исследование трехфазной осветительной цепи	2	2	2	2	2	2
Раздел 4. Несинусоидальные токи и напряжения и переходные процессы							
Тема 9. Переходные процессы в электрических цепях	5. Исследование переходных процессов в электрических цепях, содержащих один реактивный элемент	2			2		2
Раздел 6. Электрические машины							
Тема 12. Трансформаторы	6. Исследование однофазного двухобмоточного трансформатора	2	2		2		2
Тема 14. Синхронные машины	7. Исследование трехфазного асинхронного двигателя	2		2			2

2.6. Рейтинговая система оценки знаний

Лекционные занятия

Весь материал разбит на 16 лекционных тем. По каждой теме имеется тест из десяти вопросов. Количество тестов для разных специальностей не одинаково. Поэтому оценка ответов в баллах ведется следующим образом. Студент, ответивший правильно на все вопросы тестов, получает максимальную оценку – **100** баллов, за 90 % правильных ответов – 90 баллов, за 80 % правильных ответов – 80 баллов и т. д.

Практические, лабораторные занятия, контрольная работа

Количество практических, лабораторных занятий и задач в контрольной работе для разных специальностей не одинаково. Поэтому оценка ответов в

баллах ведется по каждому виду занятий аналогично оценке за лекционные занятия.

Правильное выполнение всех практических занятий оценивается в **100** баллов. Правильное выполнение всех лабораторных занятий оценивается в **100** баллов. Правильное выполнение всех задач в контрольной работе оценивается в **100** баллов. Количество баллов снижается в процентах за каждое не правильно выполненное задание, зависит от процента выполнения и округляется в большую сторону. Например, за 5 правильно выполненных задач из контрольной работы, состоящей из 6 задач, будет получено $100 \cdot 5/6 = 84$ баллов

Дополнительно, активно работая на занятиях, выполняя творческие задания, студент может заработать еще 50 баллов. Они складываются из следующих видов работ (табл. 3).

Таблица 3

Оценка творческих заданий

Тема	Количество заданий	Количество баллов за задание	Итого
Сложные цепи	2	5	10
Трехфазные цепи	4	5	20
Электрические машины	4	5	20
Итого максимальное количество баллов			50

Выполнение научной работы дополнительно оценивается в 50 баллов.

Итого каждый студент может получить не более 500 баллов

Оценка результатов обучения проводится в соответствии со следующей схемой (табл. 4)

Таблица 4

Ранжирование результатов

Оценка	Количество набранных баллов
Удовлетворительно (зачтено)	275...349
Хорошо	350...424
Отлично	425...500

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список

Основной:

1. *Иванов, И.И.* Электротехника: учеб. пособие. 2–е изд., доп. / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.С. Равдоник. – СПб.: Лань, 2003. – 496 с.
2. *Касаткин, А.С.* Электротехника: учеб. пособие. 6-е изд., перераб. / А.С. Касаткин. – М.: Academia, 2003. – 538 с.
3. *Евсеев, М.Е.* Теоретические основы электротехники. Установившиеся процессы в линейных электрических цепях. Анализ линейных электрических цепей при установившихся режимах работы: учеб. пособие / М.Е. Евсеев. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 240 с.
4. *Виноградов, А.Л.* Теоретические основы электротехники. Методы расчета переходных процессов в линейных электрических цепях. Нелинейные цепи : письменные лекции / А.Л. Виноградов, В.Н. Прокофьев. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 135 с.

Дополнительный:

5. *Воробьев, В.Е.* Электротехника. Электрические машины/ В.Е. Воробьев, В.В. Леонтьев. – СПб.: СЗПИ, 1997. – 54 с.
6. *Брандина, Е.П.* Общая электротехника. Электротехника. Электрические машины: метод. указ. к выполнению расчетно-графических работ / Е.П. Брандина. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 35 с.

3.2. Опорный конспект

ВВЕДЕНИЕ

Электрические и магнитные явления были известны в глубокой древности. Начало развития науки об электрических и магнитных явлениях принято считать, со времени опубликования Гильбертом результатов исследований электрических и магнитных явлений (1600 г.).

Важным этапом в развитии науки об электричестве были исследования атмосферного электричества, выполненные М. В. Ломоносовым совместно с академиком Г. В. Рихманом. Работы М. В. Ломоносова и работы Б. Франклина вскрывают природу атмосферного электричества.

Открытие явления электромагнитной индукции М. Фарадеем (1831 г.) знаменует начало эры электричества. В 1833 г. академик Э. Х. Ленц формулирует фундаментальный принцип электромагнитной инерции и положение об общности и обратимости явлений электромагнитной индукции и воздействия магнитного поля на проводники с током.

Разработка теории электромагнитных явлений Д. К. Максвеллом в «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873 г.) завершает создание классической теории электромагнетизма.

Опыты Г. Герца (1887—1889 гг.), работы П. Н. Лебедева (1895 г.) и изобретение радио А. С. Поповым (1895 г.) экспериментально подтверждают выводы теории о распространении электромагнитных волн.

Этим заканчивается начальный период развития классической теории электромагнитных явлений.

Академиком В. Ф. Миткевичем в течение ряда лет развивались и углублялись основные положения теории электромагнетизма. Ближайшие ученики В. Ф. Миткевича - П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман создали один из первых учебников по теоретическим основам электротехники. Теория электрических и магнитных явлений и теоретические основы электротехники излагались в книгах А. А. Эйхенвальда, К. А. Круга, К. М. Поливанова и других авторов.

Очень большой вклад внесли также русские ученые и в практическое развитие электротехники.

Электротехника как наука является областью знаний, которая занимается изучением электротехнических и магнитных явлений и их техническим использованием в различных областях техники.

В результате работы с данным курсом Вы овладеете научными знаниями по основным вопросам электротехники и тем самым обеспечите себе базовую электротехническую подготовку, необходимую для изучения последующих дисциплин.

Изучение дисциплины в соответствии с рабочей программой осуществляется с дифференциацией по специальностям (см. рабочую программу). Каждая специальность в рабочей программе обозначена соответствующей одной цифрой 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 (см. предисловие к УМК табл. 1).

Прежде чем начать изучать раздел, ознакомьтесь с нижеприведенной информацией, оформленной в виде таблиц к каждому разделу опорного конспекта, где указаны для каждой специальности номера тем, параграфов, входящих в соответствующую тему, задач, практических занятий и лабораторных работ, подлежащих к изучению и выполнению.

Требования к оформлению лабораторных работ, практических заданий и контрольных работ приводятся в руководствах по выполнению контрольных работ, практических занятий и лабораторных работ.

После теоретического материала каждой темы раздела приводятся вопросы для самопроверки. Они не оцениваются, но включают те же вопросы, на которые Вам придется отвечать при сдаче тестов, а потом и экзаменов. Поэтому советуем Вам отвечать на все вопросы для самопроверки. Для многих тем приводятся тренировочные тесты с ответами для пробного самотестирования. Они также не оцениваются, но помогают ответить на вопросы тестов по теме.

Каждая тема завершается сдачей контрольного теста. Тесты предоставляются Вам по Вашему запросу тьюторами, и время ответа на них ограничено. В случае превышения контрольного времени ответа набранные Вами баллы обнуляются.

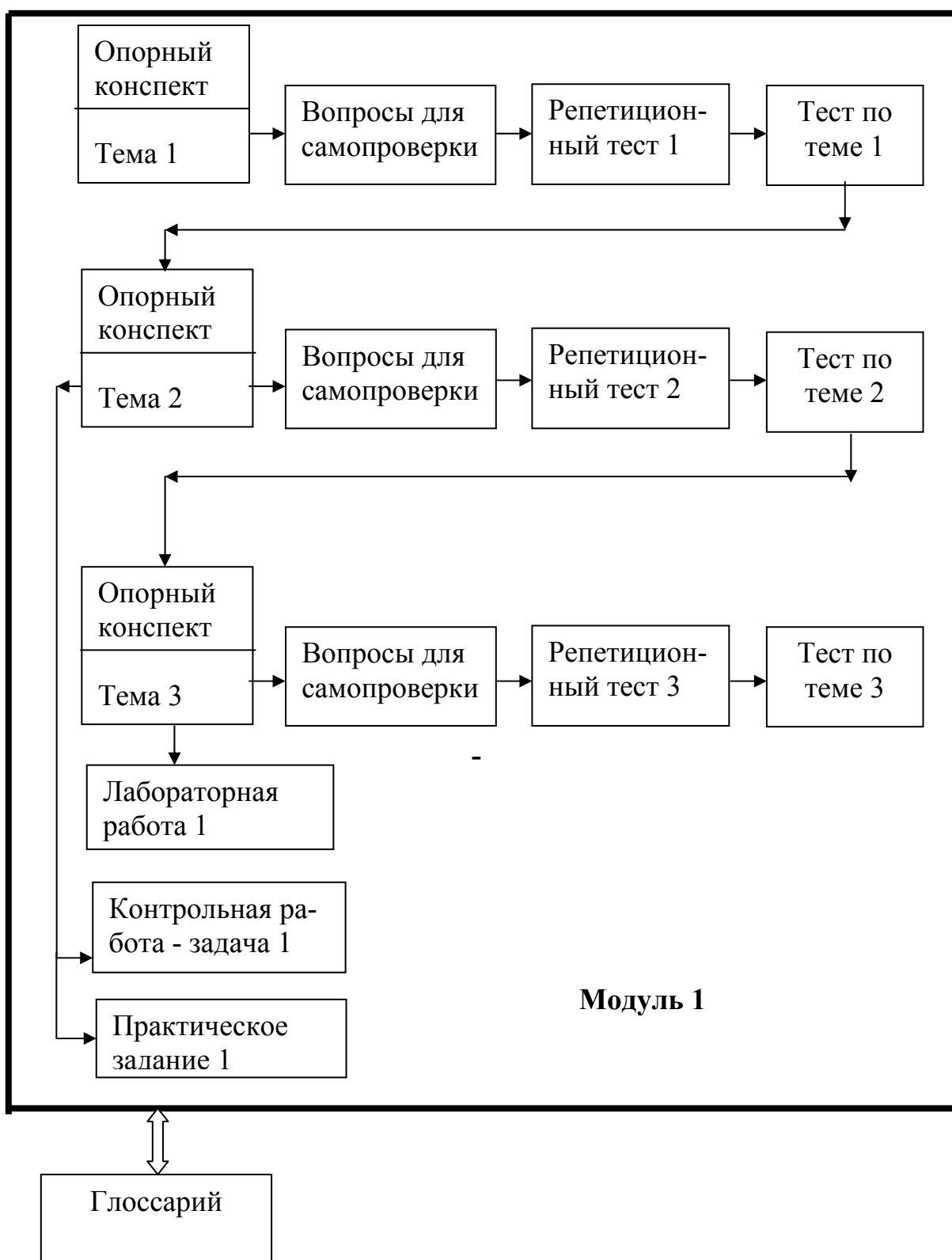
Для более четкого понимания содержания раздела в начале приводится схема содержания раздела, а в начале каждой темы указываются ключевые вопросы этой темы, входящие в экзаменационные билеты.

Для оценки знаний студента разработана рейтинговая система. Поэтому, прежде чем приступать к изучению дисциплины, ознакомьтесь с этой системой, которая находится в блоке «Рабочие учебные материалы» в параграфе 2.6.

При изучении дисциплины необходимо учесть дифференциацию в зависимости от специальности студента. Это отражено в начале каждого раздела (1, 2...7) после структурной схемы «Схема работы с разделом».

РАЗДЕЛ 1. Основы теории электрических цепей

Схема работы с разделом 1



Специальность	Часы	Номера тем	Номера параграфов	Номера задач	Номера тестов	Лаб. раб.	Практ. раб.
1	2	3	4	5	6	7	8
240401.65	52	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
240301.65	52	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
190701.65	72	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
261001.65	70	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
280202.65	71	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
190701.65	72	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
140101.65	80	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
140104.65	90	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
150104.65	100	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
190205.65	100	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
190601.65	100	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
151001.61	119	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1
151001.65	119	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1. 1 1. 2 1. 3	1	1

1	2	3	4	5	6	7	8
150202.65	120	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
220100.62	136	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
200102.65	140	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
200102.65	140	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
150501.65	142	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
230101.65	150	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
200402.65	150	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
200501.65	170	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1
210201.65	170	1 2 3	1.1...1.7 2.1...2.7 3.1...3.15	1	1.1 1.2 1.3	1	1

1. Электрическая цепь и ее характеристики

Эта тема охватывает первый раздел рабочей программы.

Для изучения данной темы следует использовать материал темы. Кроме этого, может быть использованы учебники по электротехнике [1-3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- направления токов, напряжений, ЭДС;
- законы Кирхгофа;
- соотношения между током и напряжением в идеальных элементах цепи.

Начинайте осваивать компьютерную программу EWB, предназначенную для выполнения лабораторных работ.

1.1. Определение цепи

Электрической цепью называется совокупность электротехнических устройств, создающих замкнутый путь электрическому току. Она состоит из источников (генераторов) энергии, приемников энергии (нагрузки) и соединительных проводов. В цепи могут быть также различные преобразователи, защитная и коммутационная аппаратура.

В источниках неэлектрические виды энергии преобразуются (в соответствии с законом сохранения энергии) в энергию электромагнитного поля. Так, например, на гидроэлектростанциях энергия падающей воды преобразуется в энергию электромагнитного поля. В приемниках энергия электромагнитного поля преобразуется в тепловую энергию и механическую работу. Кроме того, некоторая часть энергии запасается в электрических и магнитных полях цепи.

Электромагнитные процессы в электрической цепи описываются с помощью понятий о токе, напряжении, электродвижущей силе (ЭДС), сопротивлении, индуктивности и емкости. Заметим здесь, что ЭДС, токи и напряжения, изменяющиеся во времени, обозначаются строчными латинскими буквами *e*, *i*, *u*, а ЭДС, токи и напряжения, неизменные во времени, обозначаются заглавными латинскими буквами *E*, *I*, *U*.

1.2. Графическое изображение электрической цепи и ее элементов

Графическое изображение электрической цепи называется ее *схемой*. В схеме различают ветви, узлы и контуры. *Ветвь* – это часть схемы, состоящая только из последовательно соединенных источников и приемников (элементов цепи). *Узел* – точка схемы, в которой гальванически соединены не менее трех ветвей (ветви начинаются и заканчиваются на узлах цепи). *Контур* – замкнутая часть схемы, образованная ветвями. На рис. 1.1 даны структурные схемы трех электрических цепей и указано количество ветвей узлов и контуров в каждой из них.

№ цепи наимен.	I	II	III
ветвь	3	5	6
узел	2	3	4
контур	3	6	7

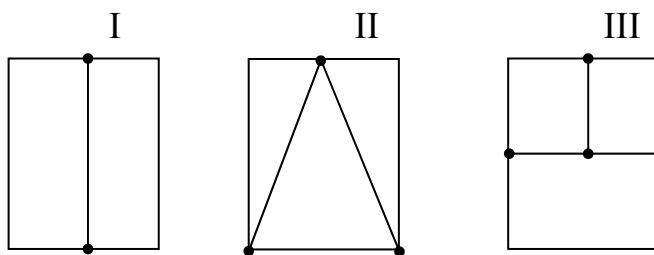


Рис. 1.1

Принятые в настоящем учебном пособии графические обозначения основных элементов цепи показаны на рис. 1.2.

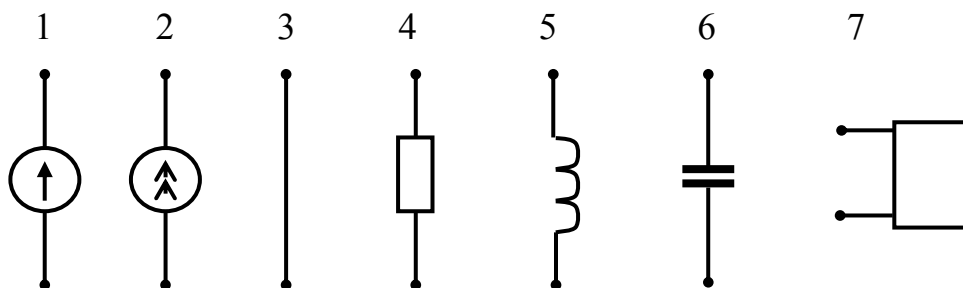


Рис. 1.2

На этом рисунке: 1 – источник ЭДС; 2 – источник тока; 3 – соединительный провод; 4 – сопротивление R цепи; 5 – индуктивность L цепи; 6 – емкость C цепи; 7 – двухполюсник (цепь с неизвестной структурой, имеющая два входных зажима).

1.3. О направлениях действия ЭДС, токов и напряжений

Для расчета электрических цепей необходимо принять направления для токов, напряжений и ЭДС. Эти направления указывают на схемах стрелками (рис. 1.3).

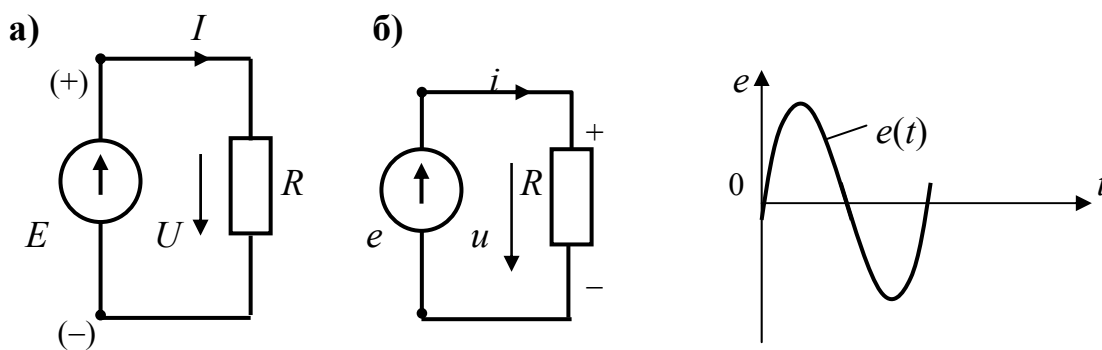


Рис. 1.3

В цепях постоянного тока (рис. 1.3,а) направление действия ЭДС источника принято указывать от отрицательного потенциала к положительному потенциалу.

За направление тока принято направление движения положительных зарядов, т.е. стрелка у тока направлена от большего потенциала к меньшему потенциалу. Направление напряжения в приемнике всегда указывают в ту же сторону, что и направление тока.

В цепях синусоидального тока (рис. 1.3,б) принято обозначать направления ЭДС, тока и напряжения, используя положительный полупериод тока, при котором ток не изменяет своего направления. При этом картина этих направлений получается аналогичной с цепью постоянного тока.

1.4. Законы электрических цепей

Ими являются первый и второй законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа относится к узлам цепи: в любой момент времени алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^K i_k = 0, \quad (1.1)$$

где K – число ветвей, подходящих к узлу (три и более).

Токи, подходящие к узлу, и токи, отходящие от узла, имеют противоположные знаки. Будем считать подходящие к узлу токи положительными и брать их в уравнениях первого закона Кирхгофа со знаком (+), а отходящие от узла, – отрицательными и брать их со знаком (–) .

Пример 1.1. На рис. 1.4,а показан узел цепи с пятью подходящими к нему ветвями. Требуется составить для этого узла уравнение по первому закону Кирхгофа.

Решение. На основании формулы (1.1) имеем

$$i_1 - i_2 + i_3 - i_4 + i_5 = 0 \quad \text{или} \quad i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4.$$

Таким образом, всегда сумма токов, подходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла.

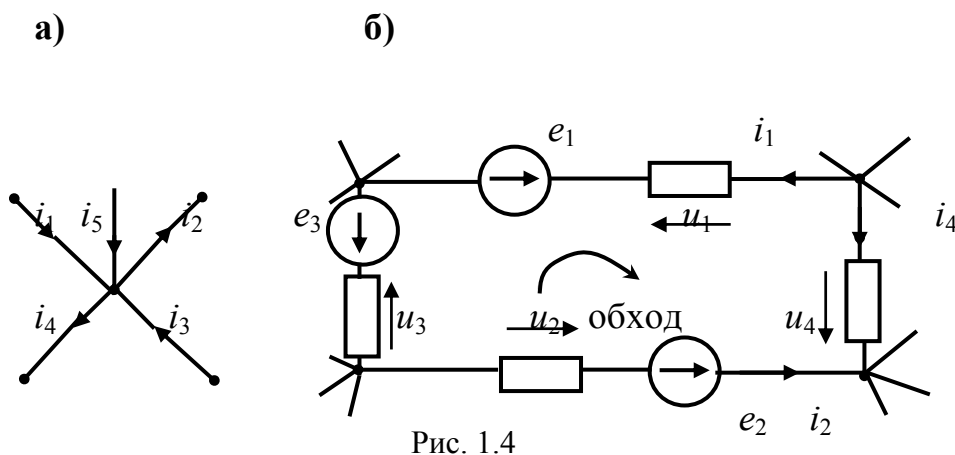


Рис. 1.4

Второй закон Кирхгофа относится к контурам цепи: в любой момент времени алгебраическая сумма ЭДС всех источников энергии контура равна алгебраической сумме напряжений на всех участках этого контура.

$$\sum_{q=1}^Q e_q = \sum_{n=1}^N u_n, \quad (1.2)$$

где Q – число источников ЭДС в контуре; N – число приемников контура.

Для составления уравнения по второму закону Кирхгофа необходимо предварительно (произвольно) выбрать направление обхода этого контура. Те ЭДС и напряжения, направления которых совпадают с выбранным направлением обхода, считаются положительными и берутся в уравнении со знаком (+), а остальные – со знаком (–).

Пример 1.2. На рис. 1.4,б показан один из контуров сложной электрической цепи. Направления действия ЭДС источников и напряжений на приемниках известны. Требуется составить для этого контура уравнение по второму закону Кирхгофа.

Решение. Для этого предварительно выбираем (произвольно) направление обхода контура и в соответствии с формулой (1.2) составляем следующее уравнение:

$$e_1 - e_2 - e_3 = -u_1 + u_4 - u_2 + u_3.$$

Здесь e_2 и e_3 , u_1 и u_2 взяты со знаком (–), так как их направление действия не совпадает с направлением обхода контура; e_1 , u_4 и u_3 взяты со знаком (+), так как их направление действия совпадает с направлением обхода контура.

1.5. Параметры электрических цепей

Любая электрическая цепь и каждый ее элемент в отдельности обладают тремя параметрами: сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C .

Сопротивление R характеризует способность цепи преобразовывать электромагнитную энергию в тепловую. Количество тепловой энергии W_T , выделяющееся в сопротивлении R при протекании тока i в течение времени t , определяется соотношением (1.3) и измеряется в джоулях (Дж):

$$W_T = \int_0^t i^2 R dt . \quad (1.3)$$

Величина сопротивления любого элемента цепи определяется как отношение постоянного напряжения на этом элементе к постоянному току в нем и измеряется в омах (Ом):

$$R = \frac{U}{I} . \quad (1.4)$$

Индуктивность L характеризует способность цепи накапливать энергию магнитного поля. Такой способностью обладает любой проводник с током или система проводов. Количество этой энергии W_M , накопленной в цепи, зависит от величины тока i и измеряется в джоулях (Дж):

$$W_M = \frac{Li^2}{2} . \quad (1.5)$$

Эта энергия не преобразуется в тепло, а существует в цепи в виде некоторого запаса. Когда ток в цепи равен нулю, запаса энергии магнитного поля в ней нет.

Величина индуктивности определяется как отношение потокосцепления цепи Ψ к току i и измеряется в генри (Гн):

$$L = \frac{\Psi}{i} . \quad (1.6)$$

Потокосцеплением называется сумма магнитных потоков всех витков катушки. В простейшем случае для катушки на замкнутом стальном сердечнике можно считать, что ее потокосцепление есть магнитный поток Φ , умноженный на число витков w : $\Psi = \Phi w$.

Емкость C характеризует способность цепи накапливать энергию электрического поля. Такой способностью обладают любые два провода, разделенные диэлектриком, например провод, висящий над землей, любые два провода линии передачи.

Количество энергии электрического поля $W_{\text{э}}$, накопленной в цепи с емкостью C , зависит от величины напряжения между проводами и измеряется в джоулях (Дж):

$$W_{\text{э}} = \frac{Cu^2}{2} . \quad (1.7)$$

Эта энергия не может преобразовываться в тепловую, а существует в цепи в виде некоторого запаса. Если напряжение между проводами отсутствует, то и запаса энергии электрического поля в цепи нет.

Величина емкости C определяется как отношение электрического заряда q одного из проводов к напряжению u между ними и измеряется в фарадах (Ф):

$$C = q/u . \quad (1.8)$$

Если R , L и C являются постоянными величинами и не зависят от тока (или напряжения), то такие элементы называются *линейными*, а цепи, их содержащие, называются *линейными цепями*.

Элементы, параметры которых зависят от тока или напряжения, называются *нелинейными*, а цепи, их содержащие, также называются *нелинейными цепями*.

Свойства нелинейного элемента электрической цепи не могут быть выражены одним постоянным числом и поэтому описываются его характеристикой. Для сопротивлений это зависимости напряжения от тока (вольтамперные характеристики); для индуктивностей это зависимости потокосцепления от тока (веберамперные характеристики); для емкостей это зависимости электрического заряда от напряжения (кулонвольтные характеристики). На рис. 1.5 показаны примеры характеристик некоторых линейных (ЛЭ) и нелинейных (НЭ) элементов цепи.

Заметим, что характеристики всех линейных элементов цепи являются прямыми линиями, а нелинейных элементов — кривыми.

1.6. Идеальные элементы электрической цепи

Любое электротехническое устройство содержит все три параметра: сопротивление R , индуктивность L и емкость C . Рассмотрим (рис. 1.6) катушку, выполненную из провода с конечной проводимостью (это может быть и нить лампы накаливания, и обмотка трансформатора или электродвигателя).

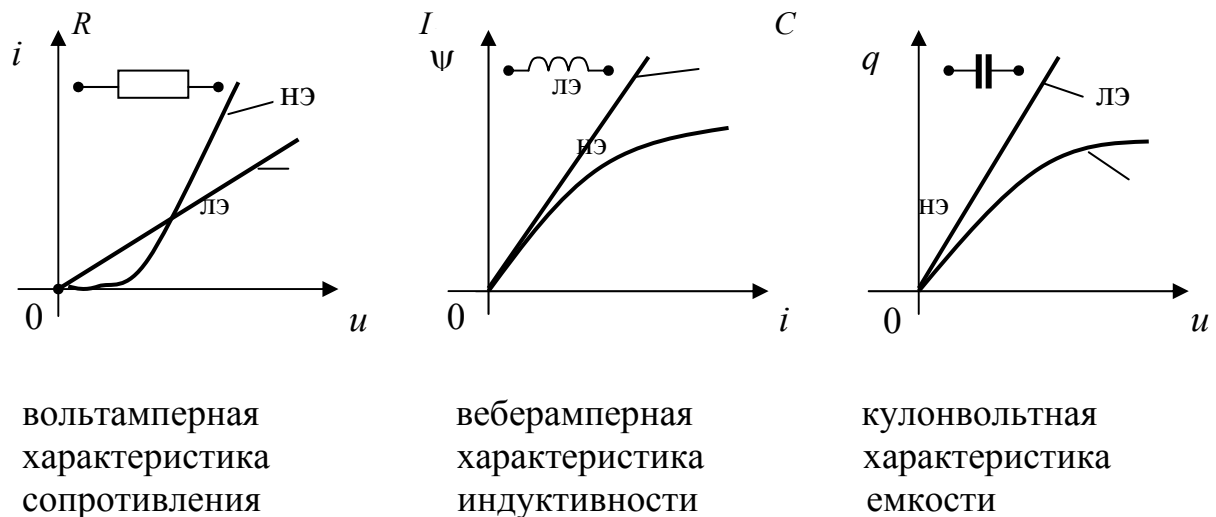


Рис. 1.5

При подаче на ее зажимы напряжения u на концах катушки появляются разноименные заряды $(+)q$ и $(-)q$ и в обмотке начинает протекать ток i . При этом вокруг витков обмотки возникает магнитное поле, характеризуемое потокоцеплением ψ . Таким образом, в соответствии с формулами (1.4), (1.6) и (1.8) рассматриваемая катушка обладает всеми тремя вышеуказанными параметрами.

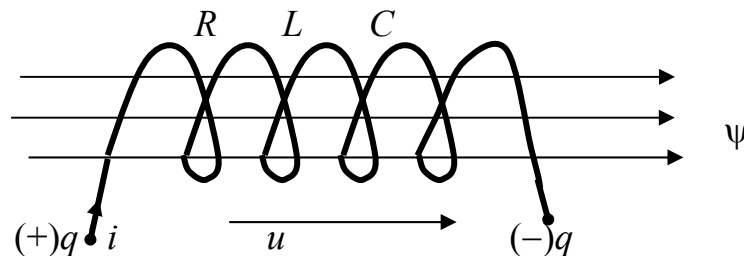


Рис. 1.6

Для удобства анализа и расчета электрических цепей вводят в рассмотрение такие элементы, которые при всех условиях обладают только одним параметром: только сопротивлением, только индуктивностью, только емкостью. Они называются *идеальными*.

Графическое изображение идеальных элементов электрической цепи показано на рис. 1.2 позициями 4, 5 и 6. В природе таких элементов не существует, но есть устройства, по своим свойствам близкие к идеальным. Реостат (резистор) при низких частотах обладает практически только сопротивлением R , а индуктивностью L и емкостью C этого устройства можно пренебречь. Катушка индуктивности на замкнутом ферромагнитном сердечнике с малыми тепловыми потерями в нем обладает на низких частотах практически только индуктивностью L , а сопротивлением R и емкостью C такой катушки можно пренебречь. Конденсатор с малыми внутренними тепловыми потерями обладает практически только емкостью C , а его активной проводимостью G и индуктивностью L можно пренебречь.

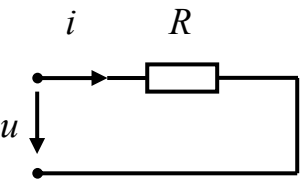
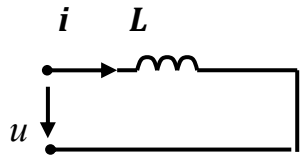
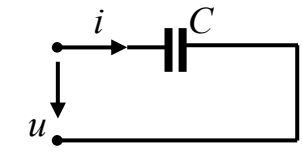
Любое реальное электротехническое устройство можно изобразить в виде электрической схемы, состоящей из комбинации идеальных элементов и, следовательно, произвести его электрический расчет.

1.7. Соотношение между током и напряжением в идеальных элементах цепи

Прежде чем приступать к расчету сколько-нибудь сложных электрических цепей, следует выяснить, каким образом связаны между собой ток и напряжение в каждом из идеальных элементов цепи. Эти соотношения, называемые **уравнения элементов**, известные из курса физики, приведены в табл. 1.1. Они имеют всеобщий характер и справедливы для цепей, у которых ток и напряжение изменяются во времени по любому закону.

Из табл. 1.1 видно, что только в сопротивлении R ток и напряжение связаны между собой алгебраическим соотношением. Между током и напряжением в индуктивности и емкости имеют место интегродифференциальные соотношения.

Формулы для определения тока и напряжения в идеальных элементах

№ п/п	Идеальный элемент	Ток	Напряжение
1		$i = \frac{u}{R}$	$u = iR$
2		$i = \frac{1}{L} \int u dt$	$u = L \frac{di}{dt}$
3		$i = C \frac{du}{dt}$	$u = \frac{1}{C} \int i dt$

Пример 1.3. В цепи с идеальной индуктивностью (рис. 1.7,а) действует пилообразный периодический ток (рис. 1.7,б). Требуется определить форму приложенного напряжения.

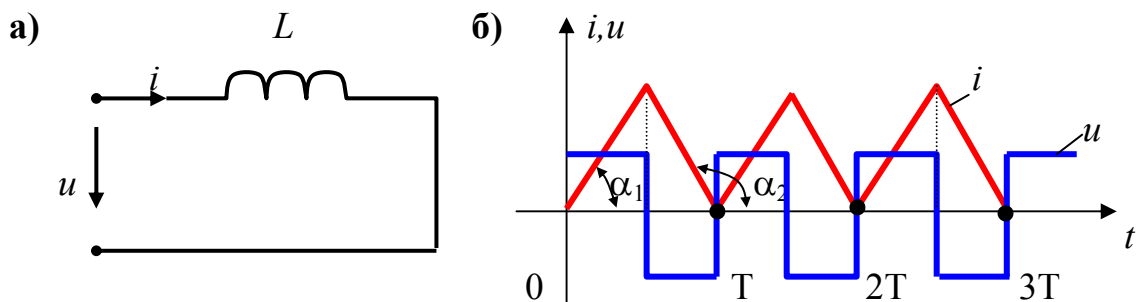


Рис. 1.7

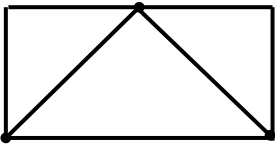
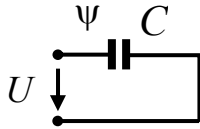
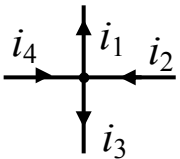
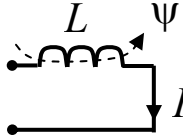
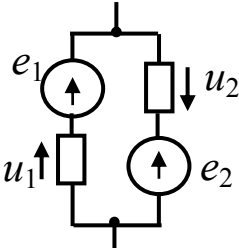
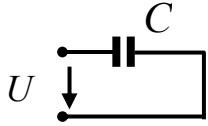
Решение. Для нахождения графика напряжения используем соотношение $u = L di/dt$, из которого следует, что форма кривой напряжения соответствует производной от тока по времени.

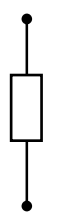
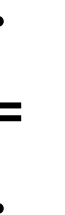
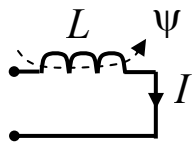
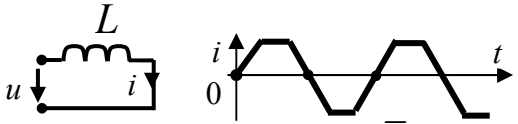
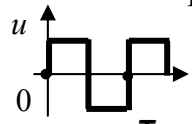
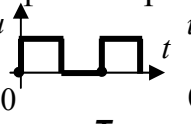
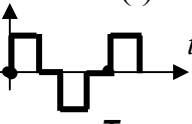
В нашем примере на участке от 0 до $T/2$ кривая тока представляет собой прямую, проходящую через начало координат под острым углом $\alpha_1 < 90^\circ$ к оси t , и поэтому производная di/dt на этом участке есть постоянная и положительная конечная величина.

На участке от $T/2$ до T ток представляет собой прямую, составляющую тупой угол с осью t $\alpha_2 > 90^\circ$, и поэтому производная di/dt на этом участке есть постоянная и отрицательная величина. При этом $\operatorname{tg} \alpha_2 = \operatorname{tg}(180 - \alpha_1) = -\operatorname{tg} \alpha_1$.

Таким образом, график искомого напряжения представляет собой отрезки прямых, меняющих каждую половину периода свой знак, как это показано на рис. 1.7,б.

Вопросы для самопроверки

1) Дана структурная схема цепи. Сколько ветвей в данной цепи?  5 4 3 6 7 1. 2. 3. 4. 5.	6) Дано: $C = 1000$ мкФ; $U = 100$ В.  Определите заряд конденсатора q Кл. 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 1. 2. 3. 4. 5.
2) Найдите правильное уравнение:  1. $-i_1 - i_2 - i_3 - i_4 = 0$ 2. $-i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$ 3. $+i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$ 4. $-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 = 0$ 5. $-i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0$	7) Дано: $L = 10$ мГн; $I = 100$ А.  Определите потокосцепление катушки ψ Вб. 4 3 2 1 0,5 1. 2. 3. 4. 5.
3) Выберите правильное уравнение:  1. $e_1 + e_2 = u_1 + u_2$ 2. $e_1 + e_2 = -u_1 - u_2$ 3. $e_1 - e_2 = u_1 + u_2$ 4. $e_1 - e_2 = u_1 - u_2$	8) Дано: $W_3 = 0,05$ Дж; $C = 10$ мкФ.  Определите напряжение на конденсаторе U В.

5. $e_1 - e_2 = -u_1 - u_2$	500 400 300 200 100 1. 2. 3. 4. 5.
4) Каково графическое изображение источника тока:      1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $L = 2 \text{ мГн}$; $I = 100 \text{ А}$.  Определите энергию магнитного поля катушки W_M Дж. 25 20 15 10 5 1. 2. 3. 4. 5.
5) По какому соотношению определяется энергия магнитного поля цепи? $\frac{\Psi}{i}$ Li $\frac{Cu^2}{2}$ $\frac{q}{u}$ $\frac{Li^2}{2}$ 1. 2. 3. 4. 5.	10) Дан график тока $i(t)$  Каков график напряжения $u(t)$?    1. 2. 3.

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ правильного ответа	1	2	3	2	5	1	4	5	4	1

2. Цепи постоянного тока

В теме 2 рассматриваются вопросы, входящие в первый раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 2.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- особенности реактивных элементов в цепях постоянного тока;
- законы Ома и Кирхгофа в цепях постоянного тока;
- мощность в цепях постоянного тока;
- расчет при последовательном, параллельном и смешанном соединении сопротивлений;

- расчет простых цепей с одним источником;
- расчет сложных цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

2.1. Некоторые особенности цепей постоянного тока

Цепи, у которых ЭДС источников, а также токи и напряжения на всех ее элементах остаются неизменными во времени, называются *цепями постоянного тока*. Цепи постоянного тока содержат все три параметра: сопротивление, индуктивность и емкость. Однако при неизменных ЭДС напряжения на индуктивностях и токи в емкостях равны нулю. В самом деле, при $I_L = \text{const}$ и $U_C = \text{const}$ напряжение $U_L = dI_L/dt = 0$ и ток $I_C = dU_C/dt = 0$.

Получается так (рис. 2.1), что в цепи постоянного тока все индуктивности закорочены ($U_L = 0$), а ветви с емкостями разомкнуты ($I_C = 0$) и в работе цепи участия не принимают. Поэтому расчетным параметром цепи постоянного тока является только сопротивление R её элементов.

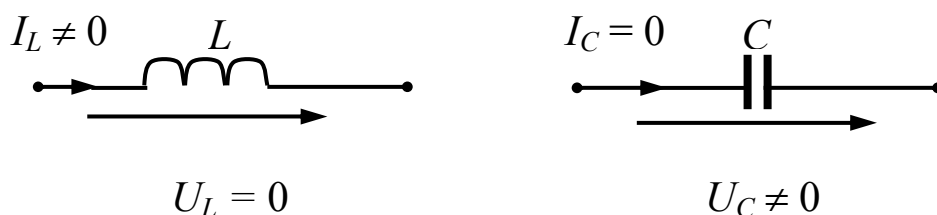


Рис. 2.1

2.2. Закон Ома и законы Кирхгофа для цепей постоянного тока

Закон Ома для любой ветви цепи постоянного тока определяется соотношением, показанным в табл. 2.1, поз. 1, в котором вместо мгновенных значений u и i используются значения постоянного напряжения U и тока I

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{или} \quad U = IR. \quad (2.1)$$

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью. Она обозначается как G и измеряется в сименсах (См):

$$G = 1/R. \quad (2.2)$$

Первый закон Кирхгофа для любого узла цепи постоянного тока записывается аналогично общей формуле (1.1), у которой переменные во времени токи i_k заменены на постоянные токи I_k .

$$\sum_{k=1}^K I_k = 0, \quad (2.3)$$

где K – число ветвей, подходящих к данному узлу цепи (не менее трех).

Токи, направленные к узлу, будем считать положительными и вводить в уравнение (2.3) со знаком (+), а токи, направленные от узла, – отрицательными и вводить в уравнение со знаком (–).

Второй закон Кирхгофа для любого контура цепи постоянного тока записывается аналогично формуле (1.2), у которой переменные во времени величины e_q и u_n заменены постоянными величинами E_q и U_n . При этом в соответствии с формулой (2.1)

$$\sum_{q=1}^Q E_q = \sum_{n=1}^N U_n = \sum_{n=1}^N I_n R_n. \quad (2.4)$$

Как и прежде (глава 1), ЭДС и токи, совпадающие с принятым направлением обхода контура, будем считать положительными и вводить их в уравнение (2.4) со знаком (+), а несовпадающие с обходом контура, – отрицательными и вводить в уравнение со знаком (–).

2.3. Мощность цепи постоянного тока

Энергия электромагнитного поля, вырабатываемая в источниках постоянного тока, преобразуется в приемниках в тепло и другие виды энергии, в том числе и в механическую работу.

Количество энергии, выделяемой в приемнике с сопротивлением R за время t при протекании тока I , определяется формулой (1.3) и измеряется в джоулях (Дж) $W_T = I^2 R t$. Энергия, отнесенная к единице времени, представляет собой мощность приемника и измеряется в ваттах (Вт):

$$P = \frac{W_T}{t} = I^2 R = UI = U^2 G. \quad (2.5)$$

2.4. Расчет простых цепей постоянного тока

К ним относятся цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением сопротивлений. Их расчет осуществляется с помощью закона Ома и законов Кирхгофа.

а) Цепь с последовательным соединением сопротивлений (рис. 2.2,а).

Эта неразветвленная одноконтурная цепь, по которой протекает один и тот же ток I во всех ее сопротивлениях. При этом на каждом из них возникает напряжение, определяемое законом Ома в соответствии с формулой (2.1). К такой цепи применяем 2-й закон Кирхгофа. Выбрав (произвольно) направление обхода контура по часовой стрелке, получаем

$$U_1 + U_2 - U = 0 \quad \text{или} \quad U_1 + U_2 = U, \quad (2.6)$$

где $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$. Тогда $U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) = IR_{\Sigma}$, где

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2. \quad (2.7)$$

Таким образом, в последовательной цепи постоянного тока общее напряжение цепи U складывается из суммы напряжений всех ее элементов, а общее сопротивление цепи R_{Σ} складывается из суммы всех ее сопротивлений.

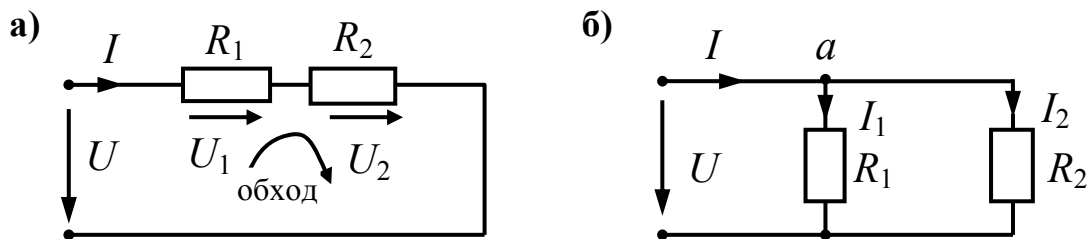


Рис. 2.2

б) Цепь с параллельным соединением сопротивлений (рис. 2.2,б). В такой цепи напряжение одинаково на всех её сопротивлениях, но токи в них в общем случае различны. Применяем к такой цепи первый закон Кирхгофа для узла «а», получаем $I - I_1 - I_2 = 0$ или

$$I = I_1 + I_2, \quad (2.8)$$

где в соответствии с формулой (2.1) $I_1 = U / R_1$; $I_2 = U / R_2$.

Токи I_1 и I_2 можно выразить и через проводимость G в соответствии с формулами (2.2) и (2.1)

$$I_1 = UG_1, \text{ где } G_1 = 1 / R_1; \quad I_2 = UG_2, \text{ где } G_2 = 1 / R_2.$$

Тогда $I = UG_1 + UG_2 = U(G_1 + G_2) = UG_{\Sigma}$, где

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_2 = 1/R_{\Sigma}. \quad (2.9)$$

Таким образом, в параллельной цепи постоянного тока общий ток I есть сумма токов, а общая проводимость G_{Σ} цепи есть сумма проводимостей всех ее ветвей. Общее сопротивление цепи из двух параллельных ветвей определяется формулой (2.9) $1/R_{\Sigma} = 1/R_1 + 1/R_2$, откуда получаем

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.10)$$

2.5. Расчет сложных цепей постоянного тока непосредственно по 1-му и 2-му законам Кирхгофа

Сложными называются разветвленные электрические цепи со многими источниками энергии. Пример такой цепи показан на рис. 2.3.

Для ее расчета, т. е. для определения токов во всех ее ветвях, необходимо составить систему уравнений по законам Кирхгофа. Общее число уравнений в системе должно соответствовать числу неизвестных токов, т. е. числу ветвей. Для нашей цепи это пять неизвестных токов. При этом

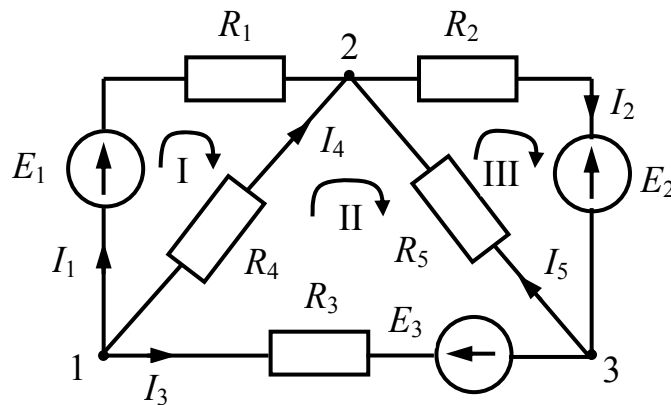


Рис. 2.3

а) *по первому закону Кирхгофа* составляется число уравнений, на единицу меньшее числа узлов цепи, поскольку уравнение для последнего узла есть следствие всех предыдущих уравнений и не дает ничего нового для расчета. В нашем примере по 1-му закону Кирхгофа надо составить 2 уравнения, так как в цепи три узла;

б) *по второму закону Кирхгофа* составляются все недостающие уравнения для любых произвольно выбранных контуров цепи. В нашем примере по 2-му закону Кирхгофа надо составить три уравнения ($5 - 2 = 3$).

Предварительно следует задаться (произвольно) направлением токов во всех ветвях цепи и направлением обхода выбранных контуров. При составлении уравнений по 1-му закону Кирхгофа в соответствии с формулой (2.3) токи, подходящие к узлу, будем считать положительными и брать со знаком (+), а токи, отходящие от узла – отрицательными и брать со знаком (–). При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа в соответствии с формулой (2.4) ЭДС и токи, совпадающие с выбранным направлением обхода контура будем брать со знаком (+), а несовпадающие – со знаком (–).

Заметим, что произвольность выбора направлений токов в ветвях цепи и направлений обхода контуров не влияет на конечный результат расчета. Если в результате расчетов некоторые из найденных токов будут иметь знак (–), то это будет означать, что их истинное направление противоположно предварительно принятому.

Приняв для нашей цепи направление токов в ветвях и направление обхода трех выбранных контуров, как показано на рис. 2.3, составляем следующую систему уравнений:

$$\begin{array}{lcl} \text{узел 1} & \left\{ \begin{array}{l} -I_1 - I_4 - I_3 = 0, \\ I_1 + I_4 + I_5 - I_2 = 0, \end{array} \right. \\ \text{узел 2} & & \\ \text{контур I} & \left\{ \begin{array}{l} I_1 R_1 - I_4 R_4 = E_1, \\ I_4 R_4 - I_5 R_5 - I_3 R_3 = E_3, \end{array} \right. \\ \text{контур II} & & \\ \text{контур III} & \left\{ \begin{array}{l} I_2 R_2 + I_5 R_5 = -E_2. \end{array} \right. \end{array}$$

Решив полученную систему уравнений, определим токи во всех пяти ветвях этой цепи.

Расчет сложных цепей другими методами будет рассмотрен ниже в разделе 2 для цепей синусоидального тока. Отметим, что методы расчета цепей постоянного тока и цепей синусоидального тока комплексным методом аналогичны.

2.6. Баланс мощностей цепи постоянного тока

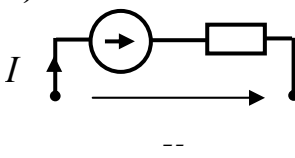
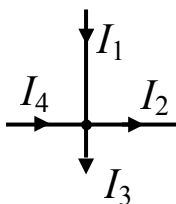
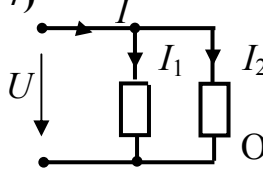
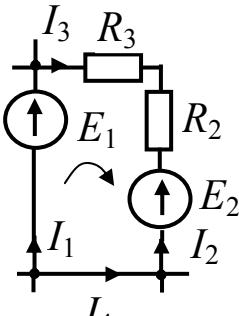
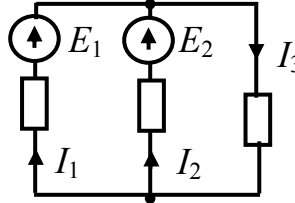
Для любой, сколько угодно сложной цепи постоянного тока, можно составить энергетический баланс, вытекающий непосредственно из закона сохранения энергии: *алгебраическая сумма всех мощностей источников энергии равна сумме всех мощностей приемников энергии*:

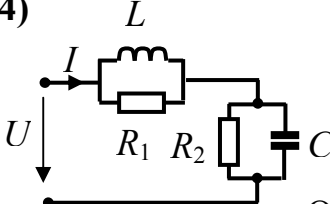
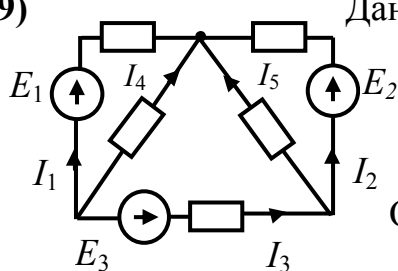
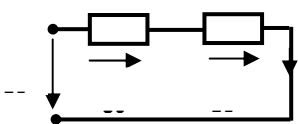
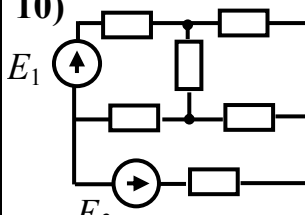
$$\sum_k^K E_k I_k = \sum_{n=1}^N I_n^2 R_n. \quad (2.11)$$

В этой формуле K – число источников энергии цепи; N – число приемников энергии цепи.

Во всех приемниках энергии токи и напряжения имеют одно и то же направление. Поэтому правая часть уравнения (2.11) является арифметической суммой мощностей всех приемников цепи. Что касается левой части этого уравнения, то в некоторых ветвях сложной цепи ток ветви может оказаться направленным противоположно действию ЭДС источника энергии. Тогда произведение EI получается отрицательным. Физически это означает, что при таком режиме работы рассматриваемый источник не генерирует энергию, а потребляет ее (например, аккумулятор при его зарядке).

Вопросы для самопроверки

1) Укажите уравнение первого закона Кирхгофа. 1. $U = IR$ 2. $\sum_{m=1}^M E_m = \sum_{n=1}^N I_n R_n$ 3. $\sum_{m=1}^M E_m I_m = \sum_{n=1}^N U_n I_n$ 4. $\sum_{k=1}^K I_k = 0$	6)  Дано: $E = 200$ В; $R = 10$ Ом; $U = 100$ В. Определите ток I А. <table><tr><td>5</td><td>10</td><td>15</td><td>20</td><td>30</td></tr><tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td><td>4.</td><td>5.</td></tr></table>	5	10	15	20	30	1.	2.	3.	4.	5.
5	10	15	20	30							
1.	2.	3.	4.	5.							
2) Найдите правильное уравнение:  1. $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$ 2. $I_1 + I_4 = I_2 + I_3$ 3. $I_1 - I_4 = I_2 - I_3$ 4. $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$ 5. $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$	7)  Дано: $I = 5$ А; $I_1 = 3$ А; $U = 100$ В. Определите мощность в сопротивлении R_2 в ваттах. <table><tr><td>100</td><td>200</td><td>300</td><td>400</td><td>500</td></tr><tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td><td>4.</td><td>5.</td></tr></table>	100	200	300	400	500	1.	2.	3.	4.	5.
100	200	300	400	500							
1.	2.	3.	4.	5.							
3) Выберите правильное уравнение:  1. $E_1 - E_2 = I_3 R_3 - I_2 R_2$ 2. $E_1 + E_2 = I_3 R_3 + I_2 R_2$ 3. $E_1 + E_2 = I_3 R_3 - I_2 R_2$ 4. $E_1 - E_2 = -I_3 R_3 + I_2 R_2$ 5. $E_1 - E_2 = -I_3 R_3 - I_2 R_2$	8)  Дано: $I_1 = 3$ А; $I_2 = 4$ А. Найдите ток I_3, А. <table><tr><td>1</td><td>-1</td><td>5</td><td>7</td><td>-7</td></tr><tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td><td>4.</td><td>5.</td></tr></table>	1	-1	5	7	-7	1.	2.	3.	4.	5.
1	-1	5	7	-7							
1.	2.	3.	4.	5.							

4)		Дано: $U = 150 \text{ В};$ $R_1 = R_2 = 50 \text{ Ом};$ $L = 10 \text{ мГн};$ $C = 100 \text{ мкФ}.$			Определите ток $I \text{ А}.$	9)		Дано: $E_1 = 10 \text{ В};$ $R_1 = 2 \text{ Ом};$ $R_4 = 2 \text{ Ом};$ $I_4 = 5 \text{ А}.$			Определите ток $I_1 \text{ А}.$
1	1,5	3	4	5		10	6	5	4	3	
1.	2.	3.	4.	5.		1.	2.	3.	4.	5.	
5)		Дано: $U = 70 \text{ В};$ $R_1 = 30 \text{ Ом};$ $R_2 = 40 \text{ Ом}.$			Определите ток $I, \text{ А}.$	10)		Сколько уравнений надо составить по законам Кирхгофа для определения токов всех ветвей?			
1,7	2,33	1,75	7	1		2	4	6	8	10	
1.	2.	3.	4.	5.		1.	2.	3.	4.	5.	

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ правильного ответа	4	2	5	2	1	5	2	4	1	3

3. Цепи синусоидального тока

Для изучения данной темы следует использовать материал темы 3. Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- характеристики синусоидального тока, напряжения;
- графическое изображение синусоидальных токов и напряжений (векторные диаграммы);
- применение векторных диаграмм к расчету цепей синусоидального тока;

- законы Кирхгофа в векторной форме записи;
- действующие значения синусоидальных токов и напряжений;
- элементы R , L и C в цепи синусоидального тока;
- цепь с последовательным соединением элементов R , L и C ;
- цепь с параллельным соединением элементов R , L и C ;
- мощность цепи синусоидального тока;
- понятие о двухполюсниках и об эквивалентных цепях.

Выполнить на компьютере лабораторную работу 1.

3.1. Основные понятия о синусоидальных процессах

Синусоидальный ток – это периодический ток, изменяющийся во времени по закону синуса. График этого тока представлен на рис. 3.1 в виде кривой, полученной на экране осциллографа.

экран осциллографа

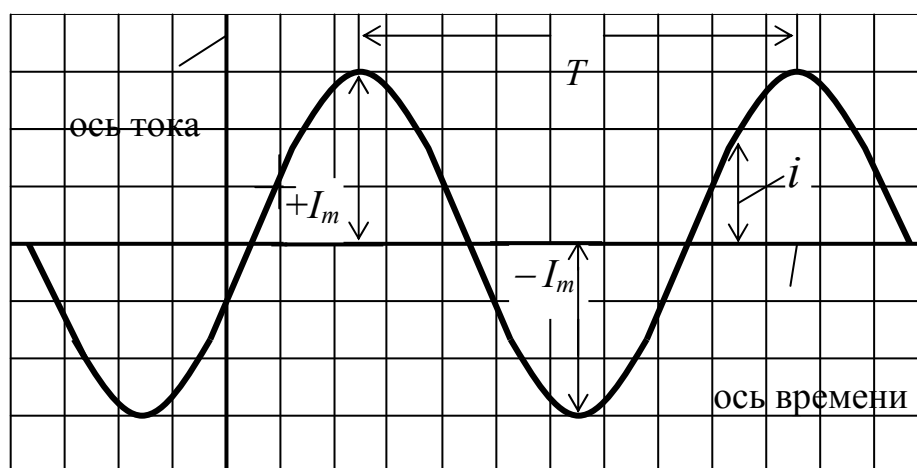


Рис. 3.1

На этом рисунке ось времени t (ось абсцисс) проведена между наибольшим и наименьшим значением тока. Ось тока (ось ординат) проведена перпендикулярно оси времени. Пересечение ее с осью начала отсчета времени t можно выбирать произвольно. Значение тока i в любой момент времени t называется *мгновенным значением*. Все значения i выше оси t считаются положительными, а ниже оси – отрицательными. Максимальное значение тока (относительно оси t) называется *амплитудой* и обозначается I_m . Синусоидальный ток изменяется во времени от $+I_m$ до $-I_m$.

Наименьшее время T , по истечении которого значения тока повторяются, называется *периодом тока*. На осциллограмме период наиболее удобно изме-

рять между двумя амплитудами. Число периодов, совершаемых током за одну секунду, называется *частотой тока* f . Частота тока и период тока – величины взаимнообратные. Частота f имеет физическую размерность 1/с и названа "герц" (Гц):

$$f = 1/T. \quad (3.1)$$

При теоретических расчетах часто используют понятие об *угловой (круговой) частоте*. Угловая частота ω связана с частотой f (1/с) соотношением

$$\omega = 2\pi f. \quad (3.2)$$

Все сказанное выше о синусоидальном токе справедливо и по отношению к синусоидальному напряжению и синусоидальной ЭДС.

3.2. Аналитическая запись синусоидальных токов и напряжений

Синусоидальные токи и напряжения выражаются аналитически следующим образом:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (3.3)$$

В этих формулах:

i и $u \rightarrow$ мгновенные значения тока и напряжения; I_m и U_m – амплитуды тока и напряжения; ω – угловая частота тока и напряжения; t – время; $(\omega t + \psi_i)$ и $(\omega t + \psi_u)$ – фазы тока и напряжения, измеряемые в градусах (град) или радианах (рад); ψ_i и ψ_u – начальные фазы тока и напряжения – это фазы $(\omega t + \psi_i)$ и $(\omega t + \psi_u)$ при $t = 0$. Их численные значения зависят от выбора момента начала отсчета времени.

Для полного определения синусоидального тока или напряжения необходимо знать три величины: *амплитуду, частоту и начальную фазу*. Если известно приложенное к цепи синусоидальное напряжение, то это значит, что заданы U_m , ω и ψ_u . Следовательно, для определения синусоидального тока этой цепи надо определить только две величины: I_m и ψ_i , так как частота тока ω такая же, как и у приложенного напряжения.

3.3. Способы графического изображения синусоидальных токов и напряжений

Существует два способа графического изображения синусоидальных токов и напряжений: с помощью графиков $i(\omega t)$ и $u(\omega t)$ в декартовых координатах (подобно рис. 3.1) и с помощью вращающихся векторов в полярных координатах.

На рис. 3.2,а показано изображение тока в виде вектора длиной I_m , вращающегося (как принято в теории цепей) *против часовой стрелки* с постоянной угловой скоростью ω (соответствующей угловой частоте тока) относительно полюса 0 полярной системы координат. Его положение на этом рисунке зафиксировано в момент времени $t = 0$, при котором угол его наклона к полярной оси Р составляет величину, равную начальной фазе $+\psi_i$ (положительные начальные фазы откладывают от полярной оси против часовой стрелки, а отрицательные – по часовой).

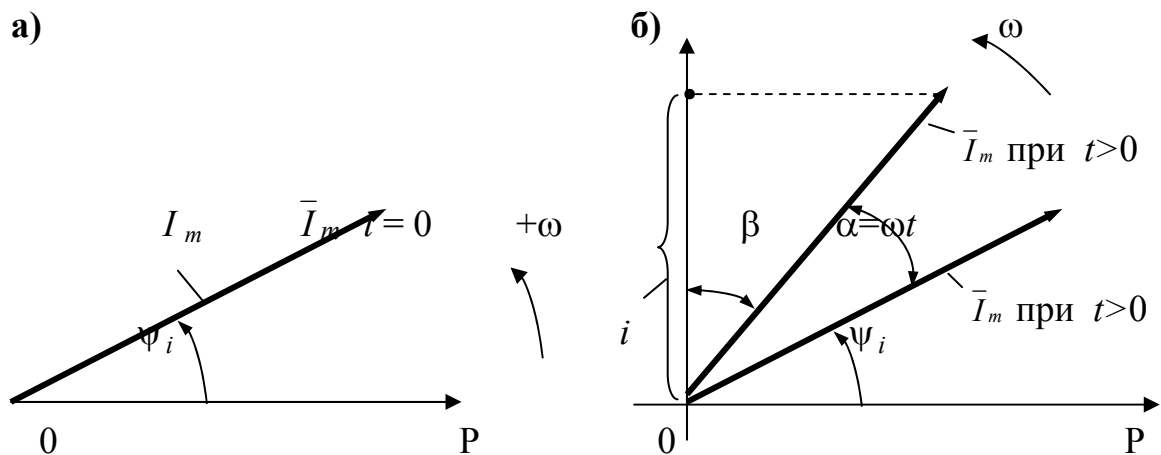


Рис. 3.2

При вращении вектора $\bar{I}_m$ против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω проекция этого вектора на ось, перпендикулярную полярной оси (рис. 3.2,б), совершает синусоидальные колебания во времени. В самом деле, пусть за время t , прошедшее от начала отсчета вектор $\bar{I}_m$ при своем вращении против часовой стрелки повернулся на угол $\alpha = \omega t$ (рис. 3.2,б). Тогда проекция этого вектора на ось, перпендикулярную полярной оси, составит $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, что является мгновенным значением тока.

Пример 3.1. Известны синусоидальные ток и напряжения некоторой цепи (рис. 3.3): $i = 2 \sin(314t + 60^\circ)$ А; $u = 30 \sin(314t - 30^\circ)$ В. Требуется изобразить графически ток и напряжение в полярных и декартовых координатах.

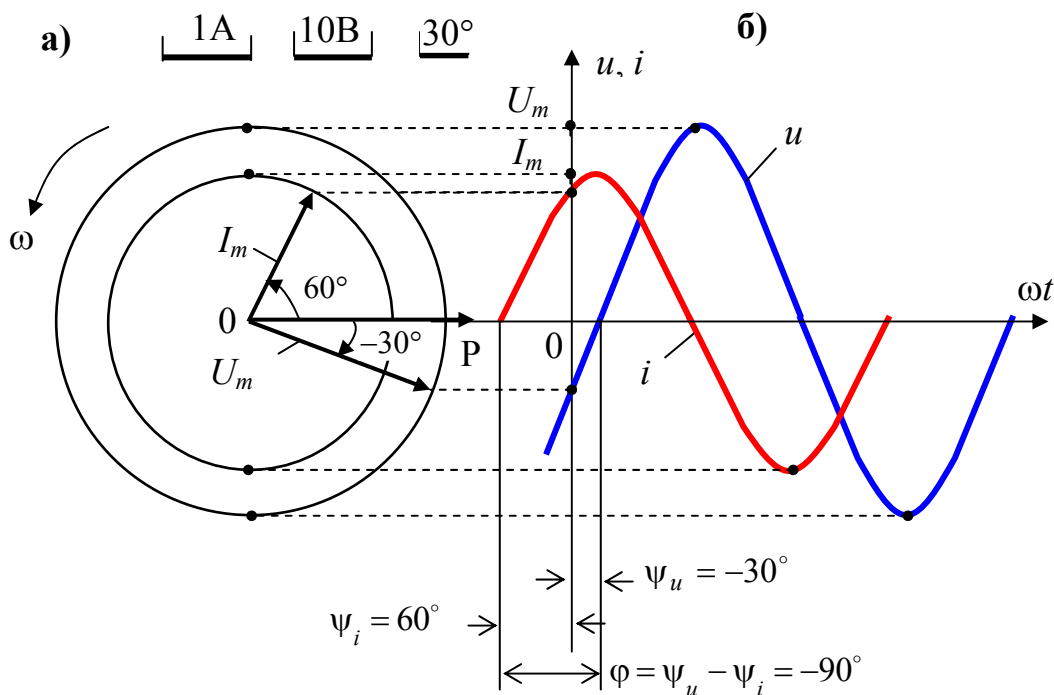


Рис. 3.3

Решение. Вначале изображаем ток i и напряжение u цепи в полярных координатах (рис. 3.3,а) в виде вращающихся векторов, зафиксированных на плоскости при $t = 0$. Для этого выбираем произвольно направление полярной оси Р и располагаем вектор тока длиной $I_m = 2\text{А}$ под углом $\psi_i = +60^\circ$ к ней, а вектор напряжения длиной $U_m = 30\text{В}$ располагаем под углом $\psi_u = -30^\circ$ к полярной оси.

Для изображения тока и напряжения в декартовых координатах

(рис. 3.3,б) устанавливаем ось абсцисс (ось ωt) так, чтобы она располагалась на одной прямой с полярной осью (Р). Затем вращаем векторы $\bar{I}_m$ и $\bar{U}_m$ против часовой стрелки с угловой скоростью ω и фиксируем проекции этих векторов на декартовой плоскости через каждые 30° их поворота. В результате получаем графики изменения синусоидального тока и напряжения во времени, как это показано на рис. 3.3,б.

Заметим, что величины начальных фаз тока и напряжения определяются отрезками на оси абсцисс между началом координат и ближайшими точками ее пересечения синусоидами при переходе значений от отрицательных к положительным. При этом положительные начальные фазы (в нашем примере

$\psi_i = +60^\circ$) располагаются левее точки 0, а отрицательные (в нашем примере $\psi_u = -30^\circ$) – правее точки 0.

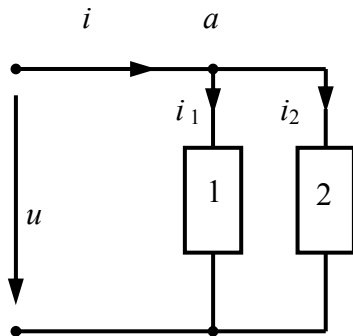
3.4. Векторные диаграммы и их применение к расчету цепей синусоидального тока

Графики токов $i(\omega t)$ и напряжений $u(\omega t)$ в декартовых координатах иногда используются для иллюстрации электромагнитных процессов в электрических цепях, но для практических расчетов не пригодны.

При решении электротехнических задач широко используется изображение токов и напряжений в виде вращающихся против часовой стрелки векторов, положение которых на плоскости зафиксировано для момента времени $t = 0$.

Пример 3.2. Известны (рис. 3.4,а) синусоидальные токи двух параллельно включенных двухполюсников 1 и 2: $i_1 = 3 \sin(628t + 30^\circ)$ А; $i_2 = 4 \sin(628t - 60^\circ)$ А. Требуется: определить синусоидальный ток i в неразветвленной части цепи.

а)



б)

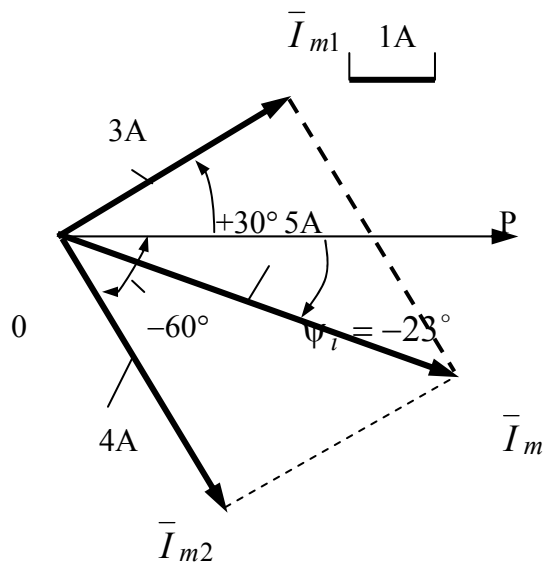


Рис. 3.4

Решение. Для узла a цепи справедлив первый закон Кирхгофа: $i - i_1 - i_2 = 0$ или $i = i_1 + i_2$. Следовательно, для нахождения тока в неразветвленной части цепи необходимо сложить синусоиды i_1 и i_2 . Это легко сделать если воспользоваться изображением токов в виде векторов по образцу рис. 3.2,а. Для определения общего тока надо определить только две характеризующие его величины – амплитуду I_m и начальную фазу ψ_i , поскольку частота тока $\omega = 628$ 1/с задана. Эти величины можно легко найти графически, сложив векторы $\bar{I}_{m1}$ и $\bar{I}_{m2}$ так, как это делают в механике при нахождении вектора результирующих сил:

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{m1} + \bar{I}_{m2} . \quad (3.4)$$

Векторы исходных токов и результат их сложения показан на рис. 3.4,б. Здесь длина суммарного вектора равна амплитуде общего тока I_m , а угол наклона к полярной оси (P), есть начальная фаза ψ_i общего тока.

Путем непосредственных измерений находим, что $I_m = 5$ А и $\psi_i = -23^\circ$ (знак “–” взят потому, что он расположен по часовой стрелке от полярной оси P). Таким образом, искомый ток $i = 5 \sin(628t - 23^\circ)$ А.

Совокупность векторов токов и напряжений цепи, называется **векторной диаграммой** этой цепи. Она позволяет заменить алгебраическое сложение

(вычитание) синусоидальных токов и напряжений графическим сложением (вычитанием) векторов и тем самым значительно облегчить расчет цепей синусоидального тока.

3.5. Закон Кирхгофа в векторной форме записи

При расчете цепей можно использовать законы Кирхгофа в векторной форме записи.

$$\text{1-й закон Кирхгофа: } \sum_{k=1}^K \bar{I}_k = 0 . \quad (3.5)$$

Геометрическая сумма векторов всех токов, подходящих к любому узлу цепи, равна нулю.

$$\text{2-й закон Кирхгофа: } \sum_{k=1}^K \bar{E}_k = \sum_{n=1}^N \bar{U}_n . \quad (3.6)$$

Геометрическая сумма векторов всех ЭДС любого контура цепи равна сумме векторов напряжений на всех участках этого контура. В формуле (3.6) K – число источников энергии в контуре, N – число участков в контуре.

3.6. Фазовые соотношения между синусоидальными токами и напряжениями

Если две или несколько синусоид имеют одинаковые начальные фазы, то это значит, что они *совпадают по фазе*. На векторной диаграмме такие синусоиды располагаются на одной прямой или параллельно друг другу.

Если две синусоиды имеют неодинаковые начальные фазы, то это значит, что они не совпадают по фазе или, иначе говоря, сдвинуты по фазе. Та из двух синусоид, фаза которой больше (с учетом знака), называется опережающей по фазе, тогда как другая – отстающей по фазе.

Так, из векторной диаграммы, показанной на рис. 3.4,б, следует, что ток i_1 опережает общий ток цепи i по фазе на 53° , а ток i_2 отстает от тока i по фазе на 37° . Заметим, что угол сдвига фаз между синусоидами не является произ-

вольной величиной. Он зависит от соотношения между параметрами R , L и C электрической цепи, о чем подробно будет изложено ниже.

В электроэнергетике большое значение придается углу сдвига фаз между напряжением и током цепи. Он определяется как разность начальных фаз напряжения и тока (с учетом их собственных знаков) и обозначается греческой буквой φ :

$$\varphi = \psi_u - \psi_i . \quad (3.7)$$

На рис. 3.5 показано соотношение между углом сдвига фаз φ и начальными фазами напряжения ψ_u и тока ψ_i (здесь они взяты положительными). От величины угла сдвига фаз φ зависит эффективность работы электрической цепи.

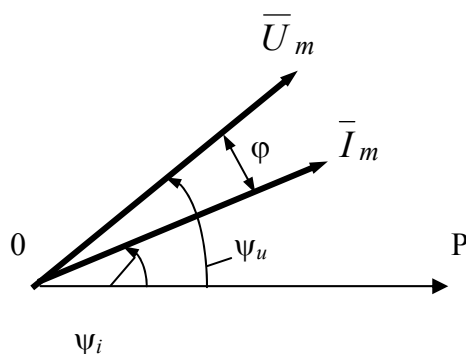


Рис. 3.5

3.7. Действующие значения синусоидальных токов и напряжений

В цепях синусоидального тока для измерения действующих значений токов и напряжений используют амперметры и вольтметры.

Понятие о действующем значении тока сложилось исторически при переходе электроэнергетики от использования сетей постоянного тока к сетям переменного синусоидального тока. Новый для того времени переменный ток сравнивали с постоянным током по его способности преобразовывать электромагнитную энергию в тепловую. Условились считать синусоидальный ток эквивалентным (равноценным) в этом смысле постоянному току, если он в сопротивлении R за время T одного периода выделяет такое же количество тепла, что и постоянный ток. При этих условиях количество тепла, выделяемого постоянным током, $W_{пост} = I^2 RT$, а количество тепла, выделенного синусоидальным током, $W_{син} = \int_0^T i^2 R dt$. Полагая $W_{пост} = W_{син}$, находим, что:

$$W_{пост} = I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt .$$

$$I^2 R T = \int_0^T i^2 R dt \quad \text{или} \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt} . \quad (3.8)$$

Полученное соотношение определяет величину постоянного тока I , эквивалентного синусоидальному току по тепловому действию. Эта величина называется действующим значением синусоидального тока i . Подставив $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ в формулу (3.8) и произведя интегрирование, получаем

$$I = I_m / \sqrt{2} . \quad (3.9)$$

Таким образом, действующие значения синусоидального тока в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитуды.

Аналогичная формула существует и для определения действующего значения синусоидального напряжения:

$$U = U_m / \sqrt{2} . \quad (3.10)$$

В настоящее время действующие значения синусоидального тока и напряжения являются основными расчетными величинами. Поэтому при дальнейшем изложении будем использовать, главным образом, действующие значения этих величин.

3.8. Элементы в цепи синусоидального тока

Рассмотрим амплитудные и фазовые соотношения между током и напряжением в элементах R , L и C . Для этого приложим к этим элементам синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и рассчитаем мгновенное значение тока в каждой из них (т. е. найдем его амплитуду и начальную фазу).

1. Сопротивлением R . В этом элементе

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) .$$

Анализ полученного выражения:

$$\text{а) } I_m = \frac{U_m}{R} \text{ или}$$

$$\text{действующее значение тока} \quad I = \frac{U}{R} . \quad (3.11)$$

Сопротивление R в цепи синусоидального тока называется *активным*, так как в нем проходит процесс преобразования электромагнитной энергии в тепловую. В большом диапазоне частот активное сопротивление R практически

постоянно. Величина, обратная активному сопротивлению, называется активной проводимостью: $G = 1/R$. Тогда формула для тока приобретает вид

$$I = U/R = UG. \quad (3.12)$$

Это закон Ома для цепи синусоидального тока с активным сопротивлением.

б) Начальная фаза тока $\psi_i = \psi_u$ или $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$, т. е. в цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе.

2. Индуктивностью L . В этом элементе

$$i = \frac{1}{L} \int u dt = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t + \psi_u - 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Анализ полученного выражения:

$$\text{а) } I_m = \frac{U_m}{\omega L} \quad \text{или}$$

$$\text{действующее значение тока} \quad I = \frac{U}{X_L}. \quad (3.13)$$

Выражение $X_L = \omega L$, Ом, стоящее в знаменателе – это реактивное индуктивное сопротивление цепи. Величина, обратная индуктивному сопротивлению, называется индуктивной проводимостью

$$b_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}. \quad (3.14)$$

Тогда формула для тока в индуктивности приобретает вид

$$I = U/X_L = U b_L. \quad (3.15)$$

Это закон Ома для цепи синусоидального тока с индуктивным сопротивлением.

б) Начальная фаза тока $\psi_i = \psi_u - 90^\circ$ или $\varphi = \psi_u - \psi_i = +90^\circ$, т. е. в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения по фазе на 90° .

3. Емкостью C . В этом элементе

$$i = C \frac{du}{dt} = \frac{U_m}{1/\omega C} \sin(\omega t + \psi_u + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Анализ полученного выражения:

$$\text{а) } I_m = \frac{U_m}{1/\omega C} \quad \text{или}$$

$$\text{действующее значение тока} \quad I = \frac{U}{X_C}. \quad (3.16)$$

Выражение $X_C = 1/\omega C$, Ом, стоящее в знаменателе – это реактивное емкостное сопротивление цепи. Величина, обратная емкостному сопротивлению, называется емкостной проводимостью

$$b_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{1/\omega C} = \omega C \quad (3.17)$$

Тогда формула для тока в емкости получает вид

$$I = U/X_C = U b_C. \quad (3.18)$$

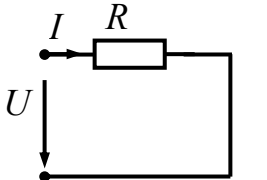
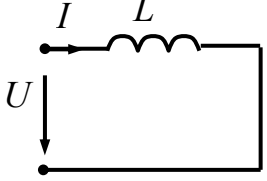
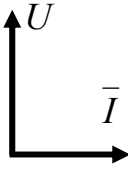
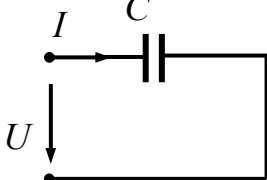
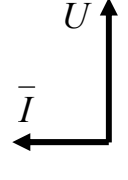
Это закон Ома для цепи синусоидального тока с емкостью.

б) Начальная фаза тока $\psi_i = \psi_u + 90^\circ$, т. е. в цепи с емкостью ток опережает приложенное напряжение по фазе на 90° . При этом $\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ$.

Результаты исследования простейших цепей синусоидального тока представлены в табл. 3.1. Там же показаны их векторные диаграммы, а на рис. 3.6 даны осциллограммы токов и напряжений для цепей с R , L и C .

Таблица 3.1

Амплитудные и фазовые соотношения между током и напряжением в простейших электрических цепях

№ п/п	Схемы цепей	Амплитудные соотношения (закон Ома)	Фазовые соотношения (сдвиг фаз)	Векторные диаграммы
1		$I = \frac{U}{R} = UG$, где $G = \frac{1}{R}$	$\psi_i = \psi_u$ $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$	
2		$I = \frac{U}{X_L} = Ub_L$, где $X_L = \omega L$, $b_L = 1/X_L = 1/\omega L$	$\psi_i = \psi_u - 90^\circ$ $\varphi = \psi_u - \psi_i = +90^\circ$	
3		$I = \frac{U}{X_C} = Ub_C$, где $X_C = 1/\omega C$, $b_C = 1/X_C = \omega C$	$\psi_i = \psi_u + 90^\circ$ $\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ$	

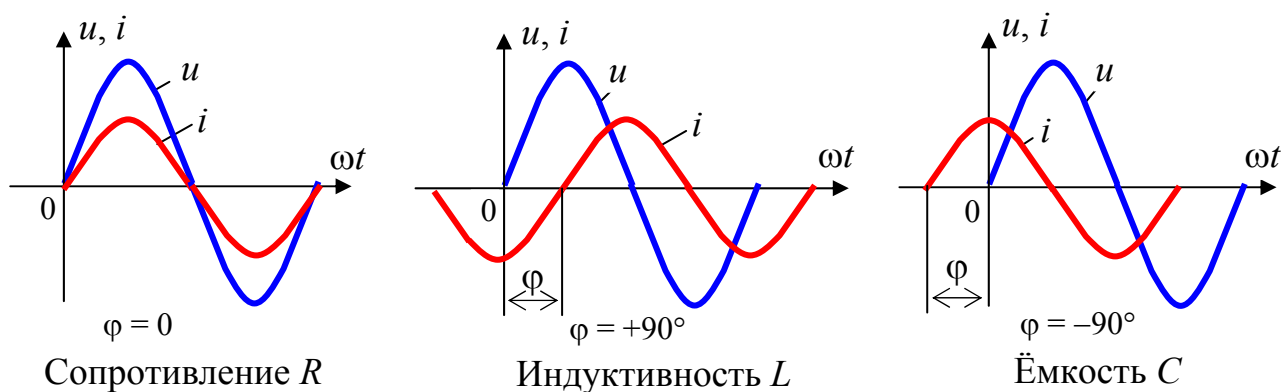


Рис. 3.6

3.9. Зависимость активного, индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты

Эти зависимости представлены в виде графика на рис. 3.7.

Активное сопротивление R в при низких частотах практически не зависит от частоты и остается неизменной величиной, но индуктивное и емкостное сопротивления цепи синусоидального тока, в принципе, зависят от частоты приложенного напряжения.

Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ изменяется прямо пропорционально частоте. При частоте $\omega \rightarrow 0$, $X_L \rightarrow 0$, что подтверждает положение о том, что индуктивность в цепи постоянного тока не обладает сопротивлением*.

Емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C$ изменяется обратно пропорционально частоте: при $\omega \rightarrow 0$ емкостное сопротивление $X_C \rightarrow \infty$, что соответствует отсутствию тока в емкости в цепи постоянного тока.

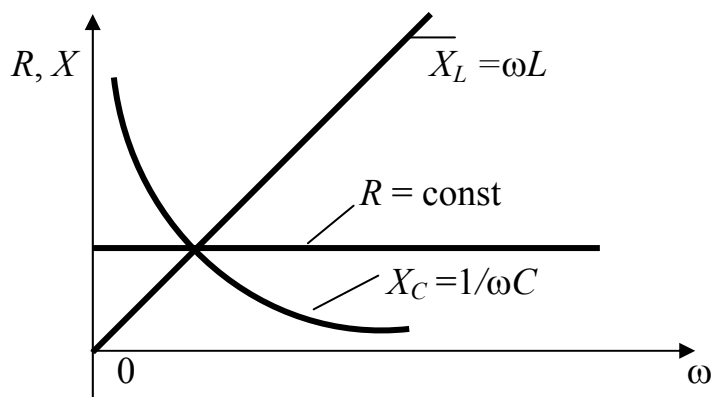


Рис. 3.7

* Частота $\omega = 0$ имеет место в цепи постоянного тока.

3.10. Цепь с последовательным соединением R, L, C

Известно приложенное к цепи синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и параметры R, L, C цепи (рис. 3.8,а). Требуется определить ток цепи i , т. е. его амплитуду I_m и начальную фазу ψ_i .

В цепи с последовательным соединением R, L, C ток во всех ее элементах одинаков, а напряжения на элементах различные. В такой цепи действует 2-й закон Кирхгофа, который в векторной форме записи в соответствии с формулой (3.7) имеет вид $\bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C - \bar{U} = 0$ или $\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C$.

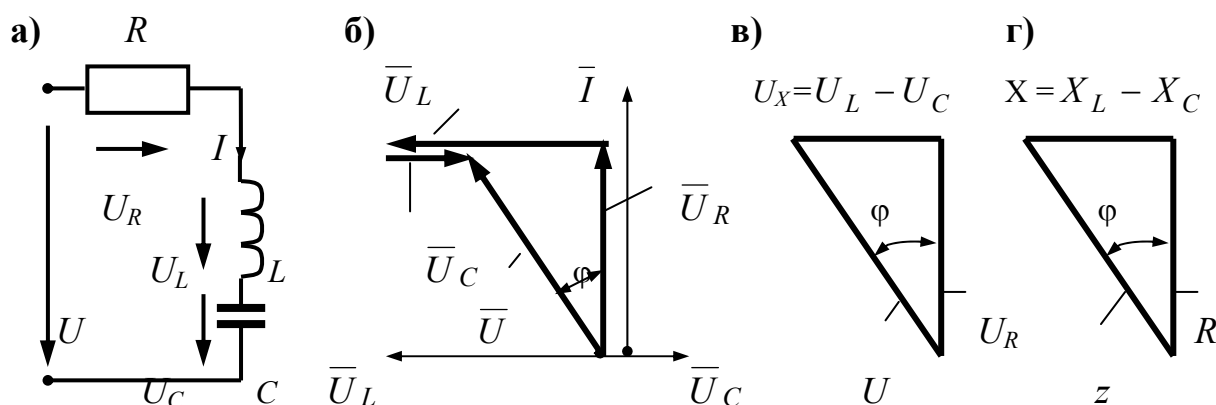


Рис. 3.8

Решим поставленную задачу с помощью векторной диаграммы. Она показана на рис. 3.8,б для случая, когда $U_L > U_C$. Диаграмму начинаем строить с вектора тока $\bar{I}$, откладывая его на плоскости чертежа вертикально вверх (выбор произвольный).

В соответствии с табл. 3.1 вектор $\bar{U}_R$ совпадает с вектором $\bar{I}$ по фазе, вектор $\bar{U}_L$ опережает вектор $\bar{I}$ по фазе на 90° , а вектор $\bar{U}_C$ отстает от вектора $\bar{I}$ по фазе на 90° .

Применяя правило многоугольника для сложения векторов и откладывая векторы U_R , $\bar{U}_L$ и $\bar{U}_C$ друг за другом, находим вектор $\bar{U}$ приложенного к цепи напряжения. Полученный результат показывает, что действующие значения напряжений этой цепи (длины векторов) соотносятся между собой как стороны прямоугольного треугольника. Этот треугольник напряжений показан на рис. 3.8,в. Применяя к этому треугольнику теорему Пифагора, находим

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{U_R^2 + U_X^2},$$

где $U_X = (U_L - U_C)$. Учитывая (табл. 3.1), что $U_R = IR$, $U_L = IX_L$ и $U_C = IX_C$, получаем

$$U = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I\sqrt{R^2 + X^2}, \quad \text{или } U = Iz. \quad (3.19)$$

Эта формула является законом Ома для цепи синусоидального тока с последовательным соединением активного и реактивных сопротивлений. Здесь

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.20)$$

– полное сопротивление данной цепи.

Из формулы (3.20) следует, что активное R , реактивное X и полное z сопротивления рассматриваемой цепи также соотносятся между собой как стороны прямоугольного треугольника. Этот треугольник сопротивлений показан на рис. 3.8,г.

Заметим, что треугольник сопротивлений подобен треугольнику напряжений: поделив все стороны треугольника напряжений на величину действующего значения тока I цепи, получаем треугольник сопротивлений.

Из векторной диаграммы видно, что ток и напряжение цепи не совпадают по фазе. Угол сдвига фаз φ определяется из треугольника напряжений или треугольника сопротивлений:

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (3.21)$$

Этот угол по абсолютному значению меньше 90° . В нашем примере $U_L > U_C$, угол $\varphi > 0$ и цепь имеет индуктивный характер. Если $U_L < U_C$, то $\varphi < 0$ и цепь имеет емкостной характер. Если же $U_L = U_C$, то $\varphi = 0$ и цепь ведет себя как чисто активная.

3.11. Цепь с параллельным соединением R , L и C

Известно приложенное к цепи (рис. 3.9,а) синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и ее параметры R, L, C . Требуется определить ток цепи i (I_m и ψ_i).

В цепи с параллельным соединением R, L, C напряжение на всех ее элементах одинаково, а токи разные. Здесь действует 1-й закон Кирхгофа в векторной форме $\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L + \bar{I}_C$. Для решения задачи построим векторную диаграмму цепи. Она показана на рис. 3.9,б при условии, что $I_L > I_C$. Диаграмму начинаем строить с общего для всей цепи вектора напряжения $\bar{U}$, откладывая его на плоскости вертикально вверх (произвольный выбор).

Затем строим векторы $\bar{I}_R$, $\bar{I}_L$ и $\bar{I}_C$. Вектор $\bar{I}_R$ откладываем по одной линии (параллельно) с вектором $\bar{U}$, так как ток и напряжение в активном сопротивлении R совпадают по фазе. Вектор $\bar{I}_L$ откладываем под углом 90° по часовой стрелке к вектору $\bar{U}$, так как в индуктивности ток отстает от напряжения на 90° . Наконец, вектор $\bar{I}_C$ откладываем под углом 90° против часовой стрелки к вектору U , поскольку в цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на 90° .

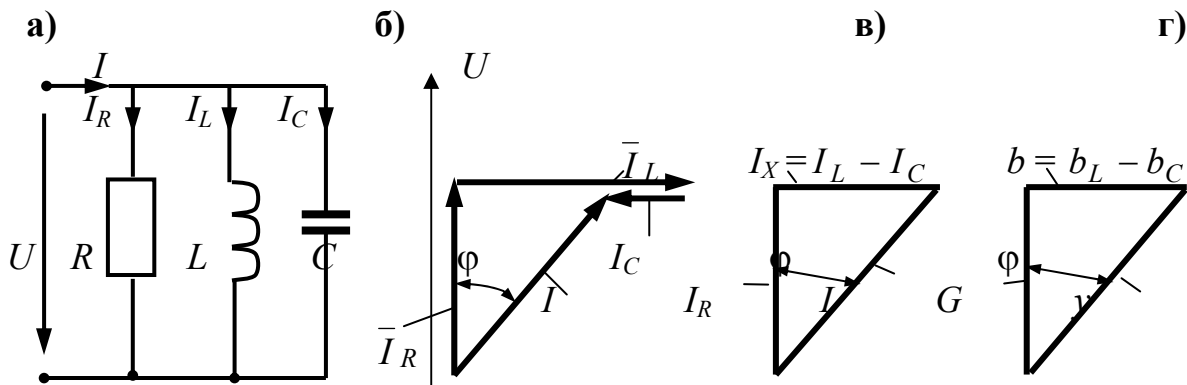


Рис. 3.9

Складывая эти векторы по правилу многоугольника (предварительно выстроив их друг за другом), находим результирующий вектор $\bar{I}$. Из полученной диаграммы следует, что действующие значения токов ветвей (длины векторов) соотносятся между собой, как стороны прямоугольного треугольника (рис. 3.9,в). Применяя теорему Пифагора, получаем

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{I_R^2 + I_X^2}, \text{ где } I_X = (I_L - I_C). \quad (3.22)$$

В соответствии с табл. 3.1 имеем $I_R = U G$; $I_L = U b_L$; $I_C = U b_C$.

Подставляя эти значения токов в формулу (3.22), находим

$$I = U \sqrt{G^2 + (b_L - b_C)^2} = U \sqrt{G^2 + b^2} \text{ или } I = U y. \quad (3.23)$$

Эта формула является законом Ома для цепи с параллельным соединением активных и реактивных сопротивлений. Здесь

$$y = \sqrt{G^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{G^2 + b^2} \quad (3.24)$$

— полная проводимость исследуемой цепи.

Из формулы (3.24) следует, что активная G , реактивная b и полная y проводимости цепи соотносятся между собой, как стороны прямоугольного треугольника (рис. 3.9,г), подобного треугольнику тока: его можно получить, если все стороны треугольника тока поделить на действующее значение напряжения

цепи U . Сравнивая между собой формулы (3.24) и (3.19), замечаем, что полная проводимость y и полное сопротивление z цепи являются взаимнообратными величинами: $y = I/U$; $z = U/I$. Отсюда

$$z = 1/y. \quad (3.25)$$

Из векторной диаграммы на рис. 3.9,б, следует, что ток и напряжение цепи не совпадают по фазе. Угол сдвига фаз φ определяется либо из треугольника напряжений, либо из треугольника токов:

$$\varphi = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_R} = \arctg \frac{b_L - b_C}{G}. \quad (3.26)$$

Этот угол, как видно из диаграммы, по абсолютному значению меньше 90° . Здесь возможны три варианта. Если $I_L > I_C$ ($b_L > b_C$), этот угол положителен и цепь имеет индуктивный характер. При $I_L < I_C$ ($b_L < b_C$) угол сдвига фаз отрицателен и цепь имеет емкостной характер. Если $I_L = I_C$ ($b_L = b_C$), то $\varphi = 0$ и цепь ведет себя как чисто активная.

На этом поставленная в условии задача нахождения тока цепи решена. Результаты, полученные при рассмотрении данной задачи, позволяют рассчитывать цепи, содержащие параллельно соединенные элементы в любой комбинации.

3.12. Мощность цепи синусоидального тока.

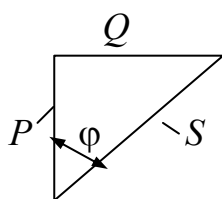
Электрическая мощность в цепи синусоидального тока определяет количество электроэнергии, поступающее в нагрузку в единицу времени. Она равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение тока I . Ее физическая размерность – вольт-ампер (ВА). Различают три вида мощности: активную (P), реактивную (Q) и полную (S).

Мощность в активных сопротивлениях цепи называется *активной* (P). Она характеризует скорость преобразования электромагнитной энергии в тепловую энергию и механическую работу и измеряется в ваттах (Вт).

Мощность в реактивных сопротивлениях цепи называется *реактивной* (Q) и измеряется (для ее отличия от активной мощности) в вольт-амперах реактивных (вар). Она характеризует скорость изменения запаса энергии в электрическом и магнитном полях цепи и не связана с преобразованием энергии электромагнитного поля в тепловую энергию.

Мощность на зажимах всей цепи, состоящей из различных комбинаций соединений R , L и C , называется *полной мощностью* (S) и измеряется в вольтамперах (ВА). Она характеризует скорость поступления электрической энергии в данную цепь.

Заметим, что активная P , реактивная Q и полная S мощности соотносятся между собой как стороны прямоугольного треугольника. Для цепи с последовательным соединением R, L, C его легко получить, если все стороны треугольника напряжений умножить на действующее значение тока I цепи. Для цепи с параллельным соединением R, L, C треугольник мощностей получается, если все стороны треугольника токов умножить на действующее значение U приложенного напряжения.



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI, \text{ ВА}$$

$$P = S \cos \varphi, \text{ Вт}$$

$$Q = S \sin \varphi, \text{ вар}$$

$$\text{где } \varphi = \arctg Q/S = \arccos P/S$$

3.13. Понятие о коэффициенте мощности и коэффициенте полезного действия

В энергетике широко распространено понятие о коэффициенте мощности цепи, под которым понимают отношение ее активной мощности P к полной S :

$$P / S = \cos \varphi. \quad (3.27)$$

Этот коэффициент показывает, какая доля полной мощности преобразуется в тепло и другие виды энергии. Энергетики стремятся эту долю свести к единице, т.е. иметь $P = S$ или $\cos \varphi = 1$, при котором угол φ сдвига фаз между напряжением и током цепи равен нулю. Иначе говоря, наиболее эффективным режимом работы цепи является резонанс токов. С этой целью на зажимы заводских и районных подстанций подключают батареи конденсаторов, подбирая их емкость так, чтобы в цепи имел место резонанс. Энергетики называют такие действия *компенсацией реактивной мощности*.

Не следует путать коэффициент мощности ($\cos \varphi$) и коэффициент полезного действия (η) электроустановок. Коэффициент мощности показывает, какая доля полной мощности S источника преобразуется в активную мощность, а коэффициент полезного действия показывает, насколько эта активная мощность эффективно используется в конкретных электрических установках, например в электродвигателях.

Известно (рис. 3.10), что мощность ($P_{ВЫХ}$), которую электродвигатель развивает на валу, меньше потребляемой из сети активной мощности ($P_{ВХ}$) за счет внутренних потерь (ΔP) на нагрев обмоток и сердечников, трение в подшипниках, работу вентилятора.

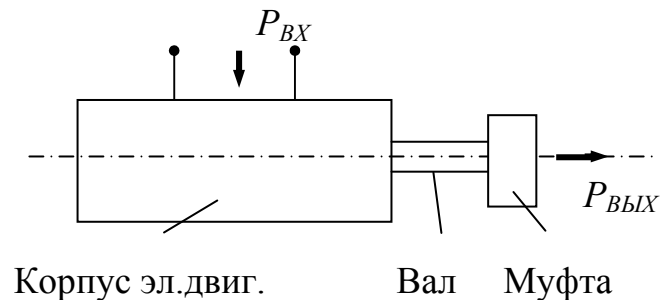


Рис. 3.10

Коэффициент полезного действия электротехнической установки – это отношение активной мощности на ее выходе к активной мощности на входе. Измеряется он в относительных единицах (или в процентах) и всегда меньше единицы (меньше 100 %).

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = \frac{P_{ВХ} - \Delta P}{P_{ВХ}} 100 < 100 \% . \quad (3.28)$$

Коэффициент полезного действия мощных электродвигателей достигает 80 % и более.

3.14. Понятие о двухполюсниках и об эквивалентных цепях

Двухполюсником называется электрическая цепь любой сложности, имеющая два выходных зажима. Двухполюсник является *активным*, если содержит внутри себя источники энергии, и *пассивным*, – если не содержит. Заметим, что все рассмотренные нами ранее электрические цепи были пассивными двухполюсниками.

Два или несколько двухполюсников являются *эквивалентными* (равноценными), если на их зажимах одинаковы синусоиды тока и синусоиды напряжения (иначе говоря, внешние характеристики цепи должны остаться неизменными). Эти условия означают, что на зажимах всех эквивалентных двухполюсников одинаковы действующие значения токов, напряжений и углы сдвига фаз между напряжением и током. Такие двухполюсники можно заменять друг на друга без изменения режима работы остальной цепи. Из этого положения, в ча-

стности, следует, что пассивный двухполюсник любой сложности можно эквивалентно заменить простейшей цепью с последовательным или параллельным соединением активного и реактивного сопротивлений, как это показано на рис. 3.11. Такие преобразования широко используются в теоретической электротехнике для упрощения расчетов сложных цепей.

Если двухполюсник, показанный на рис. 3.11, эквивалентен по отдельности схемам (б) и (в), то эти схемы также эквивалентны друг другу.

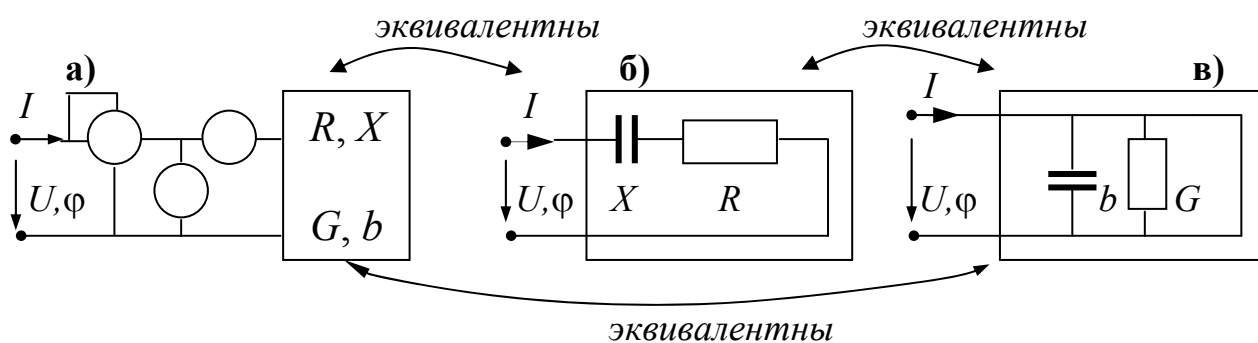
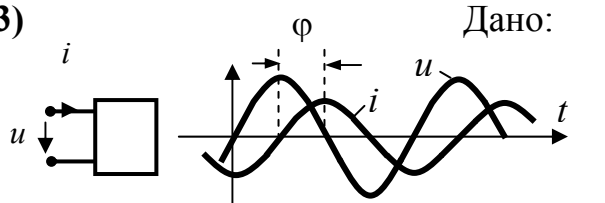
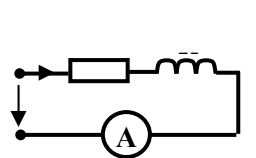
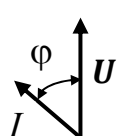
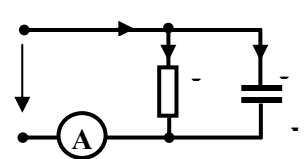
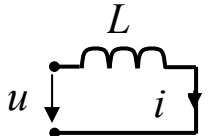
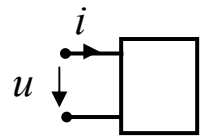


Рис. 3.11

Вопросы для самопроверки

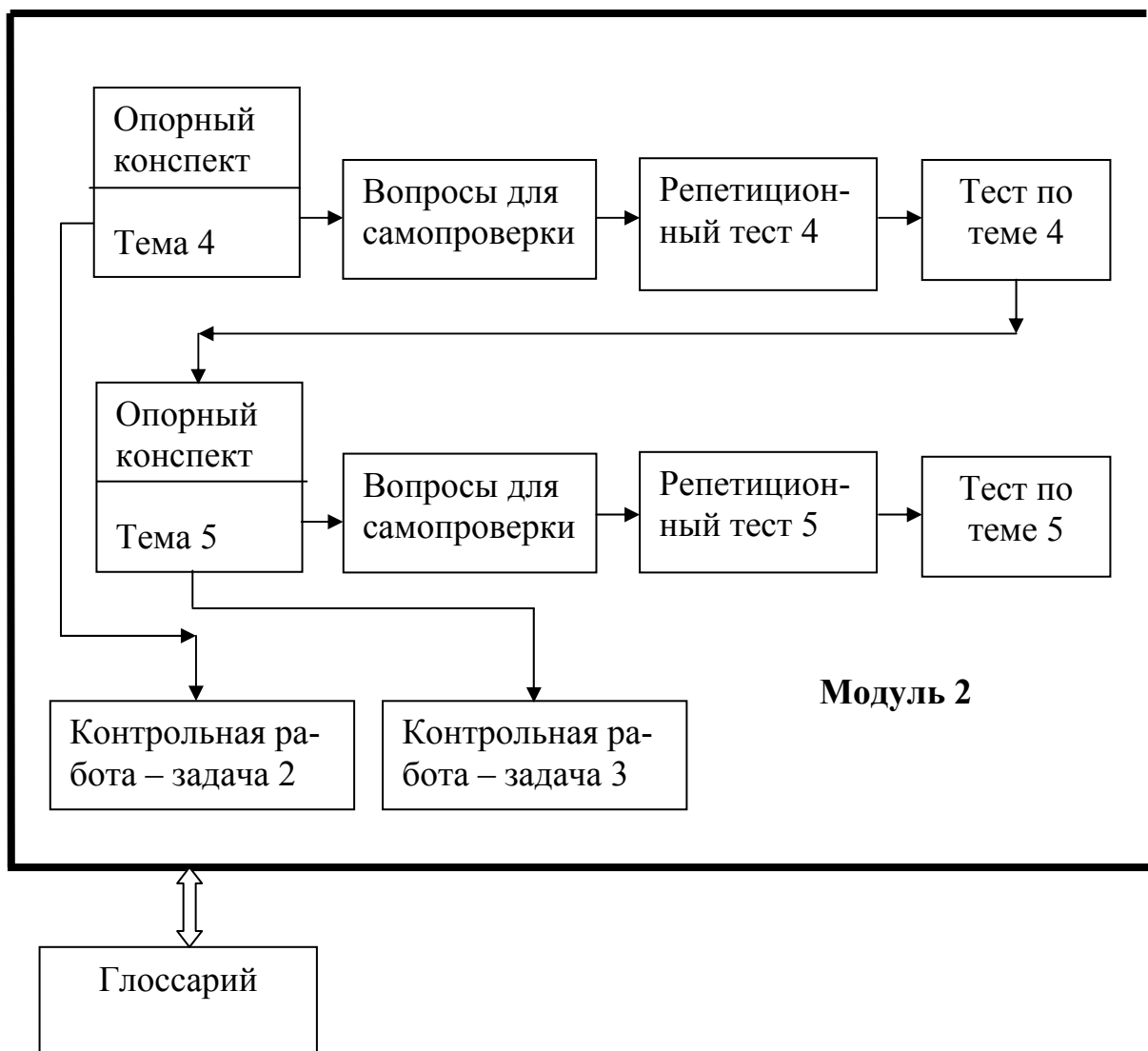
1) Дано: $u = 282\sin(942t - 20^\circ)$ В; $i = 28,2\sin(942t - 50^\circ)$ А. Определите какая это цепь? 1. 3. 5. 2. 4.	6) Даны показания вольтметров: $V = 50$ В; $V_C = 40$ В; $V_L = 70$ В. Определите показание V_R, вольт. 100 $\sqrt{50}$ 10 50 40 1. 2. 3. 4. 5.
2) Дано: $u = 120\sin(628t + 130^\circ)$ В; $i = 10\sin(628t + 40^\circ)$ А. Какова векторная диаграмма цепи? 1. 2. 3. 4. 5.	7) Дано: $G = 0,6$ См; $b_L = 1,2$ См; $b_C = 0,4$ См. Определите угол сдвига фаз φ между напряжением и током цепи. $\arctg \frac{1,2}{0,4}$, $\arctg \frac{0,6}{0,4}$, $\arctg \frac{0,6}{0,8}$, $\arctg \frac{0,8}{0,6}$, 1. 2. 3. 4.

3) Дано:  Какая это цепь? 1. 2. 3. 4. 5.	8) Дано:  $U = 10 \text{ В};$ $R = 3 \text{ Ом};$ $X_L = 4 \text{ Ом}.$ Определите показание амперметра, ампер. 2 3 4 5 6 1. 2. 3. 4. 5.
4) Дана векторная диаграмма цепи.  Укажите, какая это цепь? 1. 3. 5. 2. 4.	9) Дано:  $U = 1 \text{ В};$ $G = 0,8 \text{ См};$ $b_C = 0,6 \text{ См}.$ Определите показание амперметра, ампер. 1 2 3 4 5 1. 2. 3. 4. 5.
5) Дано: $u = 100 \sin(314t + 30^\circ) \text{ В};$  Какова начальная фаза тока в градусах? 0 - 30 30 - 60 120 1. 2. 3. 4. 5.	10) Дано: $u = 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 20^\circ) \text{ В};$ $i = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - 40^\circ) \text{ А}.$  Определите активную мощность цепи, ватт. 1000 700 500 400 200 1. 2. 3. 4. 5.

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ правильного ответа	1	2	5	2	4	5	4	1	1	3

РАЗДЕЛ 2. Методы расчета электрических цепей

Схема работы с разделом 2



Специальность	Часы	Номера тем	Номера параграфов	Номера задач	Номера тестов
1	2	3	4	5	6
240401.65	52	4 5	4.1...4.6 5.1	3	2. 4 2. 5
240301.65	5	4 5	4.1...4.6 5.1	3	2. 4 2. 5
190701.65	72	4 5	4.1...4.6 5.1	3	2. 4 2. 5
261001.65	70	4 5	4.1...4.6 5.1	3	2. 4 2. 5

1	2	3	4	5	6
280202.65	71	4 5	4.1...4.6 5.1	3	2.4 2.5
190701.65	72	4 5	4.1...4.6 5.1	3	2.4 2.5
140101.65	80	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
140104.65	90	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
150104.65	100	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
190205.65	100	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
190601.65	100	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
151001.61	119	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
151001.65	119	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
150202.65	120	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
220100.62	136	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
200102.65	140	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
200102.65	140	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
150501.65	142	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
230101.65	150	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
200402.65	150	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
200501.65	170	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5
210201.65	170	4 5	4.1...4.6 5.1...5.6	3	2.4 2.5

4. Комплексный метод расчета простых цепей синусоидального тока

В теме 4 рассматриваются вопросы, входящие во второй раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 4.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- основы комплексного метода расчета цепей синусоидального тока;
- комплексные токи, напряжения, сопротивления, проводимости;
- законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме;
- комплексная мощность;
- расчет простых цепей комплексным методом

По этой теме следует выполнить лабораторную работу 2.

4.1. Введение. Основы метода

Расчет разветвленных цепей синусоидального тока с помощью векторных диаграмм весьма затруднен. Выход из этих затруднений состоит в том, что вектора можно математически представить в виде комплексных чисел. В результате геометрические действия с векторами можно заменить алгебраическими действиями с комплексными числами.

Таковы исходные положения комплексного (символического) метода. Он позволяет заменить геометрические действия с векторами токов и напряжений алгебраическими действиями с комплексными числами. При этом следует всегда помнить, что каждому вектору на плоскости соответствует комплексное число, а каждому комплексному числу соответствует вектор на плоскости.

Рассмотрев ниже комплексный метод, убедимся в том, что все его формулы окажутся внешне тождественными расчетным формулам цепей постоянного тока, что значительно упрощает освоение этого метода.

Применяя комплексный метод, будем пользоваться всеми известными из курса математики правилами действия с комплексными числами. Сводка наиболее важных из них представлена в табл. 4.1.

Главными положениями комплексного метода являются понятия о комплексных токах и напряжениях, о комплексном сопротивлении, комплексной проводимости и комплексной мощности.

4.2. Комплексные токи и напряжения

Положение векторов токов и напряжений на комплексной плоскости показано на рис. 4.1. Здесь: $\dot{U}$ – комплексное действующее значение напряжения (сокращенно – комплексное напряжение); $\dot{I}$ – комплексное действующее значение тока (сокращенно – комплексный ток).

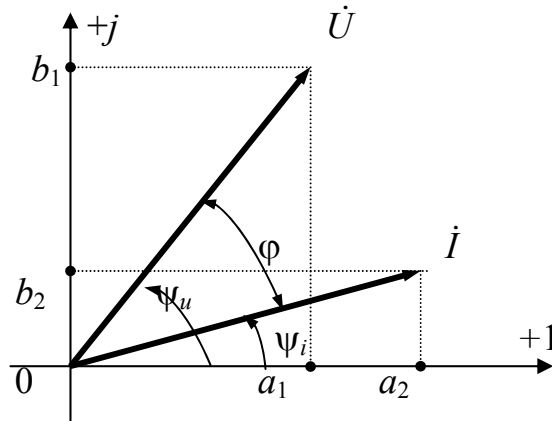


Рис. 4.1

Аналитическая запись $\dot{U}$ и $\dot{I}$ имеет вид

$$\dot{U} = a_1 + jb_1 = U \cos \psi_u + U \sin \psi_u = Ue^{j\psi_u};$$

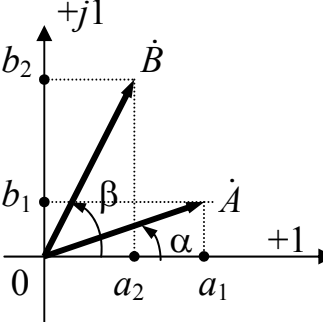
$$\dot{I} = a_2 + jb_2 = I \cos \psi_i + I \sin \psi_i = Ie^{j\psi_i}. \quad (4.1)$$

Формулы (4.1) представляют собой алгебраическую, тригонометрическую и показательную формы записи. В этих формулах: a_1 и a_2 – вещественные части комплексных величин; b_1 и b_2 – мнимые части комплексных величин; U и I – модули комплексных величин (действующие значения); ψ_u и ψ_i – аргументы комплексных величин (начальные фазы).

Заметим, что складывать и вычитать комплексные токи или комплексные напряжения удобно в алгебраической форме записи, а умножать и делить – в показательной форме.

При построении векторных диаграмм сложных цепей (трансформатор, асинхронный двигатель) комплексные токи и напряжения могут располагаться в любом из четырех ее квадрантов, как это показано для тока на рис. 4.2.

**Основные действия с комплексными числами применительно
к синусоидальным функциям времени**

Графическое изображение и формулы перехода	№ п/п	Аналитическая запись комплексных чисел и пра- вила основных действий с ними	
 переход от показатель- ной к алгебраической форме записи $a_1 = A \cos \alpha$ $b_1 = A \sin \alpha$ переход от алгебраичес- кой к показательной форме записи $A = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ $\alpha = \arctg \frac{b_1}{a_1}$	1	Показательная форма $\dot{A}$ и $\dot{B}$	$\dot{A} = Ae^{j\alpha}; \quad \dot{B} = Be^{j\beta}$
	2	Алгебраическая форма $\dot{A}$ и $\dot{B}$	$\dot{A} = a_1 + jb_1; \quad \dot{B} = a_2 + jb_2$
	3	Число $\dot{A}$, сопря- женное $\dot{A}^*$	$\dot{A}^* = Ae^{-j\alpha} = a_1 - jb_1$
	4	Сложение и вычитание $\dot{A}$ и $\dot{B}$	$\dot{A} \pm \dot{B} = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2)$
	5	Умножение $\dot{A}$ на $\dot{B}$	$\dot{A}\dot{B} = ABe^{j(\alpha+\beta)}$ или $\dot{A}\dot{B} = (a_1 + jb_1)(a_2 + jb_2) =$ $= a_1a_2 + jb_1a_2 + jb_2a_1 - b_1b_2$
	6	Умножение $\dot{A}$ на сопряженное комплексное чис- ло $\dot{A}^*$	$\dot{A}\dot{A}^* = Ae^{j\alpha} \cdot Ae^{-j\alpha} = A^2$ $\dot{A}\dot{A}^* = (a_1 + jb_1)(a_1 - jb_1) =$ $= a_1^2 + b_1^2$
	7	Деление $\dot{A}$ на $\dot{B}$	$\frac{\dot{A}}{\dot{B}} = \frac{Ae^{j\alpha}}{Be^{j\beta}} = \frac{A}{B}e^{j(\alpha-\beta)}$ или $\frac{\dot{A}}{\dot{B}} = \frac{a_1 + jb_1}{a_2 + jb_2} \cdot \left(\frac{a_2 - jb_2}{a_2 - jb_2} \right) =$ $= \frac{a_1a_2 + jb_1a_2 - jb_2a_1 + b_1b_2}{a_2^2 + b_2^2}$

Некоторые широко используемые формулы:

$$j1 = \sqrt{-1}; \quad j^2 = -1; \quad e^{\pm j90^\circ} = \pm j1; \quad e^{\pm j180^\circ} = -1;$$

Здесь же даны формулы, определяющие его алгебраическую и показательную форму записи (номера квадрантов указаны римскими цифрами I, II, III и IV).

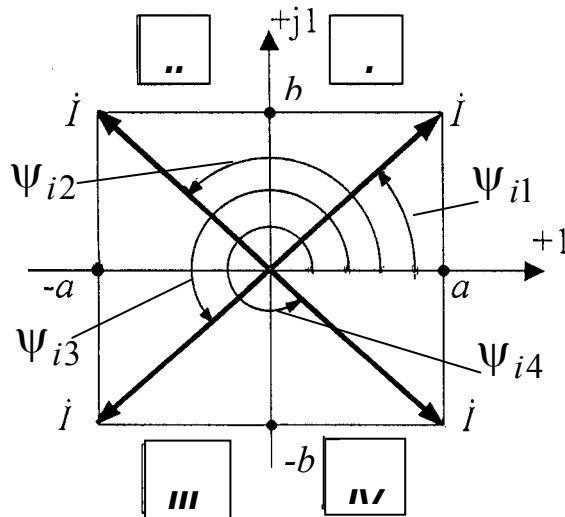


Рис. 4.2

На этом рисунке $I = \sqrt{a^2 + b^2}$ одинаков для всех квадрантов.

I	$\dot{I} = a + jb = Ie^{j\psi_i} = Ie^{j\arctg(b/a)};$
II	$\dot{I} = (-a + jb) = Ie^{j\psi_i} = Ie^{j(180^\circ - \arctg b/a)} = -Ie^{-j\arctg b/a};$
III	$\dot{I} = -a - jb = Ie^{j\psi_i} = Ie^{j(180^\circ + \arctg b/a)} = -Ie^{+j\arctg b/a};$
IV	$\dot{I} = a - jb = Ie^{j\psi_i} = Ie^{j(360^\circ - \arctg b/a)} = +Ie^{-j\arctg b/a}.$

Те же соотношения справедливы и для комплексного напряжения $\dot{U}$, расположенного в различных квадрантах комплексной плоскости.

4.3. Комплексное сопротивление и комплексная проводимость

а) Комплексное сопротивление $\underline{Z}$ есть отношение комплексного напряжения $\dot{U}$ к комплексному току $\dot{I}$:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = ze^{j\varphi}.$$

Это показательная форма записи. Здесь z – полное сопротивление цепи, а φ – угол сдвига между напряжением и током.

Переходя к алгебраической форме записи $\underline{Z}$ через тригонометрическую, находим, что его вещественная часть $z \cos \varphi$ соответствует активному сопротивлению цепи R , а его мнимая часть $z \sin \varphi$ соответствует реактивному сопротивлению X . Поэтому

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = ze^{j\varphi} = z \cos \varphi + jz \sin \varphi = (R + jX). \quad (4.2)$$

Таким образом, комплексное сопротивление содержит в себе полное сопротивление цепи z , активное сопротивление R , реактивное сопротивление X и угол сдвига фаз φ между напряжением и током.

б). *Комплексная проводимость $\underline{Y}$* есть величина, обратная комплексному сопротивлению $\underline{Z}$ и равная отношению комплексного тока к комплексному напряжению:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{Ie^{j\psi_i}}{Ue^{j\psi_u}} = \frac{I}{U} e^{j(\psi_i - \psi_u)} = ye^{-j\varphi}.$$

Это показательная форма записи. Здесь y – полная проводимость цепи, а φ – угол сдвига фаз между напряжением и током (знак минус появился здесь чисто формально в результате взятия обратной величины от $\underline{Z}$). Аналогично находим, что ее вещественная часть $y \cos \varphi$ соответствует активной проводимости цепи G , а ее мнимая часть $y \sin \varphi$ – реактивной проводимости b . Поэтому

$$\underline{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{1}{\underline{Z}} = ye^{-j\varphi} = y \cos \varphi - jy \sin \varphi = (G - jb). \quad (4.3)$$

Таким образом, комплексная проводимость содержит в себе полную проводимость y , активную проводимость G , реактивную проводимость b и угол сдвига фаз φ между напряжением и током.

Заметим, что формулы (4.2) и (4.3) представляют собой закон Ома в комплексной форме записи для участка цепи с $\underline{Z}$ или $\underline{Y}$.

Эти формулы имеют обобщенный характер и справедливы для комплексных сопротивлений и проводимостей, имеющих как активные, так и реактивные составляющие. Однако в теории цепей важно знать также комплексную форму записи чисто активных, чисто индуктивных и чисто емкостных сопротивлений, проводимостей и формулы закона Ома для цепей, содержащих такие

сопротивления и проводимости. Все эти соотношения представлены в табл. 4.2 и 4.3.

Из табл. 4.3 вытекают следующие соответствия между мгновенными и комплексными значениями напряжений и токов:

$$u_R = iR \hat{=} R\dot{I}; \quad u_L = L \frac{di}{dt} \hat{=} j\omega L \dot{I}; \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt \hat{=} -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = \frac{\dot{I}}{j\omega C};$$

$$i_G = Gu \hat{=} G\dot{U}; \quad i_C = C du/dt \hat{=} j\omega C \dot{U};$$

где ($\hat{=}$) – принятый здесь знак соответствия.

Таблица 4.2

**Активные, индуктивные, емкостные сопротивления и проводимости
в комплексной форме записи**

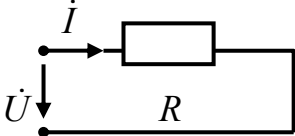
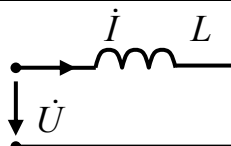
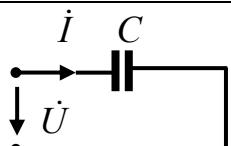
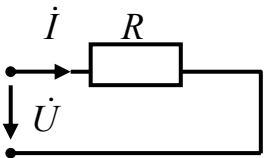
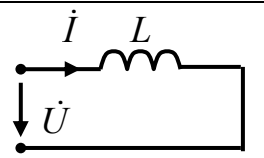
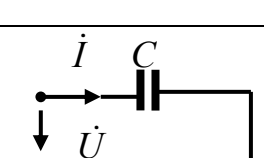
№ п/п	Схемы цепей	Физические свойства цепи	Комплексное со- противление $\underline{Z}$ $\underline{Z} = z e^{j\varphi}$	Комплексная проводимость $Y = 1/Z$
1		$z = R$ $\varphi = 0$	$\underline{Z}_R = R e^{j0^\circ} = R$	$\underline{Y}_R = \frac{1}{\underline{Z}_R} =$ $= \frac{1}{R} = G$
2		$z = x_L = \omega L$ $\varphi = +90^\circ$	$\underline{Z}_L = x_L e^{+j90^\circ} =$ $= jx_L = j\omega L$	$\underline{Y}_L = \frac{1}{\underline{Z}_L} =$ $= \frac{1}{jx_L} = -j \frac{1}{\omega L}$
3		$z = x_C = \frac{1}{\omega C}$ $\varphi = -90^\circ$	$\underline{Z}_C = x_C e^{-j90^\circ} =$ $= -jx_C = -j \frac{1}{\omega C} =$ $= + \frac{1}{j\omega C}$	$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C} =$ $= \frac{1}{-jx_C} = +j\omega C$

Таблица 4.3

Комплексная форма записи закона Ома для цепей с активным, индуктивным, емкостным сопротивлениями

№ п/п	Схемы цепей	Соотношение между u и i	Комплексная форма записи Закона Ома
1		$u = i R$ $i = u G$	$\dot{U} = \underline{Z}_R \dot{I} = R \dot{I}$ $\dot{I} = \underline{Y}_R \dot{U} = G \dot{U}$
2		$u = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int u dt$	$\dot{U} = \underline{Z}_L \dot{I} = j\omega L \dot{I}$ $\dot{I} = \underline{Y}_L \dot{U} = -j \frac{1}{\omega L} \dot{U}$
3		$u = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{du}{dt}$	$\dot{U} = \underline{Z}_C \dot{I} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$ $\dot{I} = \underline{Y}_C \dot{U} = +j\omega C \dot{U}$

4.4. Комплексная мощность

Комплексная мощность есть произведение комплексного напряжения на сопряженный комплексный ток цепи

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = S e^{j\varphi}.$$

Это показательная форма записи комплексной мощности. Здесь S – полная мощность цепи; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током; $\dot{I}^* = I e^{-j\psi_i}$ – комплексный ток, сопряженный заданному комплексному току $\dot{I} = I e^{+j\psi_i}$. Переходя от показательной к алгебраической форме записи находим, что ее вещественная часть $S \cos \varphi$ соответствует активной мощности цепи P а ее мнимая часть $S \sin \varphi$ – реактивной мощности цепи Q . Поэтому

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = S e^{j\varphi} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ. \quad (4.4)$$

Знак $\sim$ над комплексной мощностью носит название «тильда» и ставится вместо точки потому, что мощность не является синусоидой.

Таким образом, комплексная мощность цепи содержит в себе полную мощность S , активную мощность P , реактивную мощность Q и угол сдвига фаз φ между напряжением и током.

Заметим, что полная мощность S равна модулю комплексной мощности

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ ВА.}$$

4.5. Законы Кирхгофа в комплексной форме записи

Законы Кирхгофа в комплексной форме записи и алгоритмы составления уравнений по этим законам выполняются.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма комплексных токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^K \dot{I}_k = 0, \quad (4.5)$$

где K – число ветвей подходящих к данному узлу цепи

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма комплексных ЭДС контура равна алгебраической сумме комплексных напряжений на всех комплексных сопротивлениях этого контура:

$$\sum_m^Q \dot{E}_q = \sum_{n=1}^N \dot{I}_n \underline{Z}_n, \quad (4.6)$$

где Q – число источников ЭДС контура; N – число комплексных сопротивлений контура.

4.6. Аналогия с цепями постоянного тока

Сравнивая формулы закона Ома и законов Кирхгофа для цепей постоянного тока с соответствующими формулами для цепей синусоидального тока в комплексной форме записи, легко убеждаемся в том, что они формально тождественны (аналогичны) друг другу, хотя физические процессы в сравниваемых цепях различны. Таким образом, если в формулах для цепей постоянного тока заменить U , I , E , R и G на $\dot{U}$, $\dot{I}$, $\dot{E}$, $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$, то получаем формулы, записанные в комплексной форме. Это позволяет все методы расчета цепей постоянного тока применять для расчета комплексных токов, на основании которых находятся действующие и мгновенные значения искомых токов.

Расчет цепей комплексным методом рекомендуется вести в следующей последовательности:

1. Изображаем заданные синусоидальные напряжения и параметры реактивных элементов комплексными числами (4.3), (4.4).

2. Используя законы Ома (4.2) и Кирхгофа (4.5, 4.6) в комплексной форме, составляем уравнения для определения комплексных токов (напряжений).

3. Определяем комплексные токи в ветвях в результате решения алгебраических уравнений п. 2. Основные алгебраические действия с комплексными числами, которые используются на этом этапе, приведены в приложении.

4. С учетом соответствия преобразуем найденные комплексные токи в ветвях в соответствующие мгновенные значения.

Пример 4.1. Определить мгновенные и действующие значения токов во всех ветвях цепи (рис. 4.3), у которой $C = 200$ мкФ, $L = 10$ мГн, $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $u = 12\sin(314t + \pi/6)$. *Решение.* 1. Вычислим индуктивное и емкостное сопротивления, включенные в параллельно соединенные ветви:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 3,14 \text{ Ом}; \quad X_C = 1/\omega C = 10^6 / (314 \cdot 200) = 15,92 \text{ Ом}.$$

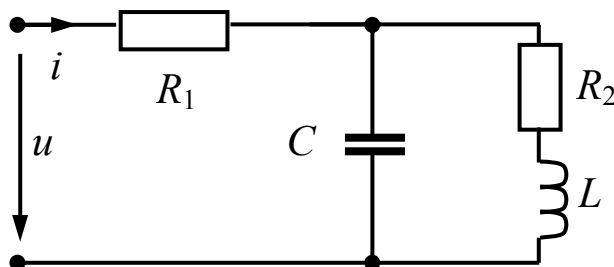


Рис. 4.3

2. Изобразим синусоидальное входное напряжение и параметры реактивных элементов L и C комплексными числами:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\frac{\pi}{6}} = 12e^{j\frac{\pi}{6}}; \quad jX_L = j\omega L = j314 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = j3,14 \text{ Ом};$$

$$-jX_C = -j/\omega C = \frac{-j}{314 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = -j15,92 \text{ Ом}.$$

Если начальная фаза ψ_u входного напряжения в условии задачи не задана, то ее рекомендуется взять равной нулю ($\psi_u = 0$).

3. Используя закон Ома в комплексной форме, составим уравнение для определения комплексной амплитуды тока на входе цепи:

$$\dot{I}_m = \dot{U}_m / \underline{Z},$$

где $\underline{Z}$ – комплексное сопротивление цепи определяется по аналогичным правилам расчета полного сопротивления резистивной цепи постоянного тока:

$$\underline{Z} = R_1 + \frac{-jX_C(R_2 + jX_L)}{R_2 + jX_L - jX_C} = R_1 + \frac{X_C X_L - jX_C R_2}{R_2 + j(X_L - X_C)} = 10 + \frac{50 - j159}{10 - j12,76} = 19,6 - j3,6.$$

4. Определим амплитуду и действующее значение комплексного тока на входе цепи:

$$\dot{I}_m = \frac{12e^{j\frac{\pi}{6}}}{19,6 - j3,6} = \frac{12e^{j\frac{\pi}{6}}}{20e^{-j\frac{\pi}{18}}} = 0,6e^{j\frac{\pi}{4,5}} = 0,6(\cos 40^\circ + j\sin 40^\circ) = \sqrt{2}(0,33 + j0,28);$$

$$\dot{I} = 0,33 + j0,28 = 0,43e^{j\pi/4}.$$

5. Преобразуем амплитуду комплексного тока на входе цепи в мгновенное значение синусоидального тока:

$$i = I_m \sin(314t + \psi_i) = 0,6 \sin(314t + \pi/4,5) \text{ А.}$$

Дальнейший расчет цепи комплексным методом ведем по правилам расчета цепей постоянного тока.

6. Комплексное действующее значение напряжения на резисторе R_1

$$\dot{U}_{R1} = \dot{I} \cdot R_1 = (0,33 + j0,28) \cdot 10 = 3,3 + j2,8 \text{ В.}$$

7. Комплексное действующее значение напряжения на участке разветвления цепи

$$\dot{U}_{23} = \dot{I} \underline{Z}_{23} = (0,33 + j0,28)(9,6 - j3,6) = 4,18 + j1,5 \text{ В.}$$

8. Комплексное действующее значение токов в ветвях, соединенных параллельно:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{(4,18 + j1,5)}{-j15,92} = -0,094 + j0,264 \text{ А;}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_3} = \frac{(4,18 + j1,5)}{10 + j3,14} = 0,42 + j0,018 \text{ А.}$$

9. Действующие и мгновенные значения токов в ветвях, соединенных параллельно:

$$I_2 = \sqrt{0,094^2 + 0,264^2} = 0,28 \text{ А}; i_2 = \sqrt{2} \cdot 0,28 \sin(314t + \arctg \frac{0,264}{-0,094}) =$$

$$= 0,395 \sin(314t - 0,531\pi) \text{ А};$$

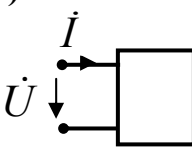
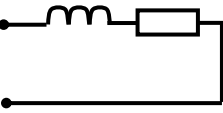
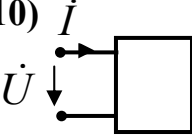
$$I_3 = \sqrt{0,42^2 + 0,018^2} = 0,42 \text{ А}; i_3 = \sqrt{2} \cdot 0,42 \sin(314t + \arctg \frac{0,42}{0,018}) =$$

$$= 0,594 \sin(314t + 0,486\pi) \text{ А}.$$

10. Если рассчитанные комплексные токи и напряжения переместить на комплексную плоскость, то получим векторную диаграмму.

Вопросы для самопроверки

1) Дано: $\dot{I} = 5e^{j53^\circ}$ А. Какова алгебраическая форма записи тока? 1. $5\cos 53^\circ - j5\sin 53^\circ$ 2. $5 + j53$ 3. $5\sin 53^\circ + j5\cos 53^\circ$ 4. $5\cos 53^\circ + j5\sin 53^\circ$ 5. $5\sin 53^\circ - j5\cos 53^\circ$	6) Дано: $\dot{I} = (-80 - j60)$ А. Какова показательная форма записи тока? 1. $\sqrt{80^2 + 60^2} e^{j[180^\circ + \arctg(3/4)]}$ 2. $\sqrt{80^2 + 60^2} e^{j[180^\circ - \arctg(3/4)]}$ 3. $\sqrt{80^2 + 60^2} e^{j\arctg(3/4)}$ 4. $\sqrt{80^2 + 60^2} e^{-j\arctg(3/4)}$														
2) Дано: $\dot{U} = (30 + j40)$ В. В каком квадранте комплексной плоскости находится вектор напряжения? II III +j1 +1 I IV <table><tr><td>II</td><td>I</td><td>IV</td><td>III</td></tr><tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td><td>4.</td></tr></table>	II	I	IV	III	1.	2.	3.	4.	7) Дано: $\dot{U} = 60e^{j80^\circ}$ В; $\dot{I} = 2e^{j120^\circ}$ А. Определите активное сопротивление цепи в омах. $\dot{I}$ $\dot{U}$ <table><tr><td>1. $30\cos 60^\circ$</td><td>3. $30\sin 80^\circ$</td><td>5. $30\cos 80^\circ$</td></tr><tr><td>2. $30\sin 60^\circ$</td><td>4. $30\sin 20^\circ$</td><td></td></tr></table>	1. $30\cos 60^\circ$	3. $30\sin 80^\circ$	5. $30\cos 80^\circ$	2. $30\sin 60^\circ$	4. $30\sin 20^\circ$	
II	I	IV	III												
1.	2.	3.	4.												
1. $30\cos 60^\circ$	3. $30\sin 80^\circ$	5. $30\cos 80^\circ$													
2. $30\sin 60^\circ$	4. $30\sin 20^\circ$														
3) Дан комплексный ток $\dot{I} = 10^{j30^\circ}$ А. Найдите соответствующую ему синусоиду тока. 1. $10\sin(\omega t + 30^\circ)$ 2. $10\sin(\omega t - 30^\circ)$ 3. $14,1\sin 30^\circ$ 4. $14,1\sin(\omega t - 30^\circ)$	8) Дано: $\dot{U} = 120e^{j65^\circ}$ В; $\underline{Z} = 2e^{j15^\circ}$ Ом. Определите показания амперметра, ампер. $\dot{U}$ $\dot{I}$ A <table><tr><td>20</td><td>40</td><td>60</td><td>80</td><td>120</td></tr><tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td><td>4.</td><td>5.</td></tr></table>	20	40	60	80	120	1.	2.	3.	4.	5.				
20	40	60	80	120											
1.	2.	3.	4.	5.											

5. $14,1\sin(\omega t + 30^\circ)$	
4) Дана комплексная проводимость цепи $\underline{Y} = (0,7 - j0,8) \text{ См.}$ Укажите какая это цепь?      1.2.3.4.5.	9) Дано: $\dot{U} = 100e^{j70^\circ} \text{ В}$ $\dot{I} = 10e^{j40^\circ} \text{ А}$ Определите реактивную проводимость цепи, сименс.  1. $0,1\cos 40^\circ$ 3. $0,1\cos 70^\circ$ 5. $0,1$ 2. $0,1\sin 30^\circ$ 4. $0,1\sin 70^\circ$
5)  Дано: $R = 3 \text{ Ом};$ $X = 4 \text{ Ом.}$ Укажите комплексное сопротивление цепи $\underline{Z} \text{ Ом.}$ 1. $4 + j3$ 3. $3 + j4$ 2. $4 - j3$ 4. $3 - j4$ 5. $j7$	10)  Дано: $\dot{U} = 180e^{-j120^\circ} \text{ В};$ $\dot{I} = 3e^{-j50^\circ} \text{ А.}$ Определите реактивную мощность цепи, ВА. 1. $540\sin 120^\circ$ 3. $540\sin 50^\circ$ 2. $540\cos 120^\circ$ 4. $540\cos 70^\circ$ 5. $540\sin 70^\circ$

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ правильного ответа	4	2	3	4	3	1	1	3	2	5

5. Методы расчета сложных цепей синусоидального тока

В теме 5 рассматриваются вопросы, входящие в третий раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 5.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- метод контурных токов;
- метод узловых напряжений (узловых потенциалов);
- метод эквивалентного источника;
- метод наложения;
- баланс мощностей цепи синусоидального тока;
- комплексная мощность.

5.1. Введение

Сложной называют электрическую цепь, имеющую разветвленную структуру и содержащую несколько источников энергии.

В основу расчета (определения токов) будет положено изображение исходных данных цепи комплексными числами. Напомним, что законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме выполняются. Поэтому все рассмотренные ниже методы можно использовать для расчета цепей постоянного тока.

Метод расчета, основанный на непосредственном применении 1-го и 2-го законов Кирхгофа, рассматривался во второй лекции для цепей постоянного тока, и поэтому он здесь не представлен.

5.2. Метод контурных токов

В основе метода лежит представление о независимых контурах, по которым протекают не зависящие друг от друга контурные токи.

Независимым называется контур, который содержит хотя бы одну новую ветвь, не входящую в другие контура.

На рис. 5.1 показана схема сложной цепи, в которой можно насчитать семь контуров. В ней можно выбрать только три независимых контура, например, контуры I, II, III. Остальные контуры окажутся зависимыми поскольку каждый из них содержит новые ветви, не входящие в другие контура.

В каждом из трех независимых контуров цепи протекает свой контурный ток. На рис. 5.1 показаны произвольно (по часовой стрелке) принятые направления действия контурных токов $\dot{I}_I$, $\dot{I}_{II}$ и $\dot{I}_{III}$ в независимых контурах цепи.

Контурные токи – промежуточные неизвестные данного метода расчета. Относительно них составляется система уравнений (используется второй закон Кирхгофа). Легко заметить, что контурных токов меньше, чем токов в ветвях цепи. Это позволяет понизить порядок системы уравнений по сравнению с решением задачи по 1-му и 2-му законам Кирхгофа.

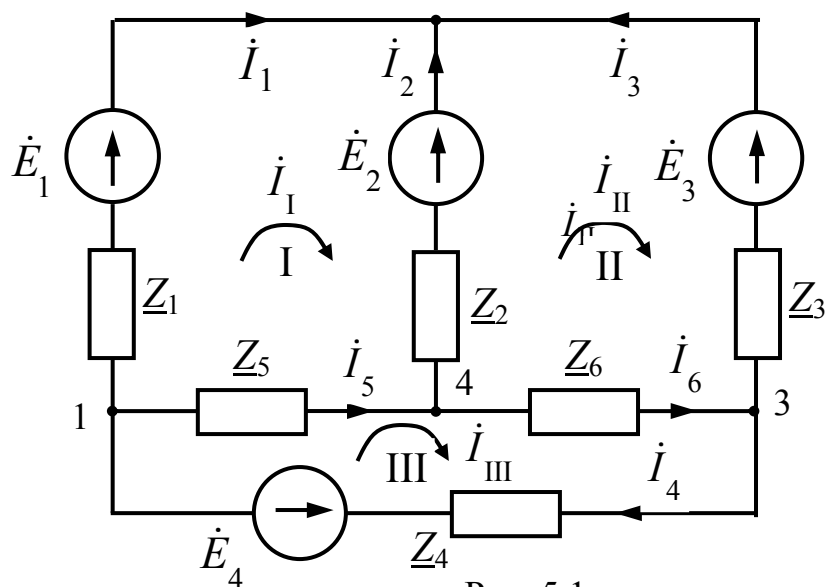


Рис. 5.1

Методику составления уравнений для контурных токов рассмотрим на примере контура I. Составим для него уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_I (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5) - \dot{I}_{II} \underline{Z}_2 - \dot{I}_{III} \underline{Z}_5 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2. \quad (5.1)$$

В левой части этого уравнения представлены все напряжения первого контура. Здесь $\dot{I}_I (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5)$ – напряжение, создаваемое первым контурным током во всех сопротивлениях первого контура; $\dot{I}_{II} \underline{Z}_2$ – напряжение, создаваемое в сопротивлении $\underline{Z}_2$ первого контура током $\dot{I}_{II}$ второго контура, действующим противоположно току $\dot{I}_I$ и поэтому взятое со знаком (–); $\dot{I}_{III} \underline{Z}_5$ – напряжение, создаваемое в сопротивлении $\underline{Z}_5$ первого контура током $\dot{I}_{III}$ третьего контура, действующим противоположно току $\dot{I}_I$ и поэтому также взятое в уравнении со знаком (–).

Правая часть уравнения (5.1) состоит из алгебраической суммы ЭДС первого контура. Здесь $\dot{E}_1$ направлена согласно (в одну сторону) с направлением тока $\dot{I}_I$ и, следовательно, входит в уравнение со знаком (+), а $\dot{E}_2$ направлена встречно контурному току $\dot{I}_I$ и имеет знак (–).

Уравнение (5.1) можно записать так:

$$\underline{Z}_{11} \dot{I}_I + \underline{Z}_{12} \dot{I}_{II} + \underline{Z}_{13} \dot{I}_{III} = \dot{E}_{11},$$

где $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5$; $\underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_2$; $\underline{Z}_{13} = -\underline{Z}_5$; $\dot{E}_{11} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2$.

Аналогично можем записать уравнения для остальных контуров, которые образуют систему:

$$(5.2) \quad \begin{cases} \underline{Z}_{11} \dot{I}_I + \underline{Z}_{12} \dot{I}_{II} + \underline{Z}_{13} \dot{I}_{III} = \dot{E}_{11} \\ \underline{Z}_{21} \dot{I}_I + \underline{Z}_{22} \dot{I}_{II} + \underline{Z}_{23} \dot{I}_{III} = \dot{E}_{22} \end{cases} .$$

$$\underline{Z}_{31} \dot{I}_I + \underline{Z}_{32} \dot{I}_{II} + \underline{Z}_{33} \dot{I}_{III} = \dot{E}_{33} .$$

Сумму сопротивлений каждого контура будем называть *собственным сопротивлением контура* и обозначать для сокращения записи одним сопротивлением с двойным индексом вида $\underline{Z}_{KK}$. Для нашего примера имеем следующие собственные сопротивления контуров: $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5$; $\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_6$; $\underline{Z}_{33} = \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_4$. Все собственные сопротивления входят в уравнения (5.2) со знаком (+).

Сумму сопротивления общих для любых двух смежных независимых контуров будем называть *взаимным сопротивлением контуров* и обозначать его двойной индексацией вида $\underline{Z}_{KM}$. Взаимные сопротивления входят в уравнение для каждого независимого контура со знаком (+), если контурные токи смежных контуров направлены в них в одну сторону (согласно) и со знаком (–), – если в разные стороны (встречно). В нашем примере взаимное сопротивление первого и второго контуров $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_2$; взаимное сопротивление первого и третьего контуров $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} = -\underline{Z}_5$; взаимное сопротивление второго и третьего контуров $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} = -\underline{Z}_6$. Все они взяты со знаком (–) потому, что контурные токи в каждом из смежных контуров направлены встречно друг другу.

Алгебраическую сумму ЭДС каждого независимого контура будем обозначать одной буквой с двойным индексом вида $\dot{E}_{KK}$. Решая полученную систему уравнений, находим контурные токи $\dot{I}_I$, $\dot{I}_{II}$ и $\dot{I}_{III}$. Однако на этом решение задачи не завершается, поскольку надо найти еще токи во всех ветвях цепи.

Во внешних ветвях (в нашем примере это ветви с сопротивлением $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$) их токи равны контурным (с учетом знака).

Во внутренних (смежных) ветвях ($\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_5$ и $\underline{Z}_6$) токи ветвей равны алгебраической сумме контурных токов смежных контуров. В нашем примере

(рис. 5.1): токи внешних ветвей $\dot{I}_1 = \dot{I}_I$, $\dot{I}_3 = -\dot{I}_{II}$, $\dot{I}_4 = \dot{I}_{III}$; токи внутренних ветвей $\dot{I}_2 = \dot{I}_{II} - \dot{I}_I$, $\dot{I}_5 = \dot{I}_{III} - \dot{I}_I$, $\dot{I}_6 = \dot{I}_{III} - \dot{I}_{II}$.

Пример 5.1. Два источника энергии (рис. 5.2) работают параллельно на одну нагрузку. Параметры источников и нагрузки известны: $\dot{E}_1 = 120$ В; $\dot{E}_2 = 115$ В; $\underline{Z}_{01} = \underline{Z}_{02} = (1+j2)$ Ом; $\underline{Z}_H = 10$ Ом. Требуется определить комплексные токи всех ветвей цепи, используя метод контурных токов.

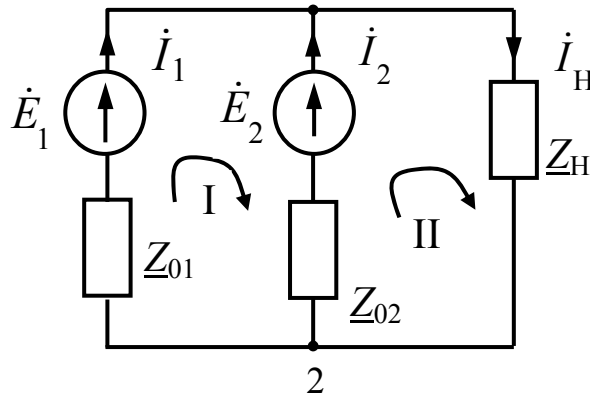


Рис. 5.2

1. Выбираем (произвольно) направления токов во всех ветвях цепи ($\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_H$), как это показано на рис. 5.1.

2. Выбираем в качестве независимых контуры I и II и направления контурных токов $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$ в них, как это показано на рис. 5.1.

3. Составляем систему уравнений по образцу системы (5.2)

$$\begin{cases} \dot{I}_I \underline{Z}_{11} + \dot{I}_{II} \underline{Z}_{12} = \dot{E}_{11}; \\ \dot{I}_I \underline{Z}_{21} + \dot{I}_{II} \underline{Z}_{22} = \dot{E}_{22}. \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\text{Здесь } \dot{E}_{11} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 120 - 115 = 5 \text{ В; } \dot{E}_{22} = \dot{E}_2 = 115 \text{ В;}$$

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{01} + \underline{Z}_{02} = (1+j2) + (1+j2) = (2+j4) \text{ Ом; } \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{02} + \underline{Z}_H = (1+j2) + 10 = (11+j2) \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{02} = -(1+j2) \text{ Ом.}$$

4. Рассчитываем контурные токи $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$, воспользовавшись теорией определителей.

Главный определитель системы

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (2+j4) & -(1+j2) \\ -(1+j2) & (11+j2) \end{vmatrix} = \\ &= (2+j4)(11+j2) - (1+j2)(1+j2) = 17 + j44 = 47,2e^{j68,8^\circ}. \end{aligned}$$

Первый дополнительный определитель получаем из главного заменой первого столбца свободными членами уравнений:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \dot{E}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \dot{E}_{22} & \underline{Z}_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 & -(1+j2) \\ 115 & (11+j2) \end{vmatrix} =$$

$$= 5(11+j2) + 115(1+j2) = 170 + j240 = 294e^{j54,7^\circ}.$$

Второй дополнительный определитель получаем из главного заменой второго столбца свободными членами уравнений.

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{11} & \dot{E}_{11} \\ \underline{Z}_{21} & \dot{E}_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2+j4 & 5 \\ -(1+j2) & 115 \end{vmatrix} =$$

$$= 115(2+j4) + 5(1+j2) = 235 + j470 = 525,5 e^{j63,4^\circ}.$$

Теперь определяем контурные токи цепи

$$\dot{I}_I = \Delta_1 / \Delta = 294 e^{j54,7^\circ} / 47,2 e^{j68,8^\circ} = 6,23 e^{-j14,1^\circ} = 6,04 - j1,52 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{II} = \Delta_2 / \Delta = 525,5 e^{j63,4^\circ} / 47,2 e^{j68,8^\circ} = 11,1 e^{-j5,4^\circ} = 11,06 - j1,04 \text{ А}.$$

5. Находим токи во всех ветвях цепи. Ток $\dot{I}_I$ в левой ветви цепи равен контурному току, так как совпадает с ним по направлению: $\dot{I}_I = \dot{I}_I = (6,04 - j1,52) \text{ А}$. Ток $\dot{I}_H$ в правой ветви цепи равен контурному току $\dot{I}_{II}$, поскольку совпадает с ним по направлению: $\dot{I}_H = \dot{I}_{II} = (11,06 - j1,04) \text{ А}$. Ток в средней ветви $\dot{I}_2$ равен алгебраической сумме контурных токов: $\dot{I}_2 = \dot{I}_{II} - \dot{I}_I = (11,06 - j1,04) - (6,04 - j1,52) = (5,02 + j0,48)$. Здесь ток $\dot{I}_{II}$ взят со знаком (+), так как он совпадает по направлению с током ветви $\dot{I}_2$, а контурный ток $\dot{I}_I$ взят со знаком (-), так как его направление противоположно $\dot{I}_2$.

5.3. Метод узловых напряжений (узловых потенциалов)

Метод основан на положении о том, что токи во всех ветвях сложной цепи можно рассчитать, если известны напряжения на всех ее ветвях.

На рис. 5.3,а представлена схема некоторой сложной цепи, имеющей шесть ветвей. Рассмотрим одну из ветвей этой цепи, расположенную между любыми двумя узлами "k" и "m" (рис. 5.3,б). Применив второй закон Кирхгофа и учитывая, что $\underline{Y}_{km} = 1/\underline{Z}_{km}$, получаем $\dot{I}_{km}\underline{Z}_{km} - \dot{U}_{km} = \dot{E}_{km}$ или

$$\dot{I}_{km} = (\dot{E}_{km} + \dot{U}_{km}) / \underline{Z}_{km} = \underline{Y}_{km} (\dot{E}_{km} + \dot{U}_{km}). \quad (5.4)$$

В этой формуле ток, напряжение и ЭДС обозначены двойными индексами. При этом все они направлены (для удобства записи) от узла "k" к узлу "m". Если реальные токи, напряжения и ЭДС окажутся направлены в противоположную сторону, то они войдут в уравнение (5.4) с обратным знаком (со знаком "-"). Здесь $\dot{E}_{km}$ и $\underline{Z}_{km}$ – известные из условия задачи величины. Если, кроме того, найти напряжение $\dot{U}_{km}$, то ток $\dot{I}_{km}$ в этой ветви также будет найден.

В нашей схеме шесть ветвей и, следовательно, шесть неизвестных напряжений. Для их нахождения необходимо предварительно найти только те из них, которые действуют между каждым из узлов цепи и опорным узлом "О" (выбираются произвольно). Они называются *узловыми напряжениями*.

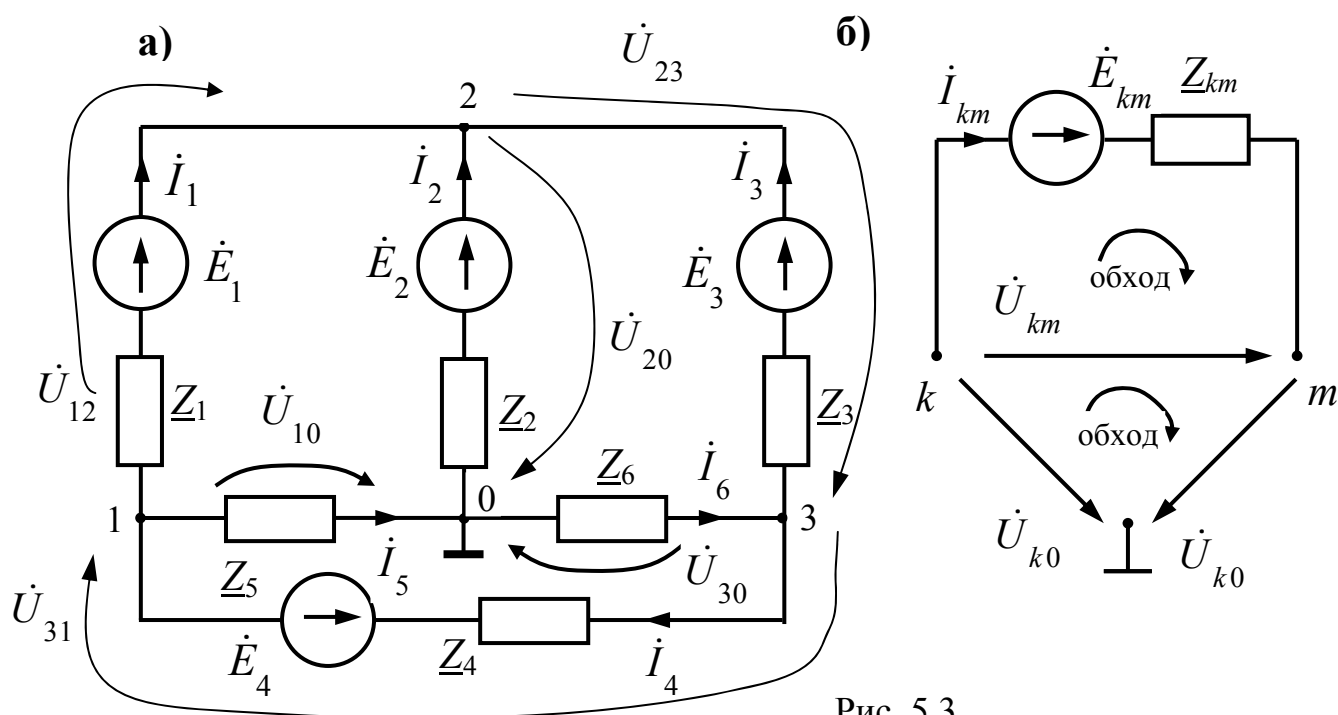


Рис. 5.3

Для схемы рис. 5.3,а узловыми являются напряжения $\dot{U}_{10}$, $\dot{U}_{20}$ и $\dot{U}_{30}$. Все они направлены к опорному узлу "О". Если узловые напряжения известны, то напряжения между всеми остальными узлами легко находятся в соответствии со вторым законом Кирхгофа (рис. 5.3,б) по формуле

$$\dot{U}_{km} = \dot{U}_{k0} - \dot{U}_{m0}. \quad (5.4)$$

а)

В нашем примере $\dot{U}_{12} = \dot{U}_{10} - \dot{U}_{20}$; $\dot{U}_{31} = \dot{U}_{30} - \dot{U}_{10}$; $\dot{U}_{23} = \dot{U}_{20} - \dot{U}_{30}$.

Заметим, что если опорный узел "0" заземлить, т.е. принять его электрический потенциал равным 0, то тогда узловые напряжения $\dot{U}_{10}$, $\dot{U}_{20}$ и $\dot{U}_{30}$ будут являться также электрическими потенциалами узлов 1, 2 и 3.

Узловые напряжения являются промежуточными неизвестными данного метода расчета. Относительно них составляется система уравнений. При этом используется первый закон Кирхгофа. Очевидно, что узловых напряжений меньше, чем токов ветвей. Поэтому данный метод позволяет существенно понизить порядок системы уравнений по сравнению с непосредственным применением 1-го и 2-го законов Кирхгофа. Рассмотрим составление системы уравнений по методу узловых напряжений.

Согласно 1-му закону Кирхгофа, алгебраическая сумма комплексных токов, подходящих к любому узлу цепи, равна нулю. Каждый из этих токов определяется формулой (5.4). Тогда для каждого узла цепи имеем

$$\Sigma I_{km} = \Sigma \dot{E}_{km} \underline{Y}_{km} + \Sigma \underline{Y}_{km} \dot{U}_{km} = 0 \quad \text{или} \quad \Sigma \underline{Y}_{km} (\dot{U}_{k0} - \dot{U}_{m0}) = -\Sigma \dot{E}_{km} \underline{Y}_{km},$$

где $\Sigma \dot{E}_{km} \underline{Y}_{km}$ – сумма произведений ЭДС на проводимость всех ветвей, подходящих к рассматриваемому узлу цепи. Эти величины известны из условий задачи; $\Sigma \underline{Y}_{km} (\dot{U}_{k0} - \dot{U}_{m0})$ – сумма произведений проводимости ветвей на напряжения ветвей, где $\underline{Y}_{km}$ – известные из условий задачи величины, а $\dot{U}_{k0}$ и $\dot{U}_{m0}$ – неизвестные узловые напряжения.

Опуская ряд несложных промежуточных преобразований получаем в результате систему уравнений относительно неизвестных узловых напряжений цепи в следующем виде:

$$(5.5) \quad \begin{cases} \dot{U}_{10} \underline{Y}_{11} + \dot{U}_{20} \underline{Y}_{12} + \dot{U}_{30} \underline{Y}_{13} = \dot{J}_{11} \\ \dot{U}_{10} \underline{Y}_{21} + \dot{U}_{20} \underline{Y}_{22} + \dot{U}_{30} \underline{Y}_{23} = \dot{J}_{22} \\ \dot{U}_{10} \underline{Y}_{31} + \dot{U}_{20} \underline{Y}_{32} + \dot{U}_{30} \underline{Y}_{33} = \dot{J}_{33} \end{cases},$$

где $\dot{U}_{10}$, $\dot{U}_{20}$, $\dot{U}_{30}$ – неизвестные узловые напряжения; $\underline{Y}_{11}$ $\underline{Y}_{22}$ $\underline{Y}_{33}$ – собственные проводимости узлов, т.е. сумма проводимости всех ветвей, подходящих к данному узлу цепи (в уравнения (5.5) они всегда входят со знаком +);

$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$; $\underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31}$; $\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32}$ – взаимные проводимости узлов, т.е. сумма проводимости всех ветвей цепи, находящихся между узлами 1-2, 1-3 и

2-3; их численные значения всегда входят в уравнения (5.5) со знаком (-); $\dot{J}_{11}$, $\dot{J}_{22}$, $\dot{J}_{33}$ – известные из условий задачи величины, представляющие собой сумму произведений ЭДС на проводимость ($\sum \dot{E} \underline{Y}$) всех ветвей, подходящих к данному узлу. Если при этом $\dot{E}$ направлена к узлу, то произведение $\dot{E} \underline{Y}$ этой ветви берется со знаком (+), а если $\dot{E}$ направлена от узла, – со знаком (-). Заметим, что произведение $\dot{E} \underline{Y}$ каждой ветви можно рассматривать как ток эквивалентного источника тока этой ветви.

Решая полученную систему уравнений, находим узловые напряжения $\dot{U}_{10}$, $\dot{U}_{20}$, $\dot{U}_{30}$, затем напряжения на всех ветвях цепи в соответствии с формулой (5.4 а) и, наконец, токи во всех ее ветвях, используя формулу (5.4).

Если разветвленная цепь имеет только два узла (например, трехфазная цепь, соединенная звездой), то система (5.5) превращается в одно уравнение следующего вида:

$$\dot{U}_{10} \underline{Y}_{11} = \dot{J}_{11}. \quad (5.5 \text{ а})$$

5.4. Метод эквивалентного источника

Метод эквивалентного источника применяется для расчета тока в какой-либо одной выделенной ветви сложной цепи. В его основе лежит *теорема об эквивалентном источнике*, суть которой состоит в следующем: любая сколь угодно сложная электрическая цепь относительно выделенной ветви может быть представлена одним эквивалентным источником ЭДС или одним эквивалентным источником тока.

Рассмотрим здесь метод расчета, основанный на эквивалентном преобразовании сложной цепи в эквивалентный источник ЭДС. На рис. 5.4,а представлена сложная цепь со многими источниками и многими сопротивлениями в виде активного двухполюсника. Требуется определить ток $\dot{I}$ в выделенном из этой цепи сопротивлении $\underline{Z}$.

Представим двухполюсник в виде эквивалентного источника ЭДС с параметрами $\dot{E}_Г$ и $\underline{Z}_Г$ (рис. 5.4,б) и получим, что в соответствии со вторым законом Кирхгофа искомый ток цепи

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_Г}{\underline{Z}_Г + \underline{Z}}. \quad (5.6)$$

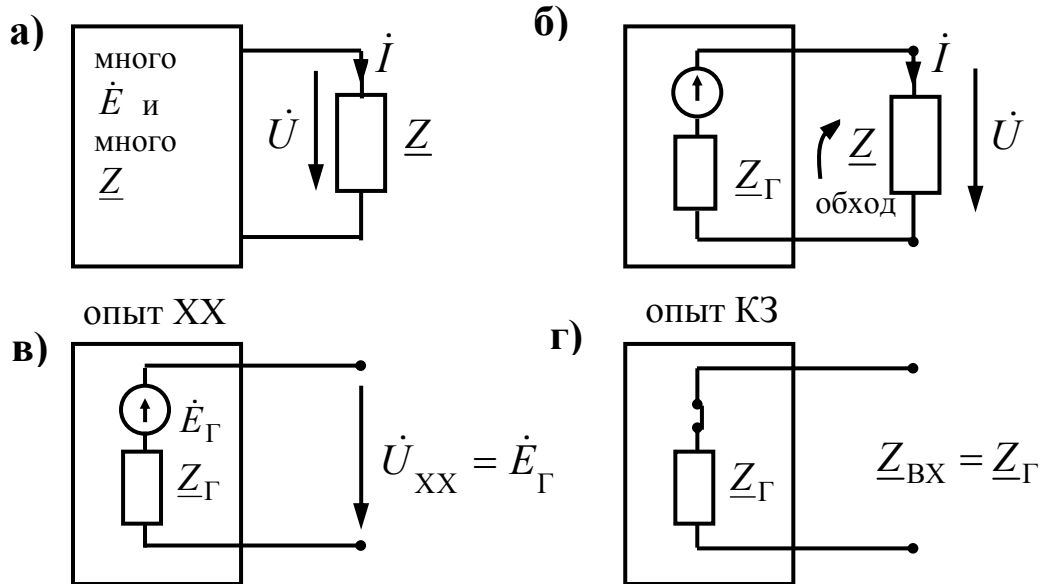


Рис. 5.4

Неизвестные величины $\dot{E}_Г$ и $\underline{Z}_Г$ можно найти из опыта холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). При проведении опыта ХХ (рис. 5.4,в) ветвь с сопротивлением $\underline{Z}$ размыкается и на ее зажимах возникает напряжение $\dot{U}_{ХХ}$, равное ЭДС эквивалентного генератора: $\dot{U}_{ХХ} = \dot{E}_Г$. При проведении опыта КЗ (рис. 5.4,г) отключаются все ЭДС цепи и заменяются перемычками без сопротивления. Тогда входное сопротивление цепи становится равным сопротивлению эквивалентного генератора: $\underline{Z}_{ВХ} = \underline{Z}_Г$.

5.5. Метод наложения

Этот метод расчета основан на фундаментальном физическом принципе суперпозиции. Применительно к электрическим цепям он формулируется следующим образом: *ток в любой ветви электрической цепи есть алгебраическая сумма токов в этой ветви от действия каждого из источников энергии этой цепи по отдельности.*

Применяя принцип наложения для расчета цепи, следует по очереди оставлять в ней только один источник энергии и для каждой такой схемы рассчитывать токи во всех ее ветвях. Реальные токи ветвей являются результатом наложения этих частных токов от действия каждого источника энергии по отдельности. При формировании схемы с одним каким-либо конкретным источником энергии все ЭДС остальных источников заменяют короткозамкнутыми переключками, а у источников тока размыкают ветви с током, оставляя в цепи ветви с их внутренними проводимостями источников тока. Заметим, что метод наложения применим только к линейным электрическим цепям, у которых сопротивления ветвей не зависят от величины токов и напряжений и при всех преобразованиях цепей остаются постоянными величинами.

Пример 5.2. Для схемы, представленной на рис. 5.2 и при тех же исходных данных, что в примере 5.1, определить токи всех ветвей цепи, используя метод наложения. Исходные данные: $\dot{E}_1=120$ В; $\underline{Z}_{01}=(1+j2)$ Ом; $\dot{E}_2=115$ В; $\underline{Z}_{02}=(1+j2)$ Ом; $\underline{Z}_H = 10$ Ом.

Решение. По очереди рассчитываем токи во всех ветвях цепи от каждого источника энергии по отдельности.

1. Оставляем в схеме только один источник ЭДС $\dot{E}_1$ и рассчитываем токи во всех ветвях от действия только этого источника (рис. 5.5,а). Сопротивление всей цепи для источника $\dot{E}_1$:

$$\underline{Z}_{\Sigma}' = \underline{Z}_{01} + [(\underline{Z}_{02} \cdot \underline{Z}_H) / (\underline{Z}_{02} + \underline{Z}_H)] = 1 + j2 + [(1 + j2)(10)] / (1 + j2 + 10) = (2,2 + j3,6) \text{ Ом};$$

$$\text{ток } I_1' = \dot{E}_1 / \underline{Z}_{\Sigma}' = 120 / (2,2 + j3,6) = (264 - j432) / 17,8 = (14,83 - j24,26) \text{ А};$$

$$\text{напряжение } \dot{U}_{12}' = \dot{E}_1 - \dot{U}_1' = \dot{E}_1 - I_1' \underline{Z}_{01} = 120 - (63,3 + j54) = (56,6 - j5,4) \text{ В};$$

$$\text{ток } I_2' = \dot{U}_{12}' / \underline{Z}_{02} = (56,6 - j5,4) / (1 + j2) = (9,17 - j23,74) \text{ А};$$

$$\text{ток } I_H' = \dot{U}_{12}' / \underline{Z}_H = (56,6 - j5,4) / 10 = (5,7 - j0,54) \text{ А}.$$

2. Оставляем в схеме только один источник $\dot{E}_2$ и рассчитываем токи во всех ее ветвях от действия только этого источника (рис. 5.5,б).

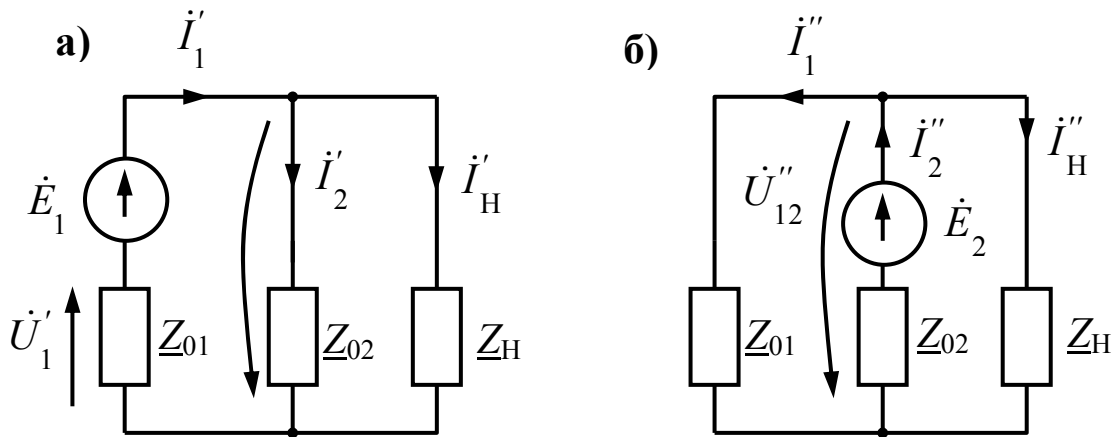


Рис. 5.5

Сопротивление всей цепи для источника $\dot{E}_2$:

$$\underline{Z}_{\Sigma}'' = \underline{Z}_{02} + [(\underline{Z}_{01} \cdot \underline{Z}_H) / (\underline{Z}_{01} + \underline{Z}_H)] = (2,2 + j3,6) \text{ Ом};$$

ток $\dot{I}_2'' = \dot{E}_2 / \underline{Z}_{\Sigma}'' = 115 / (2,2 + j3,6) = 14,21 - j23,26 \text{ А};$

напряжение $\dot{U}_{12}'' = \dot{E}_2 - \dot{I}_2'' \underline{Z}_{02} = 115 - [(14,2 - j23,26)(1+j2)] = (54,3 - j5,14) \text{ В};$

ток $\dot{I}_1'' = \dot{U}_{12}'' / \underline{Z}_{01} = (54,3 - j5,14) / (1+j2) = (44 - j113,42) / 5 = (8,8 - j22,68) \text{ А};$

ток $\dot{I}_H'' = \dot{U}_{12}'' / \underline{Z}_H = (54,3 - j5,14) / 10 = (5,43 - j0,514) \text{ А}.$

3. Находим реальные токи во всех трех ветвях цепи при одновременном действии обоих источников энергии исследуемой цепи. Сопоставляя направления токов на рис. 5.2 и применяя принцип наложения, получаем

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_1' - \dot{I}_1'' = (14,83 - j24,26) - (8,8 - j22,18) = (6,03 - j1,58) \text{ А};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_2'' - \dot{I}_2' = (14,21 - j23,26) - (9,17 - j23,74) = (5,04 + j0,48) \text{ А};$$

$$\dot{I}_H = \dot{I}_H' + \dot{I}_H'' = (5,7 - j0,54) + (5,43 - j0,514) = (11,13 - j1,05) \text{ А}.$$

5.6. Баланс мощностей цепи синусоидального тока

Энергетический баланс любой цепи синусоидального тока заключается в том, что *сумма комплексных мощностей источников энергии равна сумме комплексных мощностей приемников энергии*:

$$\sum_{k=1}^K \dot{E}_k^* I_k = \sum_{m=1}^M \dot{U}_m^* I_m, \quad (5.7)$$

где K – число источников энергии, а M – число приемников энергии цепи.

В формуле (5.7) мощность каждого источника энергии $\dot{E}_k^* I_k = P_k + jQ_k$, а мощность каждого приемника $\dot{U}_m^* I_m = P_m + jQ_m$, поэтому можно записать:

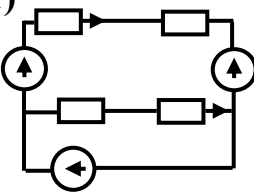
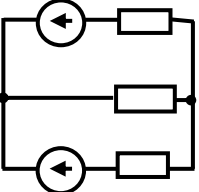
$$\sum_{k=1}^K (P_k + jQ_k) = \sum_{m=1}^M (P_m + jQ_m) \quad (5.8 \text{ а})$$

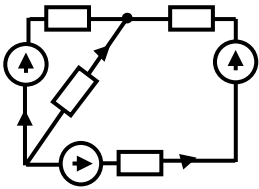
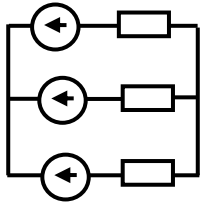
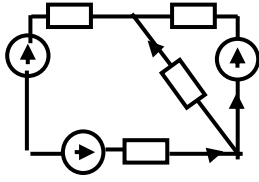
или
$$\sum_{k=1}^K P_k = \sum_{m=1}^M P_m \quad \text{и} \quad \sum_{k=1}^K Q_k = \sum_{m=1}^M Q_m. \quad (5.8 \text{ б})$$

Таким образом, в любой цепи синусоидального тока сумма активных мощностей всех источников равна сумме активных мощностей приемников, а сумма реактивных мощностей всех источников равна сумме реактивных мощностей всех приемников.

Заметим, что баланс мощностей цепи синусоидального тока (как и баланс мощностей цепи постоянного тока) является, фактически, следствием закона сохранения энергии.

Вопросы для самопроверки

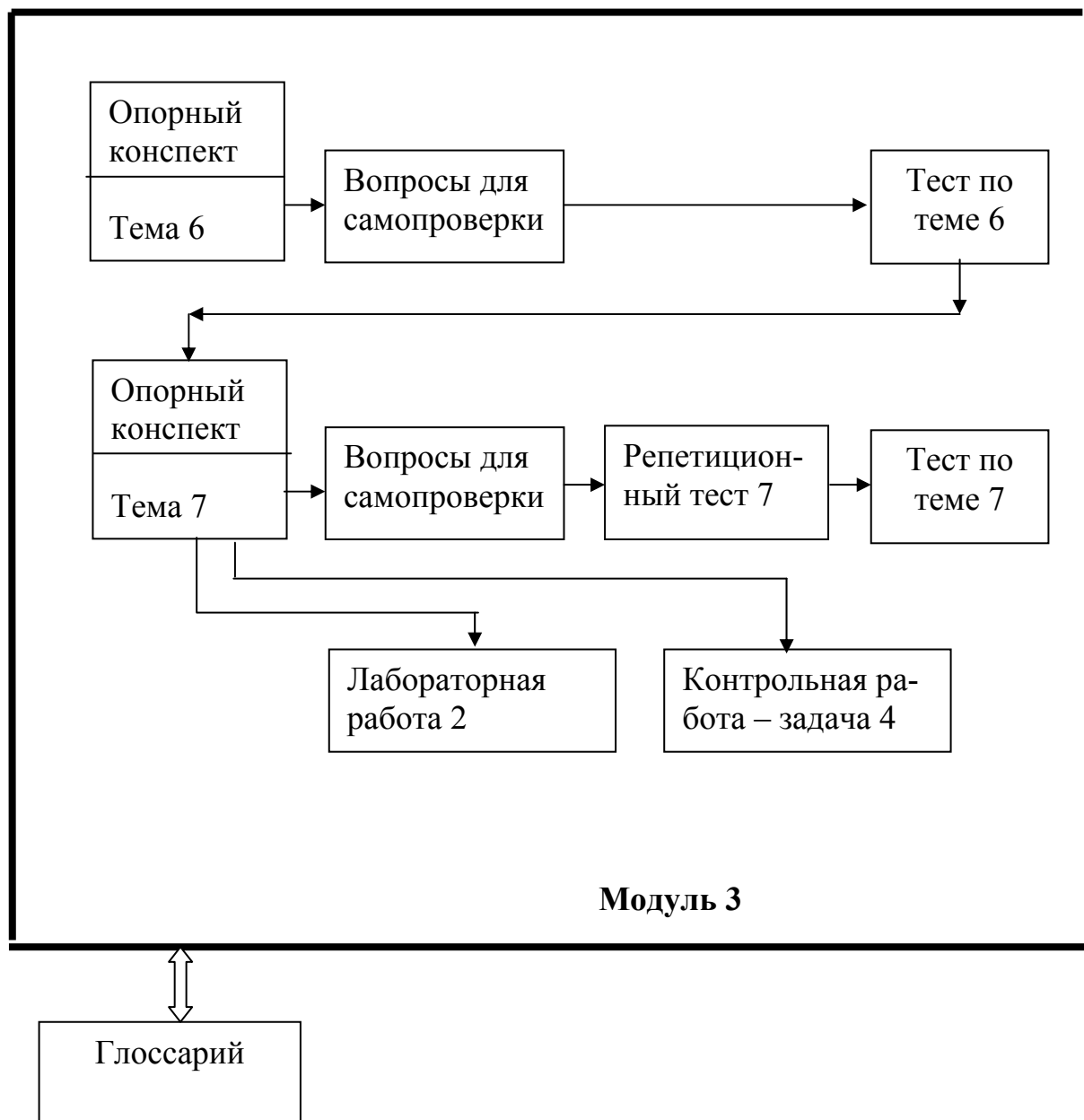
1)  Сколько уравнений надо составить для расчета цепи по законам Кирхгофа? 6 5 4 3 2 1. 2. 3. 4. 5.		6) Какое положение лежит в основе метода наложения? 1. Уравнение первого закона Кирхгофа. 2. Уравнение второго закона Кирхгофа. 3. Уравнение баланса мощностей. 4. Теорема об активном двухполюснике. 5. Независимость действия источников.
2)  Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений?		7) Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений? Их количество равно: 1. Числу ветвей цепи. 2. На единицу меньше числа узлов. 3. Числу контуров цепи.

1 1.	2 2.	3 3.	4 4.	5 5.	4. Число независимых контуров цепи. 5. Число источников энергии цепи.
3) 	Сколько уравнений надо составить для расчета контурных токов?				8) Укажите неизвестные величины, относительно которых составляется система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа? 1. Токи во всех ветвях цепи. 2. Токи в независимых контурах. 3. Токи во внешних контурах. 4. Напряжения между узлами. 5. Токи во всех контурах цепи.
4 1.	2 2.	5 3.	6 4.	7 5.	
4) Требуется рассчитать цепь по законам Кирхгофа. Чему равно число уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа? 1. На единицу меньше числа узлов. 2. На единицу больше числа узлов. 3. Число ветвей цепи. 4. Число независимых контуров цепи. 5. Число узлов цепи.	9) 				Сколько уравнений надо составить для расчета контурных токов?
5) 	Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений?				10) Каковы ограничения на применение метода контурных токов? 1. Только к цепям постоянного тока. 2. Только к цепям синусоид. тока. 3. Только к линейным цепям. 4. Только к нелинейным цепям. 5. Только к цепям с одним источником.
5 1.	3 2.	2 3.	4 4.	6 5.	

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ правильного ответа	4	1	2	4	5	5	2	1	2	3

РАЗДЕЛ 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи

Схема работы с разделом 3



Специальность	Часы	Номера тем	Номера параграфов	Номера задач	Номера тестов
1	2	3	4	5	6
240401.65	52	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3. 6 3. 7
240301.65	5	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3. 6 3. 7
1	2	3	4	5	6
190701.65	72	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3. 6 3. 7

261001.65	70	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3.6 3.7
280202.65	71	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3.6 3.7
190701.65	72	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3.6 3.7
140101.65	80	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	-	3.6 3.7
140104.65 / 100700	90	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	-	3.6 3.7
150104.65 / 110409	100	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	-	3.6 3.7
190205.65	100	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	-	3.6 3.7 3.7
190601.65	100	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	-	3.6 3.7
151001.61	119	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
151001.65	119	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
150202.65	120	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
220100.62	136	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
200102.65	140	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
200102.65	140	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
150501.65	142	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
230101.65	150	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3.6 3.7
200402.65	150	6 7	6.1...6.5 7.1...7.3	-	3.6 3.7
200501.65	170	6 7	6.1...6.5 7.1...7.5	4	3.6 3.7
210210.65	170	6 7	6.1...6 7.1...7.5	4	3.6 3.7

6. Резонансные явления. Индуктивно связанные цепи

В теме 6 рассматриваются вопросы, входящие в третий раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 6. Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- условие возникновения резонанса;
- резонанс напряжений;
- резонанс токов;
- закон электромагнитной индукции;
- коэффициент взаимной индуктивности;
- согласное и встречное включение катушек;
- цепь с трансформаторной связью.

6.1. Резонансные явления

Резонансом в цепи, содержащей сопротивления индуктивности и емкости, называется такой режим, при котором ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе. Это обусловлено тем, что реактивные сопротивления и проводимости отдельных участков цепи могут быть как положительными, так и отрицательными величинами и, следовательно, взаимно компенсироваться. Существует резонанс напряжений и резонанс токов.

6.2. Резонанс в последовательной цепи из элементов R , L , C (резонанс напряжений)

Комплексное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R , L и C (рис. 6.1), имеет вид

$$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + jx = ze^{j\varphi},$$

$$x = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad z = \sqrt{R^2 + x^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Резонанс имеет место, как указано выше, при $\varphi = 0$, что равносильно при последовательном соединении условию

$$x = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \quad \text{т. е.} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

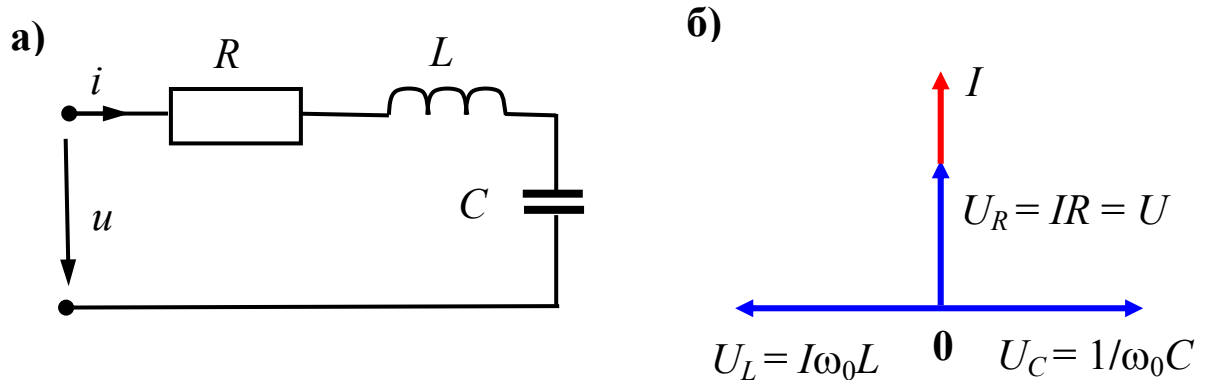


Рис. 6.1

Резонанса можно достичь, изменяя или частоту приложенного к цепи напряжения, или индуктивности катушки или емкости конденсатора. При этом значения угловой частоты, при которой наступает резонанс, определяется формулой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Частоту ω_0 называют резонансной частотой. Если реактивные сопротивления $x_L = x_C$ при резонансе превосходят по величине активное сопротивление R , то напряжения на индуктивности $U_L = I\omega_0 L$ и на емкости $U_C = \frac{I}{\omega_0 C}$ могут превосходить напряжение на зажимах цепи. Поэтому такой резонанс называют *резонансом напряжений*.

Отношение

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{U_{L0}}{U}$$

определяет кратность превышения напряжения на индуктивности и на емкости над напряжением на зажимах всей цепи. Величину Q , определяющую резонансные свойства контура, называют *добротностью контура*

6.3. Резонанс в параллельной цепи из элементов R, L, C (резонанс токов)

Условием резонанса при параллельном соединении активного индуктивного и емкостного сопротивлений (рис. 6.2,а) является также отсутствие сдвига фаз между током и напряжением на входе цепи.

Комплексная проводимость цепи имеет вид

$$\underline{Y} = g - jb = ye^{-j\varphi}, \text{ где}$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}.$$

Резонанс имеет место, как указано выше, при $\varphi = 0$, что равносильно при параллельном соединении условию

$$b = b_L - b_C = 0 \text{ или } \frac{1}{\omega L} - \omega C = 0.$$

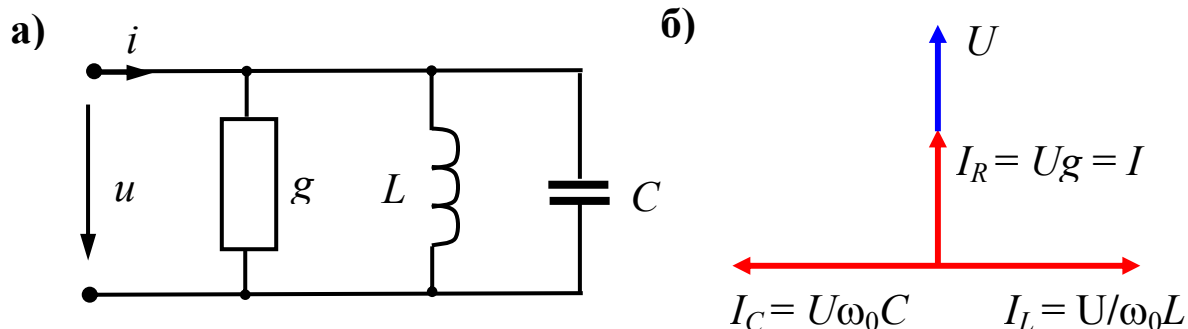


Рис. 6.2

Резонанса токов можно достичь, изменяя или частоту приложенного к цепи напряжения, или индуктивности катушки или емкости конденсатора. При этом значения угловой частоты, при которой наступает резонанс, определяется формулой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

При резонансе реактивная проводимость цепи равна нулю и полная проводимость цепи достигает своего минимального значения. Поэтому ток в об-

щей ветви $I = U_y$ при неизменном значении оказывается наименьшим в отличие от резонанса с последовательным соединением. Векторная диаграмма при резонансе в рассматриваемой цепи приведена на рис. 6.2,б. При этом токи в индуктивности и в емкости равны и находятся в противофазе. По величине они могут превосходить, а иногда намного, суммарный ток в цепи. Поэтому такой резонанс называют *резонансом токов*.

Отношение
$$Q = \frac{I_{C0}}{I} = \frac{I_{L0}}{I}$$

определяет кратность превышения токов в индуктивности и токов в емкости над суммарным током всей цепи. Величину Q , определяющую резонансные свойства контура, называют *добротностью контура*

6.4. Особенности расчета цепей синусоидального тока при наличии взаимных индуктивностей

Если при изменении во времени тока в одной катушке на зажимах второй возникает ЭДС – такие катушки называются *индуктивно связанными*. Это, например, катушки на стальных сердечниках электрических машин и аппаратов, провода линий электропередач, а также многие другие электротехнические устройства.

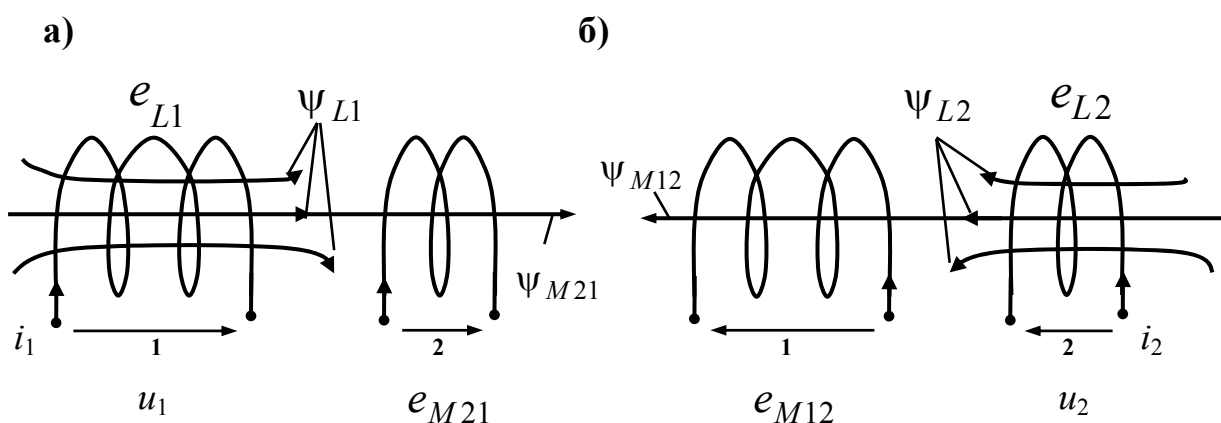


Рис. 6.3

На рис. 6.3,а показаны две идеальные (без активных сопротивлений) катушки индуктивности.

При протекании в первой катушке синусоидального тока i_1 в ней возникает магнитное поле, характеризуемое потокоцеплением самоиндукции $\psi_{L1} = w_1 \Phi$, где w_1 число витков первой катушки, Φ магнитный поток, проходящий через

один виток катушки. Это потокосцепление в соответствии с законом электромагнитной индукции индуцирует в первой катушке ЭДС самоиндукции:

$$e_{L1} = -d\psi_{L1} / dt.$$

Напряжение u_1 на этой катушке численно равно этой ЭДС, но направлено в противоположную сторону и поэтому имеет обратный знак:

$$u_1 = -e_{L1} = + \frac{d\psi_{L1}}{dt} = L \frac{di_1}{dt},$$

где $\psi_{L1} = L_1 i_1$, L_1 – индуктивность первой катушки.

В комплексной форме записи это напряжение имеет вид $\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1$, где $\omega L_1 = X_{L1}$ – индуктивное сопротивление первой катушки.

При наличии магнитной связи между катушками 1 и 2, некоторая часть потокосцепления самоиндукции первой катушки ψ_{L1} проникает во вторую катушку. Эта его часть ψ_{M21} называется потокосцеплением взаимной индукции второй катушки, вызванное током i_1 первой катушки.

Потокосцепление ψ_{M21} индуцирует во второй катушке ЭДС взаимной индукции $e_{M21} = -\frac{d\psi_{M21}}{dt}$. *Отношение потокосцепления взаимной индукции ψ_{M21} к току в первой катушке i_1 есть взаимная индуктивность этих катушек: $\psi_{M21}/i_1 = M_{21}$.* Взаимная индуктивность также, как и собственная индуктивность, измеряется в генри (Гн). С учетом последнего соотношение ЭДС взаимной индукции второй катушки приобретает вид

$$e_{M21} = -\frac{d\psi_{M21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Аналогичные рассуждения можно привести и для случая, когда синусоидальный ток i_2 протекает только по 2-й катушке (рис. 6.3,б). Потокосцепление самоиндукции ψ_{L2} второй катушки индуцирует в ней электродвижущую силу самоиндукции $e_{L2} = -(d\psi_{L2}/dt)$. Напряжение на второй катушке равно ей по величине и противоположно по знаку: $u_2 = -e_{L2} = +d\psi_{L2}/dt = L_2 di_2/dt$. Здесь $\psi_{L2} = L_2 i_2$, где L_2 – индуктивность 2-й катушки. В символической форме записи это напряжение имеет вид $\dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2$, где $\omega L_2 = X_{L2}$ – индуктивное сопротивление 2-й катушки.

Некоторая часть потокосцепления самоиндукции ψ_{L2} проникает в первую катушку и образует там потокосцепление взаимной индукции ψ_{M12} . Оно индуцирует в 1-й катушке ЭДС взаимной индукции $e_{M12} = -d\psi_{M12}/dt$. *Отно-*

шение потокосцепления взаимной индукции Ψ_{M12} к току во второй катушке i_2 есть взаимная индуктивность этих двух катушек: $\Psi_{M12}/i_2 = M_{12}$. С учетом этого соотношения ЭДС взаимной индуктивности в первой катушке $e_{M12} = -M_{12} di_2/dt$.

Заметим, что для линейных электрических цепей взаимная индуктивность двух катушек не зависит от того, каким образом она была определена экспериментально:

$$\frac{\Psi_{M12}}{i_2} = \frac{\Psi_{M21}}{i_1} = M_{12} = M_{21} = M. \quad (6.1)$$

Она является их общим параметром и не зависит от величин потокосцеплений и токов, а определяется только конструкцией катушек, их взаимным расположением и магнитными свойствами окружающей среды.

Придвигая катушки друг к другу, мы увеличиваем M , а отодвигая их друг от друга – уменьшаем M . Наибольшей взаимной индуктивностью обладают две катушки, навитые одинаково друг на друга (рис. 6.4,а), а наименьшей – расположенные своими осями под углом 90° друг к другу (рис. 6.4,б) или далеко удаленные друг от друга.

При одновременном протекании токов в обеих катушках в соответствии с принципом наложения имеем распределение их магнитных потоков, указанное на рис. 6.5.

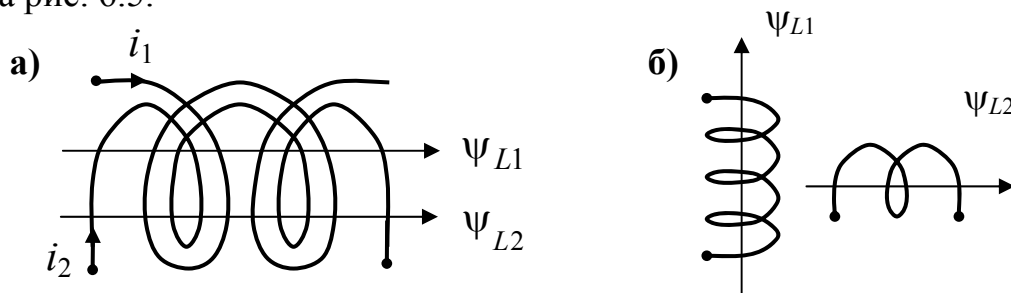


Рис. 6.4

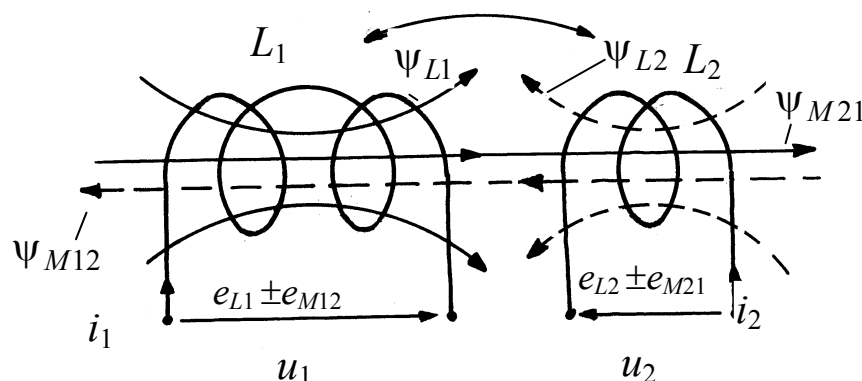


Рис. 6.5

Здесь в каждой из катушек индуцируется одновременно две электродвижущие силы: ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции. Поэтому напряжения u_1 и u_2 каждой индуктивно связанной катушки имеют две составляющие: одна из них (u_L) вызвана действием ЭДС самоиндукции, а другая (u_M) вызвана действием ЭДС взаимной индукции

$$u_1 = u_{L1} \pm u_{M12} = \frac{d\psi_{L1}}{dt} \pm \frac{d\psi_{M12}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} ; \quad (6.2)$$

$$u_2 = u_{L2} \pm u_{M21} = \frac{d\psi_{L2}}{dt} \pm \frac{d\psi_{M21}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt} . \quad (6.3)$$

В формулах (6.2) и (6.3) знаки (+) или (–) у вторых составляющих напряжений зависят от взаимного направления магнитных потоков самоиндукции и взаимной индукции в катушках.

Знак (+) берется в том случае, когда потоки самоиндукции и взаимной индукции совпадают по направлению. Такое соединение катушек называется *согласным включением*. Если потоки самоиндукции и взаимной индукции не совпадают по направлению, то берется знак (–) и такое соединение катушек называется *встречным включением*.

На рис. 6.6 показаны примеры согласного и встречного включения двух индуктивно связанных катушек.

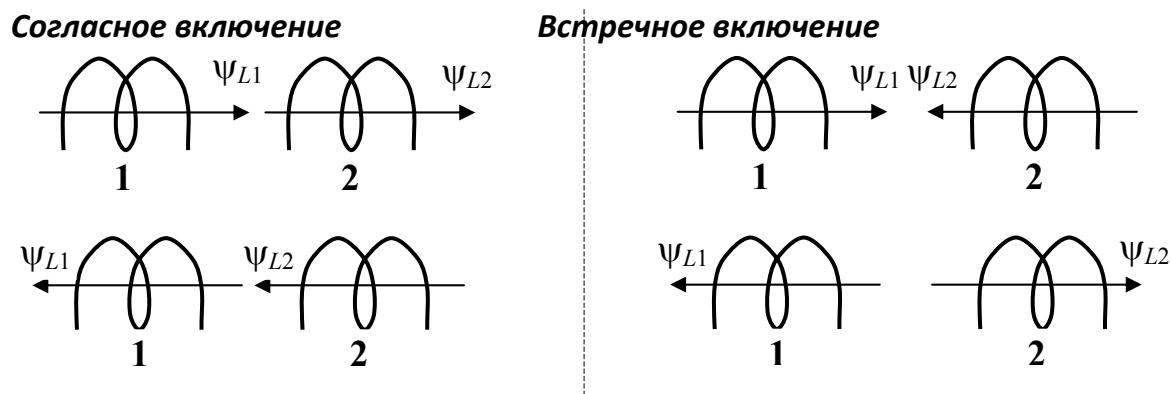


Рис. 6.6

На электрических схемах индуктивно связанные катушки изображаются так, как это показано на рис. 6.7.

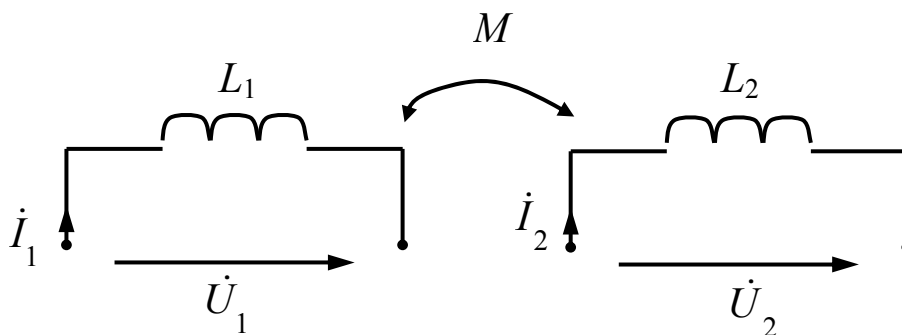


Рис. 6.7

Переходя к комплексной форме записи напряжений на индуктивно связанных катушках, получаем

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 \pm j\omega M \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 \pm j\omega M \dot{I}_1, \end{cases} \quad (6.4)$$

где $j\omega L_1 \dot{I}_1$ и $j\omega L_2 \dot{I}_2$ – комплексные напряжения первой и второй катушек, вызванные действиями токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ катушек; $\pm j\omega M \dot{I}_2$ – дополнительная составляющая напряжения первой катушки, вызванная током $\dot{I}_2$ второй катушки; $\pm j\omega M \dot{I}_1$ – дополнительная составляющая напряжения второй катушки, вызванная током $\dot{I}_1$ первой катушки. В уравнениях (6.4) знак (+) соответствует согласному включению катушек, а знак (–) – встречному включению.

Способ включения индуктивно связанных катушек указывается на ее схеме путем маркировки ”начал” катушек либо в виде жирных точек (знак •), либо в виде звездочек (знак *). При этом действует следующее правило: *если токи в катушках направлены к одноименным выводам, то включение катушек является согласным, а если к разноименным выводам – встречным.*

6.5. Цепь с трансформаторной связью между катушками

Такая цепь представлена на рис. 6.8, у которой катушки не имеют друг с другом проводниковых соединений. Известны параметры обеих катушек R_1, R_2, L_1, L_2 , их взаимная индуктивность M , частота ω и комплексное напряжение $\dot{U}_1$. Требуется определить комплексные токи $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ катушек при согласном и встречном их включении.

Решение. Составляем уравнения для левого и правого контуров цепи в соответствии с формулами (6.4) и получаем

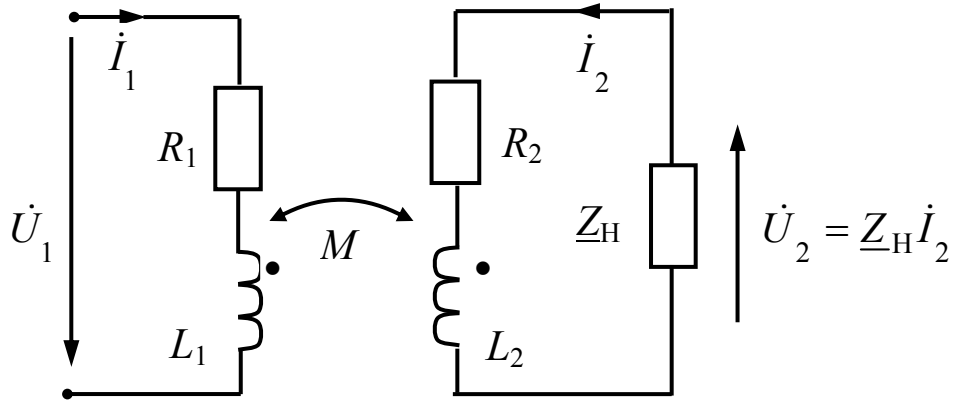


Рис. 6.8

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 \pm j\omega M\dot{I}_2; \\ 0 = \pm j\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 + \underline{Z}_H \dot{I}_2. \end{cases} \quad (6.5)$$

В этих уравнениях знак (+) у составляющих вида $j\omega M\dot{I}$ соответствует согласному включению катушек, а знак (–) – встречному включению.

Заметим, что в уравнениях (6.5) $\underline{Z}_H \dot{I}_2 = \dot{U}_2$.

Обозначаем в этих уравнениях для краткости записи

$$(R_1 + j\omega L_1) = \underline{Z}_1; \quad (R_2 + j\omega L_2 + \underline{Z}_H) = \underline{Z}_2; \quad j\omega M = \underline{Z}_M,$$

и получаем

$$\dot{U}_1 = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 \pm \underline{Z}_M \dot{I}_2; \quad 0 = \pm \underline{Z}_M \dot{I}_1 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2. \quad (6.5)$$

а)

Решая эту систему уравнений, находим комплексные токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ обеих катушек цепи. При решении задачи применяем теорию определителей:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 & \pm \underline{Z}_M \\ \pm \underline{Z}_M & \underline{Z}_2 \end{vmatrix} = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} \dot{U}_1 & \pm \underline{Z}_M \\ 0 & \underline{Z}_2 \end{vmatrix} = \underline{Z}_2 \dot{U}_1;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 & \dot{U}_1 \\ \pm \underline{Z}_M & 0 \end{vmatrix} = -\underline{Z}_M \dot{U}_1; \quad \dot{I}_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\underline{Z}_2 \dot{U}_1}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\mp \underline{Z}_M \dot{U}_1}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}.$$

Заметим, что знак (–) в числителе $\dot{I}_2$ соответствует согласному включению катушек, а знак (+) – встречному.

Пример 6.1. В цепи с трансформаторной связью двух идеальных (без активных сопротивлений) катушек индуктивности (рис. 6.9) к катушке X_1 приложено синусоидальное напряжение частотой $f = 500$ Гц, а катушка X_2 разомкну-

та. Действующее значение тока в катушке X_1 составляет $I_1=10$ А, а напряжение на разомкнутых зажимах катушки X_2 составляет $U_2=50$ В. Требуется определить величину взаимной индуктивности M этих катушек.

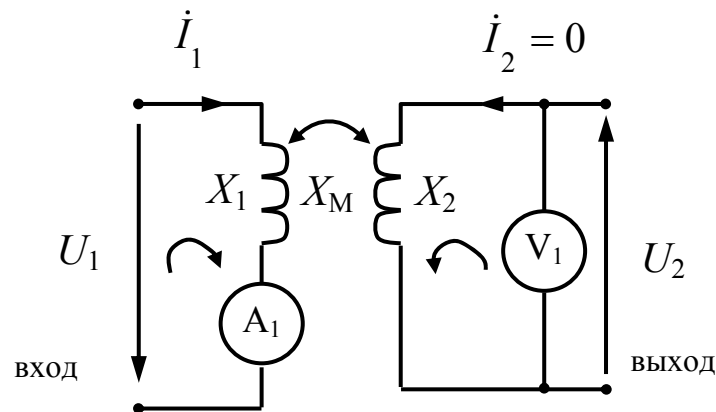


Рис. 6.9

Решение. При отсутствии активных сопротивлений катушек ($R_1 = R_2 = 0$) уравнения (6.7) можно составить только для модулей токов, напряжений и сопротивлений не применяя символического метода.

С учетом, что правый контур цепи разомкнут ($I_2=0$), имеем

$$U_1 = I_1 X_1; \quad 0 = \pm I_1 X_M + U_2,$$

где $X_1 = \omega L_1$, $X_M = \omega M$.

При этом из второго уравнения следует, что $\pm X_M = -U_2 / I_1$ или $|X_M| = U_2 / I_1 = 5$ Ом. Тогда величина взаимной индуктивности катушек

$$M = \frac{X_M}{\omega} = \frac{5}{2\pi f} = \frac{5}{6,28 \cdot 500} = 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Вопросы для самопроверки

1. Почему нельзя получить резонанс в цепи в результате изменения величины напряжения на входе цепи?
2. Укажите все возможные варианты изменений в цепи (рис. 6.1), чтобы получить в ней резонанс
3. В условиях примера 6.1 (рис. 6.9) определить комплексный ток цепи при согласном и встречном включении индуктивно связанных катушек, используя символический метод.

Ответы: $\dot{I}_{\text{согл}} = -j2 \text{ А}; \dot{I}_{\text{встр}} = -j3 \text{ А}.$

4. К цепи с трансформаторной связью двух катушек (рис. 6.6) приложено напряжение, действующее значение которого $U_1 = 100 \text{ В}$. Индуктивное сопротивление первой катушки $X_1 = 10 \text{ Ом}$, а сопротивление взаимной индуктивности $X_M = 5 \text{ Ом}$. Определить действующее значение напряжения U_2 , индуцированного на разомкнутых зажимах второй катушки.

Ответ: $U_2 = 50 \text{ В}.$

5. Определить величину коэффициента магнитной связи двух индуктивно связанных катушек, если $X_{L1} = 9 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 4 \text{ Ом}$, $X_M = 3 \text{ Ом}$.

Ответ: $K = 0,5 .$

6. Цепь с последовательным соединением двух идеальных ($R=0$) индуктивно связанных катушек имеет при согласном их включении $X_{\text{согл}} = 80 \text{ Ом}$, а при встречном включении $X_{\text{встр.}} = 20 \text{ Ом}$. Определить величину сопротивления взаимной индуктивности этих катушек.

Ответ: $X_M = 15 \text{ Ом}.$

7. Трехфазные электрические цепи

В теме 7 рассматриваются вопросы, входящие в третий раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 7.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [3].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- достоинство трехфазных цепей;
- соединение трехфазной цепи звездой;
- соединение трехфазной цепи треугольником;
- расчет трехфазных цепей.

7.1. Введение

Трехфазные цепи синусоидального тока получили широчайшее распространение в электроэнергетике. Они обладают двумя основными преимуществами перед однофазными (двухпроводными) цепями: а) экономией цветного металла при передаче одной и той же мощности, б) возможностью получения вращающегося магнитного поля, на базе которого создан простой и надежный трехфазный асинхронный двигатель.

Источником энергии в трехфазных цепях служит трехфазный генератор, схематическое устройство которого показано на рис. 7.1,а.

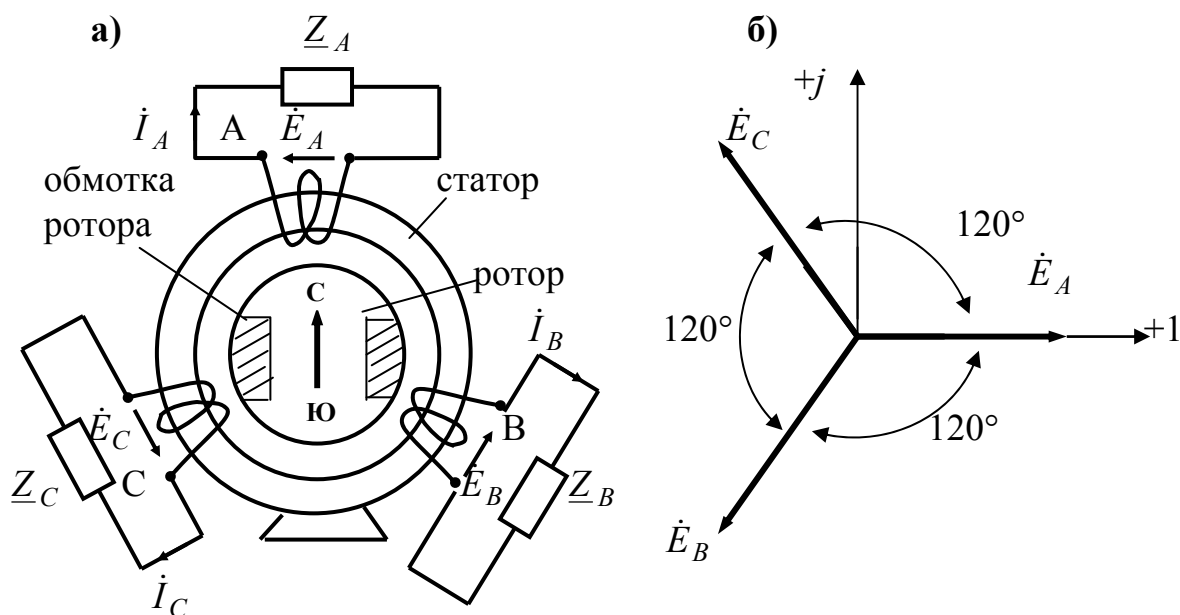


Рис. 7.1

Генератор состоит из статора (неподвижная часть) и ротора (подвижная часть). На статоре в специальных пазах на его внутренней поверхности расположены три одинаковые обмотки, сдвинутые друг относительно друга в пространстве на 120° . Их начала обозначены заглавными буквами А, В, С.

Ротор генератора представляет собой электромагнит постоянного тока, обмотка которого питается от отдельного источника постоянного тока через два контактных кольца, расположенных на валу. Ротор устроен так, что его магнитное поле распределяется в зазоре вдоль внутренней поверхности статора по закону косинуса. При вращении ротора с некоторой постоянной скоростью его магнитное поле индуцирует в обмотках статора три одинаковые синусоидальные ЭДС, сдвинутые друг относительно друга по фазе на 120° . Они образуют симметричную систему, которая в виде векторной диаграммы представлена на рис. 7.1,б. Расположив ЭДС обмотки А вдоль оси вещественных чисел комплексной плоскости, получаем запись ЭДС в следующем виде:

$$\dot{E}_A = E_A; \quad \dot{E}_B = E_A e^{j240^\circ} = E_A e^{-j120^\circ}; \quad \dot{E}_C = E_A e^{j120^\circ}, \quad (7.1)$$

где $E_A = E_B = E_C$ - действующие значения фазных ЭДС генератора.

Величину e^{+j120° для краткости обозначают буквой a ($e^{+j120^\circ} = a$) и называют *фазовым множителем*. Используя его в формулах 7.1, получаем

$$\dot{E}_A = E_A; \quad \dot{E}_B = a^2 E_A; \quad \dot{E}_C = a E_A. \quad (7.1 \text{ а})$$

Заметим, что

$$a = e^{j120^\circ} = (-0,5 + j0,87); \quad a^2 = e^{j240^\circ} = (-0,5 - j0,87); \quad 1 + a + a^2 = 0. \quad (7.1 \text{ б})$$

С учетом формул (7.1б) очевидно, что сумма трех векторов симметричной системы фазных ЭДС генератора, показанных на рис.7.1,б, равна нулю:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = E_A(1 + a + a^2) = 0. \quad (7.2)$$

Разработчиком трехфазных цепей является М.О. Доливо-Добровольский. Она признана во всем мире как оптимальная система для производства, передачи и распределения электрической энергии.

Если к обмоткам генератора (рис. 7.1,а) подсоединить нагрузочные сопротивления, получится простейшая (несвязанная) трехфазная цепь, состоящая из трех отдельных двухпроводных цепей, называемых *фазами*. Для отличия друг от друга их обозначают буквами А, В, С. На рис. 7.1,а этими буквами обозначены начала фазных обмоток генератора.

Термин «фаза», употребляемый здесь, следует отличать от термина «фаза», используемого в теории цепей синусоидального тока для обозначения стадии развития синусоиды тока, напряжения или ЭДС.

Несвязанные трехфазные цепи не имеют никаких преимуществ перед однофазными (двухпроводными) и практически не применяются. Обычно трехфазные цепи связывают звездой (условное обозначение Y) или треугольником (условное обозначение Δ).

7.2. Соединение трехфазной цепи звездой

При соединении звездой концы всех трех обмоток генератора объединяют в одну общую точку, которая называется нейтральной точкой генератора или *нейтралью*. Также поступают и с приемниками, которые образуют нейтральную точку (нейтраль) трехфазного приемника. При этом три обратных провода отдельных фаз объединяются в один, и система из шестипроводной становится четырехпроводной, как это показано на рис. 7.2.

Провода, идущие от генератора к приемникам, называются *линейными*, а провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется *нейтральным*. Показанные на этом рисунке направления действия ЭДС, токов и напряжений соответствуют направлениям, принятым в большинстве учебников по теории цепей.

Трехфазная цепь, связанная звездой, имеет ряд особенностей.

1. Токи линейных проводов, не разветвляясь, попадают в фазы приемников, поэтому фазные токи равны токам в линейных проводах: $\dot{I}_\phi = \dot{I}_л$.

2. Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N$ равен алгебраической сумме комплексных токов всех трех фаз. В соответствии с 1-м законом Кирхгофа для нейтральной точки приемника ($0'$) имеем

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N. \quad (7.3)$$

При отсутствии или обрыве нейтрального провода получаем

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (7.3 \text{ а})$$

В этом случае, зная два линейных тока, можно легко найти третий ток.

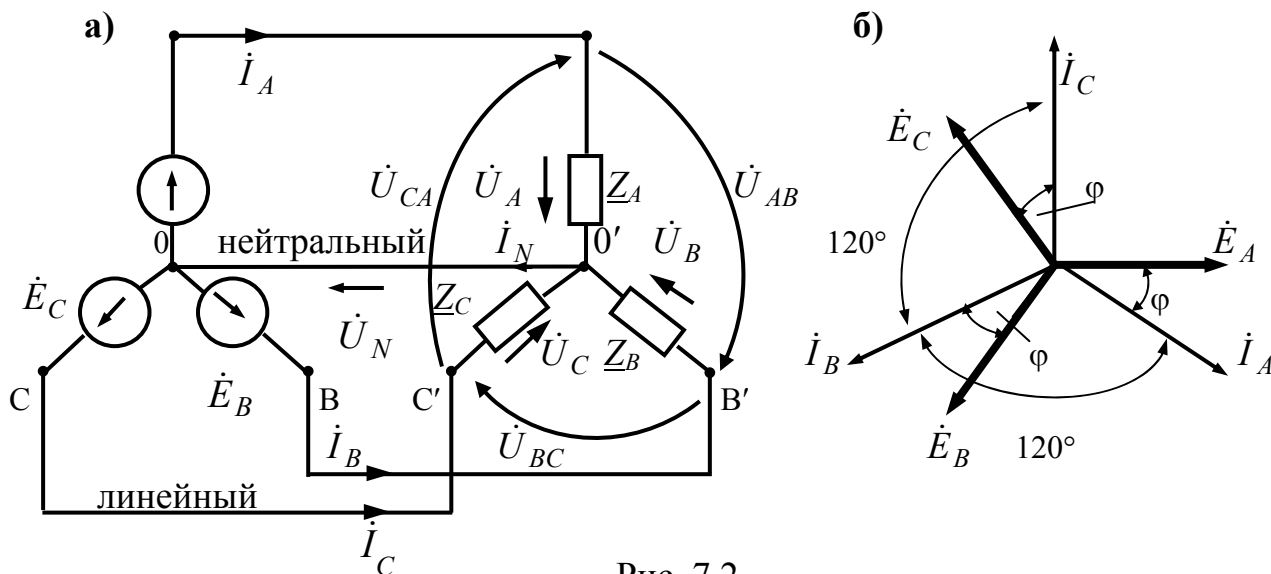


Рис. 7.2

3. Если генератор вырабатывает симметричную систему фазных ЭДС (рис. 7.1,б) и, кроме того, комплексные сопротивления всех трех фаз цепи одинаковы ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi = R \pm jX$), то комплексные токи, определяемые в соответствии с формулой закона Ома ($\dot{I}_\phi = \dot{U}_\phi / \underline{Z}_\phi$), имеют одинаковые действующие значения и сдвинуты друг относительно друга по фазе на 120° (как это показано на рис. 7.2,б). Они образуют симметричную систему фазных токов и при этих условиях $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$. Следовательно, ток в нейтральном проводе отсутствует и этот провод фактически не нужен.

Заметим, что на рис. 7.2,б угол $\varphi = \arctg X/R$ соответствует индуктивному характеру фазного сопротивления.

Рассмотренный выше режим работы трехфазной цепи называется *симметричным*. В этом режиме работают все трехфазные приемники (например, трехфазные двигатели, нагревательные печи). Они имеют три одинаковые обмотки и не нуждаются в нейтральном проводе. Такие трехфазные приемники называют *симметричными*. Однофазные же приемники (лампы освещения, бы-

товые приборы) при соединении их звездой требуют наличия нейтрального провода для поддержания одинакового напряжения на всех трех фазах цепи.

4. Трехфазные цепи, связанные звездой, широко используются в электроэнергетике для передачи электромагнитной энергии на большие расстояния. Упрощенная схема такой цепи показана на рис. 7.3. Эта цепь является трехпроводной и наглядно демонстрирует свои преимущества по сравнению с подачей той же мощности тремя однофазными цепями. Энергетики стремятся включать однофазные приемники энергии так, чтобы нагрузка каждой из трех фаз линии электропередачи (ЛЭП) была равномерной.

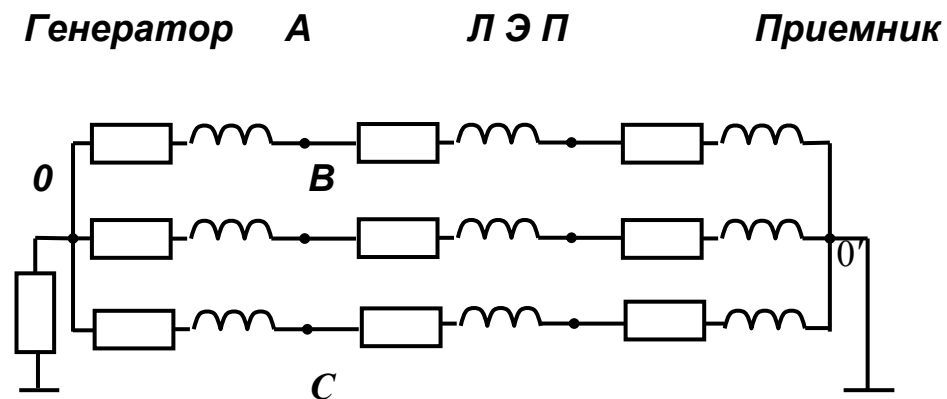


Рис. 7.3

Возможная несимметрия в ЛЭП компенсируется нейтральным проводом, в качестве которого используется земля (система с заземленной нейтралью).

5. При связывании звездой (рис. 7.2) различают фазные и линейные напряжения. Фазные напряжения ($\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$) действуют между началом и концом каждой фазы. Их направление принято в соответствии с направлением фазных токов цепи – от начала фазы к ее концу (к нейтральной точке $0'$). Линейные напряжения ($\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$) действуют между линейными проводами. Их направление принято по часовой стрелке.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для каждого из трех контуров, образованных одним линейным и двумя фазными напряжениями, имеем

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (7.4)$$

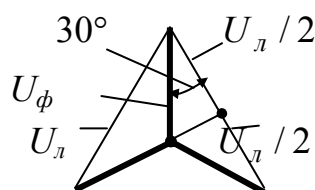


Рис. 7.4

Для построения, например, вектора линейного напряжения $\dot{U}_{AB}$ надо сложить в соответствии с формулами (7.4) вектор фазного напряжения $\dot{U}_A$ с вектором $\dot{U}_B$, взятым с обратным знаком: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A + (-\dot{U}_B)$. Если полученный таким образом вектор $\dot{U}_{AB}$ перенести параллельно самому себе так, чтобы его конец совпал с концом вектора $\dot{U}_A$, то его начало совпадет с концом вектора $\dot{U}_B$. Аналогичным образом следует поступить и при построении векторов $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$: $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C)$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C + (-\dot{U}_A)$, как это показано на векторной диаграмме рис. 7.4. Перенеся эти векторы параллельно самим себе аналогично предыдущему, получим, что вектор линейного напряжения $\dot{U}_{BC}$ расположится между концами векторов фазных напряжений $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$, а вектор линейного напряжения $\dot{U}_{CA}$ – между концами векторов фазных напряжений $\dot{U}_C$ и $\dot{U}_A$.

В частном случае, если система векторов фазных напряжений симметрична, то система векторов линейных напряжений также симметрична и образует равносторонний треугольник, из геометрии которого следует, что действующие значения (длины векторов) линейных напряжений в $\sqrt{3}$ больше действующих значений фазных напряжений.

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi} . \quad (7.5)$$

7.3. Соединение трехфазной цепи треугольником

При соединении трехфазной цепи треугольником (рис. 7.5) конец обмотки фазы А генератора соединяется с началом обмотки В, конец обмотки В – с началом обмотки С, конец обмотки С – с началом обмотки А, образуя замкнутый контур.

Из начала фаз А, В и С генератора отходят три провода к приемникам энергии. Они называются *линейными*. Направления действия линейных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ принято на рис. 7.5 такое же, как и при соединении звездой – от генератора к приемнику.

Из начала фаз А, В и С генератора отходят три провода к приемникам энергии. Они называются *линейными*. Направления действия линейных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ принято на рис. 7.5 такое же, как и при соединении звездой – от генератора к приемнику.

Заметим, что при соединении треугольником фазные ЭДС генератора и фазные сопротивления приемников удобно здесь обозначать двойными индексами: $\dot{E}_A = \dot{E}_{AB}$; $\dot{E}_B = \dot{E}_{BC}$; $\dot{E}_C = \dot{E}_{CA}$; $\underline{Z}_A = \underline{Z}_{AB}$; $\underline{Z}_B = \underline{Z}_{BC}$; $\underline{Z}_C = \underline{Z}_{CA}$. Это же относится к фазным токам и фазным напряжениям, направления действия которых принято по часовой стрелке.

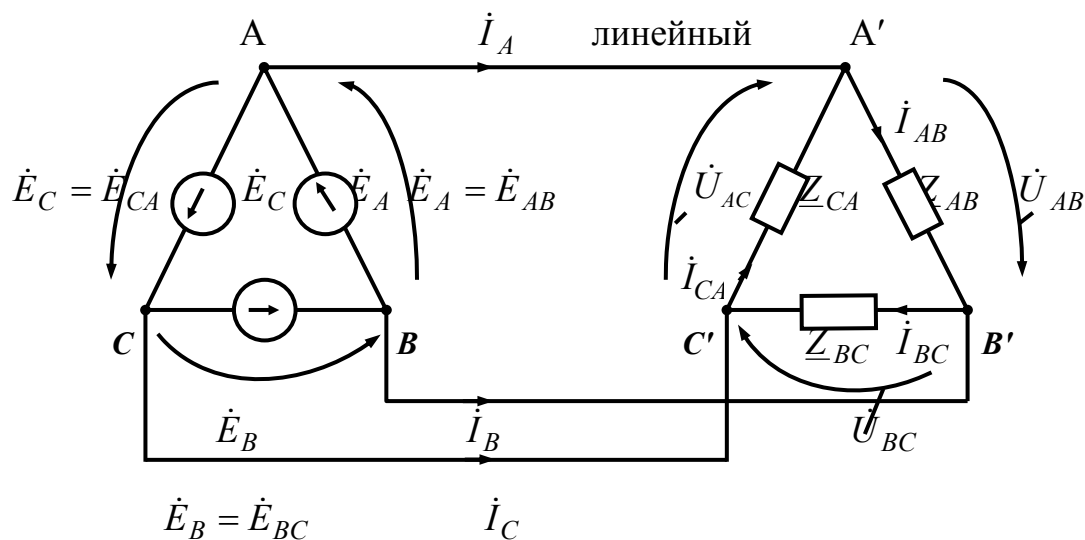


Рис. 7.5

Трехфазная цепь, связанная треугольником, имеет ряд особенностей

1. Напряжения между линейными проводами ($\dot{U}_л$) одновременно являются и фазными ($\dot{U}_ф$) напряжениями: $\dot{U}_л = \dot{U}_ф$.

2. При связывании трехфазной цепи треугольником различают фазные ($\dot{I}_{AB}$, $\dot{I}_{BC}$ и $\dot{I}_{CA}$) и линейные ($\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$) токи. Применяя первый закон Кирхгофа к узлам А, В и С трехфазного приемника, получаем следующие соотношения между этими токами:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (7.6)$$

Эти соотношения в виде векторной диаграммы показаны на рис. 7.6, где представлена симметричная система фазных токов $\dot{I}_{AB}$, $\dot{I}_{BC}$ и $\dot{I}_{CA}$ и показано, что векторы линейных токов расположены между концами векторов фазных токов. Графические построения здесь подобны построениям для фазных и линейных напряжений на рис. 7.2,а и 7.2,б.

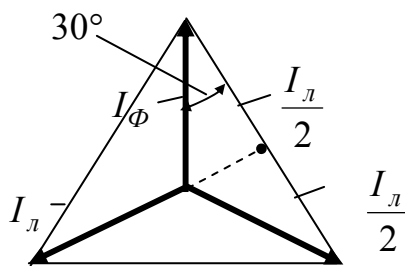


Рис. 7.6

В частном случае, при симметрии системы векторов фазных токов (рис. 7.6) система векторов линейных токов получается также симметричной и образует равносторонний треугольник, из геометрии которого следует, что действующие значения (длины векторов) линейных токов в $\sqrt{3}$ больше действующих значений фазных токов:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi} . \quad (7.7)$$

3. Соединение треугольником не применяется для передачи электромагнитной энергии на большие расстояния ввиду того, что токи в линейных проводах больше токов в фазах приемников (в $\sqrt{3}$ раз при симметричном режиме работы) и это соединение менее экономично по сравнению с соединением звездой.

7.4. Расчет трехфазных цепей

Трехфазные цепи могут работать в двух основных режимах – симметричном и несимметричном.

а) Симметричный режим работы трехфазной цепи имеет место при следующих двух условиях: генератор вырабатывает симметричную систему ЭДС (рис.7.1,б) и, кроме того, комплексные сопротивления всех трех фаз приемника одинаковы (симметричный приемник). Очевидно, что при симметричном режиме достаточно произвести расчет только одной фазы трехфазной цепи (например, фазы *A*). Токи других фаз будут иметь с фазой *A* одинаковые амплитуды (а также и действующие значения) и сдвинуты по фазе относительно своих фазных напряжений на один и тот же угол (φ). При этом друг относительно друга токи всех трех фаз будут сдвинуты по фазе на $\pm 120^\circ$, как это показано на рис. 7.2,б.

б) Несимметричный режим работы трехфазной цепи имеет место в тех случаях, когда хотя бы одно из двух условий симметричного режима отсутствует. При этом необходимо производить расчеты токов и напряжений всех трех фаз, используя известные методы расчета цепей синусоидального тока.

Пример 7.1. Трехфазная цепь (рис. 7.2,а) состоит из генератора, вырабатывающего симметричную систему ЭДС с действующим значением $E=220$ В и симметричного приемника соединенного звездой, сопротивление каждой фазы которого составляет $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi = R = 22$ Ом. Требуется определить токи и напряжения всех трех фаз приемника, ток в нейтральном проводе, а также построить векторную диаграмму цепи на комплексной плоскости.

Решение. 1. Принимаем направление действия ЭДС, токов и напряжений в данной цепи в соответствии с рис. 7.2,а.

2. Определяем комплексные фазные ЭДС генератора. Для этого совмещаем ЭДС фазы А с осью вещественных чисел (рис. 7.1,а) и получаем

$$\dot{E}_A = 220 \text{ В}; \quad \dot{E}_B = 220e^{-j120^\circ} = (-110 - j190) \text{ В};$$

$$\dot{E}_C = 220e^{+j120^\circ} = (-110 + j190) \text{ В}.$$

3. Определяем комплексные линейные напряжения приемника. Для этого воспользуемся вторым законом Кирхгофа для контуров цепи, образованных фазными ЭДС генератора и линейными напряжениями трехфазного приемника.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B = [220 - (-110 - j190)] = (330 + j190) =$$

$$= \sqrt{330^2 + 190^2} e^{j \arctg \frac{190}{330}} = 380e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C = [(-110 - j190) - (-110 + j190)] = -j380 = 380e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = [(-110 + j190) - 220] = -330 + j190 = 380e^{+j150^\circ} \text{ В}.$$

Действующие значения всех трех линейных напряжений одинаковы и составляют $U_\ell = 380$ В.

4. Определяем комплексные фазные напряжения приемника. В соответствии со 2-м законом Кирхгофа непосредственно из схемы цепи находим, что при наличии нейтрального провода они равны фазным ЭДС генератора:

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A = 220 \text{ В}; \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C = 220e^{+j120^\circ} \text{ В}.$$

Действующие значения всех трех фазных напряжений одинаковы ($U_\phi=220$ В) и в $\sqrt{3}$ раз меньше линейных напряжений ($U_\ell = 380$ В).

5. Определяем комплексные фазные (они же линейные) токи приемника, используя закон Ома

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{220}{22} = 10 \text{ А}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22} = 10e^{-j120^\circ} = (-5 - j8,7) \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{220e^{+j120^\circ}}{22} = 10e^{+j120^\circ} = 10(-0,5 + j8,7) = (-5 + j8,7) \text{ А}.$$

Действующие значения токов во всех трех фазах цепи одинаковы и составляют $I_\phi = 10$ А. Векторы этих токов образуют симметричную систему, и их сумма, определяющая ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N$, в соответствии с формулой (7.3,а) равна нулю. Следовательно, при симметричном режиме работы нейтральный провод для нормальной работы цепи не нужен.

6. Векторная диаграмма токов и напряжений исследуемой цепи представлена на рис. 7.7 в двух вариантах.

В первом варианте (рис. 7.7,а) все векторы исходят из начала координат комплексной плоскости. Во втором варианте (рис. 7.7,б) векторы линейных напряжений перенесены параллельно самим себе так, чтобы они расположились между концами соответствующих векторов фазных напряжений и образовали равносторонний треугольник.

Из этой диаграммы видно, что при симметричном режиме работы достаточно рассчитать токи и напряжения только одной из фаз цепи, например фазы А. Токи и напряжения остальных двух фаз будут такими же по действующему значению, но сдвинуты относительно фазы А по фазе на $\pm 120^\circ$.

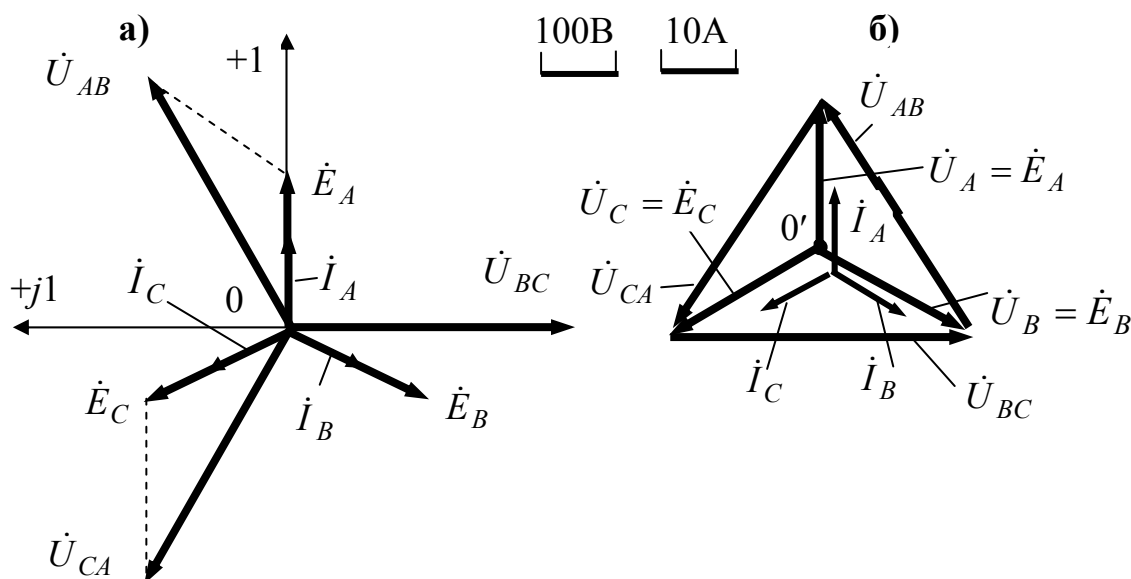


Рис. 7.7

7.5. Мощность трехфазной цепи

Комплексная мощность трехфазной цепи равна сумме комплексных мощностей всех трех ее фаз:

$$\tilde{S}_{3\phi} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C, \quad (7.8)$$

$$\tilde{S}_A = \dot{U}_A^* I_A = S_A e^{j\varphi_A} = P_A + jQ_A;$$

$$\tilde{S}_B = \dot{U}_B^* I_B = S_B e^{j\varphi_B} = P_B + jQ_B; \quad \tilde{S}_C = \dot{U}_C^* I_C = S_C e^{j\varphi_C} = P_C + jQ_C.$$

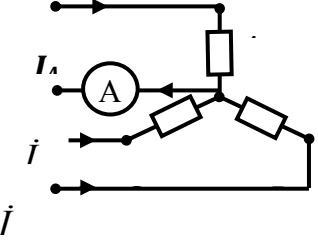
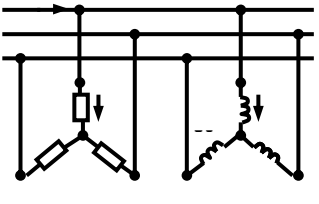
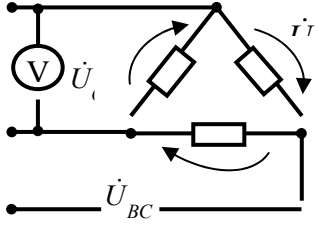
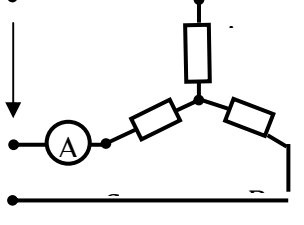
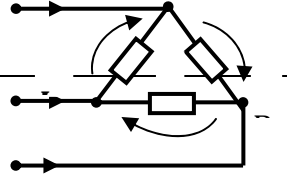
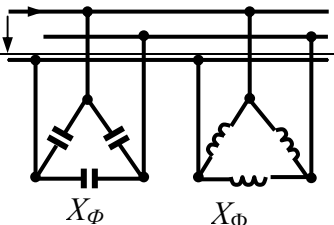
Здесь I_A , I_B и I_C – комплексные токи, сопряженные соответствующим комплексным токам фаз $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$. С учетом формулы (7.8) для комплексной мощности трехфазной цепи получаем

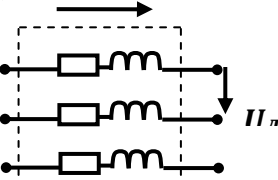
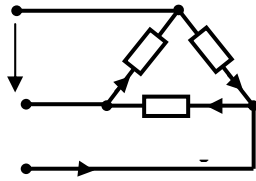
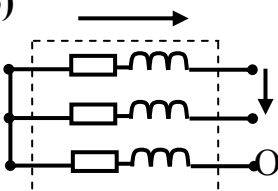
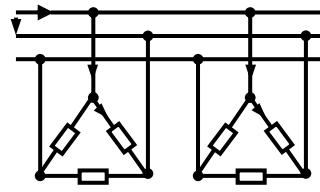
$$\tilde{S}_{3\phi} = \sum P_\phi + j \sum Q_\phi, \text{ где } \sum P_\phi = P_A + P_B + P_C \text{ и } \sum Q_\phi = Q_A + Q_B + Q_C. \quad (7.9)$$

В частном случае, при симметричном режиме работы трехфазной цепи имеем $P_{3\phi} = 3P_\phi$; $Q_{3\phi} = 3Q_\phi$; $S_\phi = U_\phi I_\phi = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2}$. С учетом формул (7.5) и (7.7) получаем для соединения приемников как звездой, так и треугольником:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi; \quad Q_{3\phi} = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi; \quad S_{3\phi} = \sqrt{3} U_L I_L = \sqrt{(P_{3\phi})^2 + (Q_{3\phi})^2}.$$

Вопросы для самопроверки

1)  Дано: $\dot{I}_A = j10 \text{ A};$ $\dot{I}_B = j20 \text{ A};$ $\dot{I}_C = j10 \text{ A}.$ Определите показание амперметра электромагнитной системы А. 40 20 30 $\sqrt{2}$ $\sqrt{40}$ 1. 2. 3. 4. 5.	6)  Дано: $U_\phi = 120 \text{ В};$ $X_\phi = 40 \text{ Ом};$ $R_\phi = 30 \text{ Ом}.$ Определите линейный ток I_L, А. 8 7 6 5 4 1. 2. 3. 4. 5.
2)  Дано: $\dot{U}_{AB} = -j500 \text{ В};$ $\dot{U}_{BC} = j200 \text{ В}.$ Определите показание вольтметра, В. 300 -300 $j500$ $j300$ $-j200$ 1. 2. 3. 4. 5.	7)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ $R = 22 \text{ Ом}.$ Определите показание амперметра фазы С. 5 10 15 20 33 1. 2. 3. 4. 5.
3)  Дано: $U_L = 660 \text{ В};$	8)  Дано: $U_L = 440 \text{ В};$

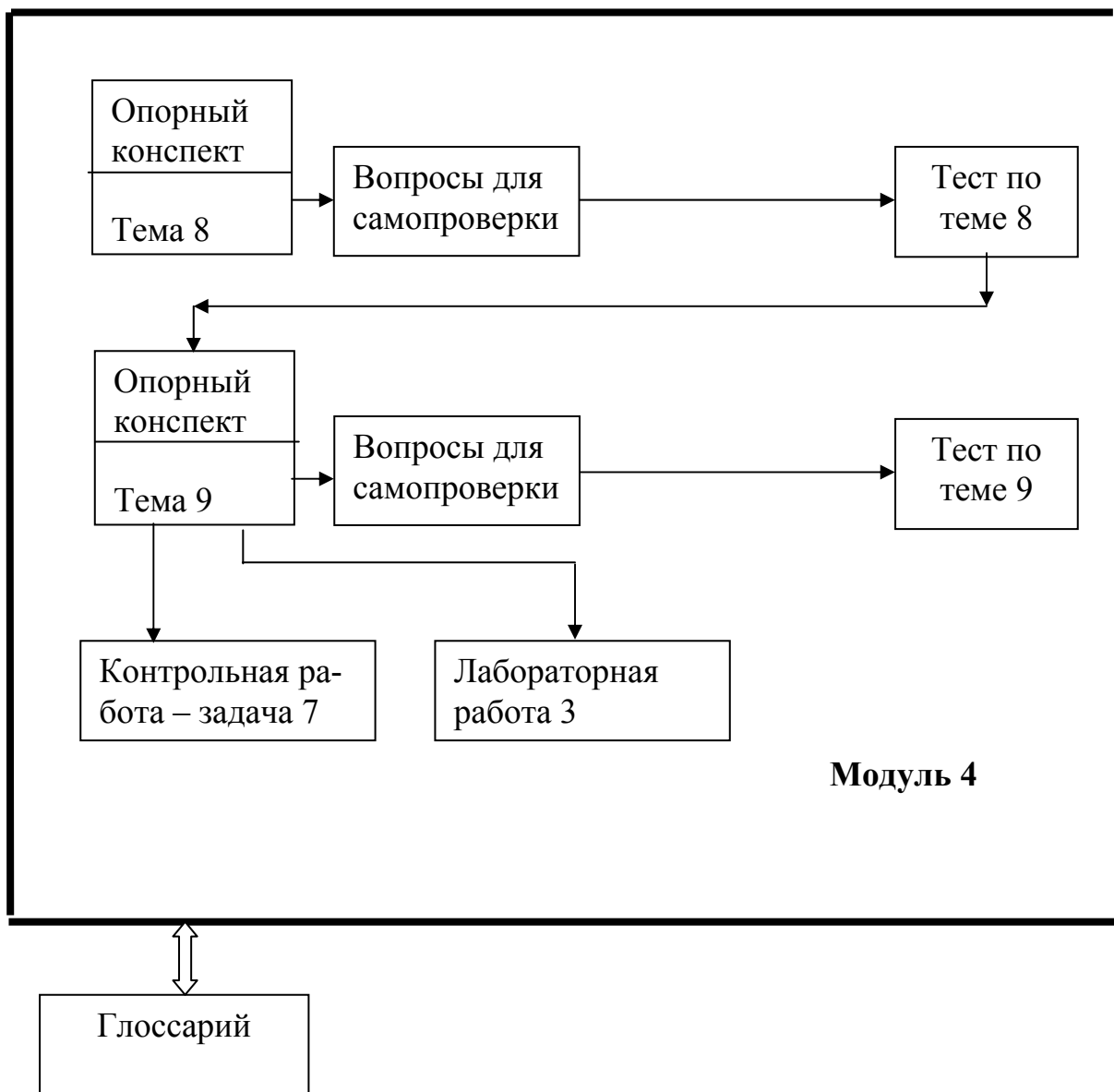
$I_L = 17,3 \text{ A};$ $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA}.$ Найдите сопротивление фазы R , Ом. 10 17,3 22 38 66 1. 2. 3. 4. 5.					$X_\phi = 38 \text{ Ом}.$ Определите линейный ток I_L , ампер. 0 10 17,3 20 34,6 1. 2. 3. 4. 5.				
4)  Дано: $U_\phi = 220 \text{ В};$ Как соединить обмотки двига- теля, чтобы на каждой обмотке было 380 В ? звездой, последов. треугол. параллел. 1. 2. 3. 4.					9)  Дано: $U_L = 440 \text{ В};$ $R = 22 \text{ Ом}.$ Определите ток I_{BC} 10 17,3 20 34,6 38 1. 2. 3. 4. 5.				
5)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ $Z_\phi = (6 + j8) \text{ Ом}.$ Определите актив- ную мощность двигателя, кВт. 9,12 5,28 3,96 11,4 8,71 1. 2. 3. 4. 5.					10)  Дано: $U_L = 440 \text{ В};$ $R_\phi = 44 \text{ Ом}.$ Определите линейный ток I_L , А. 5 10 17,3 20 34,6 1. 2. 3. 4. 5.				

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ правильного ответа	1	4	5	3	5	4	2	1	4	5

РАЗДЕЛ 4

Несинусоидальные токи, напряжения и переходные процессы

Схема работы с разделом 4



Специальность	Часы	Номера тем	Номера параграфов	Номера задач	Номера тестов
1	2	3	4	5	6
200501.65	128	8 9	8.1...8.5 9.1...9.5	-	4. 8 4. 9
210201.65	128	8 9	8.1...8.5 9.1...9.5	-	4. 8 4. 9
150501.65	136	8 9	8.1...8.5 9.1...9.5	-	4. 8 4. 9
230101.65	135	8 9	8.1...8.5 9.1...9.5	5	4. 8 4. 9

8. Несинусоидальные периодические ЭДС, напряжения и токи в линейных электрических цепях

В теме 8 рассматриваются вопросы, входящие в четвертый раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 8.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [4].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- разложение несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье;
- действующие значения несинусоидальных периодических токов и напряжений;
- мощность в цепи при несинусоидальном токе и напряжении;
- расчет линейных цепей с несинусоидальными ЭДС.

8.1. Общие положения

Несинусоидальными периодическими токами и напряжениями называются токи и напряжения, изменяющиеся во времени по несинусоидальному периодическому закону. Они могут возникать в следующих случаях:

1. Источник ЭДС (тока) вырабатывает несинусоидальную ЭДС (ток), а все элементы цепи линейны.
2. Источник ЭДС (тока) вырабатывает синусоидальную ЭДС (ток), а один или несколько элементов цепи не линейны.
3. Источник ЭДС (тока) вырабатывает постоянную или синусоидальную ЭДС (ток), а параметры одного или нескольких элементов цепи изменяются периодически во времени.

Расчет таких цепей можно свести к уже хорошо знакомым нам методам расчета цепей с постоянными и синусоидальными ЭДС. Для этого надо разложить несинусоидальную кривую на постоянную и гармонические составляющие.

8.2. Разложение несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье

В этой теме мы рассмотрим методы расчета линейных цепей, в которых действует несинусоидальные периодические ЭДС, напряжения и токи.

Несинусоидальные периодические ЭДС, напряжения и токи можно представить в виде ряда Фурье, который в общем виде содержит постоянную составляющую, основную или первую гармонику, имеющую период, равный периоду самой функции, и высшие гармоники, частота которых в целое число раз больше частоты первой гармоники

$$u(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots, \quad (8.1)$$

где U_0 – постоянная составляющая, равная среднему значению несинусоидального напряжения за период, $U_1 \sin(\omega t + \psi_1)$ – основная или первая гармоника. Она имеет тот же период $T = 2\pi/\omega$, что и данное несинусоидальное напряжение. Все остальные гармоники, имеющие частоту, не равную частоте ω , называются высшими гармониками. Номер гармоники означает, во сколько раз угловая частота больше основной частоты ω . Следует отметить, что число гармоник стремится к бесконечности, а амплитуды по мере увеличения номера гармоники уменьшаются и стремятся к нулю $U_{min} \rightarrow 0$. Поэтому обычно можно ограничиться некоторым конечным числом ряда.

Ряд Фурье (8.1) можно записать и в виде суммы синусного и косинусного рядов:

$$U(t) = U_0 + U'_{1m} \cos \omega t + U'_{1m} \cos 2\omega t + U'_{1m} \cos 3\omega t + \dots + \\ + U''_{1m} \sin \omega t + U''_{1m} \sin \omega t + U''_{1m} \sin \omega t + \dots, \quad (8.2)$$

где $U'_{km} = U_{km} \sin \psi_k$; $U''_{km} = U_{km} \cos \psi_k$; $\psi_k = \arctg \frac{U'_{km}}{U''_{km}}$.

Коэффициенты ряда (8.2) могут быть определены с помощью известных из высшей математики формул.

Если несинусоидальная периодическая функция обладает тем или иным видом симметрии, то при ее разложении в ряд Фурье отсутствуют некоторые составляющие ряда.

8.3. Действующие значения несинусоидальных периодических токов и напряжений

Известно, что действующим значением тока или напряжения называется среднеквадратичное значение их за период, т.е.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad , \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad . \quad (8.3)$$

Примем, что ток несинусоидальный:

$$i = I_0 + i_1 + i_2 + \dots = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \psi_{i1}) + I_{m2} \sin(2\omega t + \psi_{i2}) + \dots \quad (8.4)$$

Тогда при подстановке (8.4) в (8.3) получаем (вывод можно посмотреть в рекомендованной литературе [1],[2])

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad , \quad (8.5)$$

аналогично для напряжения

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad . \quad (8.6)$$

Пример 8.1. Мгновенное значение несинусоидального тока представлено в виде ряда

$$i = 12 + 6 \sin(\omega t + \pi/3) + 4 \sin(2\omega t + \pi/4).$$

Требуется найти действующее значение тока.

Решение. Действующее значение несинусоидального тока определим по выражению 8.5:

$$I = \sqrt{12^2 + \frac{6^2}{2} + \frac{4^2}{2}} = 13,1 \text{ А.}$$

8.4. Мощность в цепи при несинусоидальном токе и напряжении

Пусть на входе цепи имеется несинусоидальное напряжение и ток

$$u = U_0 + u_1 + u_2 + \dots ; \quad i = I_0 + i_1 + i_2 + \dots \quad . \quad (8.7)$$

Известно, что активная мощность цепи равна

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad . \quad (8.8)$$

При подстановке (8.7) в (8.8) получим

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T (U_0 + u_1 + u_2 + \dots)(I_0 + i_1 + i_2 + \dots) dt \quad (8.9)$$

Из (8.9) получаем формулу для расчета активной мощности при несинусоидальных токе и напряжении

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots = P_0 + P_1 + P_2 + \dots \quad (8.10)$$

Активная мощность при несинусоидальном режиме согласно (8.10) равна сумме постоянной мощности и активных мощностей всех гармоник.

Полной мощностью называется произведение действующих значений несинусоидальных напряжения и тока

Для периодических несинусоидальных процессов вводят понятие о коэффициенте мощности λ , определяя его из соотношения

$$P = UI\lambda, \quad (8.11)$$

т. е.

$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} P_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}}.$$

По аналогии с синусоидальным током вводят понятие о реактивной мощности Q , которая определяется как сумма реактивных мощностей отдельных гармоник:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (8.12)$$

Пример 8.2. Известны несинусоидальные ток i и напряжение u на входе цепи:

$$i = 18\sqrt{2} \sin(\omega t + 20^\circ) + 12\sqrt{2} \sin(3\omega t + 13^\circ) + 4\sqrt{2} \sin(5\omega t - 17^\circ),$$

$$u = 10 + 20\sqrt{2} \sin(\omega t + 35^\circ) + 14\sqrt{2} \sin(3\omega t + 63^\circ) + 8\sqrt{2} \sin(5\omega t + 37^\circ).$$

Требуется определить: активную, реактивную, полную мощности и коэффициент мощности.

Решение. Действующие значения тока и напряжения равны:

$$I = \sqrt{18^2 + 12^2 + 4^2} = 22 \text{ А}, \quad U = \sqrt{10^2 + 20^2 + 14^2 + 8^2} = 27,6 \text{ В}.$$

$$\text{Полная мощность: } S = UI = 22 \cdot 27,6 = 607 \text{ ВА}.$$

Активная мощность:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + U_5 I_5 \cos \varphi_5 =$$

$$= 10 \cdot 0 + 20 \cdot 18 \cos 15^\circ + 14 \cdot 12 \cos 50^\circ + 8 \cdot 4 \cos 54^\circ = 488,7 \text{ В}.$$

Реактивная мощность:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_3 I_3 \sin \varphi_3 + U_5 I_5 \sin \varphi_5 = \\ = 20 \cdot 18 \sin 15^\circ + 14 \cdot 12 \sin 50^\circ + 8 \cdot 4 \sin 54^\circ = 247 \text{ вар.}$$

Коэффициент мощности: $\lambda = P/S = 487,7/607 = 0,8$.

8.5. Расчет линейных цепей с несинусоидальными ЭДС

Расчет основан на принципе наложения, а именно: мгновенное значение несинусоидального тока в любой ветви в данный момент времени равно алгебраической сумме мгновенных значений отдельных гармоник тока в данный момент времени. В результате этого расчет можно свести к решению n задач с синусоидальными ЭДС (n – число гармоник) и одной задачи с постоянной ЭДС.

Весь расчет можно разделить на следующие этапы:

1. Разложение несинусоидальных источников ЭДС в ряд Фурье, т. е. на постоянную и гармонические составляющие. При этом в зависимости от симметрии кривой ЭДС в ней может отсутствовать постоянная составляющая.
2. Расчет постоянной составляющей тока, если в разложении присутствует постоянная составляющая ЭДС.
3. Расчет мгновенных значений гармоник тока i_k комплексным методом.
4. Суммирование мгновенных значений тока отдельных гармоник и постоянной составляющей $i = I_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k$.

При расчете постоянной составляющей тока необходимо учесть, что индуктивное и емкостное сопротивления соответственно равны

$$X_{L0} = 0, \quad X_{C0} = \infty, \quad (8.13)$$

так как постоянную составляющую можно представить процессом, у которого частота $\omega \rightarrow 0$ или $\omega = 0$.

При расчете гармонических составляющих тока необходимо учесть, что индуктивное и емкостное сопротивления зависят от частоты, т. е. от номера гармоники

$$X_{LK} = k\omega L = kX_{L1}, \quad X_{Ck} = 1/k\omega C = X_{C1}/k. \quad (8.14)$$

Активное сопротивление в диапазоне низких частот, что имеет место в электротехнике, практически не зависит от частоты и остается таким же, как и при постоянном токе.

Комплексный метод применим к каждой синусоидальной гармонике с учетом ее номера, т. е. необходимо учитывать соотношения (8.15).

Следует отметить, что если гармоники заданы в виде косинуса или синуса с отрицательной амплитудой, то их следует преобразовать в синусы с положительными амплитудами, воспользовавшись известными соотношениями:

$$-\sin \alpha = \sin(\alpha + 180^\circ); \quad \pm \cos \alpha = \sin(\alpha \pm 90^\circ).$$

Векторные диаграммы имеют смысл только для отдельных гармоник.

Пример 8.3. (этот пример аналогичен задаче 1 из контрольной работы и задачам, предлагаемым на зачете). Для цепи рис. 8.1 дано $X_{L1} = \omega L = 3 \text{ Ом}$, $R = X_{C1} = 1/\omega C = 4 \text{ Ом}$; $u = 10 + 5\sqrt{2} \sin \omega t + 2\sqrt{2} \sin 3\omega t$.

Требуется определить действующее и мгновенные значения тока на входе цепи и активную мощность.

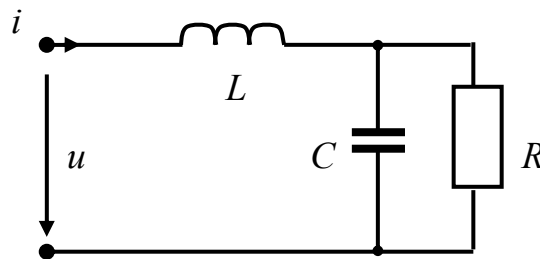


Рис. 8.1

Решение 1. Постоянная составляющая тока равна

$$I_0 = U_0 / R = 10/4 = 2,5 \text{ А}.$$

2. Действующее и мгновенные значения тока первой гармоники найдем комплексным методом:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1}; \quad \dot{U}_1 = 5; \quad \underline{Z}_1 = jX_{L1} - \frac{jRX_{C1}}{R - jX_{C1}} = j3 - \frac{j16}{4 - j4} = j3 - \frac{-64 + j64}{4^2 + 4^2} = 2 + j;$$

$$I_1 = \frac{5}{2+j} = 2-j; \quad I_1 = \sqrt{2^2+1^2} = \sqrt{5} \text{ А}; \quad i_1 = \sqrt{10} \sin(\omega t - 0,46) \text{ А}.$$

3. Определим действующее и мгновенные значения тока третьей гармоники:

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{U}_3 = 2; \quad \underline{Z}_3 = j3X_{L3} - \frac{jR \frac{X_{C1}}{3}}{R - j \frac{X_{C1}}{3}} = j9 - \frac{j5,3}{4-j4} = 0,39 + j12,1;$$

$$I_3 = \frac{2}{0,39 + j12,1} = 0,005 - j0,16; \quad I_3 = 0,16 \text{ А}; \quad i_3 = \sqrt{0,32} \sin(3\omega t - 1,57) \text{ А}.$$

4. Действующее значение тока на входе цепи:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{6,25 + 5 + 0,0256} = 3,3 \text{ А}.$$

5. Мгновенное значение тока на входе цепи:

$$i = I_0 + i_1 + i_3 = 2,5 + \sqrt{10} \sin(\omega t - 0,46) + \sqrt{0,32} \sin(3\omega t - 1,57) \text{ А}.$$

6. Активная мощность:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 = \\ 10 \cdot 2,5 + 5 \cdot 2,23 \cos 0,46 + 2 \cdot 0,16 \cos 1,57 = 36,2 \text{ Вт}.$$

Вопросы для самопроверки

1. От чего зависит состав гармоник несинусоидального напряжения?
2. Какие математические функции можно разложить в ряд Фурье?
3. Как определить действующие значения тока, напряжения, ЭДС?
4. Как определяется коэффициент мощности в цепях с несинусоидальными токами?
5. Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления в цепи постоянного тока?
6. Какова зависимость индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты?
7. Какой принцип положен в основу расчета несинусоидальных периодических токов?
8. Какие составляющие тока можно рассчитывать комплексным методом?

9. Переходные процессы в электрических цепях с сосредоточенными параметрами

В теме 9 рассматриваются вопросы, входящие в четвертый раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 9.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [4].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- законы коммутации и начальные условия;
- классический метод расчета переходных процессов;
- расчет переходных процессов в цепях с одним накопителем энергии;
- метод переменных состояния.

9.1. Общие положения

В предшествующих разделах курса рассматривались установившиеся процессы в цепях с сосредоточенными параметрами. Напомним, что цепи с сосредоточенными параметрами это такие цепи, для которых с достаточной степенью точности можно считать, что электрическое поле, магнитное поле и выделение тепла сосредоточены на отдельных участках цепи, т. е. параметрам R , C , L отводится определенное отдельное место, при этом их геометрические размеры не учитываются.

Установившимся процессом или режимом называется такой процесс, который протекает в рассматриваемый момент времени при условии, что все изменения (включение или отключение источников, нагрузки, изменение параметров цепи и др.) происходили теоретически при $t = -\infty$, практически при достаточно большом времени в прошлом.

Переходный процесс в электрической цепи – это переход от одного установившегося режима к другому, отличному от первого. Такие процессы имеют место при коммутации, т. е. при включении или отключении электрических цепей, при достаточно быстром изменении величины и формы напряжения и параметров цепи. Возникновение переходных процессов обусловлено свойством реактивных элементов индуктивности и емкости накапливать энергию электромагнитного поля и возвращать ее во внешнюю цепь в короткий промежуток времени.

На схеме обычно коммутация указывается в виде рубильника со стрелкой. На рис. 9.1,а стрелка означает включение рубильника, стрелка на рис. 9.1,б – отключение.



Рис. 9.1

Весь процесс в электрических цепях можно разделить на три режима:

1. Начальный установившийся режим, который имел место до коммутации.
2. Переходный режим. За его начало обычно принимается момент времени $t = 0$.
3. Конечный установившийся режим после коммутации, который наступает теоретически при $t = +\infty$, а практически, как будет показано ниже, через сравнительно короткое время.

Длительность переходного процесса исчисляется обычно весьма малыми долями секунды, но токи и напряжения за это время могут достигнуть значений значительно больших величин, чем в установившемся режиме, а это может привести к повреждению электрооборудования. Кроме того, в таких областях техники, как электроника, радиотехника, автоматика и др., важно знать о характере переходных процессов, что позволяет определить характеристики систем.

Следовательно, изучение и расчет переходных режимов являются актуальной задачей.

Прежде чем приступить к расчету переходных процессов, рассмотрим два важных вопроса: законы коммутации и начальные условия.

9.2. Законы коммутации. Начальные условия

Переходные процессы связаны с изменением магнитной энергии в индуктивности L и электрической энергии в емкости C и запасом этих энергий на момент коммутации.

Энергия магнитного поля в индуктивности

$$W_M = \frac{Li_L^2}{2} = \frac{\psi^2}{2L} \quad (9.1)$$

и энергия электрического поля в емкости

$$W_{\text{э}} = \frac{C u_C^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (9.2)$$

не могут изменяться мгновенно, так как для мгновенного изменения энергии потребовались бы бесконечно большие мощности источников, что физически невозможно.

Если учесть, что индуктивность L и емкость C неизменны, то из соотношения (9.1) следует, что ток и потокосцепление в индуктивности не могут изменяться скачком (мгновенно). Это положение известно под названием **первого закона коммутации**. Из соотношения (9.2) следует, что напряжение на емкости и его заряд не могут изменяться скачком (мгновенно). Это положение называется **вторым законом коммутации**.

Для учета влияния энергетического состояния цепи на момент коммутации и для записи законов коммутации введем понятие тока $i_L(-0)$ в индуктивности и напряжения $u_C(-0)$ на емкости в последний момент перед коммутацией, а также понятие тока $i_L(+0)$ в индуктивности и напряжения $u_C(+0)$ на емкости в первый момент после коммутации. Напомним, что за момент коммутации принято время $t = 0$. В соответствии с этим законы коммутации можно записать в виде:

$$\text{первый закон коммутации} \quad i_L(-0) = i_L(+0) \text{ или } \psi(-0) = \psi(+0); \quad (9.3)$$

$$\text{второй закон коммутации} \quad u_C(-0) = u_C(+0) \text{ или } q(-0) = q(+0). \quad (9.4)$$

Заметим, что напряжение на индуктивности и ток в емкости могут изменяться мгновенно.

Если цепь содержит только активные сопротивления, то запасенная энергия электрического и магнитного полей несоизмеримо мала с выделяющейся тепловой энергией в сопротивлениях, что обуславливает отсутствие переходных процессов в таких цепях. При этом ток и напряжения изменяются мгновенно от первоначально установившегося режима до нового установившегося режима. **Независимыми начальными условиями** называются токи $i_L(-0)$ в индуктивностях и напряжения $u_C(-0)$ на емкостях. В дальнейшем для краткости будем их называть начальными условиями. Если $i_L(-0)=0$ и $u_C(-0)=0$, то такие начальные условия называются нулевыми. Следует отметить, что характер переходного процесса зависит от начальных условий.

9.3. Применение дифференциальных уравнений к расчету переходных процессов

9.3.1. Классический метод

Электромагнитные процессы в электрических цепях описываются дифференциальными уравнениями, составленными согласно первому и второму законам Кирхгофа с использованием уравнений элементов. Порядок дифференциального уравнения определяется тем, сколько в цепи имеется накопителей электрической и магнитной энергии. Если требуется найти ток i_k в k -й ветви, то исключая последовательно все токи остальных ветвей, можно получить одно дифференциальное уравнение, содержащее только ток i_k и его производные

$$a_n \frac{d^n i_k}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} i_k}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{di_k}{dt} + a_0 i_k = f(t). \quad (9.5)$$

Здесь $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ - постоянные коэффициенты, значение которых зависит от конфигурации цепи. Правая часть $f(t)$ содержит в себе заданные ЭДС.

Полный интеграл дифференциального уравнения с правой частью равен сумме частного решения этого уравнения и решения того же уравнения без правой части (однородного) [1].

Частное решение уравнения (9.5) дает нам значение тока при $t = \infty$, т. е. при установившемся режиме, наступившем после коммутации. Характер и величина этой составляющей определяются внешними источниками. Поэтому ее часто называют принужденной составляющей и обозначают как i_{np} . Например, если источники постоянны, то и принужденный ток $i_{np} = \text{const}$. Если же ЭДС заданы в виде синусоидальных функций, то i_{np} также будет синусоидальной функцией. Определение i_{np} является задачей расчета установившегося режима в цепи, способы и методы которого рассматривались в предыдущих разделах курса [1], [2], [3].

Общее решение физически определяет электромагнитные процессы, происходящие в цепи при отсутствии внешних источников энергии, за счет запаса энергии в индуктивностях и емкостях, который был в начальный момент времени.

Так как в реальных цепях всегда имеет место рассеяние энергии (преобразование в тепло), то запас энергии будет со временем исчерпан и электромагнитные процессы в цепи прекратятся.

Из этого следует, что общее решение однородного уравнения должно стремиться к нулю при $t \rightarrow \infty$. Эта составляющая не зависит от внешних источников и поэтому ее часто называют свободной составляющей и обозначают как $i_{св}$.

Общее решение однородного дифференциального уравнения n -го порядка, как известно из курса математики в случае простых корней, имеет вид

$$i_{св} = \sum_{k=1}^n A_k e^{\lambda_k t},$$

где t – время; A_k – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий; λ_k – корень характеристического уравнения

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 = 0. \quad (9.6)$$

Для получения характеристического уравнения (9.6) необходимо в однородном дифференциальном уравнении заменить i на 1, первую производную тока di/dt на λ , вторую производную на λ^2 и т. д.

Рассмотренный метод расчета переходных процессов называется **классическим**. Обратим внимание, что при составлении дифференциальных уравнений в качестве неизвестных необходимо принимать ток i_L в индуктивности и напряжение u_C на емкости. При таком выборе неизвестных достаточно легко на основании начальных условий и законов коммутации определить постоянные интегрирования.

9.3.2. Расчет переходных процессов в цепях с одним накопителем энергии – индуктивностью

Электромагнитные процессы при переходном процессе в таких цепях обусловлены запасом магнитной энергии в индуктивности и ее рассеиванием в виде тепла на активных сопротивлениях. Отметим, что цепи, содержащие всего один участок с накопителем магнитной энергии (L), описываются

дифференциальным уравнением первого порядка, т. е. такие уравнения содержат только одну производную di_L/dt .

При расчете установившегося режима в случае постоянных внешних ЭДС необходимо помнить, что сопротивление индуктивности постоянному току равно нулю.

Ниже рассмотрим пример. Расчет его выполнен по алгоритму, который рекомендуется к применению для других подобных задач.

Пример 9.1. Включение последовательной цепи R, L на постоянное напряжение

Последовательная цепь R, L (рис. 9.2,а) $R=100$ Ом и $L=2$ Гн подключается к постоянному напряжению $U=100$ В. Требуется определить ток и напряжение на индуктивности в переходном процессе и построить графики зависимостей $i_L(t)$, $u_L(t)$.

Решение. 1. Определяем начальное условие: $i_L(-0) = 0$, так как цепь до коммутации была отключена (принимаем, что это было достаточно длительное время).

2. Изображаем электрическую цепь после коммутации (рис. 9.2,б) и на ней указываем направления токов и напряжений

3. Для схемы (рис. 9.2,б) составляем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$u_L + u_R - U = 0. \quad (9.7)$$

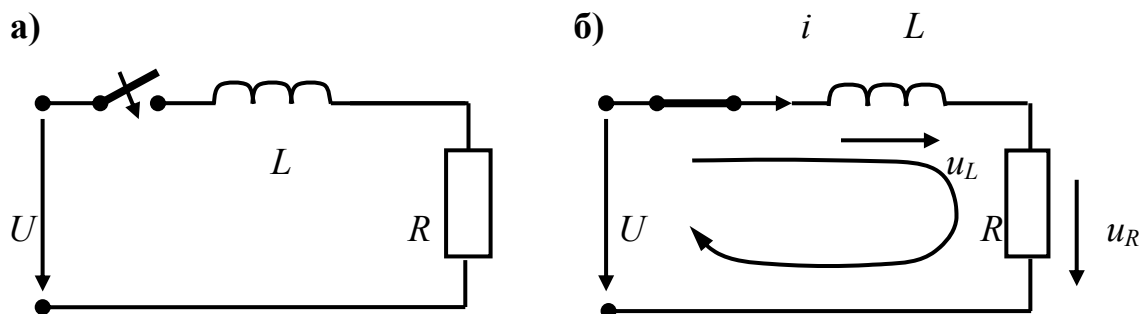


Рис. 9.2

Подставляя уравнения элементов $L di/dt$ и Ri в уравнение (9.7) и учитывая, что для последовательной цепи $i = i_L$, получим

$$L di/dt + Ri = U. \quad (9.8)$$

Уравнение (9.8) – линейное дифференциальное уравнение первого порядка.

4. Решение уравнения (искомый ток переходного процесса) ищем в виде

$$i = i_{np} + i_{св}.$$

(9.9)

5. Определяем i_{np} , который представляет собой установившийся постоянный ток в цепи. Находим его по закону Ома, учитывая при этом, что индуктивное сопротивление при постоянном токе равно нулю:

$$i_{np} = U/R = 100/100 = 1 \text{ А}.$$

6. Составляем однородное дифференциальное уравнение:

$$L di_{св}/dt + Ri_{св} = 0,$$

решением которого будет функция $i_{св} = Ae^{\lambda t}$.

7. Составляем характеристическое уравнение для определения λ

$$L\lambda + R = 0,$$

корень, которого равен

$$\lambda = -R/L = -100/2 = -50 \text{ с}^{-1}.$$

Величина $\tau = |1/\lambda| = 0,02 \text{ с}$ называется постоянной времени цепи и имеет размерность времени.

8. Запишем решение (ток в переходном процессе):

$$i = i_{np} + i_{св} = 1 + Ae^{-50t}. \quad (9.10)$$

9. Согласно первому закону коммутации и начальным условиям

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

10. Определим постоянную интегрирования A путем подстановки в уравнение (9.10) $t = 0$ и, учитывая условие п. 9, получим

$$i(0) = \frac{U}{R} + A e^{-\frac{R}{L} \cdot 0} = 1 + A e^{-50 \cdot 0}; \quad 0 = 1 + A e^{-50 \cdot 0}; \quad A = -1.$$

Ток в переходном процессе

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) = 1 - e^{-50t} \text{ А.} \quad (9.11)$$

11. Напряжение на индуктивности можно определить по уравнению

$$u_L = U - u_R = U - Ri = 100 - 100(1 - e^{-50t}) = 100e^{-50t} \text{ В.}$$

Постоянную времени τ можно определить графически. Для этого к любой точке функции i_L проводят касательную, тогда длина подкасательной на оси времени даст в том же масштабе, что и время, постоянную времени τ . За длительность переходного процесса принимают время, равное $t = (4 \div 5)\tau$. За это время величина тока в переходном процессе будет отличаться от установившегося значения тока менее чем на 1%.

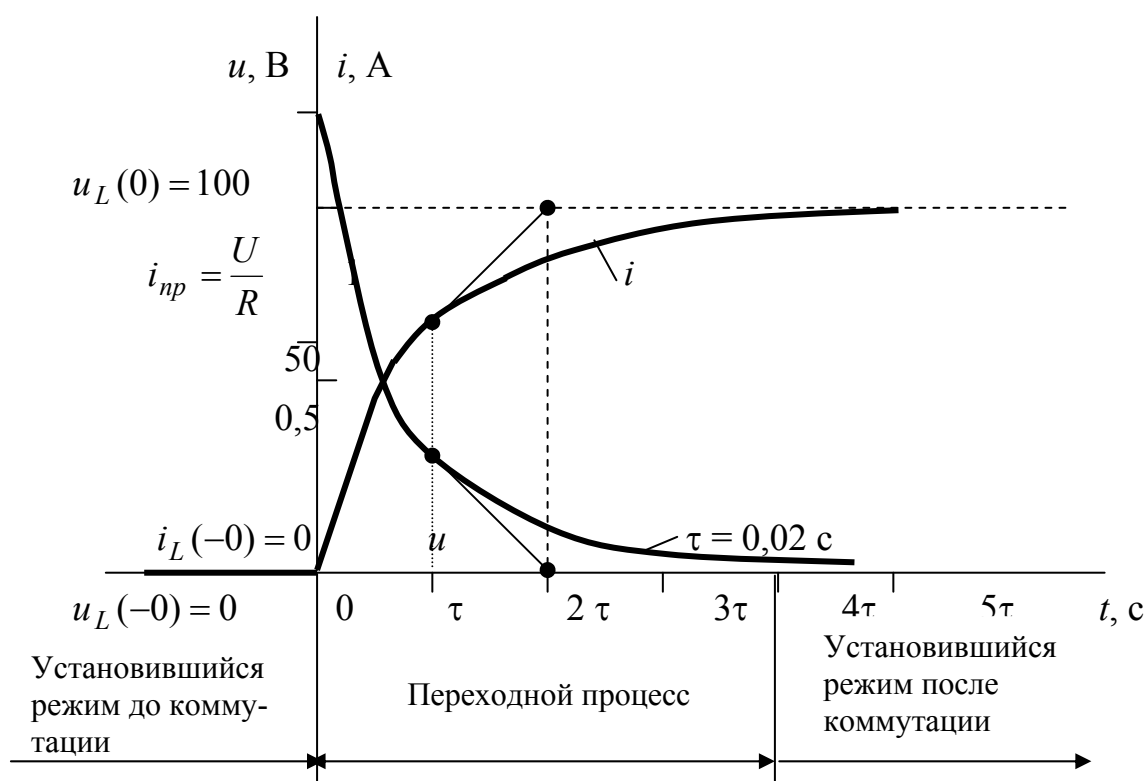


Рис. 9.3

9.3.3. Расчет переходных процессов в цепях с одним накопителем энергии – емкостью

Электромагнитные процессы при переходном процессе в таких цепях обусловлены запасом электрической энергии в емкости C и рассеиванием этой энергии в виде тепла на активных сопротивлениях цепи. При составлении дифференциального уравнения следует в качестве неизвестной функции выбрать напряжение u_C на емкости. Следует отметить, что при расчете установившихся режимов, т. е. при определении начальных условий и принужденной составляющей, сопротивление емкости в цепях постоянного тока равно бесконечности.

Расчет выполним по тому же алгоритму, что и предыдущий пример.

Пример 9.2. Включение последовательной цепи R, C на постоянное напряжение

Цепь (рис. 9.4,а), состоящая из последовательно соединенных сопротивления $R = 1000$ Ом и емкости $C = 200$ мкФ, в некоторый момент времени подключается к постоянному напряжению $U = 60$ В. Требуется определить ток и напряжение емкости в переходном процессе и построить графики $u_C(t)$, $i(t)$.

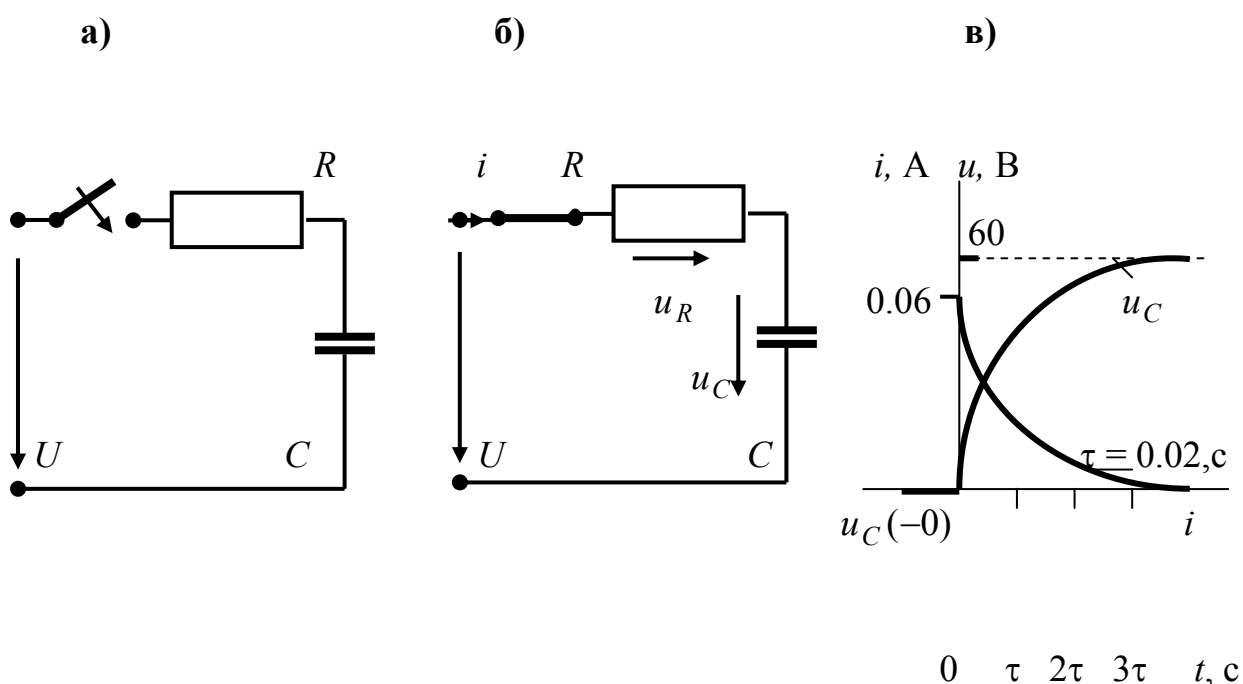


Рис. 9.4

Решение. 1. Определяем начальные условия. Начальное условие $u_C(-0) = 0$, так как цепь до коммутации была отключена (полагаем достаточно длительное время).

2. Изображаем электрическую цепь после коммутации (рис. 9.4,б), указываем направления тока и напряжений и для нее составляем уравнение по второму закону Кирхгофа

$$u_R + u_C - U = 0 \quad \text{или} \quad Ri + u_C = U.$$

3. Преобразуем уравнение п. 2 в дифференциальное. Для этого, подставив вместо тока i известное уравнение $i = C du_C / dt$, получим

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

4. Решение уравнения (искомое напряжение на емкости) ищем в виде

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв}.$$

5. Определяем u_{Cnp} . Так как в цепи постоянного тока в установившемся режиме сопротивление емкости равно бесконечности (при этом $Ri = 0$), то все напряжение будет приложено к емкости. Поэтому

$$u_{Cnp} = U = 60 \text{ В}.$$

6. Составляем однородное дифференциальное уравнение:

$$RC \frac{du_{Cсв}}{dt} + u_{Cсв} = 0,$$

решением которого будет функция $u_{Cсв} = Ae^{\lambda t}$.

7. Составляем характеристическое уравнение $RC\lambda + 1 = 0$, корень которого равен $\lambda = -\frac{1}{RC} = -\frac{1}{10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = -5 \frac{1}{\text{с}}$.

$$\text{Постоянная времени: } \tau = \left| \frac{1}{\lambda} \right| = RC = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ с}.$$

8. Запишем решение: $u_C(t) = u_{Cnp} + u_{Cсв} = U + Ae^{\lambda t}$.

9. Согласно второму закону коммутации и начальным условиям

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

10. Определим постоянную интегрирования A путем подстановки $t=0$ в уравнение п.8

$$u_C(0) = U + A; \quad A = -U.$$

Напряжение на емкости в переходном процессе

$$u_C = U - Ue^{\lambda t} = U(1 - e^{\lambda t}) = 60(1 - e^{-5t}) \text{ В.}$$

11. Ток в цепи можно определить по уравнению $i = C \frac{du_C}{dt}$

$$\text{или по уравнению п. 2} \quad i = \frac{U - u_C}{R} = \frac{U - U(1 - e^{\lambda t})}{R} = \frac{U}{R} e^{\lambda t} = 0,06e^{-5t} \text{ А.}$$

Графики $u_C(t)$ и $i(t)$ представлены на рис. 9.4, в.

Вопросы для самопроверки

1. В каких цепях возможны переходные процессы?
2. Сформулируйте первый и второй законы коммутации.
3. Почему ток в индуктивности и напряжение на емкости не могут изменяться мгновенно?
4. Почему уравнения, отражающие переходные процессы в цепи, получаются дифференциальными?
5. Какие особенности имеет классический метод расчета переходных процессов?
6. Что влияет на частное решение (принужденную составляющую) дифференциального уравнения?
7. Почему свободная составляющая при $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю?
8. Как составить характеристическое уравнение?
9. Что необходимо выбирать в качестве неизвестных дифференциального уравнения?
10. Зачем необходимо определять начальные условия?

11. Как используются законы коммутации при расчете переходных процессов?

12. Каким образом определяются постоянные интегрирования?

13. Как определяется принужденная составляющая переходного процесса?

14. Как графически определить постоянную времени цепи?

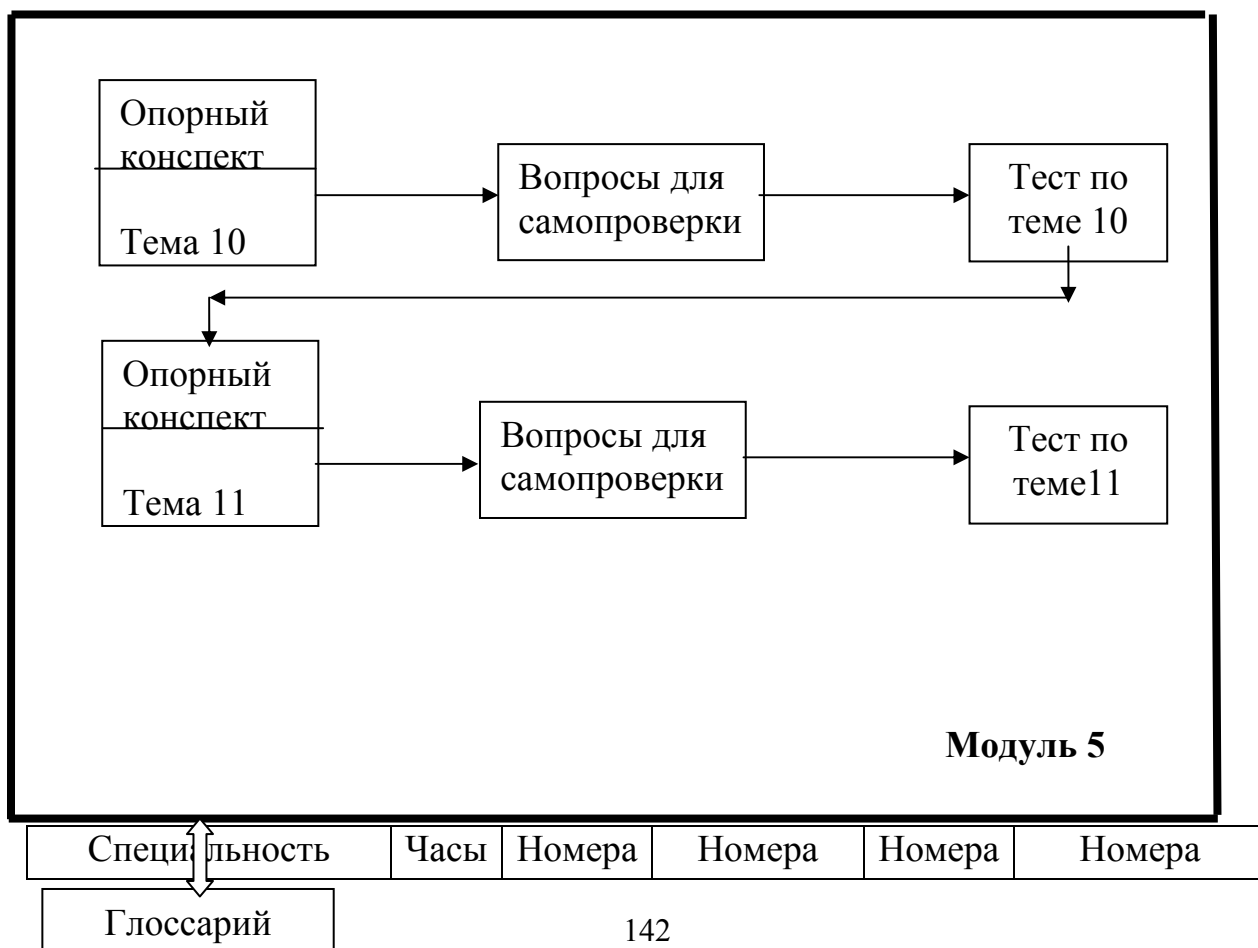
15. Какие особенности индуктивности в цепи постоянного тока необходимо учитывать при расчете начальных условий и принужденной составляющей тока i_{Lnp} ?

16. Какую величину требуется выбирать в качестве неизвестной при составлении дифференциального уравнения для цепи, содержащей только один реактивный элемент – емкость и почему?

17. Какую особенность емкостного элемента надо учитывать в цепях постоянного тока при расчете начальных условий и принужденной составляющей u_{Cnp} ?

РАЗДЕЛ 5. Нелинейные электрические и магнитные цепи

Схема работы с разделом 5



		тем	параграфов	задач	тестов
1	2	3	4	5	6
240401.65	52	10 11	10.1-10.7 11.1	-	-
240301.65	5	10 11	10.1-10.7 11.1	-	-
190701.65	72	10 11	10.1-10.7 11.1	-	-
261001.65	70	10 11	10.1-10.7 11.1	-	-
280202.65	71	10 11	10.1-10.7 11.1	-	-
1	2	3	4	5	6
190701.65	72	10 11	10.1-10.7 11.1	-	-
140101.65	80	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
140104.65	90	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
150104.65	100	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
190205.65	100	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
190601.65	100	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
151001.61	119	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
151001.65	119	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
150202.65	120	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
220100.62	136	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
200102.65	140	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
200102.65	140	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11

150501.65	142	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
230101.65	150	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
200402.65	150	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
200501.65	170	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11
210201.65	170	10 11	10.1-10.7 11.1	-	5. 10 5. 11

10. Нелинейные электрические и магнитные цепи постоянного тока

В теме 10 рассматриваются вопросы, входящие в пятый раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 10.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [4].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- характеристики нелинейных элементов;
- нелинейные свойства ферромагнитных материалов;
- законы магнитных цепей

10.1. Нелинейные электрические цепи. Общие положения

Нелинейными электрическими цепями называются цепи, параметры которых зависят от тока и напряжения. В соответствии с этим определением электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, является нелинейной. Строго говоря, все электрические цепи нелинейные, так как их параметры в той или иной степени зависят от тока и напряжения. Например, активное сопротивление проводников зависит от величины тока, поскольку с изменением тока в проводниках меняется их температура. Индуктивность катушек также зависит от величины тока, если магнитная проницаемость материала сердечника зависит от напряженности магнитного по-

ля. Однако во многих практически важных случаях эта нелинейность (зависимость параметров цепи от тока и напряжения) выражена весьма слабо. Это дает нам возможность пренебречь нелинейностью при анализе процессов в таких цепях и применять теорию линейных электрических цепей для расчета многих электротехнических устройств.

Вместе с тем в ряде электротехнических устройств применяются элементы, нелинейные свойства которых проявляются очень сильно. Это полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры, стабилитроны и т. д. Нелинейные свойства этих элементов используются при создании устройств вычислительной техники, автоматического управления и регулирования, передачи информации, а также для преобразования параметров электрической энергии в выпрямителях и инверторах.

10.2. Нелинейные сопротивления

Схемы замещения нелинейных резистивных элементов, например полупроводниковых, могут быть представлены нелинейными сопротивлениями (рис. 10.1,б). Свойства этих элементов описываются вольтамперными характеристиками (ВАХ), зависимостями напряжения на элементе от тока $u(i)$. Такая характеристика приведена на (рис. 10.1,а).

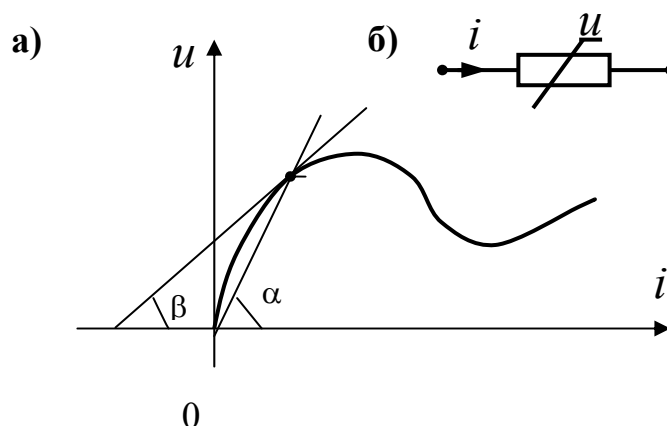


Рис. 10.1

По способу получения различают два типа ВАХ — статические и динамические. Статическими называют характеристики, в которых каждая точка дает значение постоянного напряжения при соответствующем значении постоянного тока.

По статическим характеристикам определяют статические и дифференциальные сопротивления нелинейных элементов (НЭ):

$$R_{CT} = \frac{u}{i}, \quad R_d = \frac{du}{di}.$$

Динамическими называют характеристики, устанавливающие связь между напряжением и током при быстром их изменении. Они могут отличаться от статических, вследствие инерционности некоторых процессов в НЭ (нагрева, ионизации и т. д.). По динамическим ВАХ определяют динамическое сопротивление:

$$R_d = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{du}{di}.$$

По ВАХ НЭ статическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат в соответствующую точку характеристики (рис. 10.1,а):

$$R_{CT} = k \operatorname{tg} \alpha,$$

где k – отношение масштабов напряжения и тока. Дифференциальное сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона касательной в данной точке характеристики

$$R_d = k \operatorname{tg} \beta.$$

Как видно из рис. 10.1,а, все эти параметры изменяются при переходе из одной точки характеристики в другую.

10.3. Нелинейные свойства ферромагнитных материалов

Для характеристики магнитных свойств различных веществ используют абсолютную магнитную проницаемость веществ: $\mu = B/H$, где B – индукция, H – напряженность магнитного поля. Для сравнительной оценки магнитных свойств применяют относительную магнитную проницаемость $\mu_r = \mu/\mu_0$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, равная магнитной проницаемости вакуума. Для пара- и диамагнетиков значение μ_r мало отличается от единицы, практически постоянно. Для этих веществ, которые называют немагнитными, при решении инженерных задач практически можно считать $\mu \cong \mu_0$. Для ферромагнетиков $\mu \gg \mu_0$ ($\mu_r \gg 1$), причем магнитная проницаемость для данного вещества не постоянная μ , а сильно зависит от напряженности магнитного поля, т. е. $\mu = f(H)$.

Эта зависимость обусловлена петлей гистерезиса $B = F(H)$ (рис. 10.2)

Известно, что магнитная проницаемость μ_a ферромагнитных материалов переменная величина и зависит от B . Это влечет за собой непостоянство маг-

нитного сопротивления R_m и значительно усложняет расчеты магнитных цепей. Поэтому для расчета магнитных цепей, содержащих ферромагнитные участки, необходимо располагать кривыми намагничивания, представляющими собой зависимость $B = f(H)$. Эти зависимости получают экспериментальным путем – испытанием замкнутых магнитопроводов с распределенной обмоткой.

Первоначальному намагничиванию образца соответствует кривая α , называемая кривой первоначального намагничивания (рис. 10.2).

Если образец подвергать циклическому намагничиванию при изменении напряженности магнитного поля в пределах $+H_x$ до $-H_x$, то график будет представлять замкнутую кривую, известную под названием петли гистерезиса.

Если процесс циклического намагничивания повторять для постепенно увеличивающихся значений напряженности магнитного поля, то можно получить семейство петель гистерезиса и так называемую предельную петлю гистерезиса, которой соответствует изменение напряженности магнитного поля в пределах от $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$, увеличение H сверх $H_{\max}$ не повлечет за собой увеличение площади петли гистерезиса.

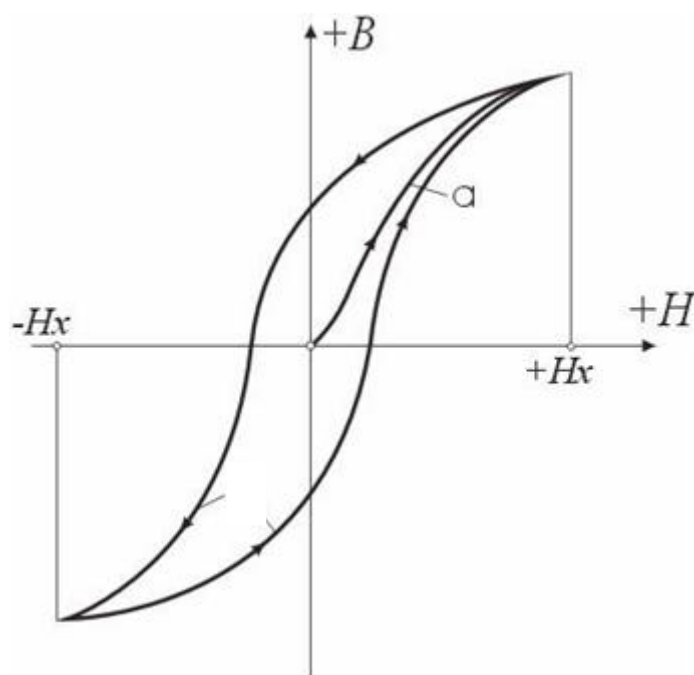


Рис. 10.2

Предельная петля гистерезиса определяет значение остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы, H_C . Кривая, соединяющая вершины петель гистерезиса, называется основной кривой намагничивания. Эти кривые приводятся в справочных руководствах и используются в расчетах магнитных цепей.

10.4. Нелинейная индуктивность

Характеристикой катушки индуктивности является зависимость $\psi(i)$, выражающая связь потокосцепления самоиндукции ψ и тока i в катушке. Эта характеристика называется вебер-амперной. Если магнитный поток распространяется в линейной среде, например в воздухе, где $\mu = \mu_0 = \text{const}$, то вебер-амперная характеристика линейна (рис. 10.3). Для катушки с ферромагнитным сердечником $\psi(i)$ нелинейна (рис. 10.3), так как магнитная проницаемость μ ферромагнитного материала сильно зависит от напряженности магнитного поля. Вебер-амперная характеристика катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником имеет тот же характер, что и начальная кривая намагничивания $B(H)$ материала сердечника.

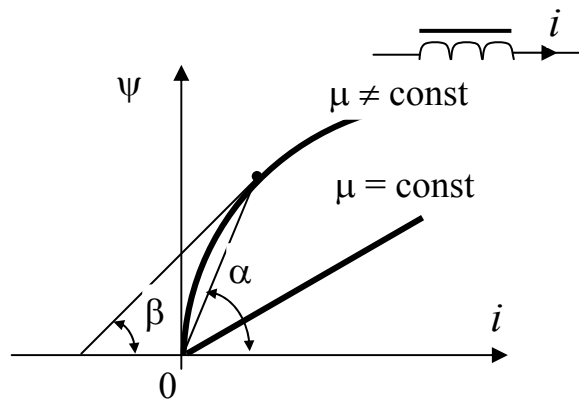


Рис. 10.3

Различают два типа вебер-амперных характеристик — статические, получаемые при медленном изменении тока; и динамические, которые получают при достаточно быстрых изменениях тока. Динамическая характеристика отличается от статической из-за магнитной вязкости и вихревых токов. Из статической характеристики определяют статическую индуктивность: $L_{CT} = \psi/i$; из динамической — динамическую индуктивность: $L_d = d\psi/di$.

При достаточно медленном изменении тока статическая и динамическая характеристики катушки совпадают, и динамическая индуктивность в этом случае равна дифференциальной $L_d = d\psi/di$, определяемой из статической характеристики.

Статическая индуктивность пропорциональна тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат в соответствующую точку на ха-

рактеристике, а динамическая пропорциональна тангенсу угла наклона касательной в этой точке (рис. 10.3):

$$L_{CT} = \frac{\Psi}{i} = k \operatorname{tg} \alpha; \quad L_d = \frac{d\Psi}{di} = k \operatorname{tg} \beta,$$

где k – отношение масштабов потокосцепления и тока.

10.5. Нелинейная емкость

Самыми распространенными устройствами, которые используются в качестве накопителей энергии электрического поля, являются конденсаторы. Характеристики конденсаторов зависят от свойств диэлектрика, в котором распространяется электрическое поле. В большинстве диэлектриков диэлектрическая проницаемость ϵ зависит от напряженности электрического поля E . В этом случае кулонвольтная характеристика конденсатора $q(u)$ нелинейная.

Аналогично нелинейным сопротивлению и индуктивности вводят понятия статической и динамической емкости:

$$C_{CT} = \frac{q}{u}, \quad C_d = \frac{dq}{du}.$$

Нелинейные емкости применяют, например, в радиоэлектронике.

10.6. Нелинейные электрические цепи постоянного тока

Задача расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока значительно сложнее аналогичного исследования линейных электрических цепей. Это связано с тем, что при расчете нелинейных цепей неприменимы принцип наложения и методы, основанные на этом принципе. Для анализа простых нелинейных цепей можно эффективно применять графические методы расчета. При расчете сложных нелинейных цепей с помощью первого и второго законов Кирхгофа составляют системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих процессы в этих цепях. В большинстве случаев получить аналитическое решение таких систем уравнений невозможно. Поэтому для их решения широко используются численные методы расчета.

10.6.1. Расчет электрической цепи при последовательном и параллельном соединении нелинейных резистивных элементов

Если вольтамперные характеристики нелинейных элементов цепи постоянного тока заданы графическими зависимостями, то расчет такой цепи выполняется графическими методами. Расчет таких цепей производится с использованием законов Кирхгофа.

Рассмотрим цепь (рис. 10.4,а) с последовательным соединением нелинейных элементов $U_1(I)$ и $U_2(I)$ (приведены на рис. 10.4,б в виде кривых 1 и 2).

Согласно второму закону Кирхгофа

$$U = U_1(I) + U_2(I),$$

где U – приложенное напряжение, $U_1(I)$ и $U_2(I)$ – напряжения на первом и втором нелинейных элементах.

Элементы соединены последовательно, и в них протекает одинаковый ток I . Поэтому результирующая вольтамперная характеристика нелинейной цепи $U(I)$ определяется кривой 3 на рис. 10.4,б. Она получена в результате сложения ординат кривых 1 и 2 при одних и тех же значениях тока.

По характеристике $U(I)$ находим значение тока I' в цепи при заданном значении приложенного напряжения U' . По этому значению тока определяем падения напряжения U'_1 и U'_2 на первом и втором элементах по кривым $U_1(I)$ и $U_2(I)$.

Если элементы соединены параллельно (рис. 10.5,а) и заданы их вольтамперные характеристики $I_1(U)$ и $I_2(U)$ кривыми 1 и 2 (рис. 10.5,б), то в этой цепи по первому закону Кирхгофа

$$I = I_1(U) + I_2(U).$$

Элементы включены параллельно, и напряжения на первом и втором элементах одинаковы и равны U . Поэтому вольтамперную характеристику цепи (рис. 10.5,б) $I(U)$ (кривая 3) можно получить, суммируя токи (ординаты кривых) при одинаковых значениях U . По кривой $I(U)$ определим значение тока I' при заданном U' , а по кривым $I_1(U)$ и $I_2(U)$ находим токи нелинейных элементов I'_1 и I'_2 .

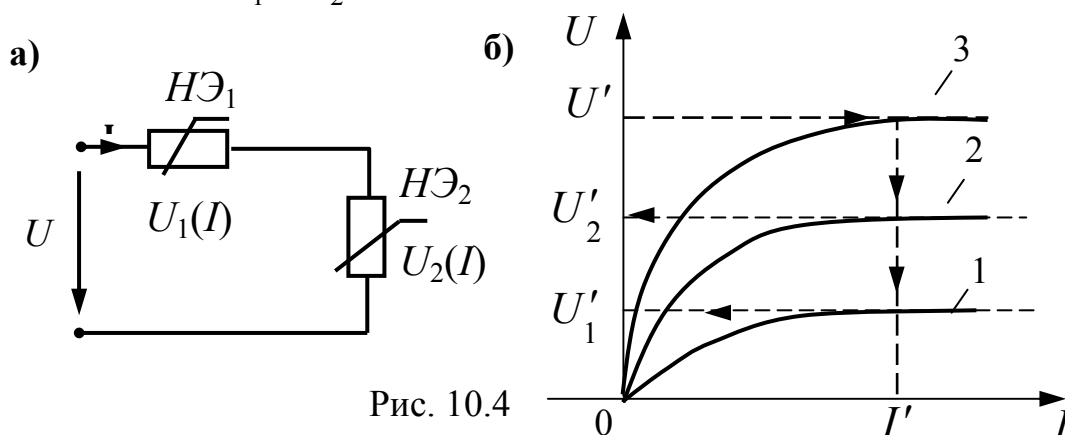


Рис. 10.4

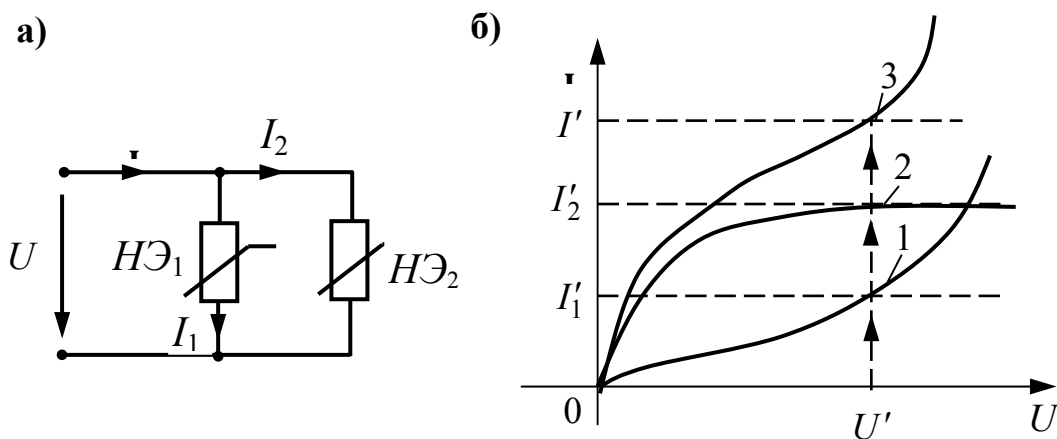


Рис. 10.5

10.7. Аналитическое представление характеристик нелинейных элементов

Характеристики нелинейных элементов задаются в виде кривых или графиков, построенных по экспериментальным данным. Но для аналитических расчетов нелинейных цепей характеристики элементов должны быть представлены аналитическими выражениями. Процесс замены нелинейной характеристики, заданной графиком или таблицей, приближенным математическим выражением называется аппроксимацией.

При подборе математического описания нелинейной характеристики желательно выполнить следующие условия.

Во-первых, аппроксимация должна быть по возможности более точной. Во-вторых, необходимо, чтобы аппроксимирующее выражение было несложным, так как, чем сложнее выражение, тем труднее дальнейшее решение уравнения, описывающего нелинейную цепь. Поэтому необходим компромиссный выбор между усложнением функции и точностью приближения. Наиболее распространенной является аппроксимация нелинейных характеристик полиномом

$$y(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 \dots + \alpha_n x^n.$$

Такая аппроксимация широко используется для математического описания вебер-амперных характеристик нелинейных индуктивностей $i(\psi)$ с ферромагнитными сердечниками. Достаточно хорошие результаты по точности дает аппроксимация усеченными полиномами вида

$$i(\psi) = \alpha\psi^3; \quad i(\psi) = \alpha_1\psi + \alpha_3\psi^3.$$

10.8. Магнитные цепи с постоянным магнитным потоком

Электромагнитные реле, электромагниты, электрические машины и другие устройства, в которых преобразование электрической энергии в механическую производится с использованием энергии магнитного поля, конструируются таким образом, чтобы магнитный поток в них был по возможности наибольшим и сосредоточенным в ограниченной части конструкции. Такой эффект достигается применением ферромагнитных материалов для ферромагнетиков $\mu \gg \mu_0$, поэтому при одинаковой напряженности магнитного поля H магнитная индукция внутри ферромагнитной конструкции $B = \mu H$ много больше, чем магнитная индукция $B = \mu_0 H$ в окружающем пространстве. В таких устройствах магнитный поток вне ферромагнитной конструкции называется потоком рассеяния.

10.8.1. Законы и параметры магнитных цепей

Рассмотрим катушку с замкнутым ферромагнитным сердечником (рис. 10.6). Пренебрегаем потоками рассеяния и считаем, что магнитный поток Φ распределен равномерно по сечению магнитопровода.

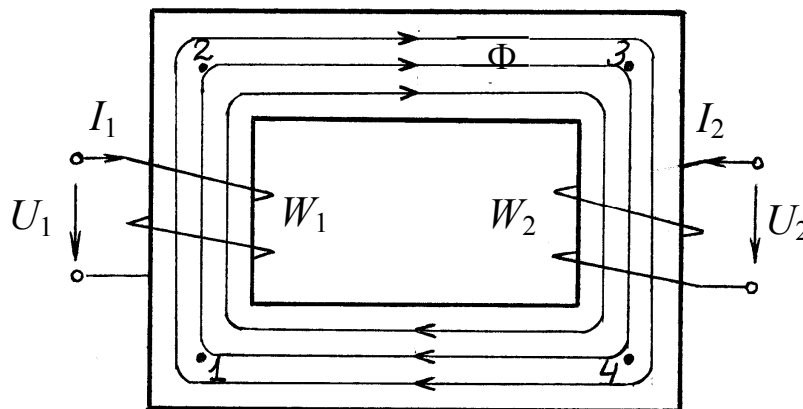


Рис. 10.6

Основными уравнениями магнитного поля постоянных токов являются: закон полного тока

$$\oint_l \overline{H} d\overline{l} = I \quad (10.1)$$

и принцип непрерывности магнитного потока

$$\oint_S \overline{B} d\overline{S} = 0. \quad (10.2)$$

Полный ток I в уравнении (10.1) для магнитной цепи (рис. 10.6) можно вычислить как сумму токов во всех витках обмоток w_1 и w_2

$$I = \sum I_k = w_1 I_1 + w_2 I_2 = F_1 + F_2 = F,$$

где F – по аналогии с электродвижущей силой в электрических цепях называется магнитодвижущей силой. В общем случае для участка магнитной цепи

$$F = \sum_{k=1}^n w_k I_k. \quad (10.3)$$

Магнитный поток Φ аналогичен току I в электрических цепях и может быть вычислен на любом участке магнитной цепи как

$$\Phi = \int_S \overline{B} dS \cong B \cdot S = \mu H S,$$

где B – магнитная индукция; S – сечение магнитопровода; H – напряженность магнитного поля; μ – магнитная проницаемость материала, в котором распространяется магнитный поток.

Отношение магнитодвижущей силы (МДС), равной интегралу напряженности магнитного поля вдоль всей цепи $\oint_l \overline{H} d\overline{l}$ к магнитному потоку Φ , называется магнитным сопротивлением всей цепи:

$$R_M = \frac{F}{\Phi} = \frac{wI}{\Phi}.$$

Такой подход дает возможность записать закон магнитной цепи, связывающий МДС с магнитным потоком:

$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{wI}{R_M}, \quad (10.4)$$

который аналогичен закону Ома для замкнутой цепи при постоянном токе:

$$I = E/R.$$

Вычислим МДС F в цепи рис. 10.6 как интеграл от H по замкнутому пути, проходящему по средней линии магнитопровода через точки 1, 2, 3, 4. Рассматриваемый магнитопровод можно разделить на три участка одинакового сечения. Первый участок (1-2-3) с сечением S_1 и длиной отрезка средней линии ℓ_1 . Второй участок (3-4) с сечением S_2 и длиной отрезка средней линии ℓ_2 и третий участок (4-1) с сечением S_3 и длиной отрезка средней линии ℓ_3 . В результате имеем

$$\begin{aligned} W_1 I_1 + W_2 I_2 &= \int_{\ell} \overline{H} d\overline{\ell} + \int_{\ell_1} \overline{H} d\overline{\ell} + \int_{\ell_2} \overline{H} d\overline{\ell} + \int_{\ell_3} \overline{H} d\overline{\ell} = H\ell_1 + H\ell_2 + H\ell_3 = \\ &= U_{M1} + U_{M2} + U_{M3}, \end{aligned}$$

где U_{M1} , U_{M2} , U_{M3} – магнитные напряжения участков цепи.

Обобщая полученные результаты, можно записать второй закон Кирхгофа для любого контура магнитной цепи:

$$\sum_{k=1}^n U_{Mk} = \sum_{k=1}^n w_k I_k. \quad (10.5)$$

Рассмотрим магнитное напряжение одного из участков цепи, учитывая, что $B_k = \mu_k H_k$ и $\Phi_k = B_k S_k$

$$U_{Mk} = H_k \ell_k = B_k / \mu_k \cdot \ell_k = \Phi_k \cdot \frac{\ell_k}{\mu_k \cdot S_k} = \Phi_k R_{mk},$$

т. е. для любого участка магнитные напряжение и сопротивление составляют

$$U_{mk} = \Phi_k R_{mk}, \quad (10.6)$$

$$R_{mk} = \frac{\ell_k}{\mu_k \cdot S_k}. \quad (10.7)$$

Принцип непрерывности магнитного потока

$$\oint_S \overline{B} dS = 0$$

позволяет записать первый закон Кирхгофа для узла магнитной цепи

$$\sum_{k=1}^m \Phi_k = 0. \quad (10.8)$$

Рассмотренные выше законы Кирхгофа (10.5,) (10.8) для магнитной цепи позволяют эффективно рассчитывать устройства, в которых используется постоянное магнитное поле, с помощью теории цепей.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается статическое сопротивление R_{CT} от дифференциального R_d ?
2. Почему вебер-амперная характеристика катушки с ферромагнитным сердечником нелинейна?
3. Чем отличается статическая емкость C_{CT} от динамической емкости C_d ?
4. Каким образом производится расчет нелинейной цепи при последовательном соединении элементов?
5. Каким образом производится расчет нелинейной цепи при смешанном соединении?
6. Что такое аппроксимация?
7. Что такое магнитная цепь?
8. Как производится расчет магнитной цепи при последовательном соединении участков?

9. Дайте формулировку законов Кирхгофа для магнитных цепей.

10. Какие параметры магнитопровода надо знать, чтобы определить его магнитное сопротивление?

11. Нелинейные цепи переменного тока

В теме 11 рассматриваются вопросы, входящие в пятый раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 11.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [4].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- электромагнитные процессы в катушке с ферромагнитным сердечником;
- электрическая схема замещения дросселя.

Установившийся режим является основным режимом работы электротехнических устройств. Поэтому исследование таких режимов в нелинейных цепях является важной задачей электротехники.

Теоретический анализ процессов в нелинейных электрических цепях оказывается намного сложнее исследования процессов в линейных цепях. Эти процессы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, которые составляются на основе первого и второго законов Кирхгофа. В большинстве случаев получить общее аналитическое решение этих уравнений невозможно. Поэтому для расчетов установившихся режимов применяются различные приближенные методы, дающие возможность получить решение для тех или иных типов конкретных устройств с нелинейными элементами.

11.1. Электромагнитные процессы в катушке с ферромагнитным сердечником

В современной технике широкое применение находят дроссели, или катушки с ферромагнитными сердечниками. При расчете электротехнических установок с дросселями важно знать схему замещения дросселя идеальными элементами электрической цепи. Такая схема может быть разработана с учетом электромагнитных процессов в этом устройстве. На рис. 11.1 приведена конструктивная схема катушки индуктивности с замкнутым магнитопроводом. Обмотка подключена к источнику напряжения u . Ток i , протекающий по об-

мотке, создает магнитный поток Φ , основная часть которого Φ_0 замыкается в ферромагнитном сердечнике, так как его магнитная проницаемость μ много больше магнитной проницаемости окружающей среды (воздуха).

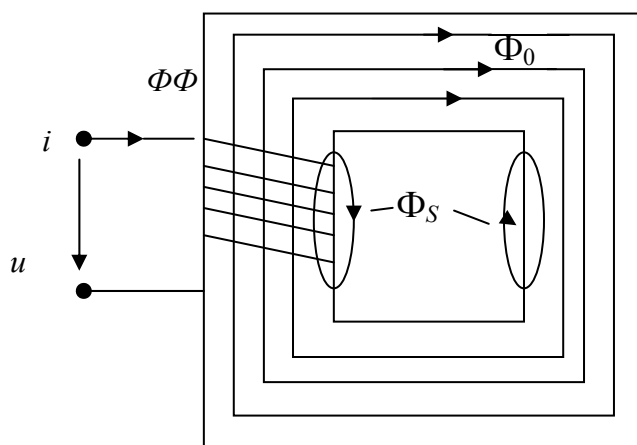


Рис. 11.1

Однако часть магнитного потока Φ_S замыкается по воздуху и называется магнитным потоком рассеяния.

Уравнение, описывающее электромагнитные процессы [1] в дросселе, имеет вид

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt}, \quad (11.1)$$

где R – активное сопротивление обмотки; ψ – полное потокосцепление.

$$\psi = w\Phi = \psi_0 + \psi_S, \quad (11.2)$$

где w – число витков обмотки дросселя, ψ_0 – потокосцепление, обусловленное потоком Φ_0 , замыкающимся в сердечнике, а ψ_S – обусловленное потоком Φ_S , замыкающимся вне сердечника.

$$\psi_S = w\Phi_S.$$

Подставив (11.2) в уравнение (11.1), получим

$$u = Ri + \frac{d}{dt}(\psi_0 + \psi_S) = Ri + \frac{d\psi_S}{dt} + \frac{d\psi_0}{dt}.$$

Поток Φ_S замыкается по линейной среде (воздуху) с постоянной магнитной проницаемостью μ_0 , и потокосцепление ψ_S пропорционально току i . Это дает возможность ввести в рассмотрение линейную индуктивность рассеяния

L_S , связывающую количественно ψ_S и i : $\psi_S = L_S i$. В результате уравнение примет вид.

$$u = Ri + L_S \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi_0(i)}{dt} = Ri + L_S \frac{di}{dt} + u_0.$$

Зависимость потокосцепления ψ_0 от тока i нелинейная (рис. 11.2) и определяется свойствами ферромагнитного сердечника. Поэтому данное уравнение является нелинейным. В результате ток несинусоидальный, даже в том случае, если к катушке приложено синусоидальное напряжение.

При анализе электромагнитных процессов в дросселе используем метод эквивалентных синусоид. При этом заменяют несинусоидальные i и Φ_0 эквивалентными синусоидами, для которых записывают уравнение в комплексной форме.

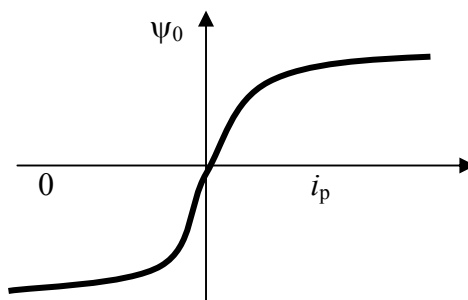


Рис. 11.2

$$\dot{U} = R\dot{I} + j\omega L_S \dot{I} + j\omega w \dot{\Phi}_0 = R\dot{I} + j\omega L \dot{I} + \dot{U}_0. \quad (11.3)$$

Такая форма записи дает возможность разработать схему замещения катушки с ферромагнитным сердечником (рис. 11.3,а) и привести ее векторную диаграмму катушки (рис. 11.3,б). Сопротивление R отражает процессы превращения электрической энергии в тепловую в обмотке дросселя, индуктивность L_S связана с магнитным потоком Φ_S вне сердечника. Причем R и L_S – линейные элементы схемы замещения. Процессы в ферромагнитном сердечнике отражаются нелинейными активной проводимостью g_0 и индуктивностью с реактивной проводимостью ϑ_0 .

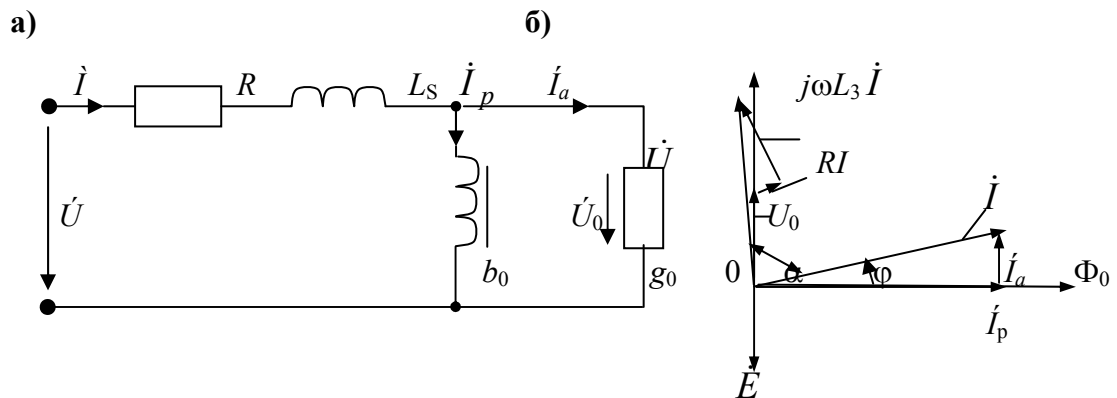
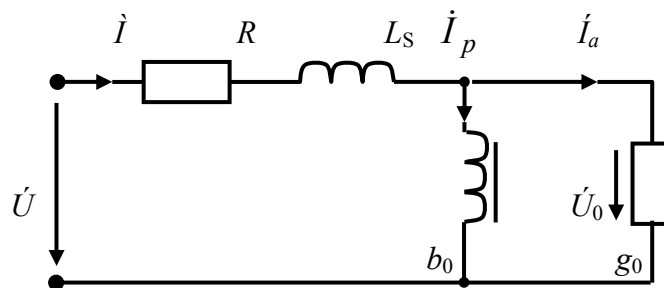


Рис. 11.3

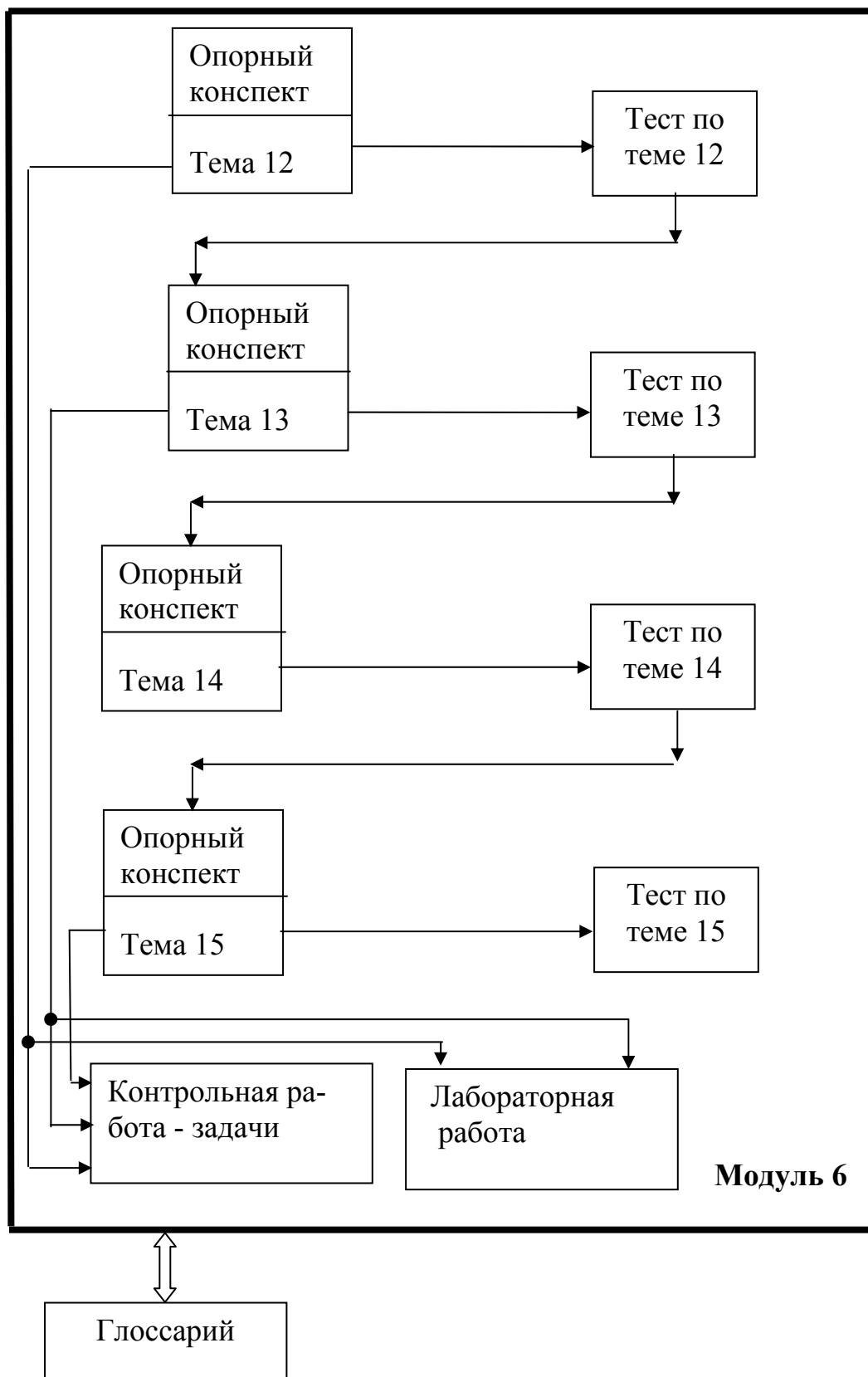
Вопросы для самопроверки

1. Что является потоком рассеяния?
2. По какому пути замыкается основная часть магнитного потока?
3. Почему уравнение дросселя для мгновенных значений токов и напряжений является нелинейным?
4. Укажите, какие физические процессы отражает каждый элемент на схеме замещения дросселя.



РАЗДЕЛ 6. Электрические машины

Схема работы с разделом 6



Специальность	Часы	Номера тем	Номера параграфов	Номера задач	Номера тестов
1	2	3	4	5	6
240401.65	52	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
240301.65	52	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
190701.65	72	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
261001.65	70	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
280202.65	71	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
190701.65	72	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
140101.65	80	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
140104.65	90	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
150104.65	100	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
190205.65	100	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
1	2	3	4	5	6

190601.65	100	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
151001.61	119	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1...14.4 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
151001.65	119	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1...14.4 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
150202.65	120	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1...14.4 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
220100-62	136	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1...14.4 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
200102.65	140	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
200102.65	140	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1 15.1...15.8	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
150501.65	142	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 14.1...14.4 15.1...15.6	8	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
230101.65	150	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 - 15.1...15.8	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15
200402.65	150	12 13 14 15	12.1...12.8 13.1...13.9 - 15.1...15.6	-	6. 12 6. 13 6. 14 6. 15

1	2	3	4	5	6
200501.65	170	12	12.1...12.8	-	6. 12

		13	13.1...13.9		6. 13
		14	14.1...14.4		6. 14
		15	15.1...15.6		6. 15
210201.65	170	12	12.1...12.8	-	6. 12
		13	13.1...13.9		6. 13
		14	14.1...14.4		6. 14
		15	15.1...15.6		6. 15

12. Трансформаторы

В теме 12 рассматриваются вопросы, входящие в шестой раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 12.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- назначение и принцип действия трансформатора;
- холостой ход трансформатора;
- нагрузка трансформатора;
- схемы замещения;
- режим короткого замыкания;
- внешняя характеристика трансформатора;
- КПД трансформатора.

12.1. Назначение и принцип действия

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования электрической энергии переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию с другими параметрами (напряжение, ток, форма и начальная фаза), при этом частота остается неизменной.

Чем выше напряжение, тем при той же передаваемой мощности будет меньше значения тока и тем меньше получается требуемое сечение проводов линии передач

$$S = UI.$$

Поэтому на электрических станциях выгодно повышать напряжение до сотен тысяч вольт, а затем передавать энергию по проводам к месту потребления, где напряжение должно понижаться до обычно применяемых величин 220, 380 В и т. д. Повышение напряжения до линии передач и понижение его после линии передач осуществляется трансформаторами

Устройство трансформатора схематично показано на рис. 12.1. На замкнутом сердечнике, собранном из листовой электротехнической стали, помещены две обмотки с числом витков w_1 и w_2 . Обмотка, к зажимам которой подводится электрическая энергия, называется первичной; обмотка, к зажимам которой подключается потребитель, называется вторичной.

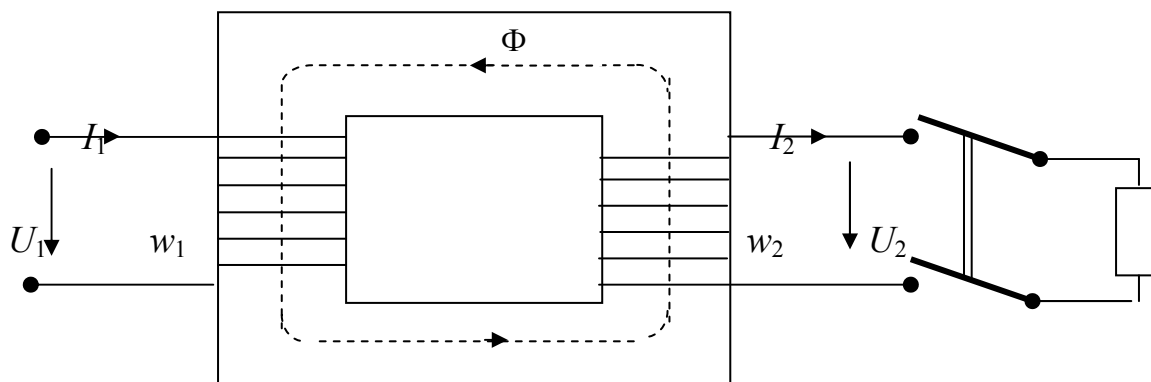


Рис. 12.1

Протекающий по первичной обмотке переменный ток вызывает образование переменного магнитного потока Φ . Этот поток сцеплен с обеими обмотками и вызывает в каждой из них переменную ЭДС. Поэтому вторичная обмотка может рассматриваться как источник переменного напряжения. Трансформатор, изображенный на рис. 12.1, является двухобмоточным. Если на сердечнике несколько обмоток, то такой трансформатор называют многообмоточным.

Величина ЭДС, индуцируемая в одном витке первичной и вторичной обмоток, находится на основании закона электромагнитной индукции:

$$e = -d\Phi / dt. \quad (12.1)$$

Для изменяющего гармонического магнитного потока

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

где Φ и Φ_m – мгновенное и амплитудное значения потока.

Отсюда имеем

$$e = -d\Phi / dt = -\Phi_m \omega \cos \omega t = \Phi_m \omega \sin(\omega t - \pi/2).$$

Обозначим амплитудное значение ЭДС в одном витке:

$$E_m = \omega \Phi_m,$$

тогда

$$e = E_m \sin(\omega t - \pi/2).$$

Таким образом, индуцированная ЭДС отстает по фазе от потока на $\pi/2$.

Найдем действующее значение ЭДС в одном витке, поделив максимальное значение на $\sqrt{2}$:

$$E_m = \omega \Phi_m / \sqrt{2} = 2\pi f \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 f \Phi_m . \quad (12.2)$$

Если в первичной обмотке w_1 витков, а во вторичной w_2 витков, то полная ЭДС каждой обмотки будет

$$E_1 = 4,44 \omega_1 f \Phi_m , \text{ В}; \quad (12.3)$$

$$E_2 = 4,44 \omega_2 f \Phi_m , \text{ В}. \quad (12.4)$$

Отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток или отношение их чисел витков называется коэффициентом трансформации:

$$k = E_1 / E_2 = \omega_1 / \omega_2 . \quad (12.5)$$

Для понижающих трансформаторов $\omega_1 > \omega_2$ и $k > 1$. Для повышающих $\omega_1 < \omega_2$ и $k < 1$.

Первичная активная мощность, потребляемая трансформатором из сети, равна

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 .$$

Вторичная активная мощность, или мощность, отдаваемая потребителю, равна

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Если не учитывать потери в трансформаторе, то приближенно можно положить

$$P_1 \approx P_2 .$$

Как будет показано ниже, $\varphi_1 \approx \varphi_2$ и напряжения первичной и вторичной обмоток мало отличаются от ЭДС обмоток.

Тогда имеем

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \text{ и } I_1 / I_2 \approx U_2 / U_1 \approx E_1 / E_2 = 1 / k . \quad (12.6)$$

При понижении напряжения вторичной обмотки в k раз вторичный ток будет больше первичного тока в k раз.

12.2. Холостой ход трансформатора

Холостым ходом трансформатора называют такой режим его работы, когда его первичная обмотка присоединена к сети переменного тока, а вторичная разомкнута. По первичной обмотке протекает ток холостого хода I_0 , который создает магнитный поток, имеющий две составляющие. Первая составляющая Φ представляет собой поток, замыкающийся по сердечнику и сцепленный как с

первичной, так и со вторичной обмотками. Этот переменный поток индуцирует в обмотках ЭДС E_1 и E_2 в соответствии с формулами (12.3) и (12.4). Вторая составляющая потока Φ_{1P} проходит частично по воздуху. Она называется потоком рассеяния. Поток рассеяния сцеплен только с первичной обмоткой и вызывает в ней дополнительную ЭДС, которую обычно учитывают посредством введения понятия **индуктивного сопротивления рассеяния** первичной обмотки x_1 .

Магнитное сопротивление для потока рассеяния в основном определяется сопротивлением пути потока по воздуху, поэтому поток рассеяния пропорционален току I_0 и совпадает с ним по фазе. Векторную диаграмму (рис. 12.2) начинают строить с откладывания вектора магнитного потока Φ .

Затем откладывается отстающий на $\pi/2$ вектор ЭДС первичной обмотки E_1 . Вектор ЭДС во вторичной обмотке совпадает по направлению с вектором E_1 ,

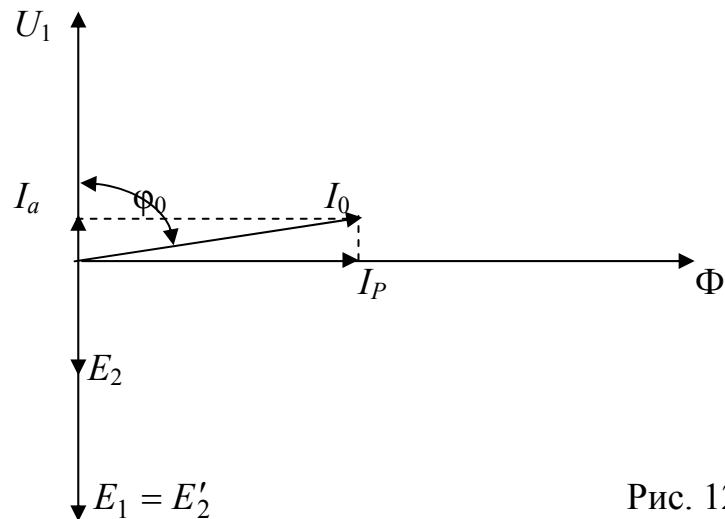


Рис. 12.2

но величина его может быть как больше, так и меньше E_1 . Для удобства построения векторной диаграммы обычно откладывается так называемое приведенное значение вторичной ЭДС:

$$E'_2 = kE_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2 = E_1, \quad (12.7)$$

которое равно первичной ЭДС. Поэтому векторы E_1 и E'_2 сливаются в один. Ток холостого хода имеет две составляющих – реактивную намагничивающую I_P и активную I_a . Составляющая I_P является намагничивающим током, который совпадает по фазе с потоком. Величина намагничивающего тока по закону магнитной цепи связана с амплитудой потока соотношением

$$\Phi_m = \sqrt{2} w_1 I_P / R_M, \quad (12.8)$$

где R_M – магнитное сопротивление стального сердечника.

Полный ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_P^2}. \quad (12.9)$$

Ток холостого хода силовых трансформаторов мал и обычно не превышает нескольких процентов от номинального значения первичного тока I_{1H} .

Падение напряжения в первичной обмотке вследствие небольшого тока холостого хода невелико. Поэтому с большой степенью точности можно записать: $\dot{U}_1 \cong \dot{E}_1$ и $U_1 \cong E_1$. На векторной диаграмме откладывается вектор U_1 , равный и противоположный вектору E_1 .

Составляющая тока холостого тока I_a определяется потерями в стальном сердечнике: $I_a = P_{CT} / E_1$. Сдвиг фаз ϕ_0 близок к 90° .

Так как напряжение сети обычно поддерживается неизменным, то, учитывая равенство $U_1 \cong E_1$, приходим к выводу, что амплитуда основного магнитного потока при холостом ходе есть тоже величина неизменная. Из выражения (12.3) амплитуда потока

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 w_1 f} \approx \frac{U_1}{4,44 w_1 f}. \quad (12.10)$$

Во вторичной цепи при холостом ходе ток не протекает. Поэтому напряжение на зажимах вторичной обмотки равно ее ЭДС. Следовательно, при холостом ходе отношение первичного и вторичного напряжений равно с достаточной точностью коэффициенту трансформации:

$$U_1 / U_2 \cong E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k. \quad (12.11)$$

12.3. Нагрузка трансформатора

При нагрузке трансформатора вторичная цепь замкнута на нагрузочное сопротивление z_H и по ней протекает ток I_2 . В этом случае можно выделить три потока: основной поток Φ , сцепленный как с первичной так и со вторичной обмотками, поток рассеяния первичной обмотки Φ_{1P} и поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{2P} . Дополнительные ЭДС, индуцируемые в обмотках потоками рассеяния, учитывают при помощи индуктивных сопротивлений рассеяния первичной и вторичной обмоток x_1 и x_2 .

ЭДС от потоков рассеяния уравниваются составляющими напряжения

$$jx_1 I_1 = -E_{1P}, \quad jx_2 I_2 = -E_{2P},$$

где $jx_1 = j\omega L_{1p}$ и $jx_2 = j\omega L_{2p}$ – комплексные сопротивления рассеяния обмоток; $L_{1p} = \psi_{1p} / I_1$ и $L_{2p} = \psi_{2p} / I_2$ – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток; ψ_{1p} и ψ_{2p} – потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток

Составляющие $x_1 I_1$ и $x_2 I_2$ опережают токи I_1 и I_2 на $\pi/2$.

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа в комплексной форме для первичной и вторичной цепи:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 + \dot{E}_1 &= \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{U}_2 + \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 \underline{Z}_2,\end{aligned}\tag{12.12}$$

где U_2 – напряжение на нагрузочном сопротивлении; $\underline{Z}_1 = R_1 + jx_1$ – комплексное полное сопротивление первичной обмотки; $\underline{Z}_2 = R_2 + jx_2$ – комплексное полное сопротивление вторичной обмотки.

Падения напряжений в обмотках составляют обычно не более нескольких процентов от напряжений U_1 и U_2 . Поэтому с некоторым приближением можно считать, что и в нагруженном трансформаторе сохраняются приближенные равенства $U_1 \approx E_1$ и $U_2 \approx E_2$. Следовательно, при нагрузке трансформатора амплитуда основного магнитного потока приблизительно постоянна и равна амплитуде потока в режиме холостого хода. Постоянной должна быть и намагничивающая сила как при нагрузке, так и на холостом ходу. В режиме нагрузки результирующая намагничивающая сила равна сумме намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток:

$$w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_0.\tag{12.13}$$

Поделив все члены последнего равенства на w_1 , получаем

$$\dot{I}_1 + \frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}_0.$$

Введем понятие приведенного вторичного тока:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}.$$

Окончательно получим

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0.\tag{12.14}$$

На холостом ходу $\dot{I}'_2 = 0$, и, следовательно, $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$. Если мы нагрузим трансформатор, то во вторичной обмотке появляется ток I_2 . Этот ток по закону Ленца препятствует причине, его вызвавшей. Поэтому ток I_2 так направлен, чтобы размагнитить сердечник, т. е. действие его противоположно действию тока I_1 . Это вызывает увеличение тока I_1 .

Векторная диаграмма нагруженного трансформатора представлена на рис. 12.3, подробное пояснение построения которой можно посмотреть, например, в [1].

Активные и индуктивные падения напряжения в первичной и вторичной обмотках зависят от протекающих токов. I_1 и I_2 и от индуктивных и активных сопротивлений обмоток трансформатора.

Алгебраическая разность между первичным и приведенным напряжениями, называемая изменением напряжения в трансформаторе, зависит не только от величины токов I_1 и I_2 , но и от рода нагрузки (угла φ_2).

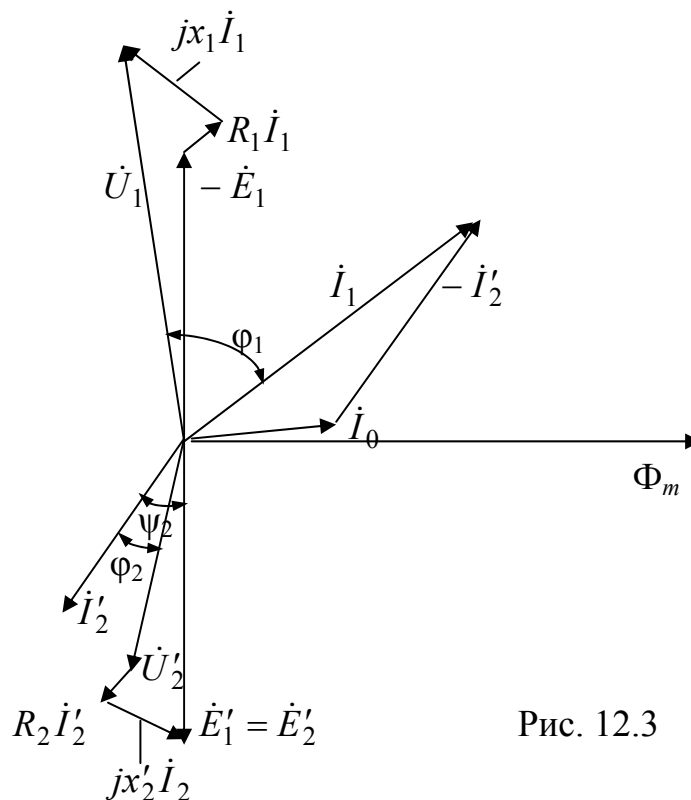


Рис. 12.3

12.4. Схема замещения

Уравнения напряжений (12.13) и токов (12.14) позволяют рассчитать все режимы трансформатора. Для расчета используют часто приведенные схемы трансформатора у которого, как говорилось выше, принимают, что $E_1 = E_2$ и $w_1 = w_2$.

На рис. 12.4 представлена схема замещения приведенного трансформатора в соответствии с уравнениями (12.13) и (12.14). Эта схема относится к одной фазе.

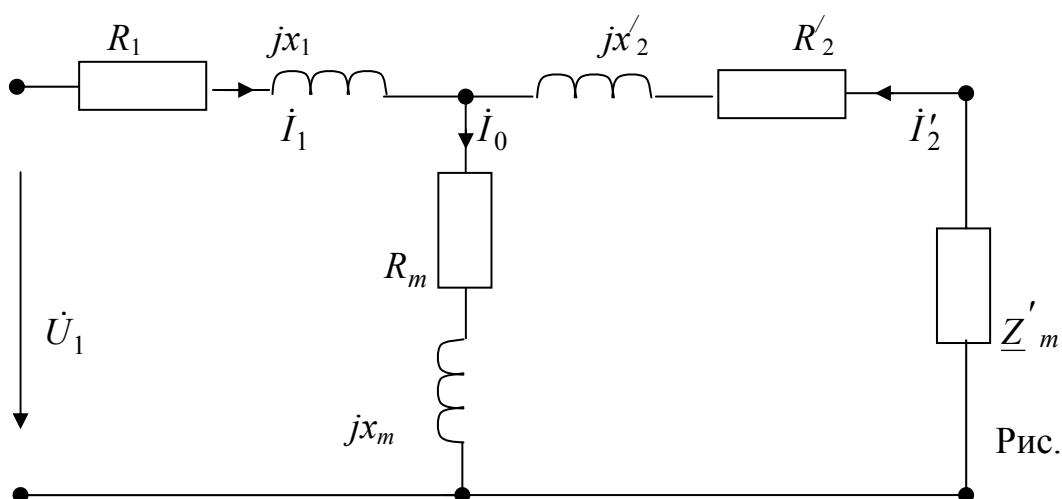


Рис. 12.4

Активное сопротивление R_m обусловлено потерями в стали сердечника

$$P_{CT} = m_1 I_0^2 R_m,$$

где m_1 – число фаз трансформатора. Индуктивное сопротивление x_m обусловлено взаимоиндукцией первичной и вторичной обмоток.

Активное, индуктивное сопротивления вторичной обмотки и сопротивление нагрузки трансформатора определяются из соотношений

$$R'_2 = k^2 R_2; \quad x'_2 = k^2 x_2; \quad \underline{Z}'_2 = k^2 \underline{Z}_2.$$

12.5. Режим холостого хода

Для режима холостого хода ($I_2 = 0$) схема замещения имеет вид рис. 12.5.

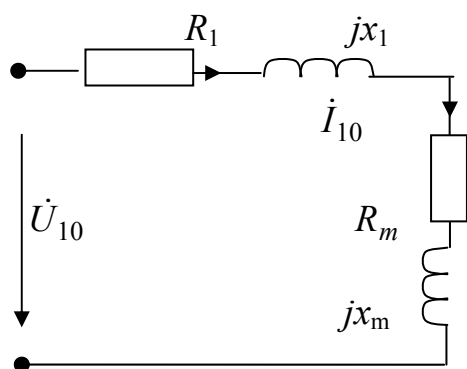


Рис. 12.5

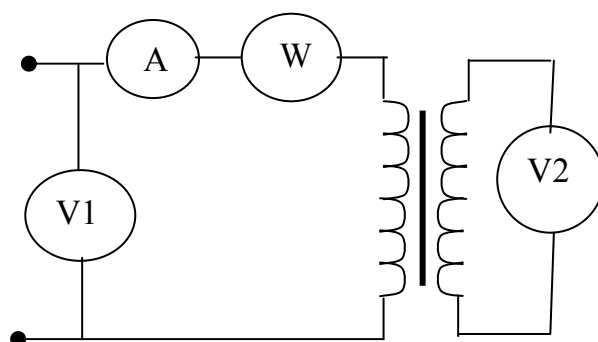


Рис. 12.6

Обычно $R_1 \ll R_m$ и $x_1 \ll x_m$ и поэтому R_1 и x_1 (рис. 12.5) можно пренебречь.

Опытное определение параметров производится по схеме рис. 12.6. При этом можно считать, что сопротивление вольтметра равно бесконечности.

На основании опытных данных определяем параметры:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}}; \quad z_m \approx \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad R_m \approx \frac{P_{10}}{I_{10}^2}; \quad x_m \approx \sqrt{z_m^2 - R_m^2}.$$

Величина тока холостого хода I_{10} составляет 2...5 % I_N .

Мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, определяется в основном потерями в стали на гистерезис и вихревые токи.

12.6. Режим короткого замыкания

В режиме короткого замыкания (КЗ) вторичная обмотка замкнута ($U_2 = 0$). При этом токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}'_2$ сдвинуты по фазе почти на 180° и примерно равны, поэтому

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{10} \approx 0.$$

Это позволяет пренебречь контуром намагничивания (ветвью R_m, x_m).

Если учесть, что

$$R_1 + R'_2 = R_K, \quad \text{и} \quad x_1 + x'_2 = x_K,$$

то схема замещения примет вид рис. 12.7. При этом можно считать сопротивление амперметра А2 равным нулю.

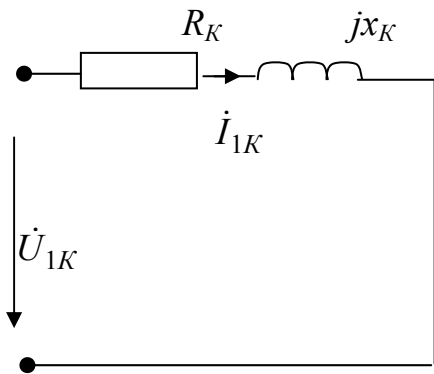


Рис. 12.7

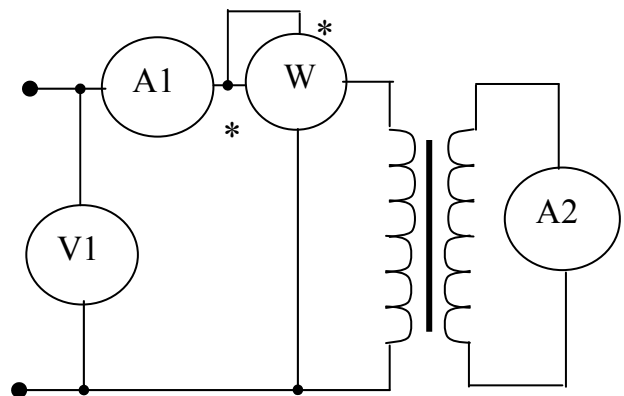


Рис. 12.8

Опытное определение параметров производится по схеме рис. 12.8.

На основании опытных данных определяем параметры:

$$z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; \quad R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2}; \quad x_K \approx \sqrt{z_K^2 - R_K^2}; \quad R_1 \approx R'_2 = \frac{R_K}{2}; \quad x_1 \approx x'_2 = \frac{x_K}{2}.$$

Таким образом, опыты ХХ и КЗ позволяют определить все параметры схемы замещения (рис. 12.4).

Напряжением короткого замыкания u_K называется такое напряжение на первичной обмотке (вторичная обмотка при этом замкнута), при котором ток короткого замыкания в первичной обмотке равен номинальному току

$$I_{1K} = I_{1H},$$

$$u_K = I_H z_K.$$

Активная и реактивная составляющие:

$$u_{KA} = I_H R_K = u_K \cos \varphi_K, \quad u_{KP} = I_H x_K = u_K \sin \varphi_K,$$

где $\cos \varphi_K = R_K / z_K$, $\sin \varphi_K = x_K / z_K$.

Напряжение короткого замыкания u_K выражают в процентах:

$$u_{K\%} = \frac{u_K}{U_H} 100 \, \%.$$

Значение $u_{K\%}$ составляет 5...10 % от U_H , и ее величина, а также активная и реактивная составляющие $u_{K\%}$ приводятся в паспортных данных трансформатора.

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, определяется потерями в обмотках. Для номинального значения тока эта мощность равна

$$P_{KH} = m I_H^2 R_K.$$

Это значение мощности приводится в паспортных данных трансформатора.

Потери в обмотках для тока, отличающегося от номинального, можно определить по формуле

$$P_K = P_{KH} \beta^2,$$

где β – коэффициент нагрузки, которой равен

$$\beta = I / I_H.$$

12.7. Внешняя характеристика трансформатора

Изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора при постоянном входном напряжении зависит не только от величины нагрузки, но и от коэффициента мощности нагрузки ($\cos \varphi_2$), и может быть определено по приближенной формуле

$$\Delta u \% \approx (u_{KA} \cos \varphi_2 + u_{KP} \sin \varphi_2) \beta.$$

На рис. 12.9 представлена внешняя характеристика для частного случая активно-индуктивной нагрузки.

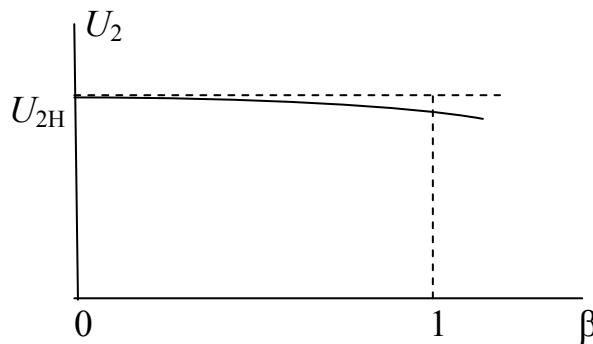


Рис. 12.9

12.8. КПД трансформатора

КПД равен отношению полезной мощности трансформатора к потребляемой:

$$\eta = P_2 / P_1,$$

где $P_2 = S_H \beta \cos \varphi_2$, $S_H = m U_{\text{ФН}} I_{\text{ФН}}$ – номинальная мощность трансформатора, $P_1 = P_2 + P_0 + P_K$.

$$\text{Следовательно, } \eta = \frac{S_H \kappa_{\text{НГ}} \cos \varphi_2}{S_H \kappa_{\text{НГ}} \cos \varphi_2 + P_0 + P_{\text{КН}} \kappa_{\text{НГ}}^2}.$$

Потери в стали P_0 называются постоянными потерями, так как они не зависят от тока нагрузки. Эти потери зависят только от Φ^2 , т.е. от U_1^2 и от частоты f .

Вопросы для самопроверки

1. С какой целью используют трансформатор в энергетике?
2. На каком законе основан принцип работы трансформатора?
3. Объясните векторную диаграмму трансформатора для режима холостого хода.
4. Какие параметры трансформатора определяют из опыта холостого хода?
5. Перечислите основные характеристики трансформатора.
6. Какой трансформатор называется приведенным?
7. Объясните векторную диаграмму трансформатора для режима номинальной нагрузки.
8. Какие параметры трансформатора определяют из опыта короткого замыкания?
9. Какая характеристика трансформатора называется внешней?
10. Перечислите виды потерь мощности в трансформаторе.

13. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

В теме 13 рассматриваются вопросы, входящие в шестой раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 13.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [5].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

1. Принцип действия электрической машины;
2. Устройство трехфазных асинхронных машин;
3. Электродвижущие силы, индуцируемые в обмотках статора и ротора;
4. Токи в обмотках ротора. Электромагнитный момент;
5. Активная мощность и КПД. Реактивная мощность и коэффициент мощности;
6. Механическая характеристика;
7. Пуск асинхронных двигателей.

13.1. Общие вопросы теории электрических машин

Электрическая машина – наиболее распространенный вид электромеханического преобразователя. Применяется практически во всех отраслях промышленности как источник электрической или механической энергии. Этому способствует простота конструкции, надежность эксплуатации и энергетические показатели.

Теоретические основы электромашиностроения были заложены в 1821 г. М. Фарадеем. Он установил возможность преобразования электрической энергии в механическую и создал первую модель электродвигателя. Дальнейшее развитие идея взаимного преобразования электрической и механической энергий получила в работах Д. Максвелла, Э.Х. Ленца, Б.С. Якоби и М.О. Доливо-Добровольского. Благодаря их трудам, были разработаны и созданы конструкции электрических машин, пригодные для практического применения

Электрическая машина – электромеханический преобразователь, работающий в генераторном или двигательном режимах, при которых соответственно механическая энергия преобразуется в электрическую или электрическая энергия преобразуется в механическую. Суть явления объясняется законом электромагнитной индукции. В соответствии с ним одна и та же электрическая машина может вырабатывать электрическую энергию либо потреблять ее. Эта особенность электрических машин называется принципом обратимости.

Рассмотрим физический смысл принципа обратимости на примере простейшего устройства, содержащего постоянный магнит, между полюсами которого помещен прямолинейный проводник.

Пусть между полюсами подковообразного постоянного магнита помещен прямолинейный проводник (рис. 13.1,а).

Воздействуя внешней силой F на прямолинейный проводник, будем перемещать его в магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. В соответствии с законом электромагнитной индукции в проводнике будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС) $E = B \cdot l \cdot v$, где B – магнитная индукция, Тл; l – активная длина проводника, м; v – скорость движения проводника, м/с.

Для определения направления ЭДС следует воспользоваться правилом "правой руки". Применив это правило, определим направление ЭДС в проводнике. Если концы проводника замкнуты на сопротивление R , то под действием ЭДС во внешней цепи будет протекать ток I . Направление тока определяется направлением ЭДС. Таким образом, проводник, перемещаемый внешней силой F в магнитном поле, можно рассматривать как элементарный генератор.

В результате взаимодействия тока с магнитным полем возникает действующая на проводник электромагнитная сила. Численное значение электромагнитной силы можно вычислить по формуле $F_{ЭМ} = B \cdot l \cdot I$. Направление $F_{ЭМ}$ определяется правилом "левой руки". В рассматриваемом случае электромагнитная сила направлена справа налево, т. е. противоположно движению проводника. Таким образом в элементарном генераторе электромагнитная сила является тормозящей по отношению к движущей силе.

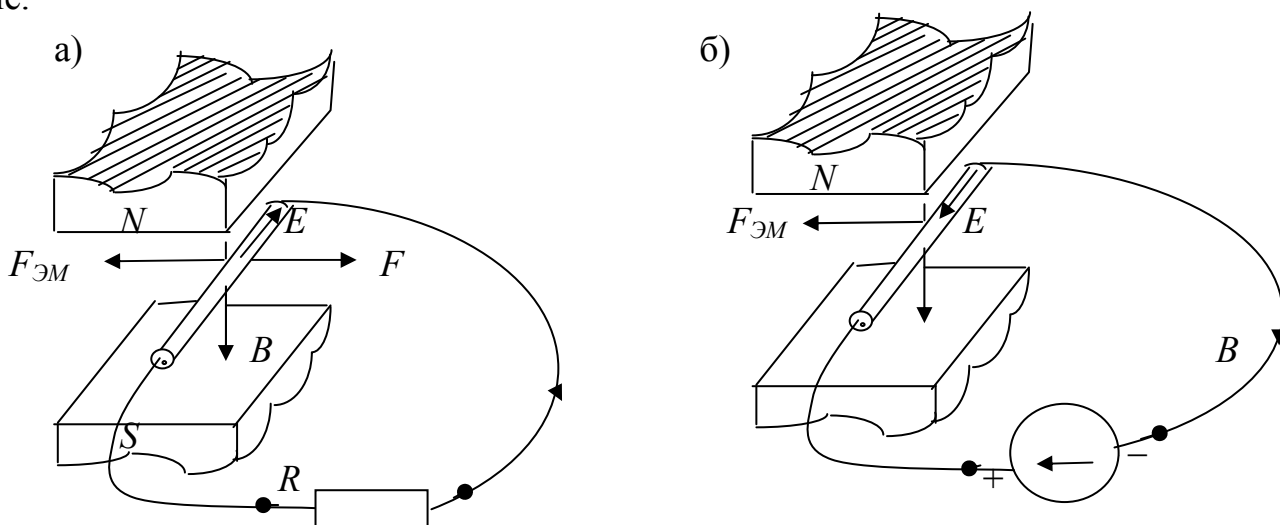


Рис. 13.1

При равномерном движении проводника обе силы уравниваются друг друга. Умножив обе части равенства на скорость движения проводника, получим $F \cdot v = F_{\text{ЭМ}} \cdot v$. С учетом значения электромагнитной силы запишем:

$$F \cdot v = B \cdot l \cdot I \cdot v = E \cdot I.$$

Левая часть равенства определяет значение механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле, а правая - значение электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре электрическим током. Знак равенства между этими частями показывает, что в генераторе механическая мощность, создаваемая внешней силой, преобразуется в электрическую.

Если внешнюю силу к проводнику не прикладывать, а от внешнего источника электроэнергии подвести к нему напряжение так, чтобы ток в проводнике имел направление, указанное на рис. 13.1,б, то на проводник будет действовать только электромагнитная сила. Под действием этой силы проводник начнет двигаться в магнитном поле. При перемещении проводника в магнитном поле в нем будет индуцироваться ЭДС. Направление ЭДС противоположно напряжению внешнего источника. Таким образом, часть напряжения, приложенного к проводнику, уравнивается ЭДС, а другая ее часть составляет падение напряжения на сопротивление проводника $U = E + I \cdot R$.

Умножив обе части равенства на ток I и учитывая значение ЭДС, запишем выражение $U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot R$, которое представим в виде

$$U \cdot I = F_{\text{ЭМ}} \cdot v + I^2 \cdot R.$$

Записанное выражение показывает, что электрическая мощность ($U \cdot I$), поступающая в проводник, частично преобразуется в механическую мощность ($F_{\text{ЭМ}} \cdot v$), а частично расходуется на покрытие электрических потерь мощности в проводнике ($I^2 \cdot R$).

Таким образом, проводник с током, помещенный в магнитное поле, можно рассматривать как элементарный электродвигатель.

Рассмотренные явления позволяют сделать следующие выводы:

1. Для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения.

2. При работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя наблюдается индуктирование ЭДС в проводнике, пе-

ресекающем магнитное поле, и возникновение силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по нему электрического тока.

3. Взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Это свойство электрических машин называют **обратимостью**. Впервые принцип обратимости был установлен русским электротехником Э.Х. Ленцем.

13.2. Классификация электрических машин

Диапазон мощностей выпускаемых электрических машин весьма широк - от долей ватта до сотен тысяч киловатт. Условно электрические машины делятся на четыре группы:

микромашин	не более 750 Вт,
машины малой мощности	от 0,75 до 50 кВт,
машины средней мощности	от 50 до 500 кВт,
машины большой мощности	свыше 500 кВт.

Классификация электрических машин в значительной степени определяется ее назначением в производственном механизме. Так, например, потребление электроэнергии часто связано с преобразованием тока промышленной частоты в ток более высокой частоты или постоянный ток. Для этой цели применяют электромашинные преобразователи.

Электрические машины, применяемые для усиления мощности электрических сигналов, называют электромашинными усилителями.

Электрические машины, используемые для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии, называют синхронными компенсаторами.

Электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока, называют индукционными регуляторами.

Применение микромашин в устройствах автоматики и вычислительной техники весьма разнообразно. Здесь машины используются в качестве: двигателей, преобразователей частоты вращения в электрический сигнал, получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала.

Электрические машины разделяют и по принципу действия: коллекторные и бесколлекторные. Эти машины различаются как конструкцией, так и рабочими свойствами. Коллекторные машины применяют, главным образом, для работы на постоянном токе как в качестве генераторов, так и двигателей. Бесколлекторные машины работают только на переменном токе.

Рассмотрим более подробно отдельные типы электрических машин общепромышленного назначения.

13.3. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Неподвижная часть машины называется **статором**, подвижная – **ротором**. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. На рис. 13.2 показан сердечник статора в сборе. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается **трёхфазная обмотка** (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия. Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых **фазами**. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 .

Начала и концы фаз выведены на клеммник (рис. 13.3, а), закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда (рис. 13.3, б) или треугольник (рис. 13.3, в). Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя.

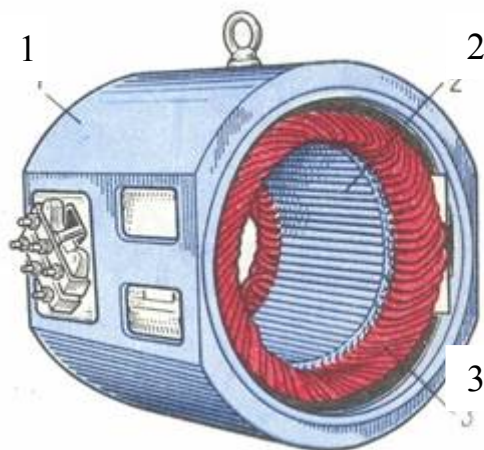


Рис. 13.2

В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 660/380, Y/Δ. Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{л} = 660\text{В}$ по схеме звезда или в сеть с $U_{л} = 380\text{В}$ – по схеме треугольник. Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающего магнитного поля.

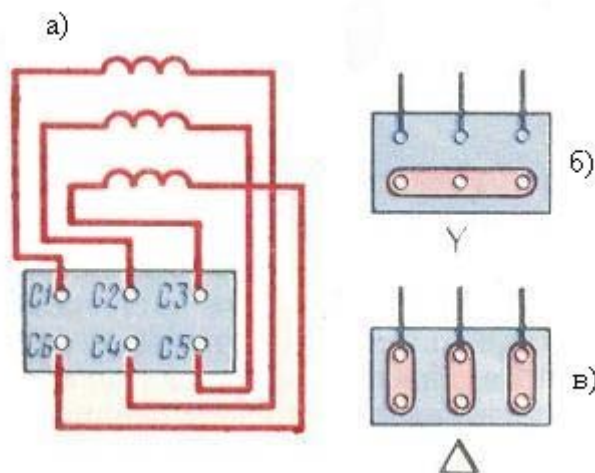


Рис. 13.3

Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: **короткозамкнутая** и **фазная**. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).

Короткозамкнутая обмотка (рис. 13.4,б) ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка напоминает “белочье колесо” и называют её типа “белочьей клетки” (рис. 13.4,а). Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.

Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент.

Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка – сильно закореженный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

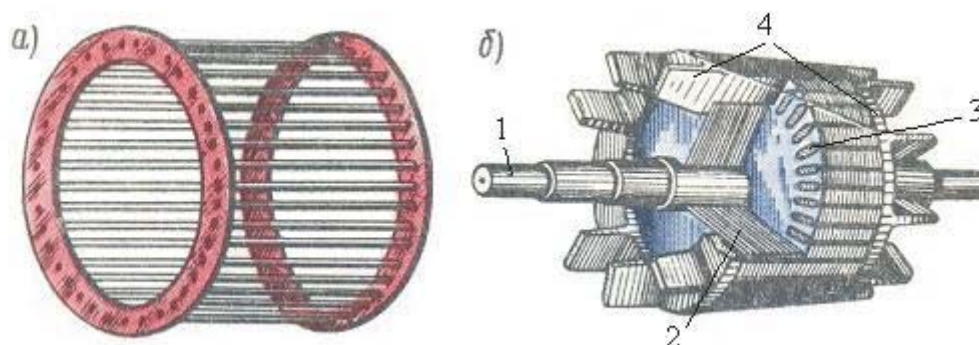


Рис. 13.4

На рис. 13.5 приведен вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки. У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток используют металлографитовые щётки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины. На рис. 13.6 приведено условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором.

На щитке машины, закреплённом на станине, приводятся данные: P_n , U_n , I_n , n_n , а также тип машины.

P_n – это номинальная полезная мощность (на валу); U_n и I_n – номинальные значения линейного напряжения и тока для указанной схемы соединения. Например, 380/220, Y/Δ, $I_n Y/I_n Δ$. n_n – номинальная частота вращения в об/мин. Тип машины, например, задан в виде 4АН315S8. Это асинхронный двигатель (А) четвёртой серии защищённого исполнения. Если буква Н отсутствует, то двигатель закрытого исполнения.

- 315 – высота оси вращения в мм;
- S – установочные размеры (они задаются в справочнике);
- 8 – число полюсов машины.

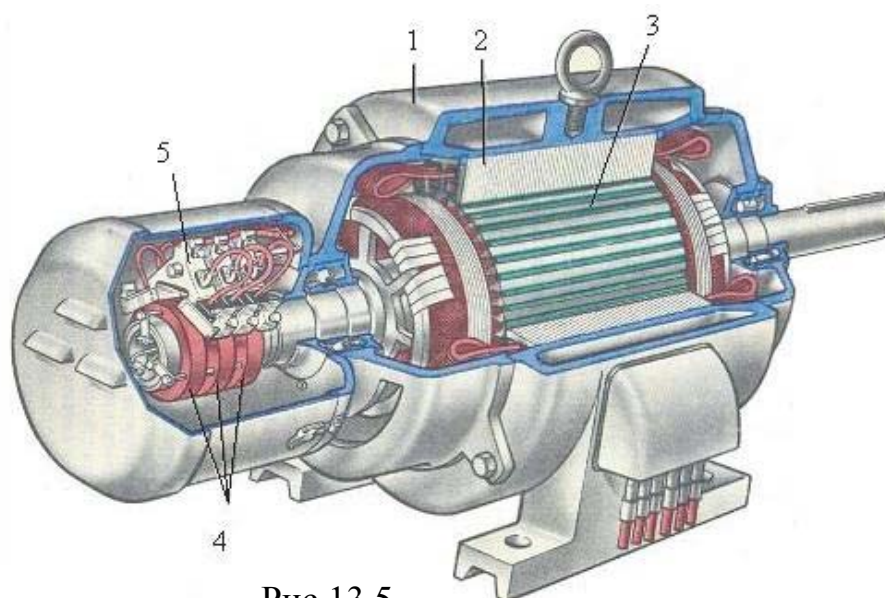


Рис.13.5

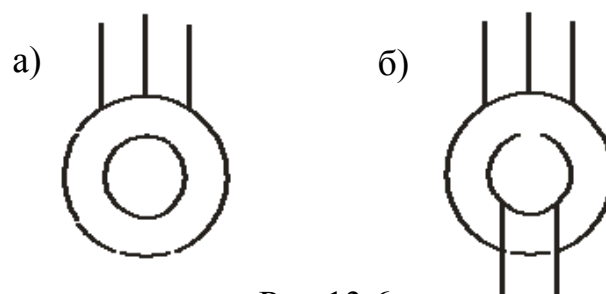


Рис.13.6

На рис. 13.7 приведен вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.

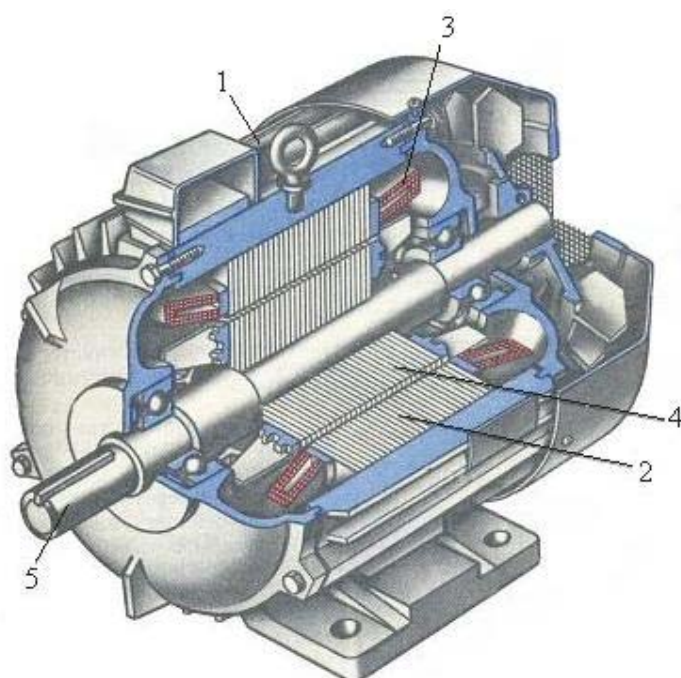


Рис. 13.7

13.4. Скольжение и его влияние на параметры ротора

В двигательном режиме частота вращения ротора (n) всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора (n_1). Эта особенность и определяет название двигателя – асинхронный.

Величина, характеризующая разность частот вращения ротора и магнитного поля статора, выраженная в относительных единицах или процентах, называется скольжением

$$s = (n_1 - n) / n_1, \quad s = ((n_1 - n) / n_1) 100 \%.$$

Из приведенной формулы следует, что скольжение асинхронного двигателя изменяется в диапазоне $0 < s \leq 1$.

В режиме работы двигателя без нагрузки на валу (режим холостого хода) ротор вращается с частотой лишь немного меньше частоты вращения магнитного поля, которую в дальнейшем будем называть синхронной частотой. В этом случае скольжение весьма мало отличается от нуля. Однако ток холостого хода статора примерно на порядок больше тока холостого хода трансформатора. Напомним, что ток холостого хода трансформатора составляет (2...8) % от номинального значения тока первичной обмотки. Ток холостого хода двигателя составляет (20...40) % от номинального тока статора. Такое увеличение тока холостого хода объясняется тем, что воздушный зазор между статором и ротором увеличивает магнитное сопротивление цепи двигателя для магнитного потока.

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют номинальным скольжением. Для асинхронных двигателей номинальное скольжение составляет (1...8) %. Меньшие значения соответствуют двигателям большей мощности, большие значения скольжения соответствуют двигателям малой мощности.

Частота вращения ротора (об/мин) может быть определена, если известны синхронная частота магнитного поля статора и скольжение:

$$n = n_1 (1 - s).$$

Например, для двигателя общепромышленного назначения ($f = 50$ Гц), имеющего четыре полюса и номинальное скольжение 4 %, частота вращения ротора равна $n = 60f (1 - s) / p = 3000(1 - 0,04) / 2 = 1440$ об/мин. Частота тока в обмотке ротора, пропорциональная абсолютной разности синхронной частоты и частоты вращения ротора, называется частотой скольжения. Ее значение вычисляется по формуле $f_2 = (n_1 - n) p / 60$, Гц.

Если числитель и знаменатель выражения для частоты скольжения умножить на значение синхронной частоты, то получим возможность вы-

числитель частоту скольжения через известные значения частоты питающего напряжения и величину скольжения:

$$f_2 = (n_1 - n) \cdot p / 60 \cdot n_1 = r_1 \cdot s.$$

Для $f_1 = 50$ Гц и скольжения $s = (2...8) \%$ частота $f_2 = 1...4$ Гц.

Влияние частоты скольжения проявляется на параметрах ротора: ЭДС и реактивном сопротивлении. Выражение для ЭДС обмотки ротора имеет вид $E_{2s} = 4,44 w_2 f_2 \Phi_m k_{06}$, где k_{06} – коэффициент, учитывающий специфику выполнения обмотки ротора (обмоточный коэффициент).

В случае неподвижного ротора, когда $s = 1$, частота скольжения f_2 равна частоте питающего двигателя напряжения. Поэтому $E_{2s} = E_2$.

В случае вращающегося ротора, когда $f_2 = f_1 s$, выражение для ЭДС примет вид $E_{2s} = 4,44 w_2 f \Phi_m k_{06} s = E_2 \cdot s$.

Аналогичную связь можно установить и между индуктивными сопротивлениями неподвижного x_{2s} и вращающегося ротора x_2 :

$$x_{2s} = x_2 \cdot s$$

Пример 13.1. Для трехфазного асинхронного двигателя известно, что при частоте $f_1 = 50$ Гц. ЭДС и индуктивное сопротивление неподвижного ротора равны: $E_2 = 120$ В., $x_2 = 130$ Ом.

Определить значения f_{2s} , E_{2s} и x_{2s} при скольжении $s = 4 \%$.

Воспользовавшись вышеприведенными формулами, получим:

$$f_{2s} = f_1 \cdot s = 2 \text{ Гц}; \quad E_{2s} = E_2 \cdot s = 4,8 \text{ В}; \quad x_{2s} = x_2 \cdot s = 5,2 \text{ Ом}.$$

13.5. Механическая мощность асинхронного двигателя

Трехфазный асинхронный двигатель нагружает питающую активную мощностью $P_1 = 3 U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_\Phi$. Здесь индексом " Φ " обозначены фазные значения напряжения и тока обмотки статора; индексом " L " – линейные значения напряжения питающей сети и тока, потребляемого двигателем.

В дальнейшем будем обозначать индексом 1 параметры обмотки статора, а индексом 2 параметры обмотки ротора.

Процесс преобразования электрической энергии в механическую наиболее просто показать в виде энергетической диаграммы (рис. 13.8). На каждой ступени передачи происходят соответствующие потери энергии, обозначенные отдельными ручейками. Эта энергия считается потерянной, а отдельные ее составляющие называются потерями мощности.

На основании энергетической диаграммы двигателя можно определить механическую мощность $P_{\text{Мех}}$, отдаваемую двигателем, путем вычитания из

подведенной от сети мощности потерь на всех ступенях передачи. К ним относятся потери в обмотке статора, стали сердечника и потери в обмотке ротора.

Уравнение энергетического баланса двигателя запишем в виде

$$P_{\text{Мех}} = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 - 3I_1^2 r_1^2 - p_{\text{СТ}} - m_2 I_2^2 r_2^2,$$

где m_2 – число фаз обмотки ротора в случае фазного способа его исполнения или число стержней ротора, деленное на два, если обмотка ротора выполнена короткозамкнутой; $p_{\text{СТ}}$ – потери в стали статора.

Потерями в стали ротора обычно пренебрегают по причине малой частоты тока ротора.

Электромагнитная мощность $P_{\text{ЭМ}}$, передаваемая ротору, определяется произведением числа фаз, ЭДС, тока и коэффициента мощности ротора. Часть этой мощности выделяется в роторе в виде теплоты.

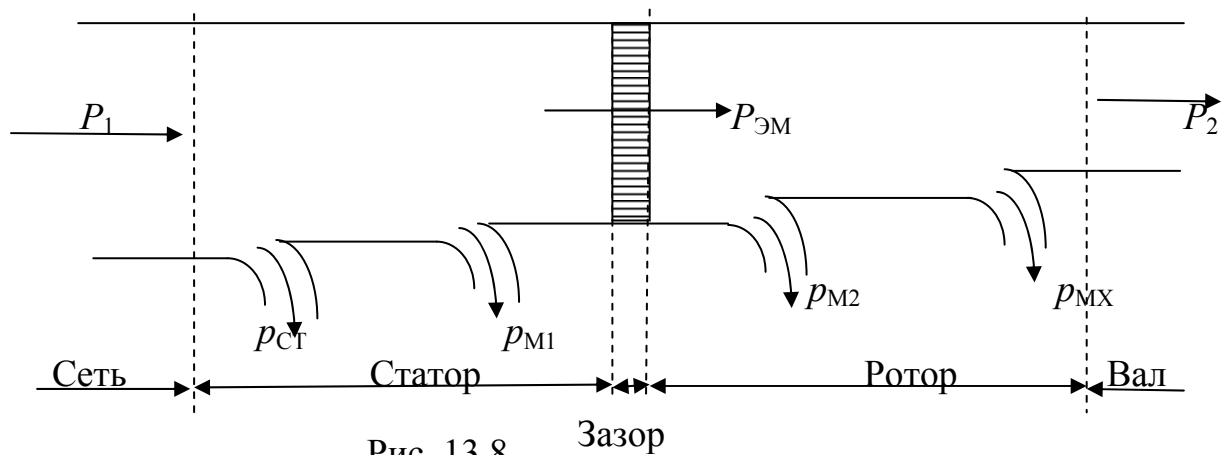


Рис. 13.8

Таким образом, механическую мощность асинхронного двигателя можно определить как разность между электромагнитной мощностью и потерями в обмотке ротора:

$$P_{\text{мех}} = m_2 E_2 I_2 \cos\varphi_2 - m_2 I_2^2 r_2.$$

Это уравнение можно представить в ином виде, если учесть, что $E_2 = E_{2S} / s$, а произведение $E_{2S} \cos\varphi_2 = I_2^2 r_2$ определяет активную составляющую ЭДС ротора. На основании изложенного выражение для механической мощности примет вид $P_{\text{мех}} = m_2 I_2^2 r_2 / s - m_2 I_2^2 r_2$, или после некоторого преобразования окончательно запишем:

$$P_{\text{мех}} = m_2 I_2^2 r_2 (1 - s) / s.$$

Если последнее выражение представить в виде

$$s P_{\text{мех}} / (1 - s) = m_2 I_2^2 r_2,$$

то становится очевидным тот факт, что с увеличением скольжения увеличивается нагрев ротора.

Поэтому современные асинхронные двигатели рассчитываются так, чтобы в рабочем режиме скольжение было минимальным.

Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше механической мощности $P_{\text{мех}}$, развиваемой двигателем, на величину механических потерь, определяемых трением в подшипниках, а также трением ротора о воздух.

13.6. Вращающий момент и его зависимость от скольжения

Вращающий момент двигателя связан с механической мощностью и угловой частотой вращения ротора известной из механики формулой

$$M = P_{\text{Мех}} / \Omega_2.$$

Механическая мощность и ее зависимость от параметров ротора с учетом полученных выше соотношений может быть представлена в виде следующего соотношения:

$$P_{\text{мех}} = m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2 (1 - s).$$

Связь между угловой частотой вращения ротора и магнитным полем статора может быть выражена через скольжение $\Omega_2 = \omega_1 (1 - s)$. Если обмотка статора имеет одну пару полюсов, то $\omega_1 = \omega$, т. е. угловая частота вращения магнитного поля статора равна круговой частоте тока. Однако в общем случае двигатель имеет несколько пар полюсов. Тогда $\omega_1 = \omega / p$, а выражение для угловой частоты ротора примет вид $\Omega_2 = (1 - s) \omega / p$.

Учитывая это обстоятельство, выражение для вращающего момента запишем в виде $M = (pm_2 / \omega) E_2 I_2 \cos \varphi_2$. Обозначив отношение, стоящее в скобках, как некоторую постоянную C_M , запишем выражение для вращающего момента в виде

$$M = C_M E_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Анализ полученного выражения показывает, что вращающий момент двигателя пропорционален произведению тока и ЭДС ротора и углу сдвига фаз между ними. Покажем влияние скольжения на отдельные сомножители, определяющие вращающий момент двигателя.

Здесь $C_M = pm_2 / \omega$ – постоянная для данного типа двигателя величина, зависящая только от его конструктивных особенностей $E_2 = 4,44 w_2 f_1 \Phi_m k_{06}$ – ЭДС, наводимая в обмотке неподвижного ротора;

$I_2 = E_{2s} / z_2 = E_{2s} / \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}$ – ток в фазе обмотки вращающегося ротора, при увеличении скольжения увеличивается или уменьшается при его уменьшении;

$\cos\varphi_2 = r_2 / \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}$ – фазовый угол между ЭДС и током в обмотке ротора, уменьшается при увеличении скольжения и увеличивается при его уменьшении.

Таким образом, из трех основных параметров ротора только два зависят от скольжения, причем один изменяется прямо пропорционально, а второй – обратно пропорционально скольжению.

Графическая зависимость вращающего момента от скольжения существенно нелинейная (рис. 13.9,а). Характерными точками этой зависимости являются: M_{Π} – пусковой момент, соответствующий $s = 1$, т. е. неподвижному ротору; M_H – номинальный момент, соответствующий номинальному скольжению s_H , т. е. рабочему режиму; M_{KP} – критический момент, т. е. наибольшее значение вращающего момента, которому соответствует критическое значение скольжения s_{KP} .

Значение критического момента определяет границу между устойчивой и неустойчивой областями работы двигателя. Двигатель работает в устойчивой области, если при увеличении момента сопротивления на валу вращающий момент возрастает. Скольжение в этой области изменяется от нуля до критического значения. Если же при увеличении момента сопротивления скольжение увеличивается, а вращающий момент уменьшается, то двигатель работает в неустойчивой области, что в конечном итоге ведет к его остановке. Скольжение в этой области больше критического, но меньше либо равно единице. Физически уменьшение величины вращающего момента в этой зоне объясняется уменьшением активной составляющей тока ротора, что приводит к уменьшению $\cos\varphi_2$.

Зависимость вращающего момента от частоты вращения ротора называется механической характеристикой. Вид характеристики показан на рис. 13.9,б. На механической характеристике можно выделить те же характерные точки, что и на зависимости $M = \xi(s)$.

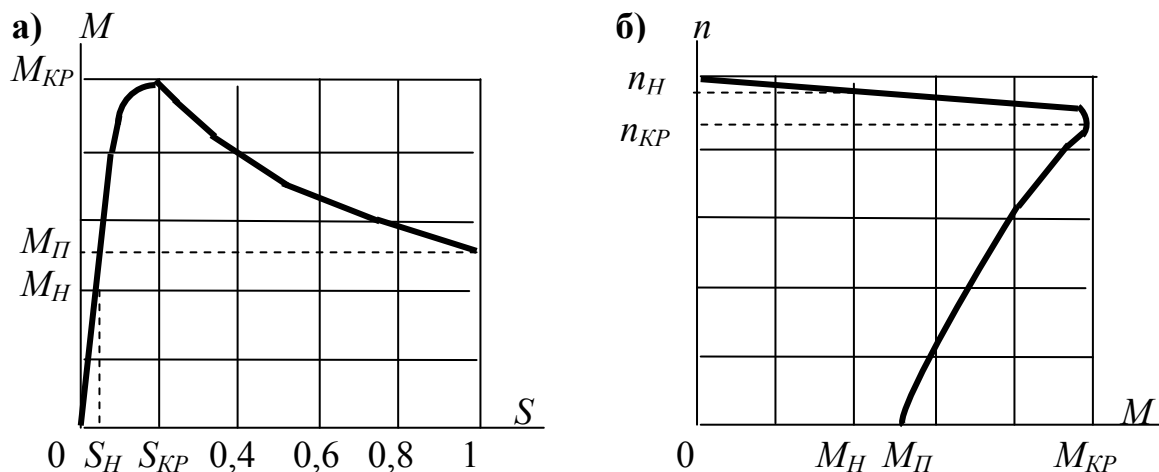


Рис. 13.9

13.7. Коэффициенты мощности и полезного действия асинхронного двигателя

Преобразование электрической энергии в механическую сопряжено не только с потреблением активной и реактивной мощностей, но и с потерями энергии. По этой причине коэффициенты мощности ($\cos\varphi_1$) и полезного действия (η) асинхронного двигателя не остаются постоянными. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Изменение коэффициента мощности в процессе работы асинхронного двигателя обусловлено изменением составляющих тока статора. Реактивная составляющая тока статора не зависит от нагрузки на валу двигателя и при любом напряжении сети практически неизменна. В то же время, активная составляющая тока двигателя пропорциональна его механической нагрузке. Это приводит к тому, что с увеличением нагрузки относительное значение реактивного тока убывает, а коэффициент мощности увеличивается. При холостом ходе двигателя его коэффициент мощности довольно низок – порядка 0,2...0,3. С увеличением нагрузки он быстро возрастает и достигает максимального значения 0,7...0,9 при номинальной нагрузке.

При увеличении нагрузки двигателя свыше номинального значения увеличивается реактивная составляющая тока и коэффициент мощности начинает уменьшаться. Причиной увеличения реактивной составляющей тока является влияние магнитных потоков рассеяния, что и приводит к увеличению реактивной мощности двигателя.

Значение коэффициента мощности трехфазного асинхронного двигателя можно вычислить по формулам

$$\cos \varphi_1 = P_1 / \sqrt{3} U_1 I_1 = P_1 / \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) определяется отношением полезной мощности P_2 к подводимой P_1 . Следует помнить, что полезной является механическая мощность, развиваемая двигателем на его валу, тогда как подводимая мощность является электрическим параметром и определяется произведением напряжения, тока и коэффициента мощности.

Из приведенной выше энергетической диаграммы следует, что мощность P_1 равна сумме полезной мощности и всех видов потерь в двигателе

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\Pi}.$$

Потери мощности можно разделить на постоянные, практически не зависящие от нагрузки, и от нее зависящие - переменные. К группе постоянных потерь относятся потери в стали сердечника от гистерезиса и вихревых токов, а

также механические потери. Эти потери определяются экспериментально из опыта холостого хода. Переменными потерями являются потери, обусловленные сопротивлением проводников протекающему по ним току:

$$\Delta P_1 = 3 I_1^2 r_1; \quad \Delta P_2 = m_2 I_2^2 r_2, \quad \text{Вт.}$$

КПД двигателя (о.е.) можно вычислить по формуле

$$\eta = (P_2 + \Delta P_{II}) / P_1.$$

Максимальное значение КПД достигается при равенстве постоянных и переменных потерь. Обычно максимум КПД имеет место при нагрузке, равной 75 % от номинальной. Это объясняется тем, что двигатели проектируются с учетом того обстоятельства, что в процессе эксплуатации они не всегда полностью загружены.

13.8. Расчет механической характеристики двигателя по паспортным данным

Основными точками механической характеристики асинхронного двигателя являются: номинальный, пусковой и максимальный моменты, а также соответствующие им частоты вращения. Покажем, как, пользуясь информацией, приведенной в паспорте двигателя, можно рассчитать характерные точки механической характеристики. В табличке, закрепленной на корпусе статора, приведены значения номинальной механической мощности и частоты вращения ротора. По этим данным можно вычислить значения номинального момента на валу двигателя (Н.м):

$$M_H = P_{2H} / \Omega_H ,$$

и номинального скольжения $s_H = (n - n) / n_1,$

где $\Omega_H = \pi n / 30$ – круговая частота вращения ротора.

Для расчета значений пускового и максимального моментов следует взять справочник по электрическим машинам и найти в нем для данного двигателя два параметра: кратность пускового момента K_{II} и кратность максимального момента K_M . Значения коэффициентов определяются соотношением соответствующих моментов к его номинальному значению:

$$K_{II} = M_{II} / M_H, \quad K_M = M_{KP} / M_H.$$

Из приведенных соотношений, находим значения пускового и максимального моментов: $M_{II} = K_{II} M_H, \quad M_M = K_M M_H.$

Скольжение, соответствующее пусковому моменту, равно единице. Следовательно, $n = 0$ об/мин, т. е. ротор неподвижен. Скольжение, соответствующее максимальному (критическому) моменту, вычисляется по формуле

$$s_{KP} = s_H (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}).$$

Частота вращения ротора (об / мин) асинхронного двигателя может быть вычислена по формуле

$$n = n_1 (1 - s) .$$

13.9. Пуск асинхронных двигателей

Пусковые свойства асинхронного двигателя определяются особенностями его конструкции, в частности устройством ротора.

В большинстве случаев двигатели с короткозамкнутым ротором пускают в ход прямым включением обмоток статора к питающей сети. Этот способ пуска прост и быстр. Для его осуществления необходим лишь простейший коммутирующий аппарат - выключатель. Однако следует помнить, что при прямом включении двигателя кратность пускового тока составляет от 4 до 7 номинального значения тока. Кратковременный толчок пускового тока безопасен для двигателя. Однако он вызывает кратковременное понижение напряжения в сети, что может оказать неблагоприятное влияние на работу других потребителей электрической энергии. Следует иметь в виду еще один недостаток прямого пуска асинхронного двигателя – это кратность пускового момента, которая составляет 1,1...1,4.

Таким образом, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при пуске имеет большую силу тока при относительно небольшом вращающем моменте.

Для уменьшения величины пусковых токов двигателя с короткозамкнутым ротором пускают в ход при пониженном напряжении питающей сети. Практическая реализация данного способа требует не только дополнительных элементов, например регулируемых трехфазных трансформаторов, но и приводит к снижению величины пускового момента. Наибольшее распространение получил способ, при котором двигатель, работающий при соединении обмоток статора по схеме треугольник, пускают в ход без нагрузки путем переключения схемы соединения его обмоток. При пуске обмотки статора соединяют по схеме звезда, а при достижении им частоты вращения, близкой к номинальной, при помощи специального переключателя обмотки соединяют по схеме "треугольник" и нагружают двигатель. Пусковые свойства двигателя с фазным ротором существенно отличаются от двигателя с короткозамкнутым ротором за счет возможности включения в цепь ротора внешнего пускового реостата.

Сопротивление каждой фазы пускового реостата выбирается таким, чтобы обеспечить при пуске максимальный момент. По мере разгона ротора

уменьшается скольжение, а вместе с ним ЭДС и сила тока ротора, вследствие чего падает и вращающий момент. Для получения вращающего момента, близкого к максимальному, сопротивление пускового реостата постепенно уменьшают. Наконец, когда ротор двигателя достигает нормальной скорости, сопротивления пусковых реостатов замыкаются накоротко.

Добавочное сопротивление, включенное в цепь ротора, изменяет характер зависимости вращающего момента от скольжения путем смещения максимума момента в сторону большего скольжения. Такая механическая характеристика называется искусственной. Численное значение критического скольжения искусственной характеристики может быть оценено по формуле

$$s_{KP.H} = M_{KP} / M_{II} - \sqrt{(M_{KP} / M_{II})^2 - 1}.$$

Значение добавочного сопротивления (Ом), которое необходимо включить в цепь фазы ротора для обеспечения заданного пускового момента, рассчитывается как

$$R_{Д} = r_2 (s_{KP.H} / s_{KP} - 1),$$

где r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора (Ом), определяемое выражением $r_2 = E_{2K} s_H / \sqrt{3} I_{2H}$, где E_{2K} – линейное значение ЭДС обмотки ротора, I_{2H} – номинальное значение тока в обмотке ротора.

Численные значения ЭДС и тока в обмотке ротора приводятся в каталогах на асинхронные двигатели.

Вопросы для самопроверки

1. Какие законы лежат в основе действия электрических машин?
2. Что называется обратимостью машин?
3. Из каких основных узлов состоит асинхронный двигатель?
4. Какое существенное отличие двигателя с фазным ротором от двигателя с короткозамкнутым ротором?
5. Что называется скольжением двигателя и как оно влияет на параметры ротора?
6. Поясните энергетическую диаграмму асинхронного двигателя?
7. Какая характеристика двигателя называется механической?
8. Что влияет на коэффициенты мощности и полезного действия асинхронного двигателя?
9. Какие параметры надо знать для расчета механической характеристики двигателя?
10. Какими способами можно уменьшить пусковые токи?

14. Синхронные машины

В теме 14 рассматриваются вопросы, входящие в шестой раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 14.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [5].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

- 1) устройство синхронных машин;
- 2) характеристика холостого хода;
- 3) внешние характеристики синхронного генератора;
- 4) включение синхронного генератора на параллельную работу;
- 5) пуск в ход синхронных двигателей.

14.1. Устройство и принцип действия

Синхронные машины широко применяются в энергетике как электрические генераторы и двигатели преимущественно большой мощности. Практически все генераторы электрической энергии являются синхронными генераторами.

Мощность современных крупных генераторов составляет десятки и сотни тысяч киловольт-ампер. Синхронные машины, как и все электрические машины, обратимы, т. е. они могут работать как генераторами, так и двигателями.

У синхронной машины частота вращения находится в строго постоянном соотношении с частотой сети.

Эта зависимость может быть представлена следующим выражением:

$$n_1 = f_1 / p,$$

где n_1 – частота вращения ротора (об/мин), равная синхронной частоте магнитного поля статора, f_1 – электрическая частота сети, p – число полюсов машины.

Синхронные машины, применяемые в качестве генератора, обычно соединяются с первичными двигателями непосредственно, без промежуточных редукторов. Первичным двигателем для мощных синхронных генераторов служат гидротурбины, паровые и газовые турбины и относительно редко двигатели внутреннего сгорания.

Синхронная машина является машиной переменного тока; устройство ее статора, который здесь называется якорем, принципиально не отличается от устройства статора асинхронной машины. Существенные отличия имеются только в машинах большой мощности. Ротор представляет собой электромаг-

нит, обмотка которого питается постоянным током. Два конца этой обмотки выводятся на контактные кольца, укрепленные на валу машины и вращающиеся вместе с ротором. Постоянный ток подводится к ротору извне через неподвижные щетки, скользящие по контактным кольцам.

Существуют две различные конструкции ротора синхронной машины – явнополюсная и неявнополюсная.

Для получения большой намагничивающей силы полюсов при относительно небольшом токе обмотки роторов делают с большим числом витков. Постоянный ток для питания обмотки возбуждения может подводиться от небольшого генератора постоянного тока, вращающегося вместе с ротором или приводимого отдельным двигателем. Нередко постоянный ток получают от выпрямительной установки.

Здесь мы рассмотрим только основные характеристики синхронных машин. Более подробное описание электромеханических процессов можно посмотреть, например, в [1,2, 5].

14.2. Характеристика холостого хода

При холостом ходе ток якоря равен нулю. Характеристикой холостого хода синхронной машины является зависимость между напряжением (ЭДС) якоря и током возбуждения ротора при постоянной частоте сети f и частоте вращения n . Ток возбуждения I_B , поступающего в цепь ротора от источника постоянного тока, регулируется от нуля до некоторого максимального значения. Это позволяет изменять магнитный поток ротора Φ в широких пределах, т. е. получать различную величину ЭДС статора, так как она пропорциональна магнитному потоку ротора.

На рис. 14.1 представлена характеристика холостого хода.

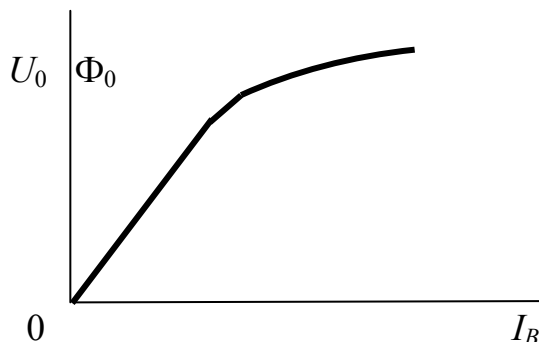
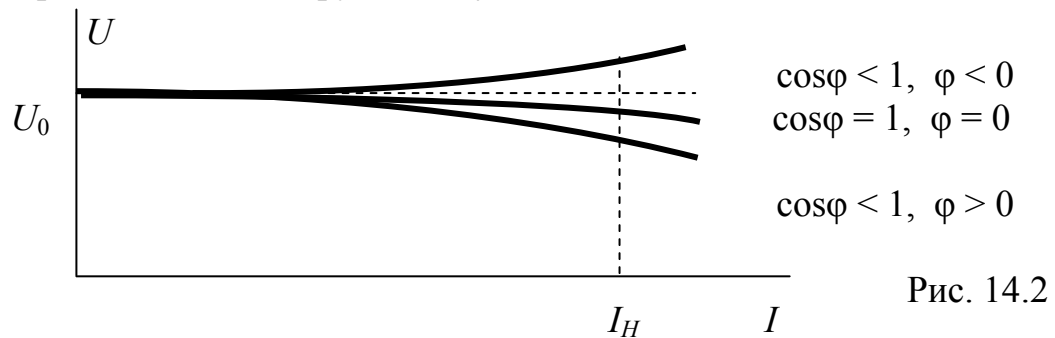


Рис. 14.1

14.3. Внешние характеристики синхронного генератора

Внешняя характеристика показывает, как изменяется напряжение U на обмотках якоря при изменении тока нагрузки (якоря) I и неизменном токе возбуждения I_B .

На рис. 14.2 представлены внешние характеристики синхронного генератора при различных характерах нагрузки. Каждая кривая (рис. 14.2) относится к случаю, когда при изменении нагрузки $\cos\varphi$ остается постоянным.

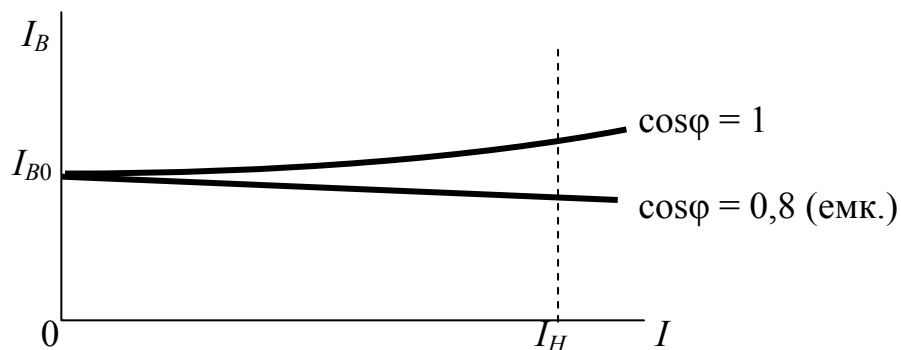


Относительное изменение напряжения генератора при номинальном токе I_H равно

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100 \%,$$

где U_0 – напряжение при холостом ходе; U_H – напряжение при номинальном токе.

Изменение напряжения сравнительно велико и доходит до нескольких десятков процентов. Однако напряжение можно сделать стабильным, если при изменении тока нагрузки одновременно изменять магнитный поток ротора, регулируя ток I_B возбуждения машины. Это подтверждают регулировочные характеристики, представленные на рис. 14.3.



14.4. Включение синхронного генератора на параллельную работу

На электростанциях, как правило, имеются несколько синхронных генераторов, включаемых параллельно и совместно работающих на одну сеть.

Перед включением генератора на параллельную работу необходимо выполнить ряд операций, называемых синхронизацией. Условия синхронизации заключаются в следующем:

- напряжение включаемого генератора должно быть равно напряжению сети или уже работающего генератора;
- частота генератора должна равняться частоте сети;
- чередование фаз генератора и сети должно быть одинаково;
- напряжения генератора и сети должны быть в фазе.

Выполнение всех этих условий входит в задачу управления электроприводом синхронных генераторов.

14.5. Пуск в ход синхронных двигателей

Пуск в ход синхронного двигателя обычного исполнения путем непосредственного включения в сеть невозможен. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен. За время действия механической силы на ротор, возникающей от действия вращающего магнитного поля якоря, ротор, в силу своей механической инерции, не сдвинется с места. При вращении магнитного поля ротор будет находиться под действием кратковременных знакопеременных толчков. Пуск синхронных двигателей возможен лишь при условии, что предварительно будет произведен разгон ротора до скорости, равной синхронной или близкой к ней.

Для синхронных двигателей обычно применяют асинхронный пуск в ход, состоящий в том, что в начале пуска двигатель разгоняется как асинхронный. Для этого ротор снабжается короткозамкнутой обмоткой, подобно короткозамкнутой клетке асинхронного двигателя. В процессе пуска перед включением якоря в трехфазную сеть обмотка возбуждения, т. е. обмотка ротора замыкается на сопротивление; постоянный ток в эту обмотку пока не подается. Затем включается обмотка якоря и возникает вращающееся магнитное поле. Оно индуцирует токи в пусковой клетке ротора, и двигатель разгоняется до некоторой установившейся скорости n , немного отличающейся от скорости вращения магнитного поля.

Затем обмотка возбуждения отключается от сопротивления и подключается к источнику постоянного тока. В результате возникает обычный для синхронной машины момент взаимодействия вращающего поля якоря и полюсов ротора и машина втягивается в синхронизм, т.е. начинает вращаться синхронно с полем. При вращении ротора с синхронной скоростью, т.е. при отсутствии скольжения, в пусковой клетке не возникают токи, и в дальнейшей работе машины клетка не участвует.

Синхронные двигатели конструктивно сложнее асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, так как имеют значительно более сложную конструкцию ротора. Для синхронных двигателей требуется источник постоянного напряжения. Пуск синхронных двигателей значительно сложнее, чем асинхронных.

Достоинством синхронного двигателя является то, что его максимальный момент зависит от напряжения в сети в первой степени, а не во второй, как для асинхронного двигателя. Это означает, что в обычных условиях при колебаниях напряжения сети момент синхронного двигателя является более стабильным. Кроме этого, синхронные двигатели могут работать с любым коэффициентом мощности, который можно изменять независимо от нагрузки на валу двигателя, регулируя ток возбуждения.

Сопоставление достоинств и недостатков синхронных двигателей показывает, что их целесообразно применять для установок большой мощности, начиная примерно с 50 – 100 кВт, в особенности для установок, работающих в условиях редких пусков.

14.6. Синхронные компенсаторы

Способность синхронной машины вызывать в сети опережающий ток и служить генератором реактивной мощности находит широкое применение.

Создают специальные синхронные двигатели, работающие на холостом ходу, генерирующие реактивную мощность и повышающие $\cos\varphi$ сети. Такие машины называются синхронными компенсаторами. Они работают в режиме перевозбуждения, вызывая ток, опережающий напряжение сети на угол, близкий к $\pi / 2$. Тем самым компенсируется реактивная составляющая тока других потребителей и, как следствие, уменьшается результирующий ток, нагружающий электрическую сеть.

Потери мощности синхронных компенсаторов невелики и не превышает 2 – 3 % их номинальной мощности. По сравнению с конденсаторами, которые

также вызывают в сети опережающий ток и используются для повышения cosφ сети, синхронные компенсаторы дешевле, имеют меньшие габариты при той же мощности, но потери мощности в них больше потерь в конденсаторах.

Вопросы для самопроверки

1. Где в основном применяются синхронные машины (С.М.)?
2. Из каких основных узлов состоит С.М.?
3. Какие исходные данные надо знать, чтобы определить частоту вращения С.М.?
4. Назовите основные характеристики С.М.
5. Какой вывод можно сделать на основании внешних характеристик С.М.?
6. Какие действия необходимо выполнить перед включением С.М.?
7. Почему невозможен пуск путем непосредственного включения в сеть?
8. Как осуществляют пуск С.М.?
9. Какие достоинства имеет С.М. в сравнении с асинхронным двигателем?
10. Поясните назначение и принцип работы синхронных компенсаторов.

15. Машины постоянного тока

В теме 15 рассматриваются вопросы, входящие в шестой раздел рабочей программы. Для изучения данной темы следует использовать материал темы 15.

Эти вопросы также разобраны в [1], [2], [5].

Обратите особое внимание на ключевые моменты этой темы, которыми являются:

1. Устройство машин постоянного тока и получение ЭДС;
 2. Конструктивные элементы современной машины постоянного тока. Режимы работы машины постоянного тока;
 3. КПД машины. Электродвижущая сила якоря. Электромагнитный момент;
 4. Магнитное поле машины при нагрузке. Основные полюса. Искрение на коллекторе. Добавочные полюса;
 5. Способы возбуждения машин постоянного тока;
 6. Область применения машин постоянного тока;
- Ответьте на вопросы теста по теме 15.

15.1. Конструктивные особенности машин постоянного тока

Машины постоянного тока (МПТ) представляют особую группу, которая отличается не только родом тока, но и имеет свои характерные особенности. Следует отметить, что наиболее просто МПТ могут быть получены путем незначительных конструктивных преобразований рассмотренных выше синхронных машин. Для этой цели необходимо в цепь обмотки статора включить трехфазный выпрямитель, собранный по той или иной схеме, например, по схеме Ларионова. В этом случае изменение тока в цепи обмотки возбуждения приведет к изменению постоянного напряжения на зажимах выпрямителя. Эта простота перехода от одного типа электрических машин к другому и определяет широкое применение МПТ в промышленности. Рассмотрим более подробно этот тип электрических машин.

Основными частями машины (рис. 15.1) являются неподвижная станина, несущая электромагниты, и вращающаяся часть, называемая якорем.

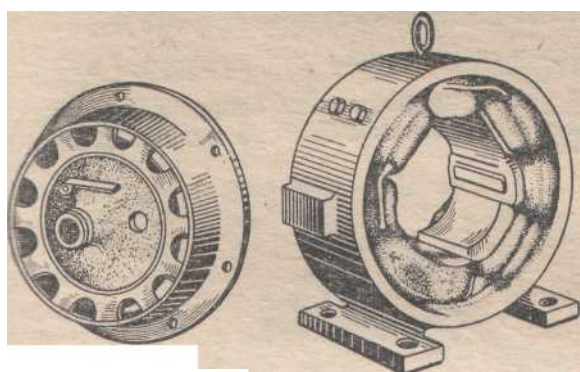
Станина представляет собой полый, стальной цилиндр, на внутренней стороне которого укреплены сердечники главных полюсов. На стержнях главных полюсов расположены катушки, выполненные изолированным проводом. Выводы катушек подключаются к источнику постоянного напряжения. Ток, протекая по виткам катушек, создает неподвижное в пространстве магнитное поле возбуждения, а сами катушки называют обмоткой возбуждения. Если обмотка возбуждения выполнена тонким проводом и имеет сопротивление несколько десятков Ом, то выводы обмотки обозначают буквами Π_1 и Π_2 . Если обмотка возбуждения выполнена проводом большого сечения и имеет сопротивление не больше нескольких единиц Ом, то выводы этой обмотки обозначают буквами C_1 и C_2 .

Сердечник якоря собран из изолированных друг от друга листов электротехнической стали, имеющих форму кольца. На внешней поверхности кольца выштампованы пазы, в которые закладывается обмотка якоря. Основной частью обмотки якоря является секция, состоящая из одного или нескольких витков изолированного провода. Секции соединяются между собой последовательно. От точек соединения секций делают отпайки.

Составной частью якоря машины является коллектор, который представляет собой полый цилиндр, собранный из изолированных одна от другой и от вала якоря клинообразных медных пластин. Пластины коллектора определенным образом соединяются с отпайками секций. На коллекторе в щеткодержателях устанавливают щетки, через которые обмотка якоря соединяется с внешней

цепью. Выводы обмотки якоря обозначают буквами $Я_1$ и $Я_2$. Щетки к коллектору прижимаются пружинами. Щеткодержатели крепятся на траверсах, которые можно поворачивать в пространстве, изменяя положение щеток по отношению к полюсам машины.

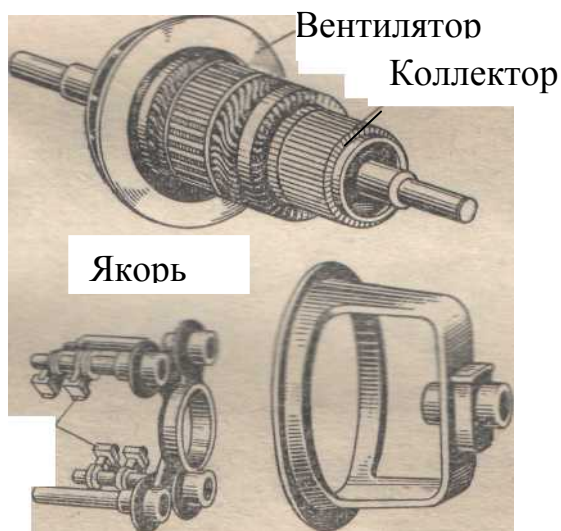
Коллектор в зависимости от режима работы машины позволяет выпрямить переменную ЭДС, индуктируемую во вращающейся обмотке якоря в генераторном режиме, и обеспечить постоянный по направлению вращающий момент в двигательном режиме.



Задний щит

Станина с полюсами

Рис. 15.1



Якорь

Вентилятор

Коллектор

Траверза

Передний щит

В режиме генератора машина работает тогда, когда ее якорь приводится во вращение каким-либо первичным двигателем, главное магнитное поле возбуждено, а обмотка якоря через щетки замкнута на нагрузку.

В режиме двигателя внешний источник подключен к обмотке якоря и цепи возбуждения машины. Ток якоря, взаимодействуя с главным магнитным полем, образует вращающий момент. Под действием этого момента якорь вращается, и машина преобразует электрическую энергию в механическую.

15.2. Классификация по способу возбуждения

В зависимости от способа создания магнитного потока возбуждения машины делятся на две группы: магнитоэлектрические и электромагнитные. В первых магнитный поток возбуждения создается при помощи постоянных магнитов; во вторых - постоянным током, проходящим по обмотке, расположенной на главных полюсах.

В данном разделе мы будем рассматривать электрические машины с электромагнитным способом возбуждения, как получившие наибольшее рас-

пространение в различных отраслях промышленности. Машины с магнито-электрическим способом возбуждения применяются в качестве элементов устройств автоматики как исполнительные механизмы следящих систем. Эта группа машин относится к машинам малой мощности и является предметом специального рассмотрения.

В зависимости от схемы соединения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря различают четыре типа машин постоянного тока:

- машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря подключается к различным источникам (рис. 15.2,а);
- машины параллельного возбуждения, в которых обмотка возбуждения включается параллельно обмотке якоря (рис. 15.2, б);
- машины последовательного возбуждения, в которых обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря (рис. 15.2, в);
- машины смешанного возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения: последовательная и параллельная (рис. 15.2, г).

Способ соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря оказывает существенное влияние на характеристики генераторов и двигателей.

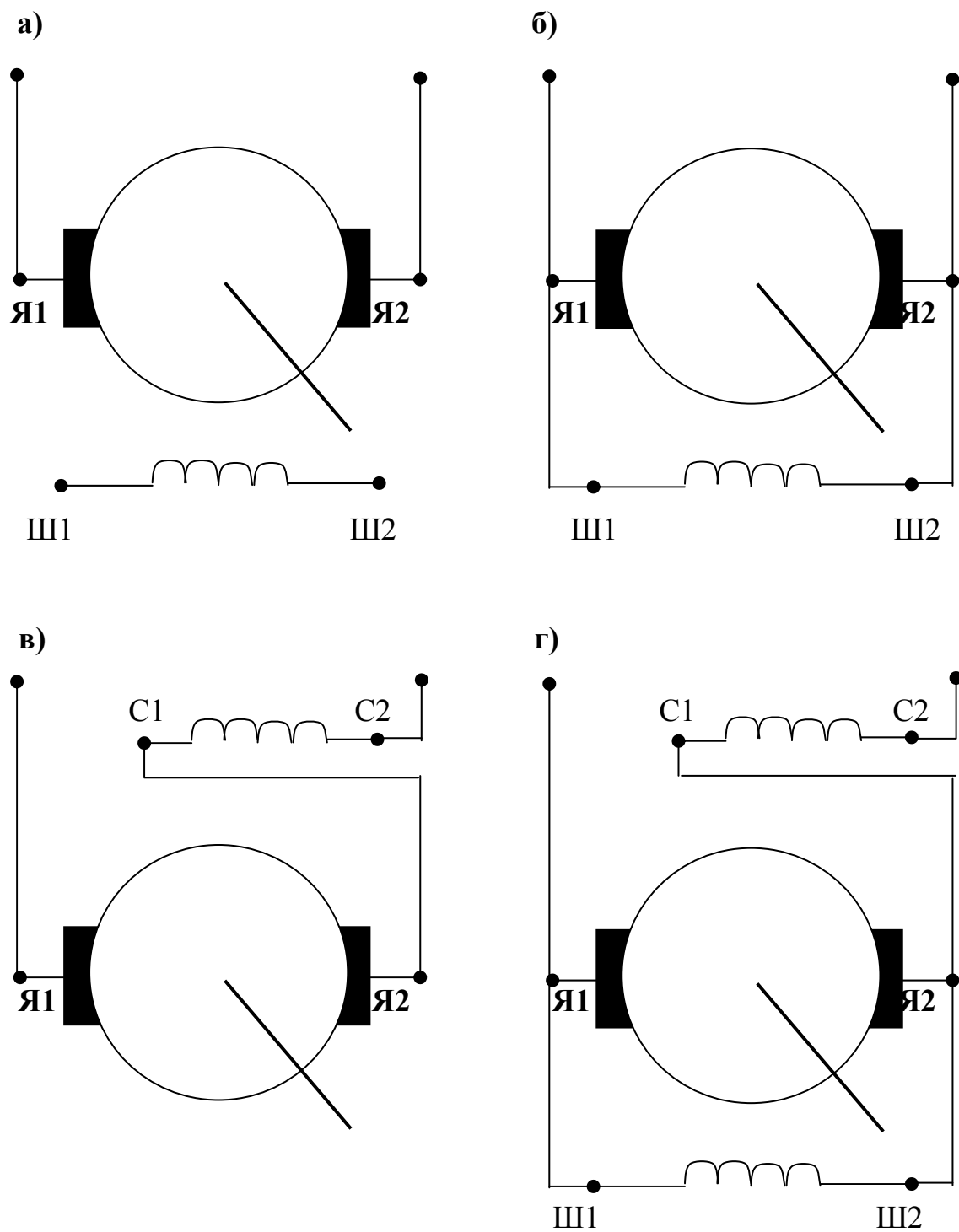


Рис. 15.2

15.3. Генераторы постоянного тока

При эксплуатации машины постоянного тока в генераторном режиме важно знать три основные характеристики, выражающие зависимость одних переменных величин от других. К ним относятся: характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика, холостого хода – зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения при отсутствии тока в обмотке якоря и постоянной частоте его вращения, т. е. $U_G = \xi(I_B)$ при $I_A = 0$, $n = \text{const}$.

Для снятия этой характеристики якорь генератора приводят во вращение вспомогательным устройством, например асинхронным двигателем. Цепь якоря размыкается. Ток в обмотке возбуждения изменяется от нуля до максимального значения и обратно до нуля. При увеличении тока получают восходящую ветвь характеристики; при уменьшении тока – нисходящую ветвь. Особое внимание следует обратить на наличие напряжения на зажимах обмотки якоря при равенстве нулю тока в обмотке возбуждения. Причиной появления напряжения является магнитный поток остаточной индукции, сохраняющийся в магнитной цепи машины от ее предыдущей работы.

Характеристика холостого хода есть средняя линия, проходящая по середине между ветвями петли гистерезиса. В режиме холостого хода напряжение генератора равно по величине его ЭДС.

Характеристика холостого хода позволяет судить о свойствах стали якоря и выбрать положение рабочей точки, соответствующей номинальному напряжению.

Внешняя характеристика - это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянстве сопротивления цепи возбуждения и частоты вращения якоря, т. е. $U_G = \xi(I)$ при $R_B = \text{const}$, $n = n_H = \text{const}$.

В режиме нагрузки напряжение генератора меньше его ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря

$$U_G = E_G - I_A R_A.$$

Внешняя характеристика генератора нелинейна. Причина нелинейности обусловлена воздействием магнитного потока обмотки якоря на магнитный поток обмотки возбуждения. Взаимодействие магнитных потоков приводит к

неравномерности насыщения полюсного наконечника главного полюса машины.

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном напряжении на зажимах генератора и частоты вращения якоря т. е.

$$I_B = \xi(I) \quad \text{при} \quad U_G = \text{const}, \quad n = n_H = \text{const}.$$

Характеристика показывает, как надо изменять ток в обмотке возбуждения для того, чтобы обеспечить постоянство напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки.

Характеристики генераторов других типов обычно рассматриваются в сравнении с характеристиками генератора с независимым способом возбуждения.

Необходимость дополнительного источника постоянного тока для генератора с независимым возбуждением привела к поиску других способов возбуждения. К ним относятся генераторы с параллельным, последовательным и смешанным способами возбуждения. Эта группа генераторов объединена общим признаком создания основного магнитного потока, называемого самовозбуждением.

Процесс самовозбуждения основан на явлении остаточного намагничивания ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь машины. При изготовлении генераторов главные полюса машины специально намагничивают постоянным током. Эта процедура обеспечивает наличие в машине небольшого остаточного магнитного потока, значение которого составляет 2...3 % от номинального значения основного потока. Рассмотрим суть процесса на примере генератора с параллельным способом возбуждения.

Самовозбуждение генератора осуществляется при отсутствии тока в цепи потребителя, т. е. в режиме холостого хода. В обмотке вращающегося якоря наводится остаточная ЭДС, которая и приложена к зажимам обмотки возбуждения. Под действием остаточной ЭДС в цепи обмотки возбуждения протекает ток, который создает дополнительный магнитный поток. Направление дополнительного потока должно совпадать по направлению с остаточным магнитным потоком машины, т. е. усиливать его. Увеличение суммарного магнитного потока приводит к возрастанию ЭДС в обмотке якоря, а следовательно, и напряжения на зажимах генератора. Процесс самовозбуждения заканчивается, когда падение напряжения в обмотке возбуждения становится равным ЭДС якоря.

По своему виду характеристика холостого хода и регулировочная характеристика у генератора с параллельным возбуждением не отличаются от аналогичных характеристик машины, работающей с независимым возбуждением.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением проходит ниже соответствующей характеристики генератора с независимым возбуждением. Это объясняется уменьшением тока возбуждения при снижении напряжения с ростом тока нагрузки. В номинальном режиме снижение напряжения составляет 10...15 % от номинального значения.

Генераторы последовательного возбуждения не нашли широкого применения по причине непостоянства выходного напряжения при изменении тока нагрузки. По этой причине их характеристики в данном курсе не рассматриваются.

Генераторы смешанного возбуждения применяют в установках небольшой мощности, где желательно избежать значительного изменения напряжения при отключениях или подключениях отдельных потребителей. Две обмотки возбуждения такого генератора соединяют так, чтобы их магнитные потоки складывались. Путем соответствующего подбора числа витков последовательной обмотки можно скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и от действия реакции якоря и обеспечить необходимое напряжение в определенных пределах изменения тока нагрузки.

15.4. Двигатели постоянного тока

Если цепи обмотки якоря и возбуждения машины постоянного тока подключены к источнику постоянного напряжения, то под действием последнего в этих цепях протекают токи, возбуждающие соответствующие магнитные потоки. В результате взаимодействия, магнитных потоков создается вращающий момент, под действием которого якорь начнет вращаться. В этом случае машина будет работать в режиме двигателя, т. е. преобразовывать электрическую энергию в механическую.

При вращении якоря в его обмотке будет индуцироваться ЭДС. Направление ЭДС, определяемое правилом правой руки, противоположно направлению тока в обмотке якоря. Поэтому она называется противоэлектродвижущей силой, а ее роль в двигателе постоянного тока сводится к ограничению тока в цепи обмотки якоря. Численно значение силы тока в цепи якоря можно вычислить по формуле

$$I_{\text{Я}} = (U_{\text{Д}} - E_{\text{Я}}) / R_{\text{Я}}.$$

Рассмотрим возможные способы пуска двигателя в ход.

15.5. Пуск двигателей постоянного тока

Наиболее распространенными являются следующие способы пуска двигателей постоянного тока: прямой, при котором обмотка якоря непосредственно подключается к источнику постоянного напряжения; реостатный с помощью пускового реостата, который включается в цепь якоря, а также пуск при пониженном напряжении, подводимом к якорю.

В двигателях постоянного тока падение напряжения в цепи якоря обычно не превышает 5...10 % от номинального напряжения. Поэтому при прямом пуске ток в якоре превышает номинальное значение в 10...15 раз. Подобное увеличение силы тока недопустимо ни для сети, питающей двигатель, ни для коллектора и обмотки, ни для рабочего механизма, с которым соединен вал якоря. По этой причине прямой пуск применяется для двигателей, мощность которых не превышает 1 кВт.

Наибольшее распространение получил реостатный пуск. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат. Сопротивление пускового реостата рассчитывают из условия, чтобы пусковой ток не превышал 2-2,5 номинального значения.

Следует помнить, что пусковой реостат предназначен для кратковременной работы. Поэтому по мере увеличения частоты вращения якоря сопротивление пускового реостата уменьшают. На крышке пускового реостата имеется указатель двух предельных режимов. Этим режимам соответствуют надписи "СТОП" и "ХОД".

Надпись "СТОП" соответствует размыканию цепи обмотки якоря, что делает невозможным пуск двигателя.

Надпись "ХОД" соответствует нулевому сопротивлению пускового реостата. В процессе пуска ручка пускового реостата плавно переводится из положения "СТОП" в положение "ХОД".

Пуск происходит быстро и легко, если двигатель развивает пусковой момент, превышающий момент сопротивления на валу. Поэтому пуск производят при максимальном магнитном потоке. С этой целью перед пуском двигателя сопротивление в цепи обмотки возбуждения рекомендуется полностью вывести.

Ограничение пускового тока достигается также в случае пуска при пониженном напряжении, подводимом к якору двигателя от источника с регулируемым напряжением.

15.6. Механическая характеристика двигателя постоянного тока и способы регулирования его частоты вращения

Зависимость установившейся частоты вращения якоря от момента на валу двигателя при постоянном напряжении и сопротивлении цепи якоря называется механической характеристикой двигателя. Для получения уравнения механической характеристики запишем выражение второго закона Кирхгофа для цепи якоря:

$$U_d = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

где $E_{\text{я}} = C_e n \Phi$ - ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря.

С учетом ее значения уравнение, записанное относительно частоты вращения, примет вид

$$n = (U_d - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / C_e \Phi.$$

Из уравнения следует, что регулировать частоту вращения двигателя можно тремя способами:

- 1) включением дополнительного сопротивления $R_{\text{доп}}$ в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование);
- 2) изменением магнитного потока Φ (полюсное регулирование);
- 3) изменением питающего напряжения U_d (якорное регулирование).

Рассмотрим эти способы регулирования на примере двигателей постоянного тока с параллельным и независимым способами возбуждения (как получивших наибольшее распространение) при постоянном моменте нагрузки на валу.

При отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря ($R_{\text{доп}} = 0$) и номинальных значениях магнитного потока обмотки возбуждения и напряжения механическая характеристика имеет вид прямой линии, наклоненной к оси абсцисс. Такая механическая характеристика называется естественной. Это очень пологая прямая. Уменьшение частоты вращения не превышает 6...7 % от номинального значения и обусловлено, главным образом, наличием внутреннего сопротивления обмотки якоря.

Включение дополнительного сопротивления в цепь якоря позволяет получить семейство искусственных механических характеристик. Все эти характеристики расположены ниже естественной.

Реостатный способ регулирования находит широкое применение, так как позволяет получить любую пониженную частоту вращения при заданном моменте нагрузки на валу.

К недостаткам данного способа относятся:

- 1) трудность поддержания частоты вращения при изменении момента нагрузки;
- 2) дополнительные потери мощности на регулировочном реостате, включенном в цепь обмотки якоря.

Изменение сопротивления в цепи обмотки возбуждения (полюсное регулирование) позволяет варьировать частоту вращения двигателя обратно пропорционально величине магнитного потока. Это обстоятельство следует иметь в виду, не допуская чрезмерного уменьшения тока в обмотке возбуждения.

Одним из преимуществ полюсного регулирования является его экономичность, так как ток возбуждения в рассматриваемых двигателях не превышает 10 % от номинального значения тока якоря. Другим преимуществом этого способа является достаточно жесткие механические характеристики, т. е. изменение частоты вращения, не превышающее 5 % номинального значения во всем диапазоне работы двигателя.

Недостатком полюсного регулирования является то, что изменение магнитного потока можно производить лишь в области, расположенной ниже естественной механической характеристики, тогда как чаще требуется понижение частоты вращения.

Якорное регулирование за счет изменения величины подводимого напряжения применяется, главным образом, в двигателях с независимым возбуждением. Пусковой реостат в этом случае не требуется, так как пуск начинается при пониженном напряжении, которое можно плавно повысить.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление тока в обмотке возбуждения или полярность приложенного напряжения. Одновременное изменение двух указанных параметров не изменяет направление вращения якоря.

15.7. Пример решения задачи

Пример 15.1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения типа 2П0132МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные: $U_H = 200$ В, $I_H = 40$ А, $n_H = 1000$ об/мин, $\eta_H = 0,85$. Сопротивления цепей: якоря $R_H = 0,35$ Ом, возбуждения $R_B = 123$ Ом.

Выполнить расчет сопротивления пускового реостата, ограничивающего ток двигателя на уровне $2I_{яH}$, и механической характеристики двигателя при изменении тока якоря от 0,25 до 1,25 номинального значения.

Решение

Условное обозначение двигателя постоянного тока с параллельным способом возбуждения приведено на рис. 15.3.

По условию задачи значение тока, потребляемого от питающей сети, известно.

Определим токи в цепях возбуждения и якоря двигателя.

Ток в цепи обмотки возбуждения определяется по закону Ома:

$$I_B = U_H / R_B = 200/123 = 1,6 \text{ А.}$$

Ток цепи якоря определяется по уравнению первого закона Кирхгофа:

$$I_{яH} = I_H - I_B = 40 - 1,62 = 38,38 \text{ А.}$$

Сопротивление пускового реостата, включаемого в цепь якоря, с целью ограничения тока в момент пуска двигателя вычисляется по формуле

$$R_{\Pi} = (U_H / 2I_{яH}) - R_{я} = (200 / 2 \cdot 38,38) - 0,35 = 2,25 \text{ Ом.}$$

Для расчета механической характеристики двигателя необходимо определить механическую мощность, частоту вращения якоря и потери, имеющие место в двигателе при различных значениях тока якоря. Принимая кратности тока (K) якоря равными 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 и 1,25, выполним расчет требуемых параметров по приведенным ниже формулам.

Токи в цепях двигателя

$$I_{я} = KI_{яH}; \quad I = I_{я} + I_B,$$

где $I_B = 1,62$ А.

Электрическая мощность (Вт), потребляемая двигателем от сети

$$P_1 = U_H I.$$

Потери мощности в обмотках двигателя (Вт):

а) в цепи якоря $\Delta P_{я} = I_{я}^2 R_{я}.$

б) в цепи обмотки возбуждения $\Delta P_B = U_B I_B,$

Механические и магнитные потери двигателя (Вт):

$$\Delta P_O = P_{1H} (1 - \eta_H) - (\Delta P_{ЯH} + \Delta P_B) .$$

Эти потери являются постоянными, так как не зависят от тока.

Сумма всех потерь (Вт):

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Я} + \Delta P_B + \Delta P_O .$$

Механическая мощность двигателя (Вт):

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P .$$

Частота вращения якоря (об/мин):

$$n = n_H (U_H - I_{Я} R_{Я}) / (U_H - I_{ЯH} R_{Я}) ,$$

Вращающий момент, на валу двигателя:

$$M_2 = 9,55 P_2 / n .$$

Результаты расчета по приведенным выше формулам представлены в виде табл. 15.1.

Таблица 15.1

$I_{Я}$	I	P_1	$\Delta P_{Я}$	ΔP_B	ΔP_O	P_2	n	M
А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	об/мин	Н·м
10	11,62	2324	35	324	360	1605	1053	11,56
20	21,62	4324	140	324	360	3500	1034	32,33
30	31,62	6324	315	324	360	5325	1015	50,10
40	41,62	8324	560	324	360	7080	997	67,82
50	51,62	10324	875	324	360	8765	978	85,59

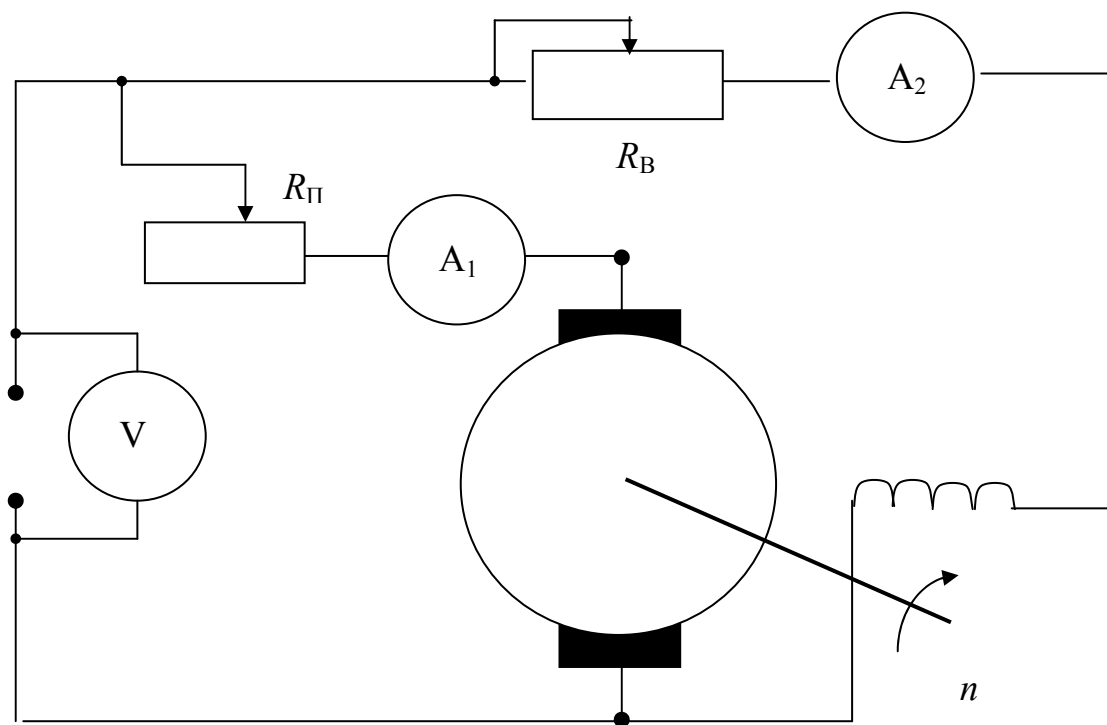


Рис. 15.3. Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Механическая мощность двигателя (Вт):

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P.$$

Частота вращения якоря (об/мин):

$$n = n_H (U_H - I_{Я} R_{Я}) / (U_H - I_{ЯH} R_{Я}).$$

Вращающий момент на валу двигателя

$$M_2 = 9,55 P_2 / n.$$

Вопросы для самопроверки

1. Каковы конструктивные особенности машин постоянного тока (МПТ)?
2. Перечислите классификацию машин по способу возбуждения.
3. Укажите характеристики МПТ и какие параметры машины можно по ним определить?
4. Укажите, в каких случаях применяют генератор с той или иной схемой возбуждения?
5. Как выполняют пуск МПТ?
6. Как регулируют скорость МПТ?
7. Укажите недостатки и достоинства различных способов регулирования.

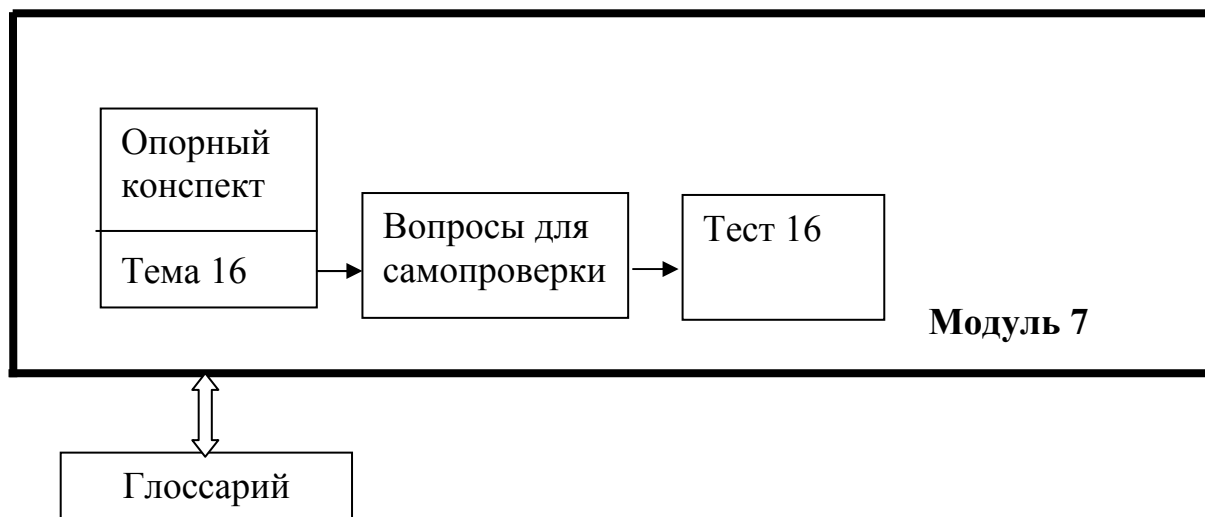
8. Укажите порядок расчета механической характеристики МПТ с параллельной схемой возбуждения.

9. Какие потери мощности уменьшают КПД двигателя?

10. Нарисуйте электрическую схему подключения МПТ с последовательным возбуждением к сети.

РАЗДЕЛ 7. Электрические измерения и приборы

Схема работы с разделом 7



Специальность	Часы	Номера Тем	Номера параграфов	Номера задач	Номера тестов
1	2	3	4	5	6
240401.65	52	16	16.1...16.3	-	-
240301.65	52	16	16.1...16.3	-	-
190701.65	72	16	16.1...16.3	-	-
261001.65	70	16	16.1...16.3	-	-
280202.65	71	16	16.1...16.3	-	-
190701.65	72	16	16.1...16.3	-	-
140101.65	80	16	16.1...16.4	-	7. 16
140104.65	90	16	16.1...16.4	-	7. 16
150104.65	100	16	16.1...16.4	-	7. 16
190205.65	100	16	16.1...16.4	-	7. 16
190601.65	100	16	16.1...16.4	-	7. 16
151001.61	119	16	16.1...16.4	-	7. 16
151001.65	119	16	16.1...16.4	-	7. 16

150202.65	120	16	16.1...16.4	-	7. 16
220100.62	136	16	16.1...16.4	-	7. 16
200102.65	140	16	16.1...16.4	-	7. 16
200102.65	140	16	16.1...16.4	-	7. 16
150501.65	142	16	16.1...16.4	-	7. 16
230101.65	150	16	16.1...16.4	-	7. 16
200402.65	150	16	16.1...16.4	-	7. 16
200501.65	170	16	16.1...16.4	-	7. 16
210201.65	170	16	16.1...16.4	-	7. 16

16. Электрические измерения и приборы

16.1. Общие сведения об электрических измерениях

Измерения играют огромную роль в научных исследованиях, промышленности, в сельском хозяйстве, медицине, транспорте и т. д. Измерения относятся к познавательной деятельности человека, результатом измерения являются не вещи, а знания (информация) об их свойствах.

Научное изучение законов природы всегда связано с экспериментами, проведение которых невозможно без измерительной аппаратуры. Современные промышленные предприятия оснащены большим числом измерительных приборов, служащих для контроля работы производственных машин и установок, регулирования производственных процессов, измерения технических параметров состава и свойств веществ при контроле продукции. В нашей стране имеется первоклассная электроприборостроительная промышленность, выпускающая около 900 типов различных по назначению и принципу действия электроизмерительных приборов. В настоящее время электроизмерительные приборы используются не только для измерения электрических величин (тока, напряжения, сопротивления, фазы и т. д.), но вместе с преобразователями (датчиками) применяются для измерения почти всех физических величин (температуры, механических напряжений, освещенности поверхности и т. д.).

Измерения производятся с помощью различных средств – измерительных приборов, схем и специальных устройств. Тип измерительного прибора зависит от вида и размера (диапазона значений) измеряемой величины, а также от требуемой точности измерения. В электрических измерениях используются основные единицы системы СИ: вольт (В), ом (Ом), фарада (Ф), генри (Г), ампер (А) и секунда (с).

16.2. Эталоны единиц электрических величин

Электрическое измерение – это нахождение (экспериментальными методами) значения физической величины, выраженного в соответствующих единицах (например, 3 А, 4 В). Значения единиц электрических величин определяются международным соглашением в соответствии с законами физики и единицами механических величин. Поскольку «поддержание» единиц электрических величин, определяемых международными соглашениями, сопряжено с трудностями, их представляют «практическими» эталонами единиц электрических величин. Такие эталоны поддерживаются государственными метрологическими лабораториями разных стран. Например, в США юридическую ответственность за поддержание эталонов единиц электрических величин несет Национальный институт стандартов и технологии. Время от времени проводятся эксперименты по уточнению соответствия между значениями эталонов единиц электрических величин и определениями этих единиц.

1990 государственных метрологических лабораторий промышленно развитых стран подписали соглашение о согласовании всех практических эталонов единиц электрических величин между собой и с международными определениями единиц этих величин.

Электрические измерения проводятся в соответствии с государственными эталонами единиц напряжения и постоянного тока, сопротивления постоянному току, индуктивности и емкости. Такие эталоны представляют собой устройства, имеющие стабильные электрические характеристики, или установки, в которых на основе некоего физического явления воспроизводится электрическая величина, вычисляемая по известным значениям фундаментальных физических констант. Эталоны ватта и ватт-часа не поддерживаются, так как более целесообразно вычислять значения этих единиц по определяющим уравнениям, связывающим их с единицами других величин.

16.3. Измерительные приборы

Электроизмерительные приборы чаще всего измеряют мгновенные значения либо электрических величин, либо неэлектрических, преобразованных в электрические. Все приборы делятся на аналоговые и цифровые. Первые обычно показывают значение измеряемой величины посредством стрелки, перемещающейся по шкале с делениями. Вторые снабжены цифровым дисплеем, ко-

торый показывает измеренное значение величины в виде числа. Цифровые приборы в большинстве измерений более предпочтительны, так как они более точны, более удобны при снятии показаний и, в целом, более универсальны.

Цифровые универсальные измерительные приборы («мультиметры») и цифровые вольтметры применяются для измерения со средней и высокой точностью сопротивления постоянному току, а также напряжения и силы переменного тока. Аналоговые приборы постепенно вытесняются цифровыми, хотя они еще находят применение там, где важна низкая стоимость и не нужна высокая точность. Для самых точных измерений сопротивления и полного сопротивления (импеданса) существуют измерительные мосты и другие специализированные измерители.

Для регистрации хода изменения измеряемой величины во времени применяются регистрирующие приборы – ленточные самописцы и электронные осциллографы, аналоговые и цифровые.

16.3.1. Цифровые приборы

Во всех цифровых измерительных приборах (кроме простейших) используются усилители и другие электронные блоки для преобразования входного сигнала в сигнал напряжения, который затем преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Число, выражающее измеренное значение, выводится на светодиодный (СИД), вакуумный люминесцентный или жидкокристаллический (ЖК) индикатор (дисплей). Прибор обычно работает под управлением встроенного микропроцессора, причем в простых приборах микропроцессор объединяется с АЦП на одной интегральной схеме.

Цифровые приборы хорошо подходят для работы с подключением к внешнему компьютеру. В некоторых видах измерений такой компьютер переключает измерительные функции прибора и дает команды передачи данных для их обработки.

Аналого-цифровые преобразователи. Существуют три основных типа АЦП: интегрирующий, последовательного приближения и параллельный. Интегрирующий АЦП усредняет входной сигнал по времени. Из трех перечисленных типов это самый точный, хотя и самый «медленный». Время преобразования интегрирующего АЦП лежит в диапазоне от 0,001 до 50 с и более, погрешность составляет 0,1–0,0003 %. Погрешность АЦП последовательного приближения несколько больше (0,4–0,002 %), но зато время преобразования – от ~10 мкс до ~1 мс. Параллельные АЦП – самые быстродействующие, но и наи-

менее точные: их время преобразования порядка 0,25 нс, погрешность – от 0,4 до 2 %.

Методы дискретизации. Сигнал дискретизируется по времени путем быстрого измерения его в отдельные моменты времени и удержания (сохранения) измеренных значений на время преобразования их в цифровую форму. Последовательность полученных дискретных значений может выводиться на дисплей в виде кривой, имеющей форму сигнала; возводя эти значения в квадрат и суммируя, можно вычислять среднеквадратическое значение сигнала; их можно использовать также для вычисления времени нарастания, максимального значения, среднего по времени, частотного спектра и т. д. Дискретизация по времени может производиться либо за один период сигнала («в реальном времени») либо (с последовательной или произвольной выборкой) за ряд повторяющихся периодов.

Цифровые вольтметры и мультиметры. Цифровые вольтметры и мультиметры измеряют квазистатическое значение величины и указывают его в цифровой форме. Вольтметры непосредственно измеряют только напряжение, обычно постоянного тока, а мультиметры могут измерять напряжение постоянного и переменного тока, силу тока, сопротивление постоянному току и иногда температуру. Эти самые распространенные контрольно-измерительные приборы общего назначения с погрешностью измерения от 0,2 до 0,001 % могут иметь 3,5- или 4,5-значный цифровой дисплей. «Полуцелый» знак (разряд) – это условное указание на то, что дисплей может показывать числа, выходящие за пределы номинального числа знаков. Например, 3,5-значный (3,5-разрядный) дисплей в диапазоне 1–2 В может показывать напряжение до 1,999 В.

Измерители полных сопротивлений. Это специализированные приборы, измеряющие и показывающие емкость конденсатора, сопротивление резистора, индуктивность катушки индуктивности или полное сопротивление (импеданс) соединения конденсатора или катушки индуктивности с резистором. Имеются приборы такого типа для измерения емкости от 0,00001 пФ до 99,999 мкФ, сопротивления от 0,00001 Ом до 99,999 кОм и индуктивности от 0,0001 мГ до 99,999 Г. Измерения могут проводиться на частотах от 5 Гц до 100 МГц, хотя ни один прибор не перекрывает всего диапазона частот. На частотах, близких к 1 кГц, погрешность может составлять лишь 0,02 %, но точность снижается вблизи границ диапазонов частоты и измеряемых значений. Большинство приборов могут показывать также производные величины такие, как добротность катушки или коэффициент потерь конденсатора, вычисляемые по основным измеренным значениям.

16.3.2. Аналоговые приборы

Для измерения напряжения, силы тока и сопротивления на постоянном токе применяются аналоговые магнитоэлектрические приборы с постоянным магнитом и многовитковой подвижной частью. Такие приборы стрелочного типа характеризуются погрешностью от 0,5 до 5 %. Они просты и недороги (пример – автомобильные приборы, показывающие ток и температуру), но не применяются там, где требуется сколько-нибудь значительная точность.

Магнитоэлектрические приборы. В таких приборах используется сила взаимодействия магнитного поля с током в витках обмотки подвижной части, стремящаяся повернуть последнюю.

Момент этой силы уравнивается моментом, создаваемым противодействующей пружиной, так что каждому значению тока соответствует определенное положение стрелки на шкале. Подвижная часть имеет форму многовитковой проволочной рамки с размерами от $3 \div 5$ до $25 \div 35$ мм и делается как можно более легкой. Подвижная часть, установленная на каменных подшипниках или подвешенная на металлической ленточке, помещается между полюсами сильного постоянного магнита. Две спиральные пружинки, уравнивающие крутящий момент, служат также токопроводами обмотки подвижной части.

Магнитоэлектрический прибор реагирует на ток, проходящий по обмотке его подвижной части, а потому представляет собой амперметр, или точнее миллиамперметр (так как верхний предел диапазона измерений не превышает примерно 50 мА). Его можно приспособить для измерения токов большей силы, присоединив параллельно обмотке подвижной части шунтирующий резистор с малым сопротивлением, чтобы в обмотку подвижной части ответвлялась лишь малая доля полного измеряемого тока.

Такое устройство пригодно для токов, измеряемых многими тысячами ампер. Если последовательно с обмоткой присоединить добавочный резистор, то прибор превратится в вольтметр. Падение напряжения на таком последовательном соединении равно произведению сопротивления резистора на ток, показываемый прибором, так что его шкалу можно проградуировать в вольтах. Чтобы сделать из магнитоэлектрического миллиамперметра омметр, нужно присоединять к нему последовательно измеряемые резисторы и подавать на это последовательное соединение постоянное напряжение, например, от батареи питания. Ток в такой схеме не будет пропорционален сопротивлению, а потому необходима специальная шкала, корректирующая нелинейность. Тогда можно

будет производить по шкале прямой отсчет сопротивления, хотя и с не очень высокой точностью.

Гальванометры. К магнитоэлектрическим приборам относятся и гальванометры – высокочувствительные приборы для измерения крайне малых токов. В гальванометрах нет подшипников, их подвижная часть подвешена на тонкой ленточке или нити, используется более сильное магнитное поле, а стрелка заменена зеркальцем, приклеенным к нити подвеса. Зеркальце поворачивается вместе с подвижной частью, а угол его поворота оценивается по смещению отбрасываемого им светового зайчика на шкале, установленной на расстоянии около 1 м. Самые чувствительные гальванометры способны давать отклонение по шкале, равное 1 мм, при изменении тока всего лишь на 0,00001 мкА.

Шкала стрелочного измерительного прибора аналогового типа

К главным атрибутам любого шкального средства измерения относятся:

1. А - обозначение типа прибора (амперметр);
2. 5 - обозначение класса точности ($\gamma = 5 \%$);
3. Знак катушки с сердечником – обозначение типа измерительного механизма (электромагнитный);
4. Знак волны ($\sim$) - обозначение рода измеряемого тока (прибор предназначен для измерения переменного тока);
5. Знак перпендикуляра ($\perp$) - обозначение одного из условий эксплуатации (механический баланс подвижных деталей прибора рассчитан на вертикальное положение);
6. Точка ($\bullet$) вблизи начала шкалы - обозначение запретной для измерений области в начале шкалы.

16.3.3. Регистрирующие приборы

Регистрирующие приборы записывают «историю» изменения значения измеряемой величины. К таким приборам наиболее распространенных типов относятся ленточные самописцы, записывающие пером кривую изменения величины на диаграммной бумажной ленте, аналоговые электронные осциллографы, развертывающие кривую процесса на экране электронно-лучевой трубки, и цифровые осциллографы, запоминаящие однократные или редко повторяющиеся сигналы. Основное различие между этими приборами – в скорости записи. Ленточные самописцы с их движущимися механическими частями наиболее подходят для регистрации сигналов, изменяющихся за секунды, минуты и еще медленнее. Электронные осциллографы же способны регистрировать

сигналы, изменяющиеся за время от миллионных долей секунды до нескольких секунд.

16.3.4. Измерительные мосты

Измерительный мост – это обычно четырехплечая электрическая цепь, составленная из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, предназначенная для определения отношения параметров этих компонентов. К одной паре противоположных полюсов цепи подключается источник питания, а к другой – нуль-детектор. Измерительные мосты применяются только в тех случаях, когда требуется наивысшая точность измерения. (Для измерений со средней точностью лучше пользоваться цифровыми приборами, поскольку они проще в обращении). Наилучшие трансформаторные измерительные мосты переменного тока характеризуются погрешностью (измерения отношения) порядка 0,0000001 %. Простейший мост для измерения сопротивления носит имя своего изобретателя Ч. Уитстона.

Двойной измерительный мост постоянного тока. К резистору трудно подсоединить медные провода, не привнеся при этом сопротивления контактов порядка 0,0001 Ом и более. В случае сопротивления 1 Ом такой токоподвод вносит ошибку порядка всего лишь 0,01 %, но для сопротивления 0,001 Ом ошибка будет составлять 10 %. Двойной измерительный мост (мост Томсона) предназначен для измерения сопротивления эталонных резисторов малого номинала. При такой методике сопротивление присоединительных проводов не вносит ошибки в результат измерения искомого сопротивления.

Измерительные мосты переменного тока. Наиболее распространенные измерительные мосты переменного тока рассчитаны на измерения либо на сетевой частоте 50–60 Гц, либо на звуковых частотах (обычно вблизи 1000 Гц); специализированные же измерительные мосты работают на частотах до 100 МГц. Как правило, в измерительных мостах переменного тока вместо двух плеч, точно задающих отношение напряжений, используется трансформатор. К исключениям из этого правила относится измерительный мост Максвелла – Вина.

Измерительный мост Максвелла – Вина. Такой измерительный мост позволяет сравнивать эталоны индуктивности (L) с эталонами емкости на неизвестной точно рабочей частоте. Эталоны емкости применяются в измерениях высокой точности, поскольку они конструктивно проще прецизионных эталонов индуктивности, более компактны, их легче экранировать, и они практически не создают внешних электромагнитных полей.

Мост уравнивается даже в случае «нечистого» источника питания (т. е. источника сигнала, содержащего гармоники основной частоты), если величина L_x не зависит от частоты.

Трансформаторный измерительный мост. Одно из преимуществ измерительных мостов переменного тока – простота задания точного отношения напряжений посредством трансформатора. В отличие от делителей напряжения, построенных из резисторов, конденсаторов или катушек индуктивности, трансформаторы в течение длительного времени сохраняют постоянным установленное отношение напряжений и редко требуют повторной калибровки.

К недостаткам трансформаторного измерительного моста можно отнести то, что отношение, задаваемое трансформатором, в какой-то степени зависит от частоты сигнала. Это приводит к необходимости проектировать трансформаторные измерительные мосты лишь для ограниченных частотных диапазонов, в которых гарантируется паспортная точность.

Заземление и экранирование. Измерительные мосты необходимо тщательно заземлять и экранировать, чтобы паразитные емкости между разными частями схемы моста не вносили ошибку уравнивания.

Типичные нуль-детекторы. В измерительных мостах переменного тока чаще всего применяются нуль-детекторы двух типов. Нуль-детектор одного из них представляет собой резонансный усилитель с аналоговым выходным прибором, показывающим уровень сигнала. Нуль-детектор другого типа – это фазочувствительный детектор, который разделяет сигнал разбаланса на активную и реактивную составляющие и пригоден в тех случаях, когда требуется точно уравнивать только одну из неизвестных составляющих (скажем, индуктивность L , но не сопротивление R катушки индуктивности).

16.4. Измерение напряжения переменного тока

В случае изменяющихся во времени сигналов переменного тока обычно требуется измерять некоторые их характеристики, связанные с мгновенными значениями сигнала.

Чаще всего желательно знать среднеквадратические (действующие) значения электрических величин переменного тока, поскольку мощности нагрева при напряжении 1 В постоянного тока соответствует мощность нагрева при напряжении 1 В действующего значения.

Наряду с этим могут представлять интерес и другие величины, например максимальное или среднее абсолютное значение. Среднеквадратическое (дей-

ствующее) значение напряжения или переменного тока определяется как корень квадратный из усредненного по времени квадрата напряжения (или тока):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} u^2(t) dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) dt},$$

где T – период напряжения (тока). При синусоидальной форме колебаний $U = 0,707 U_m$, где U_m – амплитуда (максимальное значение) напряжения аналогично для тока.

Измерение переменного напряжения и тока. Почти все приборы для измерения напряжения и тока показывают значение, которое предлагается рассматривать как действующее значение входного сигнала. Однако в дешевых приборах зачастую на самом деле измеряется среднее абсолютное или максимальное значение сигнала, а шкала градуируется так, чтобы показание соответствовало эквивалентному действующему значению в предположении, что входной сигнал имеет синусоидальную форму. Не следует упускать из виду, что точность таких приборов крайне низка, если сигнал несинусоидален. Приборы, способные измерять истинное действующее значение сигналов переменного тока, могут быть основаны на одном из трех принципов: электронного умножения, дискретизации сигнала или теплового преобразования. Приборы, основанные на первых двух принципах, как правило, реагируют на напряжение, а тепловые электроизмерительные приборы – на ток. При использовании добавочных и шунтовых резисторов всеми приборами можно измерять как ток, так и напряжение.

Электронное умножение. Возведение в квадрат и усреднение по времени входного сигнала в некотором приближении осуществляются электронными схемами с усилителями и нелинейными элементами для выполнения таких математических операций, как нахождение логарифма и антилогарифма аналоговых сигналов. Приборы такого типа могут иметь погрешность порядка всего лишь 0,009 %.

Дискретизация сигнала. Сигнал переменного тока преобразуется в цифровую форму с помощью быстродействующего АЦП. Дискретизированные значения сигнала возводятся в квадрат, суммируются и делятся на число дискретных значений в одном периоде сигнала. Погрешность таких приборов составляет 0,01–0,1 %.

Тепловые электроизмерительные приборы. Наивысшую точность измерения действующих значений напряжения и тока обеспечивают тепловые элек-

троизмерительные приборы. В них используется тепловой преобразователь тока в виде небольшого откачанного стеклянного баллончика с нагревательной проволокой (длиной 0,5–1 см), к средней части которой крохотной бусинкой прикреплен горячий спай термопары. Бусинка обеспечивает тепловой контакт и одновременно электроизоляцию. При повышении температуры, прямо связанном с действующим значением тока в нагревательной проволочке, на выходе термопары возникает термоЭДС (напряжение постоянного тока). Такие преобразователи пригодны для измерения переменного тока с частотой от 20 Гц до 10 МГц.

С помощью добавочного резистора описанный измеритель тока можно превратить в вольтметр. Поскольку тепловые электроизмерительные приборы непосредственно измеряют токи лишь от 2 до 500 мА, для измерения токов большей силы необходимы резисторные шунты.

Измерение мощности и энергии переменного тока. Мощность, потребляемая нагрузкой в цепи переменного тока, равна среднему по времени произведению мгновенных значений напряжения и тока нагрузки. Если напряжение и ток изменяются синусоидально (как это обычно и бывает), то мощность P можно представить в виде $P = UI \cos\varphi$, где U и I – действующие значения напряжения и тока, а φ – фазовый угол (угол сдвига) синусоид напряжения и тока.

Если напряжение выражается в вольтах, а ток в амперах, то мощность будет выражена в ваттах. Множитель $\cos\varphi$, называемый коэффициентом мощности, характеризует степень синхронности колебаний напряжения и тока.

С экономической точки зрения, самая важная электрическая величина – энергия. Энергия W определяется произведением мощности на время ее потребления. В математической форме это записывается так:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} u i dt.$$

Если время ($t_1 - t_2$) измеряется в секундах, напряжение u – в вольтах, а ток i – в амперах, то энергия W будет выражена в ватт-секундах, т.е. джоулях (1 Дж = 1 Вт.с). Если же время измеряется в часах, то энергия – в ватт-часах. На практике электроэнергию удобнее выражать в киловатт-часах (1 кВт.ч = 1000 Вт.ч).

Счетчики электроэнергии с разделением времени. В счетчиках электроэнергии с разделением времени используется весьма своеобразный, но точный метод измерения электрической мощности. Такой прибор имеет два канала. Один канал представляет собой электронный ключ, который пропускает или не пропускает входной сигнал Y (или обращенный входной сигнал $-Y$) на фильтр

нижних частот. Состоянием ключа управляет выходной сигнал второго канала с отношением временных интервалов «закрыто»/«открыто», пропорциональным его входному сигналу. Средний сигнал на выходе фильтра равен среднему по времени произведению двух входных сигналов. Если один входной сигнал пропорционален напряжению на нагрузке, а другой – току нагрузки, то выходное напряжение пропорционально мощности, потребляемой нагрузкой. Погрешность таких счетчиков промышленного изготовления составляет 0,02% на частотах до 3 кГц (лабораторных – порядка всего лишь 0,0001% при 60 Гц). Как приборы высокой точности они применяются в качестве образцовых счетчиков для поверки рабочих средств измерения.

Дискретизирующие ваттметры и счетчики электроэнергии. Такие приборы основаны на принципе цифрового вольтметра, но имеют два входных канала, дискретизирующих параллельно сигналы тока и напряжения. Каждое дискретное значение $u(k)$, представляющее мгновенные значения напряжения в момент дискретизации, умножается на соответствующее дискретное значение $i(k)$ тока, полученное в тот же момент времени. Среднее по времени таких произведений есть мощность в ваттах:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} u(k)i(k).$$

Сумматор, накапливающий произведения дискретных значений с течением времени, дает полную электроэнергию в ватт-часах. Погрешность счетчиков электроэнергии может составлять всего лишь 0,01 %.

Индукционные счетчики электроэнергии. Индукционный счетчик представляет собой не что иное, как маломощный электродвигатель переменного тока с двумя обмотками – токовой и обмоткой напряжения. Проводящий диск, помещенный между обмотками, вращается под действием крутящего момента, пропорционального потребляемой мощности. Этот момент уравнивается токами, наводимыми в диске постоянным магнитом, так что частота вращения диска пропорциональна потребляемой мощности. Число оборотов диска за то или иное время пропорционально полной электроэнергии, полученной за это время потребителем. Число оборотов диска считает механический счетчик, который показывает электроэнергию в киловатт-часах. Приборы такого типа широко применяются в качестве бытовых счетчиков электроэнергии. Их погрешность, как правило, составляет 0,5 %; они отличаются большим сроком службы при любых допустимых уровнях тока.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите эталоны электрических величин.
2. На какие два вида делятся измерительные приборы?
3. Чем отличаются аналоговые измерительные приборы от цифровых измерительных приборов?
4. Какие основные блоки входят в состав цифровых приборов?
5. Укажите достоинства и недостатки цифровых и аналоговых измерительных приборов.
6. В каких случаях используются измерительные мосты?
7. Перечислите типы измерительных мостов.
8. Какими способами измеряют действующие значения напряжений и токов?
9. Какие принципы используют для измерения мощности и энергии переменного тока?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучив дисциплину «Электротехника и электроника. Ч. 1», студент обеспечивает себе базовую инженерную подготовку для изучения последующих технических дисциплин, для которых требуется знание методов расчета и анализа электрических цепей и электрооборудования. Кроме этого, дисциплина электротехника помогает закрепить основные разделы математики и физики, которые также необходимы для изучения специальных дисциплин.

Следует отметить, что практически все современное производство не обходится без электроэнергетики, методов электроизмерений, электрооборудования и различных электротехнических систем. Поэтому от современного инженера требуется знание основ электротехники и дальнейшее их углубление. Эта задача будет выполнена, если будут пройдены все этапы подготовки по изучению дисциплины.

ГЛОССАРИЙ

Термин	Что обозначает
Амплитуда	Наибольшее значение A , которого достигает величина s , совершающая гармонические колебания по закону $s = A \sin(\omega t + \psi_0)$
Асинхронная машина	Электрическая машина переменного тока, у которой угловая скорость ротора не совпадает с угловой скоростью магнитного поля, создаваемого переменным током (обычно 3 - фазным), протекающим по обмоткам статора
Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором	Асинхронная машина, у которой обмотка ротора выполнена короткозамкнутой
Асинхронный двигатель	Электрическая машина, работающая в двигательном режиме
Асинхронный двигатель с фазным ротором	Асинхронный двигатель, у которого обмотка ротора выполнена по типу обмотки статора и снабжена вводным устройством (в виде контактных колец) для присоединения к внешней цепи
Векторная диаграмма	Графическое изображение в виде векторов синусоидально изменяющихся электрических величин
Взаимная индуктивность	Количественная характеристика M_{21} связи между магнитным потоком Φ_{21} через некоторую электрическую цепь, создаваемым током I другой цепи; $M_{21} = \Phi_{21} / I$ ($M_{21} = M_{12}$). Ед. измерения – Гн
Взаимная индукция	Явление возбуждения ЭДС в одной электрической цепи при изменении тока в другой цепи
Вольтамперная характеристика элемента электрической цепи	Зависимость напряжения на зажимах элемента электрической цепи от тока
Второй закон коммутации	Напряжение на емкостном элементе в начальный момент времени после коммутации имеет то же самое значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения оно начинает плавно изменяться
Двигатель электрический (электродвигатель)	Электрическая машина, преобразующая электрическую энергию в механическую. По роду тока двигатели подразделяют на двигатели постоянного тока и двигатели переменного тока
Двухполюсник	Многополюсник, имеющий только две точки подсоединения. Различают Д. активные, содержащие источники электрической энергии, и пассивные, не содержащие их
Действующее значение	Среднеквадратическое за период значение периодической величины (тока, напряжения, ЭДС и т. д). Например, для тока $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt}$. для синусоидально изменяющихся величин действующее значение в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного
Емкость электрическая (Э.е.)	Электрическая характеристика проводника или системы проводников. Э.е. уединенного проводника равна $C = Q / \varphi$, где Q и φ – заряд и потенциал проводника. Э.е. конденсатора $C = Q / (\varphi_1 - \varphi_2)$, где Q – заряд на одной из обкладок конденсатора, а φ_1, φ_2 - потенциалы его обкладок

Термин	Что обозначает
«Звезда»	Схема соединения фаз генератора или потребителя, в которой вместе соединяются концы фаз
Индуктивность	Количественная характеристика связи между магнитным потоком самоиндукции Φ_C электрической цепи и током в ней I . Обозначают – L ($L = \Phi_C / I$)
Источник ЭДС или напряжения идеальный	Источник, у которого напряжение на выводах не зависит от сопротивления нагрузки (внутреннее сопротивление источника равно нулю)
Источник тока идеальный	Источник, у которого ток не зависит от сопротивления нагрузки
Классический метод анализа переходного процесса	Это непосредственное решение дифференциального уравнения, составленного для исследуемой цепи на основе законов Кирхгофа
Коммутация	Любые изменения в электрической цепи. Обычно считают, что коммутация происходит мгновенно
Линейный элемент	Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивления и др.) не зависят от тока в нем
Линейная электр. цепь	Цепь, все элементы которой являются линейными
Линейные провода	Провода, соединяющие начала фаз генератора и потребителя
Линейные токи	Токи в линейных проводах
Линейные напряжения	Напряжения между линейными проводами
Магнитное поле	Одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости
Магнитная индукция	Векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся или смещающуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля. П р и м е ч а н и е. Магнитная индукция численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу, к произведению заряда и скорости частицы, если направление скорости таково, что эта сила максимальная и имеет направление, перпендикулярное к векторам силы и скорости, совпадающее с направлением правого винта при вращении его от направления силы к направлению скорости частицы с положительным зарядом
Магнитная цепь	Совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны при помощи магнитодвижущей силы, магнитного потока и разности магнитных потенциалов
Магнитодвижущая сила (М.с.)	Величина, характеризующая магнитное поле электрического тока. В соответствии с законом полного тока М.с. равна электрическому току сквозь поверхность, натянутую на контур L (например, произведению тока в обмотке трансформатора или электромагнита на число витков обмотки, намотанных на контур L). М.с. измеряется в А
Магнитных потенциалов разность (магнитное напряжение)	Величина, равная произведению напряженности магнитного поля на длину участка магнитной цепи. Измеряется в А

Термин	Что обозначает
Машина постоянного тока параллельного возбуждения	Машина постоянного тока, у которой обмотки возбуждения соединены с обмоткой якоря параллельно
Машина постоянного тока последовательного возбуждения	Машина постоянного тока, у которой обмотки возбуждения соединены с обмоткой якоря последовательно
Магнитопровод	Часть электротехнического устройства из ферромагнитного материала, служащая для увеличения магнитного потока, его концентрации в определенной части устройства, а также придания магнитному полю определенной конфигурации
Мощности коэффициент	Отношение активной мощности к полной мощности. В цепях синусоидального тока равен $\cos \varphi$ (φ – сдвиг фаз между током и напряжением)
Мощность электрическая (М.э.)	Величина, характеризующая скорость изменения (преобразования, рассеяния, передачи и т. п.) электрической энергии. В цепях пост. тока М. э. равна произведению напряжения и тока. В цепях переменного тока различают мгновенную, активную, реактивную и полную. М г н о в е н н а я М. э. равна произведению мгновенных значений напряжения и тока. А к т и в н а я М. э. P – среднее за период значение мгновенной мощности переменного тока, характеризует скорость преобразования электромагнитной энергии в другие виды энергии (тепловую, механическую и т. д.). В цепях однофазного синусоидального тока активная М. э. $P = UI \cos \varphi$, (U и I — действующие значения напряжения и тока, φ – сдвиг фаз между током и напряжением). Ед. активной М. э. – Вт (ватт). Р е а к т и в н а я М. э. Q характеризует скорость накопления энергии в конденсаторах и катушках индуктивности, а также обмен энергией между отдельными участками цепи, и в частности генератором и приёмником. В цепях синусоидального тока реактивная М. э. участка $Q = UI \sin \varphi$. Единица реактивной М. э. – вар. П о л н а я М. э. S характеризует М. э., отдаваемую в цепь источником переменного тока. Для цепей синусоид. тока полная М. э. $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Ед. полной М. э. – вольт-ампер (В.А)
Напряжение	Скалярная величина, численно равная работе при перемещении единичного положительного заряда по заданному пути. С напряженностью E вдоль участка цепи 1-2 напряжение U_{12} связано соотношением $U_{12} = \int_1^2 E dl$
Напряжение короткого замыкания	Величина напряжения на входе трансформатора, которое нужно приложить к первичной обмотке трансформатора, при условии, что вторичная обмотка замкнута накоротко, при этом в первичной обмотке протекает номинальный ток
Напряжение холостого хода	Напряжение между двумя выводами цепи, когда нагрузка, подключаемая к этим выводам, отсутствует
Напряженность магнитного поля	Векторная величина H , характеризующая магнитное поле и равная отношению магнитной индукции B в рассматриваемой точке к абсолютной магнитной проницаемости μ

Термин	Что обозначает
Напряженность электрического поля	Основная силовая характеристика E электрического поля, равная отношению силы, действующей на точечный электрический заряд в данной точке пространства, к величине заряда
Независимый контур	Контур, в состав которого входит хотя бы одна ветвь, не принадлежащая другим контурам
Нейтральный провод	Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и потребителя в схеме
Нелинейный элемент	Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) изменяются при изменении величины тока, возникающего в данном элементе
Нелинейная электрическая цепь	Цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент
Переходные процессы	Процессы, возникающие в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима работы к другому. Переходные процессы в электрической цепи возникают, когда в цепи имеются индуктивные и ёмкостные элементы
Первый закон коммутации	Ток в ветви с индуктивным элементом в начальный момент времени после коммутации имеет то же самое значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения он начинает плавно изменяться
Постоянная времени	Интервал времени, в течение которого ток (напряжение) в цепи изменится в $e = 2,71$ раз. Величина постоянной времени зависит от вида и параметров цепи. Постоянная времени характеризует скорость протекания переходных процессов, причем, чем больше постоянная времени, тем продолжительнее переходный процесс
Принужденный (установившийся) режим	Режим, который создается источником питания (постоянного или переменного напряжения)
Период	Наименьший промежуток времени T , через который колебания повторяются в той же самой последовательности. Такие колебания называются периодическими
Последовательное соединение участков электрической (магнитной) цепи	Соединение, при котором через все участки цепи проходят один и тот же ток или поток индукции
Параллельное соединение электрических (магнитных) участков цепи	Соединение, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т. е. находятся под действием одного и того же электрического (магнитного) напряжения
Проводимость	Величина, обратная сопротивлению
Свободная составляющая тока (напряжения)	Составляющая тока (напряжения) в цепи во время переходного процесса, обусловленная внутренними накопителями энергии (индуктивными катушками и конденсаторами)
Сдвиг фаз	Величина, равная разности начальных фаз синусоидальных функций, имеющих одинаковую частоту
Симметричная трехфазная цепь	Электрическая цепь, в которой комплексные сопротивления каждой её фазы одинаковы
Синхронная машина	Машина переменного тока, обычно трехфазная, у которой угловые скорости вращения магнитного поля и ротора равны между собой и кратны частоте тока электрической сети

Термин	Что обозначает
Сопротивление	Величина, характеризующая противодействие, которое оказывает электрическая цепь движущимся в ней электрическим зарядам. Ед. измерения – Ом
Сопротивление активное	Сопротивление цепи, не содержащей емкостей и индуктивностей, переменному току. Ед. измерения - Ом
Сопротивление емкостное (С.е.)	Величина, характеризующая противодействие, оказываемое переменному току емкостным элементом. С.е. $x_C = 1/\omega C$, Ом.
Сопротивление комплексное	Отношение амплитуды (действующего значения) комплексного напряжения к амплитуде (действующему значению) комплексного тока. Ед. измерения – Ом
Сопротивление индуктивное (С.и.)	Величина, характеризующая противодействие, оказываемое переменному току индуктивным элементом. С.и. $x_L = \omega L$, Ом
Сопротивление магнитное (С.м.)	Параметр магнитной цепи, равный отношению магнитного напряжения U_M к магнитному потоку Φ для данного однородного участка магнитной цепи
Сопротивление полное	Отношение действующего или амплитудного напряжения соответственно к действующему или амплитудному току. Ед. измерения – Ом
Сопротивление реактивное	Величина, характеризующая противодействие, оказываемое переменному току емкостным и индуктивным элементами цепи. Ед. измерения – Ом
Статор	Неподвижная часть электрической машины роторного типа
Ток проводимости	Скалярная величина, равная производной по времени от электрического заряда, переносимого носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность. П р и м е ч а н и е. До настоящего времени на практике широко применяется термин "сила тока проводимости"
Трансформатор	Статическое устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения (при неизменной частоте)
«Треугольник»	Схема соединения фаз генератора или потребителя, в которой вместе соединяются начало одной фазы с концом другой фазы.
Трехфазная цепь	Электрическая цепь переменного тока, в которой действуют 3 синусоидальных напряжения одинаковой частоты, сдвинутые по фазе на 120 градусов
Узел	Место соединения трех и более ветвей
Фазные напряжения	Напряжения, возникающие в фазах генератора или потребителя
Фаза	Одна из электрических цепей, входящая в состав многофазной цепи, характеризующаяся тем, что в ней действует ЭДС (напряжение), сдвинутое во времени по отношению к другим цепям (фазам) этой многофазной цепи
Фаза начальная	Величина, определяющая состояние синусоидального процесса и равная значению фазы в начальный момент времени
Фазные токи	Токи в фазах генератора или потребителя
ЭДС (электродвижущая сила)	ЭДС равна отношению работы, совершаемой сторонними силами и силами индуктированного электрического поля, к перенесенному электрическому заряду между двумя точками вдоль рассматриваемого пути или вдоль замкнутого контура

Термин	Что обозначает
ЭДС магнитоэлектрической индукции	Электродвижущая сила индукции, возникающая в теле (проводнике), движущемся в магнитном поле или в замкнутом проводящем контуре при изменении его потокосцепления вследствие движения контура в магнитном поле или изменения самого поля
Электростатическое поле	Электрическое поле неподвижных заряженных тел при отсутствии в них электрических токов
Электрическая цепь	Совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об ЭДС, токе и напряжении
Якорь электрической машины	Подвижная часть электрической машины

3.3. Технические и программные средства обеспечения дисциплины

Для выполнения виртуальных лабораторных работ можно использовать программу Electronics Workbench (EWB) любых версий (3.0, 4.0, 5.0). При этом самая первая версия программы 3.0 имеет объем 1.4 Мбайт.

Последней, наиболее совершенной версией этой программы является «Multisim – 2001», которая является шестой версией программы EWB.

Существуют и другие программы, позволяющие моделировать электрические и электронные схемы.

3.4. Лабораторные работы

Общие указания

Целью выполнения лабораторного практикума является приобретение навыков экспериментального исследования электрических цепей и умения анализировать полученные результаты.

Перед выполнением работ необходимо изучить основные теоретические положения. В конце каждой работы указаны номер литературы и страницы, где представлен материал по тематике данной работы. Библиографический список с соответствующими номерами содержится в разделе «Информация о дисциплине».

Лабораторные работы можно выполнить либо в лаборатории либо на компьютере, используя программу для моделирования электрических цепей.

Описание методических указаний для этих видов выполнения лабораторных работ будут достаточно близко совпадать.

В каждой работе предусмотрено 10 вариантов. Выбор варианта определяется по последней цифре шифра студента. Оформление можно выполнить в произвольной форме. На титульном листе обязательно указывается номер специальности студента и его личный шифр. В содержании отчета должны быть отражены все требования, которые указываются в конце работы в разделе «Содержание отчета».

Работы 1...5 выполняются с помощью компьютерного моделирования.

Работы 6,7 являются расчетно-графическими работами и могут выполняться без компьютера.

РАБОТА 1

Исследование линейных цепей синусоидального тока, содержащих только сопротивление, только индуктивность и только емкость

1. ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

Экспериментальное исследование фазных и амплитудных соотношений между напряжением и током в простейших электрических цепях.

1. Исследование цепи, содержащей только активное сопротивление;
2. Исследование цепи, содержащей только индуктивность;
3. Исследование цепи, содержащей только емкость.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Любое реальное электротехническое устройство обладает тремя параметрами: сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C .

Для удобства анализа и расчета электрических цепей вводят понятие об идеализированных элементах цепи, то есть таких, которые обладают только одним параметром – только сопротивлением, только индуктивностью, только емкостью. Эти элементы называются соответственно: сопротивлением, индуктивностью, емкостью. Их графическое изображение представлено на рис. 1, 2 и 3.

С помощью идеализированных элементов можно любое реальное электротехническое устройство представить в виде комбинации идеализированных элементов и, следовательно, провести его электромагнитный расчет.

Элементы, используемые в виртуальной лабораторной работе из библиотеки программы EWB, являются идеализированными элементами.

В данной работе исследуются электромагнитные процессы, происходящие в сопротивлении, индуктивности и емкости при их подключении к источнику синусоидального напряжения. Синусоидальное напряжение – периодическая функция. Ее периодом T называется минимальное время, по истечении которого значение функции повторяется. Число периодов в секунду называется частотой напряжения $f = 1/T$, Гц. Кроме частоты f , в электротехнике часто используют понятие об угловой частоте $\omega = 2\pi f$, 1/с.

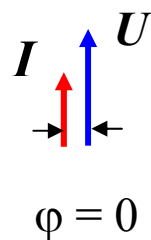
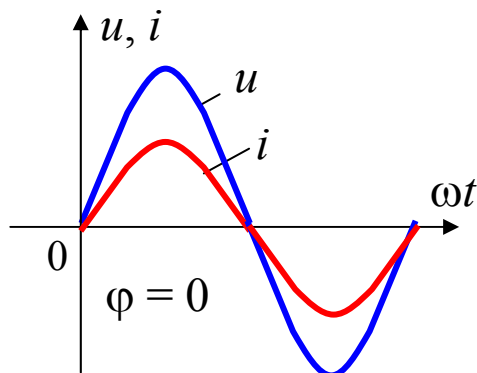
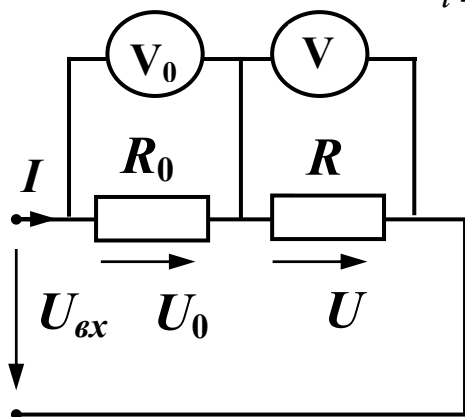
Аналитическая запись синусоидального напряжения имеет вид

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (1)$$

Здесь u – мгновенное значение напряжения, т. е. его значение в любой момент времени t от начала отсчета; U_m – амплитуда напряжения, т. е. наибольшее его значение; $(\omega t + \psi_u)$ – фаза напряжения, град. или рад., может принимать любые значения в пределах от 0 до $\pm 2K\pi$ радиан или от 0 до $\pm K360^\circ$ (K – любое целое число); ψ – начальная фаза напряжения (греческая "пси"), это напряжения при $t = 0$.

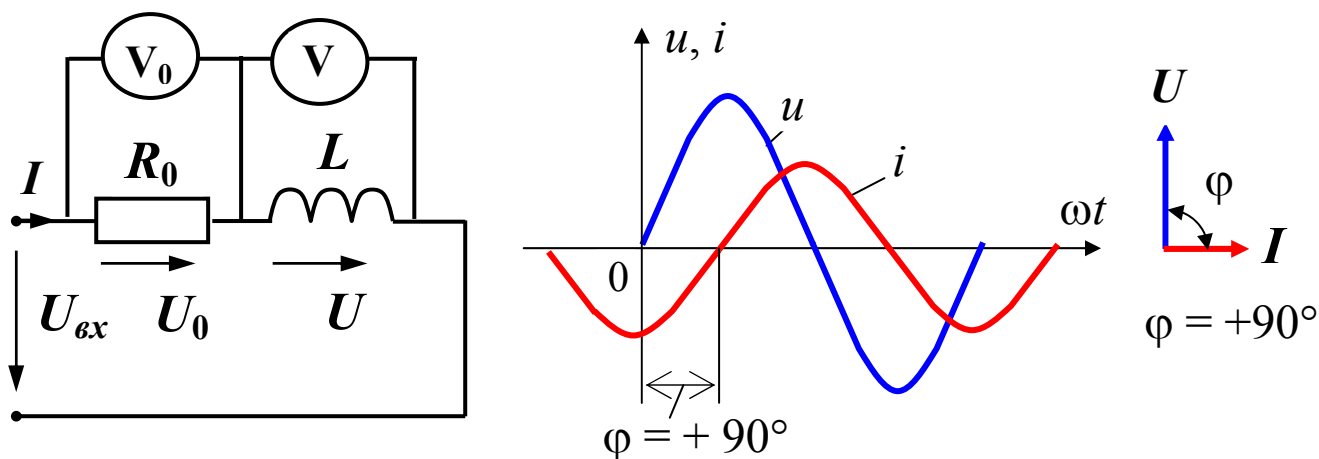
Синус любого угла, как известно из курса математики, изменяется в пределах от 0 до ± 1 , как бы велико ни было значение угла, входящего под его знак. Поэтому синусоидальное напряжение изменяется во времени, как это видно из формулы (1), в пределах от $+U_m$ до $-U_m$, принимая в этом диапазоне любые значения ($+U_m \geq u \geq -U_m$). Все сказанное выше относится и к синусоидальному току, аналитическая запись которого имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (2)$$



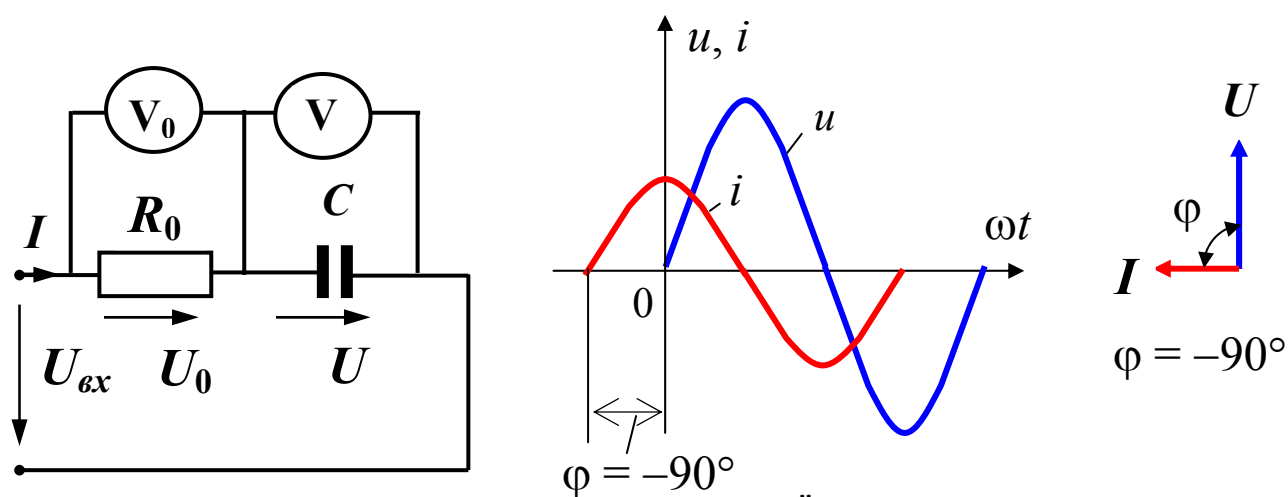
Сопротивление R

Рис. 1



Индуктивность L

Рис. 2



Ёмкость C

Рис. 3

Здесь i – мгновенное значение тока, А; I_m – амплитуда тока, А; $(\omega t + \psi_i)$ – фаза тока; ψ_i – начальная фаза тока. Графики напряжений $u(t)$ на рис. 1, 2, 3 построены для случая, когда начальная фаза напряжения принята равной нулю: $\psi_u = 0$ и тогда $u = U_m \sin \omega t$. График тока i на рис. 1 построен таким образом, что его начальная фаза $\psi_i = 0$, и тогда $i = I_m \sin \omega t$. График тока на рис. 2 построен так, что $\psi_i = -90^\circ$, и тогда $i = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$. График тока на рис. 3 построен так, что $\psi_i = +90^\circ$, и тогда $i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. Положительные начальные фазы этих графиков откладываются влево от точки начала отсчета ($t = 0$), а отрицательные начальные фазы – вправо.

Фазовые соотношения между током и напряжением цепи

Если ток и напряжение одновременно достигают нуля, то это означает, что они совпадают по фазе (рис. 1). При этом $\psi_u = \psi_i$. Если этого нет, то напряжение и ток сдвинуты по фазе. Угол сдвига фаз между напряжением и током принято определять как разность начальных фаз напряжения (ψ_u) и тока (ψ_i). Этот угол обозначают греческой буквой φ (фи):

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (3)$$

Угол сдвига фаз φ любой электрической цепи не произвольная величина. Он определяется соотношением между параметрами R , L и C для каждой конкретной цепи с постоянной частотой f .

В частности, в цепи с сопротивлением R ток и напряжение всегда совпадают по фазе ($\psi_u = \psi_i$) и угол сдвига фаз, см. формулу (3), $\varphi = 0$; в цепи с индуктивностью L ток всегда отстает по фазе от напряжения на 90° $\psi_i = \psi_u - 90^\circ$ и поэтому угол сдвига фаз $\varphi = +90^\circ$; в цепи с емкостью C ток всегда опережает напряжение по фазе на 90° $\psi_i = \psi_u + 90^\circ$ и поэтому угол сдвига фаз $\varphi = -90^\circ$.

Фазовые соотношения между током и напряжением цепи исследуются с помощью осциллографа, позволяющего получать на экране одновременно две синусоиды: тока и напряжения (рис. 4).

Фазовые соотношения между током и напряжением цепи исследуются с помощью осциллографа, позволяющего получать на экране одновременно две синусоиды: тока и напряжения (рис. 4).

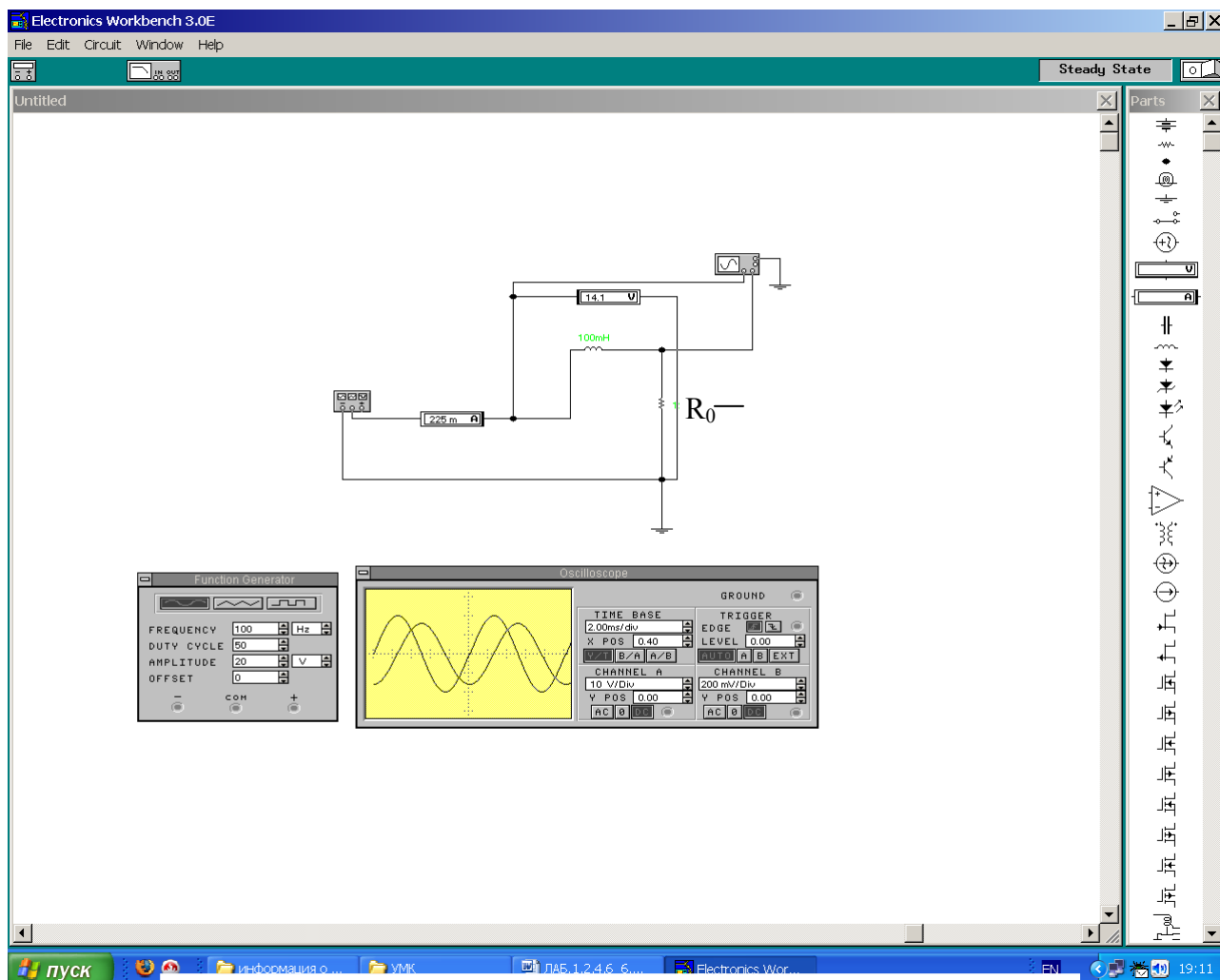


Рис. 4

Амплитудные соотношения между током и напряжением цепи

Синусоидальные напряжения и токи часто изображают в виде векторов, длина которых равна амплитуде, а угол между вектором и произвольно выбранной осью отсчета равен начальной фазе. При этом принято положительные начальные фазы откладывать от оси отсчета против часовой стрелки, а отрицательные начальные фазы – по часовой стрелке.

Совокупность векторов тока и напряжений цепи называется векторной диаграммой этой цепи. Векторные диаграммы для цепей с R , L и C показаны на рис. 1, 2 и 3.

Токи и напряжения в электрических цепях измеряют с помощью амперметров и вольтметров. Обычно для этого применяют приборы электромагнитной системы, шкалы которых отградуированы не в амплитудных значениях тока I_m и напряжения U_m , а в так называемых действующих значениях тока и напряжения I и U . Виртуальные приборы на компьютере также показывают дей-

ствующие значения. Это основные расчетные величины цепей синусоидального тока. Они меньше амплитуд в $\sqrt{2}$ раз:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Между амплитудами напряжения и тока (так же, как и между их действующими значениями) любой электрической цепи существует однозначная связь, определяемая соотношениями между параметрами R , L и C . Отношение амплитуд (или действующих значений) напряжения и тока называется полным сопротивлением цепи: $Z = \frac{U}{I}$.

В частности:

для цепи с активным сопротивлением:

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = z_R = R; \quad (5)$$

для цепи с индуктивностью:

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = z_L = x_L; \quad (6)$$

для цепи с емкостью:

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = z_C = x_C, \quad (7)$$

где x_L – индуктивное, а x_C – емкостное сопротивления.

Индуктивное и емкостное сопротивления зависят от частоты напряжения:

$$x_L = \omega L; \quad x_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (8)$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с методикой моделирования (приведена в конце седьмой работы) простых цепей переменного тока на компьютере.

2. Выбрать свой вариант из табл. 1. Номер варианта должен быть равен последней цифре шифра студента.

Таблица 1

№ варианта	R_0 , Ом	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	f , Гц
1	10	510	70	0,2	1000
2	10	510	50	0,1	2500
3	10	510	30	0,15	2000
4	10	510	70	0,25	1000
5	10	510	50	0,1	2000
6	10	510	30	0,2	1500
7	10	510	70	0,25	1000
8	10	510	50	0,1	2000
9	5	400	100	0,1	1000
0	5	300	90	0,15	2000

3. «Собрать» цепь, содержащую только активное сопротивление R и последовательно соединенное с ним измерительное сопротивление R_0 (рис. 4). На рис. 4 показан случай, когда исследуемым элементом является индуктивность.

4. Установить параметры цепи, частоту синусоидального напряжения в соответствии со своим вариантом. Действующее значение напряжения источника $U_{\text{вх}}$ установить в пределах 5÷10 В. Перевести приборы в режим измерения переменного тока (АС).

5. «Включить» цепь и записать показания измерительных приборов в соответствующую строку табл. по форме 1.

Форма 1

Вид цепи	Измерено			Вычислено				
	$U_{\text{вх}}$, В	U , В	I , А	R , Ом	x_L , Ом	x_C , Ом	L , Гн	C , Ф
R								
L								
C								

6. Рассчитать значение активного сопротивления R цепи, воспользовавшись соотношениями (5). Полученный результат занести в соответствующую графу табл. по форме 1 и сопоставить его с установленным согласно варианта значением. Убедиться в том, что в пределах погрешностей измерений и погрешностей вычислений элементов цепи значения параметров практически совпадают.

7. Настроить осциллограф и получить на его экране синусоиды тока и напряжения на сопротивлении. Напряжение на входе цепи практически равно напряжению на сопротивлении, так как $R \gg R_0$ (напряжение в последовательной цепи прямо пропорционально величине сопротивления). Осциллограф имеет два канала. Канал **A** фиксирует напряжение на исследуемом элементе, воспринимает напряжение на этом элементе. Канал **B** подключается параллельно измерительному сопротивлению R_0 и воспринимает напряжение на нем. Напряжение на активном сопротивлении пропорционально току цепи (току исследуемого элемента). Поэтому напряжению на экране осциллографа в канале **B** соответствует синусоида тока цепи.

Скопировать экран монитора аналогично рис. 4 при помощи клавиши Prt Scr. Нажатие этой клавиши позволяет занести в буфер обмена содержимое экрана монитора, которое затем можно вставить в необходимый документ.

Анализируя полученные графики u и i , убедиться в том, что в цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе.

Рядом с графиком u и i построить в тех же масштабах векторную диаграмму тока и напряжения цепи для амплитудных или действующих значений. Указать на этой диаграмме угол сдвига фаз.

8. Собрать цепь, содержащую только индуктивность L и последовательно соединенное с ней измерительное сопротивление R_0 (рис. 4). При этом начальная фаза напряжения может быть выбрана любой и отличаться от ее значения на осциллографе, например выбрать $\psi_u = 0$, как на рис. 1

9. Собрать цепь с индуктивностью L . Установить заданную величину индуктивности (табл. 1). Действующее значение напряжения источника U_{ex} установить в пределах $5 \div 10$ В. Измерить ток и напряжение в индуктивности L и полученные данные занести в табл. по форме 1.

Рассчитать величину индуктивного сопротивления x_L и индуктивности L цепи, воспользовавшись формулами (6) и (8). Полученные значения x_L и L занести в соответствующую графу табл. по форме 1 и сопоставить величину L с установленным согласно варианта значением. Убедиться в том, что в пределах погрешностей измерений и погрешностей вычислений элементов цепи значения параметров практически совпадают.

10. Настроить осциллограф и получить на его экране синусоиды тока и напряжения на индуктивности.

11. Анализируя полученные графики u и i , убедиться в том, что в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения по фазе на четверть периода, то есть на 90° или $\pi / 2$ радиан.

Рядом с графиками u и i построить в тех же масштабах векторную диаграмму тока и напряжения цепи для амплитудных или действующих значений. Указать на этой диаграмме угол сдвига фаз.

12. Собрать цепь, содержащую только емкость C и последовательно соединенное с ней измерительное сопротивление R_0 .

13. Установить заданную величину емкости (табл. 1). Действующее значение напряжения источника $U_{\text{вх}}$ установить в пределах $5 \div 10$ В. Измерить ток и напряжение в емкости C и полученные данные занести в табл. по форме 1.

Рассчитать величину емкостного сопротивления x_C и емкость C цепи по формулам (7) и (8). Полученные данные занести в табл. по форме 1 и сопоставить рассчитанное значение C с установленным согласно варианта значением. Убедиться в том, что в пределах погрешности измерений и погрешности исполнения элементов цепи эти значения практически совпадают.

14. Настроить осциллограф и получить на его экране синусоиды тока и напряжения на емкости.

Анализируя полученные графики, u и i убедиться в том, что в цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на четверть периода, то есть на 90° или $\pi / 2$ радиан.

Рядом с графиком u и i построить в тех же масштабах векторную диаграмму тока и напряжения цепи для амплитудных или действующих значений тока и напряжения. Указать на этой диаграмме угол сдвига фаз.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист (указать специальность и шифр студента)
 2. Схемы всех исследуемых цепей, соответствующие им графики u и i , а также векторные диаграммы.
 3. Основные расчетные соотношения.
 4. Таблица по форме 1 с результатами измерений и вычислений.
 5. Краткие выводы.
- Литература: [1], с. 32...66

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличаются идеализированные элементы электрической цепи от реальных элементов?

2. Почему в данной работе в качестве идеализированных элементов можно использовать резистор, катушку индуктивности и конденсатор?

3. Для некоторой цепи известны напряжение и ток:

$$u = 282 \sin(314t + 30^\circ); \quad i = 141 \sin(314t + 70^\circ).$$

Требуется определить:

- действующие значения напряжения и тока цепи;
- частоту цепи f , Гц;
- угол сдвига фаз φ между напряжением и током цепи;
- характер цепи – индуктивной или емкостной.

Построить графики зависимости тока и напряжения цепи от времени.

Построить векторную диаграмму цепи.

4. В цепи с активным сопротивлением измерены действующие значения тока и напряжения $I = 1 \text{ А}$; $U = 10 \text{ В}$. Требуется определить величину активного сопротивления.

Записать ток и напряжение в виде синусоид, если частота цепи $f = 1000 \text{ Гц}$, а начальная фаза напряжения $\psi_u = 60^\circ$. Построить графики зависимости тока и напряжения от времени. Построить векторную диаграмму цепи.

5. В цепи с индуктивностью измерены действующие значения тока и напряжения $U = 10 \text{ В}$, $I = 1 \text{ А}$. Требуется:

- определить величину индуктивного сопротивления x_L ;
- определить величину индуктивности L , если частота цепи $f = 1590 \text{ Гц}$;
- записать ток и напряжение в виде синусоид, если частота цепи $f = 1590 \text{ Гц}$, а начальная фаза напряжения $\psi_u = -360^\circ$;
- построить векторную диаграмму цепи.

6. В цепи с емкостью измерены действующие значения тока и напряжения цепи: $U = 10 \text{ В}$; $I = 1 \text{ А}$. Требуется:

- определить величину индуктивного сопротивления x_C ;
- определить величину индуктивности C , если частота цепи $f = 1590 \text{ Гц}$;
- записать ток и напряжение в виде синусоид, если частота цепи $f = 1590 \text{ Гц}$, а начальная фаза напряжения $\psi_u = -60^\circ$;
- построить векторную диаграмму цепи.

7. Как зависят активное сопротивление R , индуктивное сопротивление x_L и емкостное сопротивление x_C от частоты приложенного напряжения?

8. Индуктивное сопротивление цепи составляет 8 Ом . Как изменится это сопротивление, если частоту приложенного напряжения увеличить в два раза?

РАБОТА 2

Исследование разветвленной цепи синусоидального тока с одним источником энергии

1. ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

Экспериментальное исследование разветвленной электрической цепи с одним источником синусоидального напряжения и ее анализ комплексным методом (символическим).

1. Экспериментальное определение параметров всех элементов исследуемой цепи;
2. Проверка справедливости законов Кирхгофа при помощи векторной диаграммы цепи;
3. Расчет электрической цепи комплексным методом и сопоставление его результатов с опытом.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной работе исследуется цепь со смешанным соединением трех комплексных сопротивлений Z_1 , Z_2 и Z_3 . Рассматривается одна из двух схем такой цепи: с последовательно-параллельным (рис. 5,а) и параллельно-последовательным (рис. 5,б) соединением этих элементов.

Расчет исследуемой цепи

Задача расчета состоит в определении токов во всех ветвях цепи при известных параметрах, заданном действующем значении приложенного к цепи напряжения и частоте сети. Расчет производится символическим методом с использованием преобразований цепи либо к последовательному, либо к параллельному соединению ее элементов.

Порядок расчета цепи с последовательно-параллельным соединением комплексных сопротивлений (рис. 5,а)

1. Определяется эквивалентное комплексное сопротивление цепи $Z_э$:

$$\underline{Z}_э = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

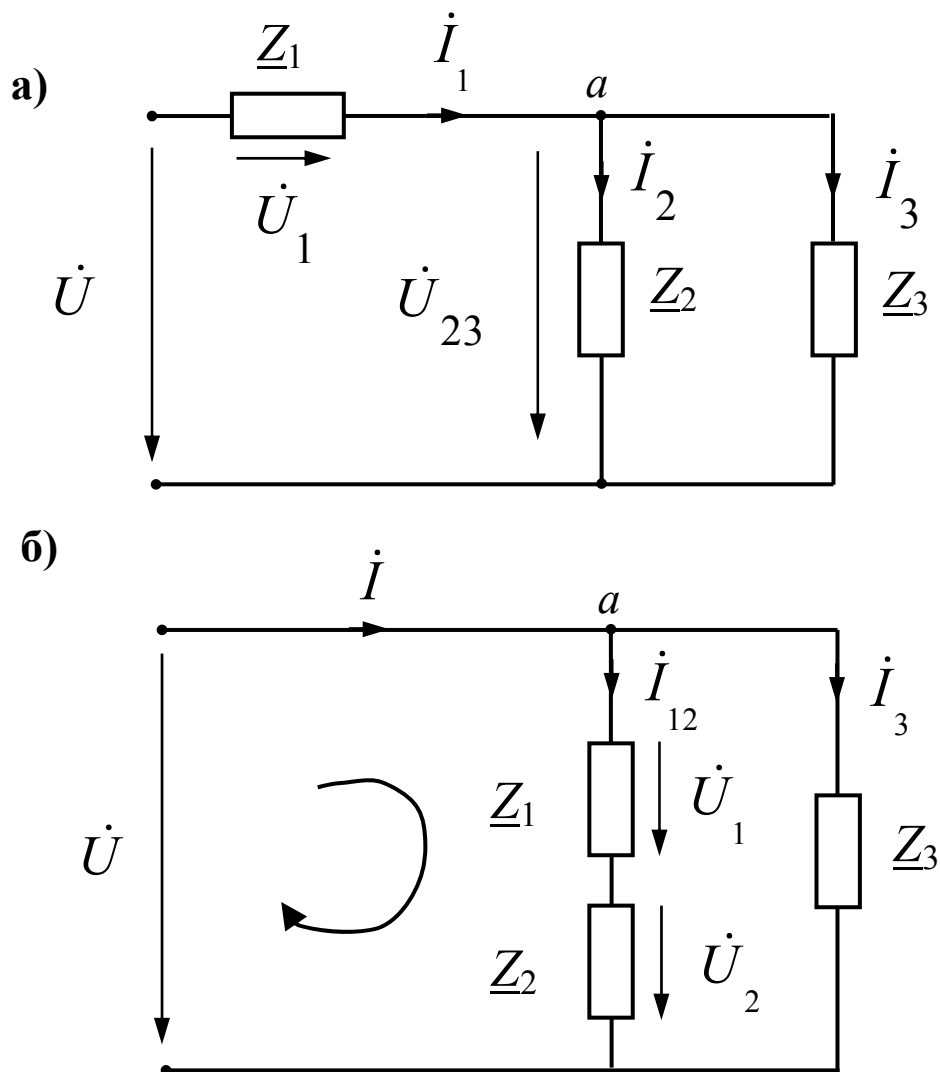


Рис. 5

2. Определяется комплексное действующее значение тока $\dot{I}$:

$$\dot{I} = \dot{U}_1 / \underline{Z}_1.$$

При этом начальная фаза приложенного напряжения может быть принята равной нулю, т. е. $\dot{U}e^{j\psi} = Ue^{j0} = U$.

3. Определяется комплексное действующее значение напряжения на участке цепи с параллельным соединением $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$

$$\dot{U}_{23} = \dot{U} - \dot{I}_1 \underline{Z}_1.$$

4. Определяется комплексное действующее значение тока $\dot{I}_2$:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{23}}{\underline{Z}_2}.$$

5. Определяется комплексное действующее значение тока $\dot{I}_3$:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{23}}{\underline{Z}_3}.$$

Проверка решения осуществляется по первому закону Кирхгофа для одного из узлов цепи. Например, для узла a имеем

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3.$$

Если расчет произведен верно, то сумма комплексных токов $\dot{I}_2 + \dot{I}_3$ должна быть практически равна комплексному току $\dot{I}_1$.

Порядок расчета цепи с параллельно-последовательным соединением комплексных сопротивлений (рис. 5,б)

1. Определяется эквивалентная комплексная проводимость всей цепи $\underline{Y}_9$:

$$\underline{Y}_9 = \frac{1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3}.$$

2. Определяется комплексное действующее значение тока цепи $\dot{I}$:

$$\dot{I} = \dot{U} \underline{Y}_9.$$

Начальную фазу приложенного напряжения можно принять равной нулю, т.е. $\dot{U} e^{j\psi} = U e^{j0} = U$.

3. Определяется комплексное действующее значение тока $\dot{I}_{12}$:

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

4. Определяется комплексное действующее значение напряжения $\dot{U}_1$:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_{12} \underline{Z}_1.$$

5. Определяется комплексное действующее значение напряжения $\dot{U}_2$:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_{12} \underline{Z}_2.$$

6. Определяется комплексное действующее значение тока $\dot{I}_3$:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_3}.$$

Проверка решения осуществляется по первому закону Кирхгофа для одного из узлов цепи или по второму закону Кирхгофа для одного из контуров

цепи. Например, для узла a имеем $\dot{I} = \dot{I}_{12} + \dot{I}_3$; для левого контура (на схеме указано направление его обхода) имеем $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$.

Если расчет произведен верно, то сумма комплексных токов $\dot{I}_{12} + \dot{I}_3$ должна быть практически равна комплексному току $\dot{I}$, а сумма комплексных напряжений $\dot{U}_1 + \dot{U}_2$ должна быть практически равна комплексному напряжению цепи $\dot{U}$.

Описание элементов исследуемой цепи

В качестве элементов исследуемой цепи применяются резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы, которые в диапазоне используемых частот принимаются идеализированными элементами цепи, т.е. полагают, что резистор обладает только сопротивлением R , катушка индуктивности обладает только индуктивностью L и конденсатор обладает только емкостью C .

Комплексные сопротивления таких элементов записываются следующим образом:

$$\underline{Z}_R = R, \quad \underline{Z}_L = jx_L = j\omega L, \quad \underline{Z}_C = jx_C = -j\frac{1}{\omega C}.$$

В данной работе студенты исследуют одну из цепей, составленных из комбинации идеализированных элементов $\underline{Z}_R$, $\underline{Z}_L$, $\underline{Z}_C$ (рис. 5). Векторные диаграммы для этих цепей приведены в общем виде (без масштабов).

Экспериментальное исследование параметров цепи

Для экспериментального определения параметра любого идеализированного элемента цепи достаточно измерить действующие значения тока и напряжения на этом элементе. Отношение действующих значений напряжения и тока дает полное сопротивление z этого элемента. Для идеализированных элементов цепи эти соотношения дают:

$$\begin{aligned} \text{– активное сопротивление:} \quad & \frac{U_R}{I} = z_R = R; \\ \text{– индуктивное сопротивление:} \quad & \frac{U_L}{I} = z_L = \omega L; \end{aligned}$$

– емкостное сопротивление: $\frac{U_C}{I} = z_C = \frac{1}{\omega C}$.

Зная частоту f приложенного к цепи напряжения, легко рассчитать индуктивность и емкость:

$$L = \frac{x_L}{\omega}; \quad C = \frac{1}{\omega x_C}; \quad \omega = 2\pi f.$$

Указания к построению векторных диаграмм

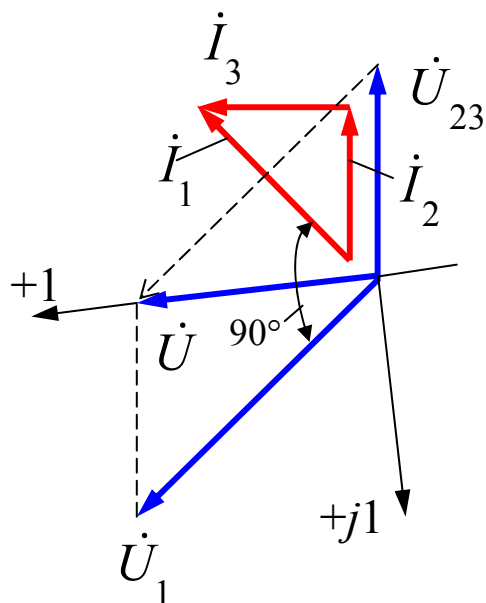
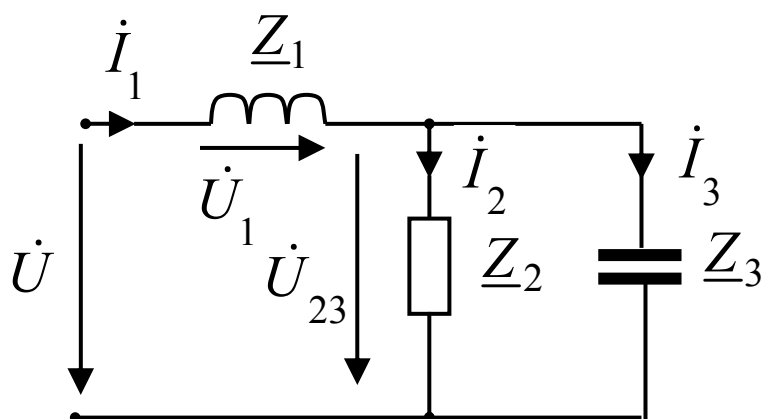
При построении векторной диаграммы используются данные измерений действующих значений токов и напряжений на всех элементах цепи, а также учитывается то обстоятельство, что все элементы цепи можно считать идеализированными. Предварительно следует выбрать масштабы токов и напряжений так, чтобы векторная диаграмма заполнила весь тетрадный лист.

При построении векторной диаграммы целесообразно руководствоваться следующими рекомендациями.

Для схемы 1 (рис. 6) построение удобно начинать с вектора напряжения $\dot{U}_{23}$ и отложить его на диаграмме в произвольном направлении, например вертикально. Вектор тока $\dot{I}_2$ в сопротивлении $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_R$ совпадает по фазе с вектором напряжения $\dot{U}_{23}$. Вектор тока $\dot{I}_3$ в сопротивлении $\underline{Z}_3$ опережает вектор напряжения $\dot{U}_{23}$ по фазе 90° . Вектор общего тока цепи $\dot{I}_1$ в соответствии с первым законом Кирхгофа определяется как геометрическая сумма векторов $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$ т. е. $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$. При этом действующее значение общего тока цепи, полученное в результате непосредственных измерений, должно практически совпадать с его значением, полученным при построении векторной диаграммы.

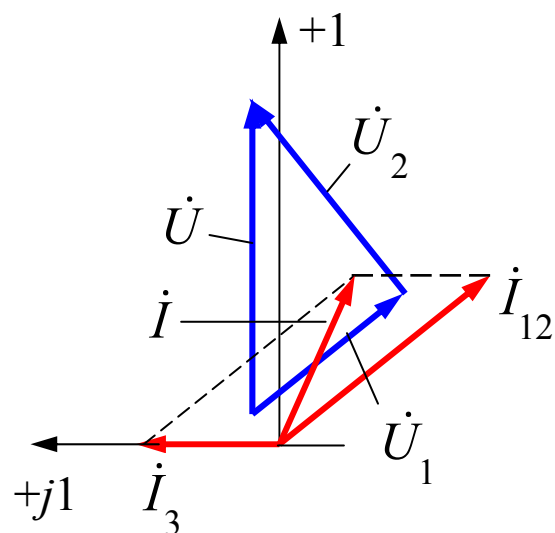
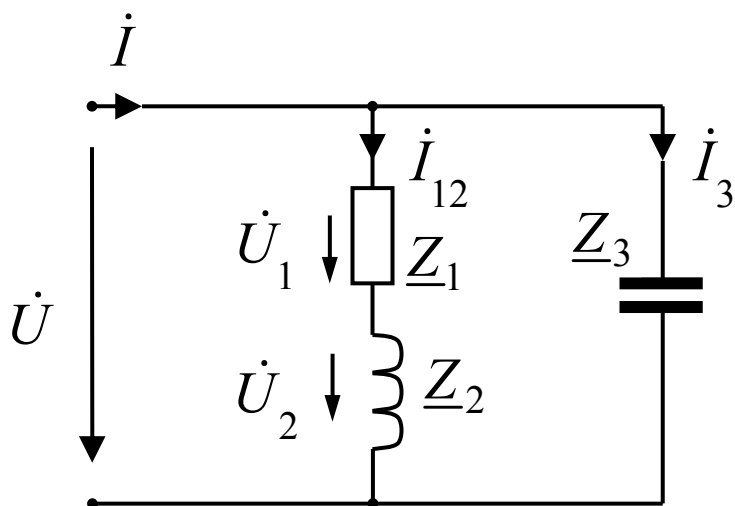
После нахождения вектора общего тока цепи $\dot{I}_1$ определяется и положение вектора $\dot{U}_1$. Этот вектор опережает вектор тока по фазе 90° . При геометрическом сложении векторов $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_{23}$ получаем в соответствии со вторым законом Кирхгофа вектор общего напряжения цепи $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23}$. При этом действующее значение приложенного напряжения, полученное в результате непосредственных измерений, должно практически совпадать с его значением, полученным при построении векторной диаграммы.

СХЕМА 1



$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_L = jX_L; \quad \underline{Z}_2 = \underline{Z}_R = R; \quad \underline{Z}_3 = \underline{Z}_C = -jX_C$$

СХЕМА 2



$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_R = R; \quad \underline{Z}_2 = \underline{Z}_L = jX_L; \quad \underline{Z}_3 = \underline{Z}_C = -jX_C$$

Рис. 6

Для схемы 2 (рис. 6) построение следует начинать с вектора приложенного напряжения $\dot{U}$ и отложить его на диаграмме в произвольном направлении. Вектор тока $\dot{I}_3$ опережает вектор приложенного напряжения по фазе

90°. Вектор тока $\dot{I}_{12}$ отстает по фазе от вектора приложенного напряжения на угол $\psi = \arctg x_L/R$. Параметры x_L , x_C и R к моменту построения векторной диаграммы уже известны. Вектор общего тока цепи $\dot{I}$ в соответствии с первым законом Кирхгофа определяется как геометрическая сумма векторов $\dot{I}_{12}$ и $\dot{I}_3$, т. е. $\dot{I} = \dot{I}_{12} + \dot{I}_3$.

Векторы напряжений $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ находятся путем разложения вектора $\dot{U}$ на две составляющие: $\dot{U}_1$ – на активном сопротивлении $\underline{Z}_1 = R$, совпадающую по фазе с вектором тока $\dot{I}_{12}$ и $\dot{U}_2$ – на реактивном сопротивлении $\underline{Z}_2$, перпендикулярную вектору тока $\dot{I}_{12}$. В соответствии со вторым законом Кирхгофа $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$.

Указания к записи токов и напряжений в виде комплексных чисел

Всякий вектор на плоскости, изображающий синусоидальный ток или напряжение, может быть записан в виде комплексного числа. Для этого векторную диаграмму токов и напряжений цепи следует совместить с комплексной плоскостью, координатная система которой состоит из взаимно – перпендикулярных осей вещественных чисел и мнимых чисел так, чтобы всякий вектор на плоскости изображающий синусоидальный ток или напряжение, может быть записан в виде комплексного числа. Для этого построенную в процессе выполнения данной работы векторную диаграмму следует совместить с комплексной плоскостью так, чтобы вещественная ось комплексной плоскости совпала с приложенным напряжением U (рис. 6). Тогда $\dot{U} = Ue^{je} = U$, и при расчете цепи можно пользоваться формулами, приведенными в разделе 2. При этом рассчитанные теоретически и построенные экспериментально векторные диаграммы должны практически совпасть.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. «Собрать» схему, представленную на рис. 6, в соответствии со своим вариантом. Номер схемы и ее параметры указаны в табл. 2. При этом номер варианта должен быть равен последней цифре шифра студента. В каждую из

трех ветвей схемы ввести амперметр для последующего измерения действующего значения тока и параллельно каждому элементу подсоединить вольтметр.

Скопировать схему с экрана монитора для последующего представления ее в отчете по лабораторной работе. Напоминаем, что нажатие клавиши Prt Scr позволяет занести в буфер обмена содержимое экрана монитора, которое затем можно вставить в необходимый документ.

2. Измерить действующие значения токов и напряжений на всех элементах цепи и действующее значение напряжения источника. Не забудьте перевести приборы в режим измерения переменного тока (АС). Занести полученные значения в табл. по форме 2.

Таблица 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
№ схемы (рис. 2)	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
f , Гц	2000	3000	2000	3000	2000	3000	2000	3000	2500	2000
U , В	10	15	20	25	15	10	20	25	10	10
R , Ом	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
L , мГн	50	50	50	50	50	50	50	50	40	45
C , мкФ	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Для схемы 1 (рис. 6)

Форма 2

f	U , В	U_1 , В	U_{23} , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Для схемы 2 (рис. 6)

Форма 2

f	U , В	U_1 , В	U_2 , В	I , А	I_{12} , А	I_3 , А

3. Определить параметры всех элементов схемы, считая их идеализированными. Полученные расчетные данные занести в табл. по форме 3.

Форма 3

R , Ом	x_L , Ом	L , Ом	x_C , Ом	C , мкФ

4. Построить векторную диаграмму цепи, используя результаты измерений токов и напряжений. Предварительно следует выбрать масштабы токов и напряжений таким образом, чтобы векторная диаграмма полностью занимала

отдельный лист отчета. Проверить соответствие графических построений первому и второму законам Кирхгофа.

5. Произвести теоретический расчет цепи символическим методом, считая известными действующее значение приложенного напряжения U и сопротивления всех элементов цепи (табл. по форме 2 и 3). Принять при расчетах начальную фазу приложенного напряжения равной нулю, т. е. совместить ось вещественных чисел комплексной плоскости с вектором U , приложенного напряжения. Положение комплексной плоскости показано на векторных диаграммах рис. 6. Результаты расчетов занести в табл. по форме 4 для схемы 1 и в табл. по форме 5 для схемы 2.

Форма 4

	Модуль	Аргумент	Вещественная часть	Мнимая часть
$\dot{U}$, В				
$\dot{U}_1$, В				
$\dot{U}_{23}$, В				
$\dot{I}_1$, В				
$\dot{I}_2$, В				
$\dot{I}_3$, В				

Форма 5

	Модуль	Аргумент	Вещественная часть	Мнимая часть
$\dot{U}$, В				
$\dot{U}_1$, В				
$\dot{U}_2$, В				
$\dot{I}_{12}$, В				
$\dot{I}_3$, В				
$\dot{I}$, В				

6. Сопоставить результаты расчета с опытом. Для этого на комплексной плоскости, сориентированной относительно построенной векторной диаграммы так, как это показано на рис. 6, построить расчетные значения векторов токов и напряжений, убедиться в их хорошем соответствии с опытными данными.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Копия экрана монитора со схемой исследуемой цепи.
2. Таблицы с опытными и расчетными результатами.
3. Векторная диаграмма.
4. Выводы.

Литература: [1], с. 52...58

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как соотносятся между собой ток и напряжение в индуктивности; ток и напряжение в емкости?
2. Начальная фаза напряжения, приложенного к емкости, составляет $+30^\circ$. Какова начальная фаза тока в этой емкости?
3. Начальная фаза тока в индуктивности составляет -60° . Какова начальная фаза напряжения, приложенного к этой индуктивности?
4. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа применительно к векторам действующих токов и напряжений исследуемой цепи синусоидального тока.
5. К идеализированной катушке индуктивности приложено синусоидальное напряжение, действующее значение которого $U = 314$ В. Частота сети $f = 50$ Гц. Какова величина индуктивности этой катушки, если действующее значение тока в ней $I = 1$ А?
6. К идеализированному конденсатору приложено напряжение, действующее значение которого $U = 318,5$ В, угловая частота сети $\omega = 314$ 1/с. Какова величина емкости этого конденсатора, если действующее значение тока в нем $I = 1$ А?
7. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа применительно к комплексным действующим значениям токов и напряжений исследуемой цепи синусоидального тока.
8. К цепи, содержащей только индуктивное сопротивление $x_L = 2$ Ом, приложено напряжение, комплексное действующее значение которого $\dot{U} = 100e^{-j30^\circ}$. Записать комплексное действующее значение тока $\dot{I}$ в этом сопротивлении.
9. В цепи, содержащей только емкостное сопротивление $x_C = 1$ Ом, протекает ток, комплексное действующее значение которого $\dot{I} = 20e^{+j45^\circ}$. Записать комплексное действующее значение напряжения $\dot{U}$, приложенного к этой цепи.

РАБОТА 3

Исследование частотных свойств цепи с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости

1. ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

Экспериментальное исследование резонанса и частотных характеристик цепи с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.

1. Экспериментальное определение резонансной частоты и сопоставление ее с расчетной величиной.

2. Экспериментальное определение зависимости активного, индуктивного, емкостного и полного сопротивлений цепи от частоты приложенного напряжения; сопоставление опытных и расчетных зависимостей между собой.

3. Экспериментальное определение зависимости тока цепи от частоты приложенного напряжения и сопоставление ее с расчетной зависимостью.

4. Экспериментальное определение полосы пропускания и добротности цепи.

5. Определение полосы пропускания и добротности расчетным путем; сопоставление результатов эксперимента и расчета.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 7, а. В соответствии со 2-м законом Кирхгофа для этой цепи имеем

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C, \quad (9)$$

где $\bar{U}$ – вектор действующего значения приложенного напряжения;

$\bar{U}_R$ – вектор действующего значения напряжения на активном сопротивлении R цепи, совпадающий по фазе с вектором действующего значения тока $\bar{I}$;

$\bar{U}_L$ – вектор действующего значения напряжения на индуктивном сопротивлении $X_L = \omega L$ цепи, опережающий по фазе вектор действующего значения тока $\bar{I}$ на 90° ;

$\overline{U}_C$ – вектор действующего значения напряжения на емкостном сопротивлении $X_C = 1/\omega C$ цепи, отстающий по фазе от вектора действующего значения тока $\overline{I}$ на 90° .

Векторная диаграмма исследуемой цепи показана на рис. 7 для трех случаев соотношения между U_L и U_C .

На этой диаграмме векторы напряжений образуют прямоугольный треугольник со сторонами U , $(U_L - U_C)$ и U_R . Из этого треугольника легко найти соотношения между действующими значениями напряжений и угол сдвига фаз φ между напряжением и током цепи:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}; \quad (10)$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R}. \quad (11)$$

На рис. 7, б $U_L > U_C$; ток цепи отстает по фазе от напряжения, $\varphi > 0$ и цепь имеет индуктивный характер. На рис. 7, в $U_L < U_C$; ток цепи опережает по фазе напряжение, $\varphi < 0$ и цепь имеет емкостной характер. На рис. 7, г $U_L = U_C$; ток цепи совпадает по фазе с напряжением, $\varphi = 0$ и цепь имеет чисто активный характер. В этих условиях в цепи имеет место резонанс напряжений. При резонансе напряжений $U_L - U_C = 0$ и $U = U_R$.

Известно, что в соответствии с законом Ома

$$U_R = I R; \quad U_L = I X_L; \quad U_C = I X_C. \quad (12)$$

Здесь R – активное сопротивление цепи; $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление цепи; $X_C = 1/\omega C$ – емкостное сопротивление цепи; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота цепи; f – частота цепи в герцах.

Подставив (11) в (9) и (10), получаем

$$U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I z, \quad (13)$$

где z – полное сопротивление цепи
$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (14)$$

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

Из соотношения $U_L - U_C = 0$ вытекает, что при резонансе $X_L - X_C = 0$ или $\omega L - 1/\omega C$. Отсюда

$$\omega^2 LC - 1 = 0. \quad (15)$$

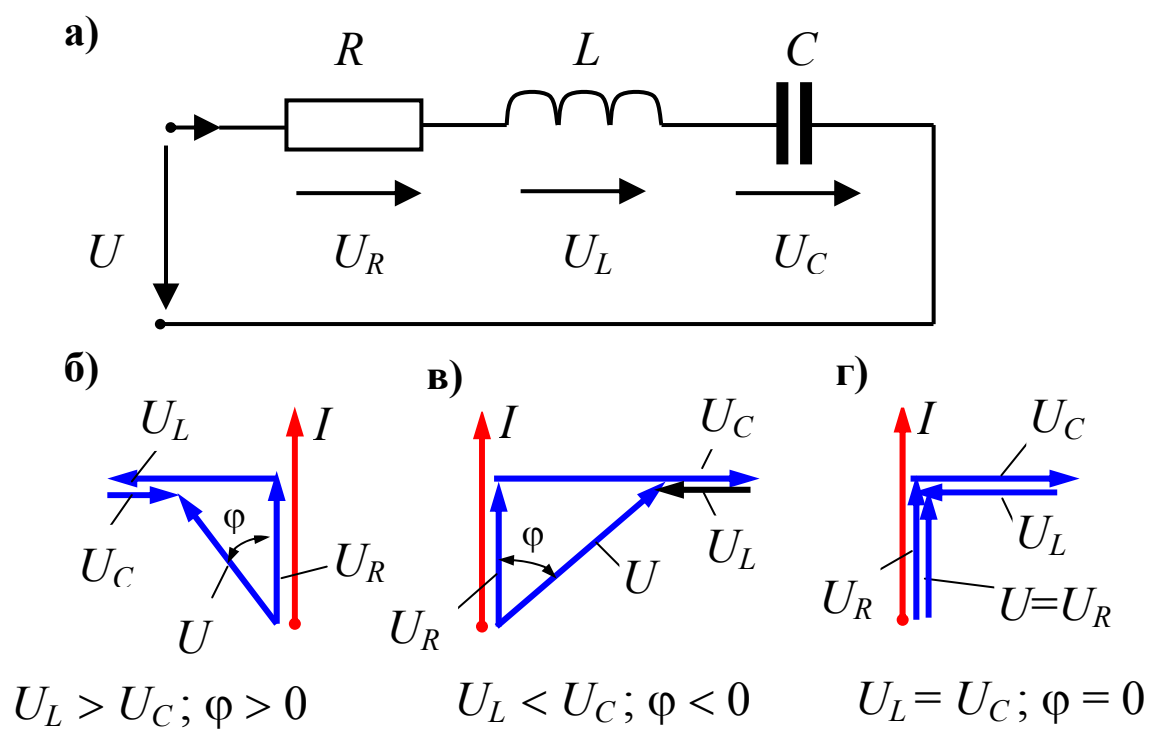


Рис. 7

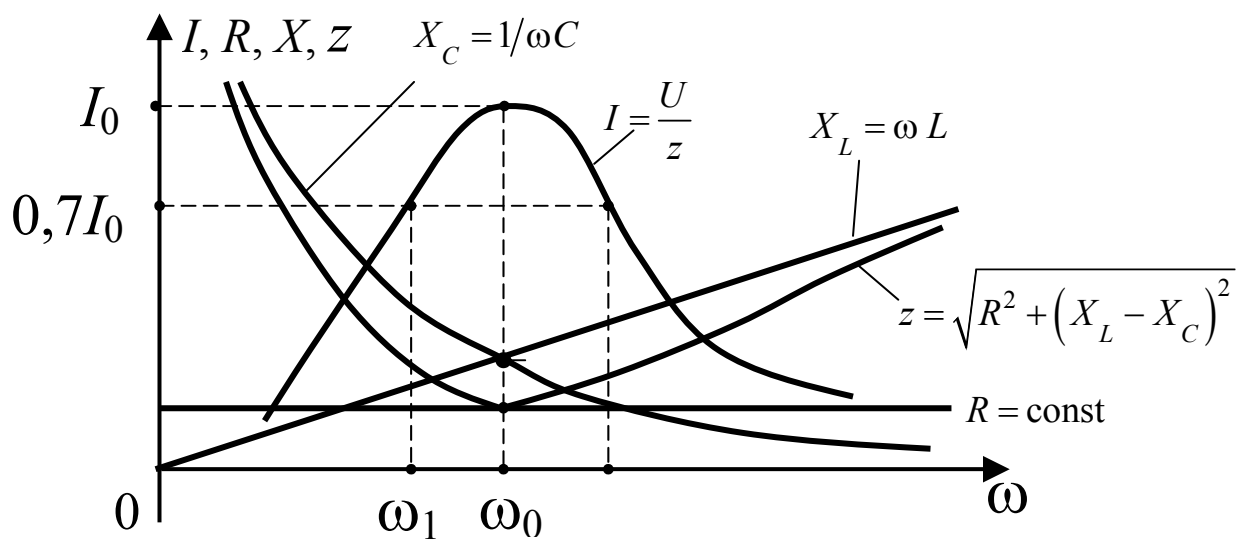


Рис. 8

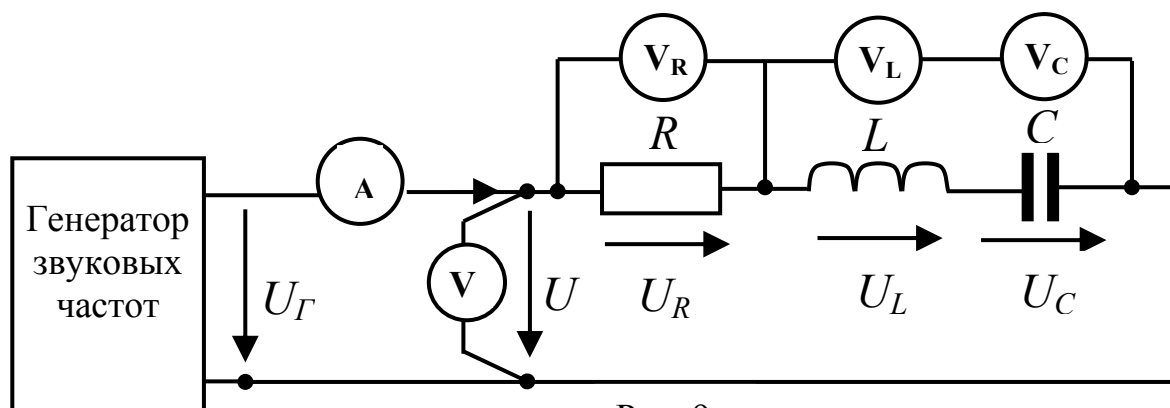


Рис. 9

Это уравнение показывает соотношение между ω , L , C при резонансе. Если L и C – заданные величины, то угловая частота цепи, при которой будет иметь место резонанс напряжений

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (16)$$

При резонансе напряжений полное сопротивление $z = R$ и является минимальным, а ток в цепи $I = U/z$ при неизменном значении действующего напряжения U – максимальным. Если при резонансе $X_{L0} = X_{C0} > R$, то напряжения на реактивных элементах цепи больше приложенного к цепи напряжения $U_{L0} = U_{C0} > U$. Для оценки этого соотношения в последовательной цепи используют коэффициент Q , называемый *добротностью* цепи (контура):

$$Q = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{U_{C0}}{U}. \quad (17)$$

Зависимости сопротивлений элементов цепи, напряжений на этих элементах, угла сдвига фаз, тока от частоты называются *частотными характеристиками цепи*. В данной работе рассматриваются зависимости активного сопротивления R , индуктивного сопротивления X_L , емкостного сопротивления X_C , полного сопротивления z , угла сдвига фаз φ и действующего значения тока цепи I от частоты приложенного напряжения. Общий вид этих характеристик показан на рис. 8.

При частоте $\omega_0 > \omega > 0$ преобладает емкостное сопротивление и цепь имеет емкостной характер – ток опережает напряжение по фазе (векторная диаграмма на рис. 7, в).

При частоте $\infty > \omega > \omega_0$ в цепи преобладает индуктивное сопротивление и цепь имеет индуктивный характер – ток отстает от напряжения по фазе (рис. 7, б).

При частоте $\omega = \omega_0$ цепь является чисто активной – ток и напряжение совпадают по фазе и наблюдается резонанс напряжений (векторная диаграмма на рис. 7, г).

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. «Собрать» схему, представленную на рис. 9, в соответствии со своим вариантом. Номер схемы и ее параметры указаны в табл. 3. При этом номер варианта должен быть равен последней цифре шифра студента. Скопировать схему с экрана монитора для последующего представления ее в отчете по лабораторной работе. Напоминаем, что нажатие клавиши Prt Scr позволяет зане-

сти в буфер обмена содержимое экрана монитора, которое затем можно вставить в необходимый документ.

Таблица 3

№ варианта	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	U , В
1	100	20	0,5	1
2	125	25	0,4	1
3	200	40	0,25	2
4	250	50	0,2	2
5	375	75	0,134	3
6	400	80	0,125	3
7	500	100	0,1	4
8	600	120	0,84	4
9	220	70	0,25	2
0	330	80	0,2	2

2. Рассчитать величину резонансной частоты ω_0 по формуле (15).

3. Определить величину резонансной частоты экспериментально. Для этого, изменяя частоту напряжения источника ЭДС, найти то ее значение, при котором ток цепи достигает максимума. Рекомендуется вначале изменять частоту дискретно в десять раз. Определив приблизительный максимум в найденном диапазоне, продолжите изменение частоты, сократив ее дискретизацию. При этом следите за показанием амперметра. Расчетное значение резонансной частоты и экспериментальное значение должны совпасть.

Форма 6

Частота		U_0 , В	U , В	U_R , В	U_L , В	U_C , В
$\omega = 1/C$	f , Гц					
$0,2\omega_0 =$	$0,2f_0 =$					
$0,5\omega_0 =$	$0,5f_0 =$					
$0,7\omega_0 =$	$0,7f_0 =$					
$\omega_0 =$	$f_0 =$					
$1,3\omega_0 =$	$1,3f_0 =$					
$1,7\omega_0 =$	$1,7f_0 =$					
$2\omega_0 =$	$2f_0 =$					

4. Изменяя частоту приложенного напряжения в пределах от $0,2 \omega_0$ до $2\omega_0$, измерить при каждом из значений ω (значения частоты указаны в табл. по форме 6) действующее значение тока цепи I и действующие значения напряжений U , U_R , U_L , U_C . Полученные данные занести в табл. по форме 6.

По полученным данным рассчитать значения I , R , X_L , X_C , z для тех же значений частот, что и в табл. по форме 6. Результаты расчета занести в табл. по форме 7.

Форма 7

Частота		Эксперимент					Теория
$\omega = 1/C$	f , Гц	I , мА	R , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	z , Ом	z , Ом
$0,2\omega_0 =$	$0,2f_0 =$						
$0,5\omega_0 =$	$0,5f_0 =$						
$0,7\omega_0 =$	$0,7f_0 =$						
$\omega_0 =$	$f_0 =$						
$1,3\omega_0 =$	$1,3f_0 =$						
$1,7\omega_0 =$	$1,7f_0 =$						
$2\omega_0 =$	$2f_0 =$						

5. Рассчитать теоретически характеристику $z(\omega)$ по формуле (14) и сравнить ее с экспериментальной характеристикой, представленной в табл. по форме 7. Убедиться в хорошем совпадении теории и опыта.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Копия экрана монитора со схемой исследуемой цепи.
 2. Таблицы экспериментальных и расчетных величин.
 3. Основные расчетные формулы.
 4. Графические зависимости.
 5. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.
 6. Выводы.
- Литература: [1], с. 93...100

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каково общее условие возникновения резонанса в электрической цепи?
2. Каковы основные особенности резонанса в цепи с последовательным соединением R, L, C ?
3. Почему резонанс в цепи с последовательным соединением R, L, C называют резонансом напряжения?
4. По каким признакам можно определить наступление резонанса в цепи с последовательным соединением R, L, C , если плавно изменять частоту на зажимах цепи от нуля до бесконечности?
5. Как изменяется характер полного сопротивления цепи при изменении частоты в ней от нуля до наибольшего значения?
6. Как объяснить тот факт, что при резонансе исследуемой цепи ток в ней достигает наибольшего значения?

РАБОТА 4

Исследование трехфазной осветительной цепи

1. ЦЕЛИ ПРОГРАММА РАБОТЫ

Экспериментальное исследование трехфазной цепи при соединении приемников звездой при различных режимах работы.

1. Исследование цепи в симметричном режиме работы при наличии и отсутствии нейтрального провода.
2. Исследование цепи в случае обрыва фазного провода при наличии и отсутствии нейтрального провода.
3. Исследование цепи в случае короткого замыкания фазы приемника при отсутствии нейтрального провода.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной работе рассматривается трехфазная цепь, однофазные приемники которой соединены звездой, как показано на рис. 10,а.

Провода, соединяющие фазы источника и приемника, называются линейными, а провод, соединяющий нейтральную точку источника "0" и нейтральную точку приемника "0", называется нейтральным. Сопротивле-

нием линейных проводов и сопротивлением нейтрального провода пренебрегаем.

В основе теоретического анализа исследуемой цепи лежит комплексный метод. Принятые при этом положительные направления комплексных действующих значений токов, напряжений и ЭДС показаны на рис. 10,а. Для наглядности уравнения, составленные по законам Кирхгофа для комплексных действующих значений токов и напряжений, представляются в виде векторных диаграмм.

При соединении приемников звездой различают два вида напряжений – фазные и линейные. Фазные напряжения – это напряжения на фазах приемника (напряжение между соответствующим линейным проводом и нейтральной точкой приемников): $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$. Линейные напряжения – это напряжения между линейными проводами: $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$. Соотношения между фазными и линейными напряжениями определяются непосредственно из рассмотрения рис. 11,а и подтверждаются вторым законом Кирхгофа:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B ; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C ; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A . \quad (18)$$

При этом всегда сумма комплексных действующих значений линейных напряжений приемника равна нулю:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0 . \quad (19)$$

При соединении приемника звездой токи в линейных проводах

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} ; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} ; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}$$

равны токам в фазах приемника (рис. 10). При этом в соответствии с первым законом Кирхгофа для узла 0' сумма комплексных действующих значений фазных токов равна току в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{0'0} . \quad (20)$$

При отсутствии нейтрального провода

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 . \quad (21)$$

Различают симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. Для получения симметричного режима работы необходимо соблюдение двух условий:

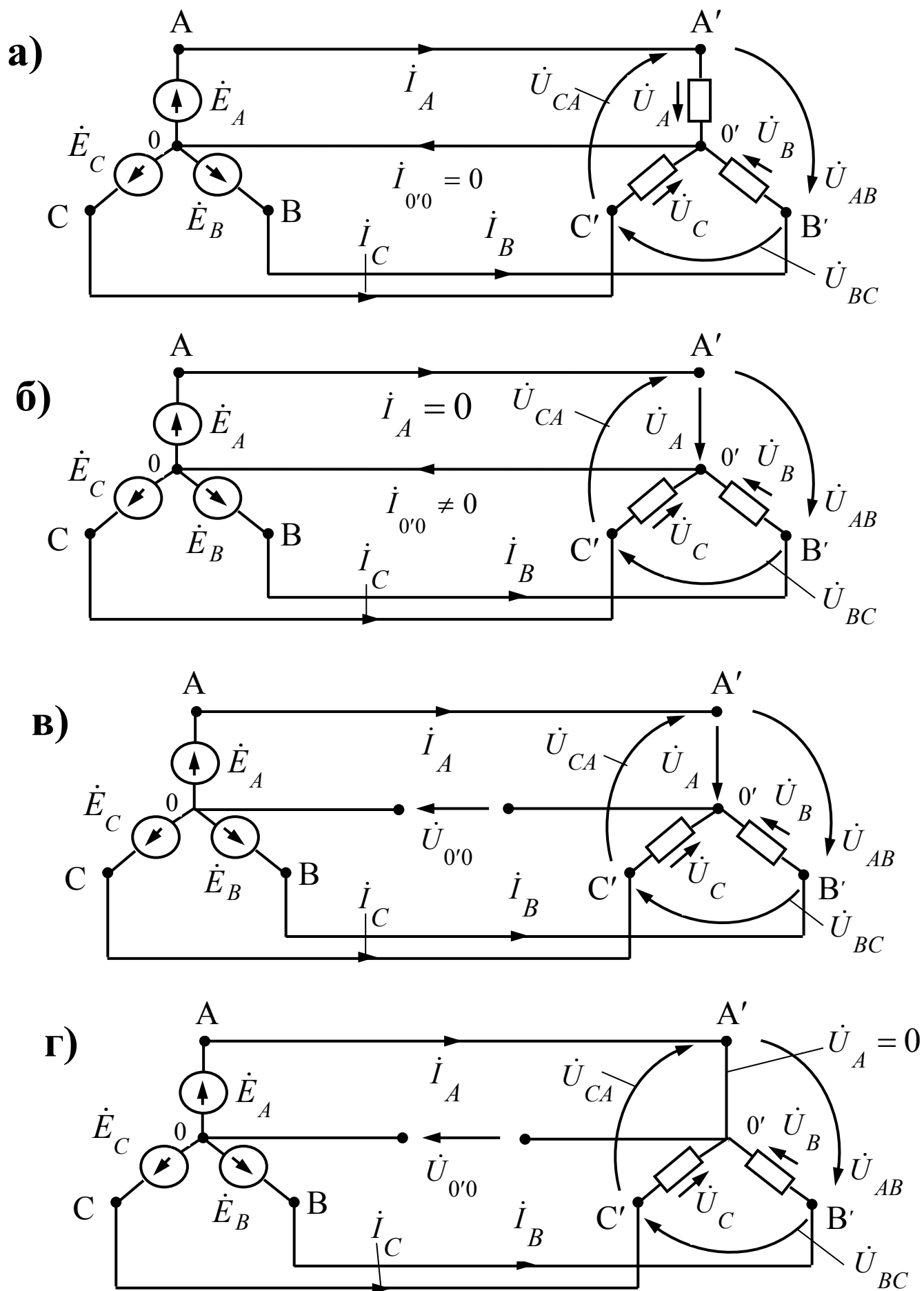
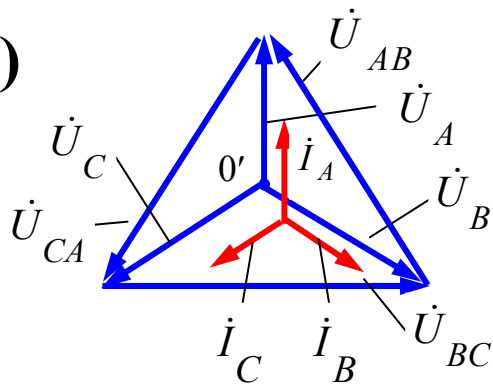


Рис. 10

а)



$$U_A = U_B = U_C = U_\Phi$$

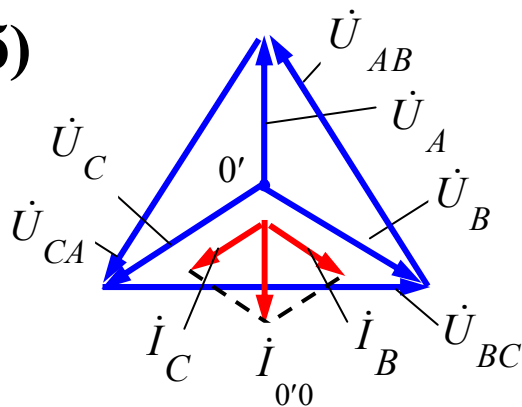
$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\Pi$$

$$U_\Pi = \sqrt{3} U_\Phi$$

$$I_A = I_B = I_C = I_\Phi$$

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

б)

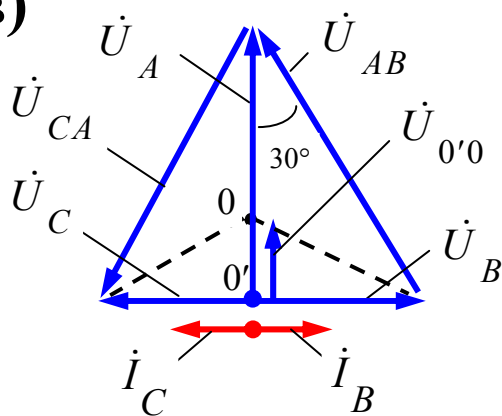


$$I_A = 0 \quad I_{0'0} = I_B = I_C$$

$$\dot{I}_{0'0} = \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

$$U_A = U_B = U_C$$

в)

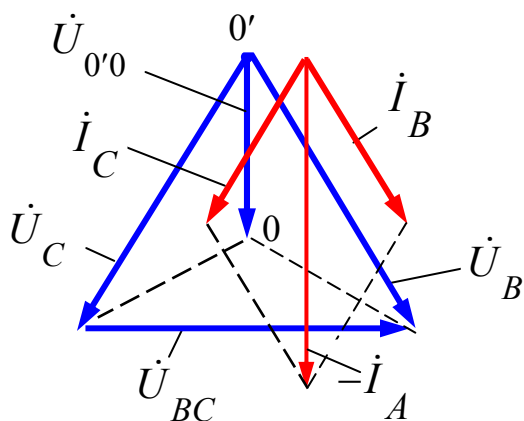


$$I_A = 0 \quad I_B = I_C = 0,87 I_\Phi$$

$$U_A = U_\Pi \cos 30^\circ = 0,87 U_\Pi$$

$$U_A = 1,5 U_\Phi \quad U_{0'0} = 0,5 U_\Phi$$

г)



$$U_A = 0 \quad U_B = U_C = U_\Pi$$

$$U_{0'0} = U_\Phi$$

$$I_B = I_C = 1,73 I_\Phi$$

$$I_A = 3 I_\Phi$$

Рис. 11

– трехфазный источник должен быть симметричным, т. е. действующие значения всех трех фазных напряжений должны быть одинаковыми и сдвинутыми друг относительно друга по фазе на 120° (на векторной диаграмме эти напряжения образуют симметричную трехлучевую звезду, как это показано на рис. 11,а);

– комплексные сопротивления всех трех фаз приемника должны быть одинаковыми:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\Phi.$$

При симметричном режиме работы цепи действующие значения токов во всех трех фазах приемника равны между собой:

$$I_A = I_B = I_C = I_\Phi.$$

Соответствующие векторы сдвинуты относительно друг друга по фазе на 120° .

Если хотя бы одно из вышеперечисленных условий не соблюдается, то режим работы цепи является несимметричным.

В данной работе трехфазный источник симметричен. Кроме того, сопротивления всех трех фаз приемника одинаковы и активны:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\Phi = R. \quad (22)$$

Несимметричный режим работы в такой цепи может возникать либо вследствие обрыва линейных или фазных проводов, либо вследствие коротких замыканий в фазах приемника.

Симметричный режим работы при наличии нейтрального провода

При таком режиме работы (рис. 10,а) векторы действующих значений фазных напряжений $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ образуют симметричную трехлучевую звезду (рис. 11,а). Векторы действующих значений линейных напряжений, определяемых из соотношения (17), также образуют симметричную трехлучевую звезду и могут быть расположены между концами векторов фазных напряжений, образуя замкнутый равносторонний треугольник, как это показано на рис. 11,а. При этом действующие значения линейных напряжений в $\sqrt{3}$ раз больше действующих значений фазных напряжений:

$$U_A = \sqrt{3}U_\Phi = 1,73 U_\Phi.$$

Заметим, что система линейных напряжений определяется источником энергии и остается неизменной при любых изменениях фазных напряжений приемника.

Векторы действующих значений фазных токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ также образуют симметричную трехлучевую звезду, причем каждый из векторов тока совпадает по фазе с вектором фазного напряжения, как ток в активном сопротивлении. Сумма векторов фазных токов в силу симметрии звезды токов равна нулю, и поэтому ток $I_{0'0}$ в нейтральном проводе в соответствии с отношением (20) равен нулю.

Симметричный режим работы цепи при отсутствии нейтрального провода

При таком режиме работы сумма векторов действующих значений фазных токов по-прежнему равна нулю и поэтому отсутствие нейтрального провода никак не влияет на режим работы трехфазной цепи. Векторная диаграмма токов и напряжений при этом та же, что и на рис. 11,а.

Несимметричный режим работы цепи при обрыве фазы и наличии нейтрального провода

При данном режиме работы (рис. 10,б) фазные напряжения всех трех фаз остаются неизменными (рис. 11,б) по сравнению со случаем симметричного режима работы цепи, однако ток в оборванной фазе отсутствует. Система фазных токов становится несимметричной, и в соответствии с соотношением (19) в нейтральном проводе появляется ток, комплексное действующее значение которого

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

Действующее значение этого тока, как видно из геометрических построений на векторной диаграмме (рис. 11,б), равно действующему значению тока в фазах В и С.

Несимметричный режим работы цепи при обрыве фазы А и отсутствии нейтрального провода

При таком режиме работы ток в фазе А равен нулю (рис. 10,в) и трехфазная цепь превращается фактически в однофазную, состоящую из двух со-

противлений $\underline{Z}_B$ и $\underline{Z}_C$, соединенных последовательно и подключенных к линейному напряжению $\dot{U}_{BC}$. Векторы действующих значений $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ (рис. 11,в) находятся в противофазе: $\dot{U}_B$ и $-\dot{U}_C$. Их действующие значения равны между собой и составляют половину действующего значения линейного напряжения U_{BC}

$$U_B = U_C = \frac{U_{BC}}{2}.$$

Эти значения уменьшились по сравнению с симметричным режимом работы, что следует из векторной диаграммы, в 0,87 раз. Соответствующим образом уменьшились и действующие значения фазных токов в фазах В и С. Они составляют при этом режиме работы 0,87 часть от действующих значений токов в этих фазах при симметричном режиме работы цепи.

На разрыве фазы А появляется напряжение $\dot{U}_A$, действующее значение которого, как видно из векторной диаграммы, составляет 0,87 часть линейного напряжения и в 1,5 раза больше фазного напряжения при симметричном режиме работы цепи:

$$U_A = 0,87U_L = 1,5U_\phi.$$

Между нейтральными точками приемника и источника появляется напряжение $\dot{U}_{0'0}$, показанное на векторной диаграмме в виде вектора между точками 0' и 0. Его действующее значение, как видно из диаграммы, равно половине фазного напряжения при симметричном режиме работы цепи.

$$U_{0'0} = 0,5U_\phi.$$

Несимметричный режим работы цепи при коротком замыкании фазы А и отсутствии нулевого провода

При этом режиме работы (рис. 10,г) напряжение на фазе А равно нулю, а напряжения на фазах В и С становятся равными линейными напряжениями источника

$$\dot{U}_B = -\dot{U}_{AB}; \quad \dot{U}_C = -\dot{U}_{CA}.$$

Их действующие значения U_B и U_C увеличиваются по сравнению с симметричным режимом в 1,73 раза $U_B = U_C = U_L$.

Соответствующим образом увеличиваются и действующие значения токов в фазах В и С они становятся в 1,73 раза больше, чем при симметричном режиме работы

$$I_B = I_C = \frac{U_{\text{Л}}}{R} = 1,73I_{\phi}.$$

Ток в фазе А определяется из соотношения (21)

$$\dot{I}_A = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C).$$

Действующее значение этого тока, как видно из векторной диаграммы (рис. 11,г), в 1,73 раза больше, чем действующие значения токов в фазах В и С:

$$I_A = 1,73I_B = 1,73I_C.$$

Между нейтральными точками приемника и источника действует напряжение $U_{0'0}$, комплексное действующее значение которого показано на векторной диаграмме в виде вектора между точками 0' и 0. Действующее значение этого напряжения численно равно фазной ЭДС источника:

$$U_{0'0} = E_A = U_{\phi}.$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. «Собрать» трехфазную схему с измерительными приборами (вольтметры и амперметры), представленную на рис. 12. В соответствии со своим вариантом установить параметры трехфазной цепи (табл. 4). При этом номер варианта должен быть равен последней цифре шифра студента. Скопировать схему с экрана монитора для последующего представления ее в отчете по лабораторной работе. Напоминаем, что нажатие клавиши Prt Scr позволяет занести в буфер обмена содержимое экрана монитора, которое затем можно вставить в необходимый документ.

2. Установить во всех трех фазах источника одинаковые действующие значения напряжений и начальные фазы: фаза А – 0° , фаза В – $(+240^\circ)$, фаза С – $(+120^\circ)$. Измерить действующие значения фазных и линейных напряжений на зажимах трехфазного источника и занести их в табл. по форме 8.

Таблица 4

Значение параметра	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
f , Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
U , В	120	110	127	115	220	200	240	380	360	400
R , Ом	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200

Фазные напряжения источника			Линейные напряжения источника		
$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{AB}, \text{В}$	$U_{BC}, \text{В}$	$U_{CA}, \text{В}$

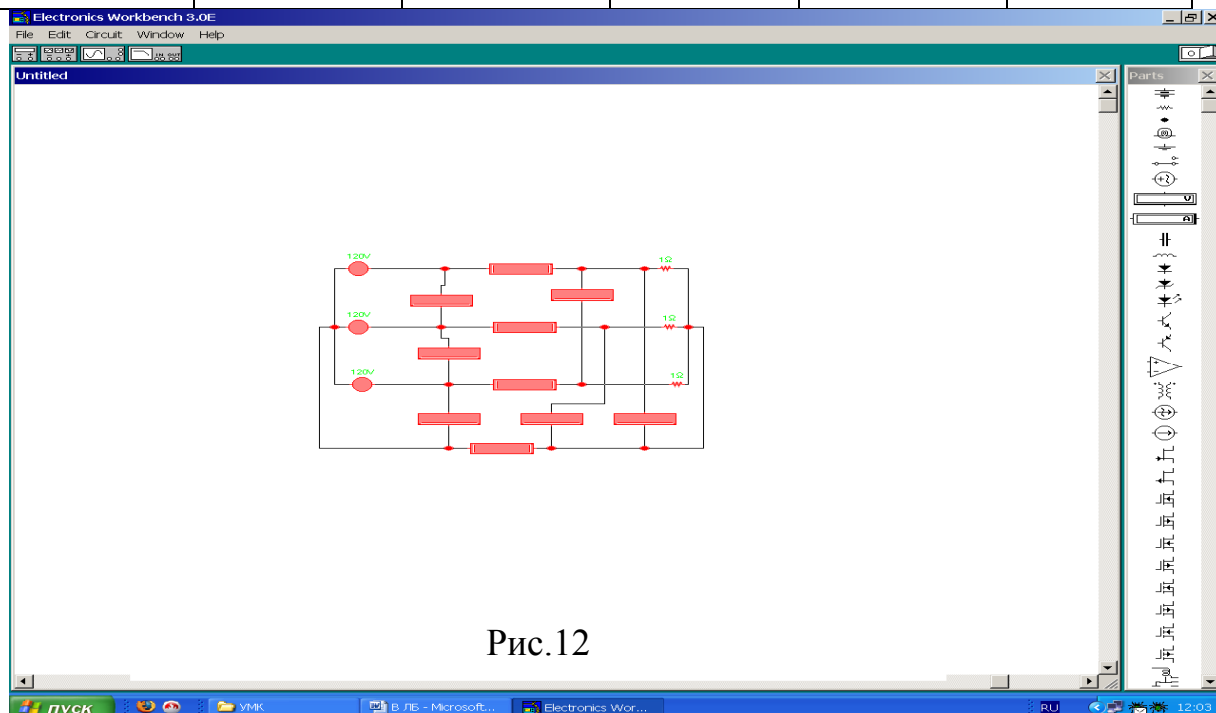


Рис.12

3. Исследовать симметричный режим работы цепи при наличии нейтрального провода. Для этого измерить действующие значения фазных и линейных напряжений приемника. Результаты измерений занести в первую строку табл. по форме 9.

Режим работы	Измеряемая величина								
	$U_L, \text{В}$	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{0'0}, \text{В}$	$I_A, \text{В}$	$I_B, \text{В}$	$I_C, \text{В}$	$I_{0'0}, \text{В}$
Симметричный с нейтральным проводом									
Симметричный без нейтрального провода									
Обрыв фазы А с нейтральным проводом									
Обрыв фазы А без нейтрального провода									
Короткое замыкание фазы А без нейтрального провода									

Затем измерить действующие значения фазных токов и действующее значение тока в нейтральном проводе. Результаты измерений также занести в табл. по форме 9. По известным действующим значениям фазных и линейных напряжений, величинам фазных сопротивлений построить векторную диаграмму напряжений и токов для данного режима работы цепи (рис. 11,а).

Сопоставить результаты теоретических построений с экспериментальными данными и убедиться в том, что они практически совпадают. Убедиться также в том, что при этом режиме:

- действующие значения фазных напряжений приемника равны между собой;
- действующие значения линейных напряжений равны между собой и в $\sqrt{3}$ раз больше действующих значений фазных напряжений;
- действующие значения линейных напряжений равны между собой и в $\sqrt{3}$ раз больше действующих значений фазных напряжений;
- действующие значения фазных токов равны между собой;
- ток в нейтральном проводе равен нулю.

4. Исследовать симметричный режим работы при отсутствии нейтрального провода.

Для этого отключить нейтральный провод и измерить действующие значения всех фазных и линейных напряжений приемника, а также действующие значения всех фазных токов. Результаты измерений занести во вторую строку табл. по форме 9.

Убедиться в том, что обрыв нейтрального провода не привел к изменению режима работы цепи.

5. Исследовать режим работы цепи при обрыве фазы А и наличии нейтрального провода (рис. 10,б).

Для этого вновь подключить к нейтральным точкам источника и приемника нейтральный провод и отключить сопротивление в фазе А.

Затем измерить действующие значения фазных и линейных напряжений приемника, действующие значения фазных токов и действующие значения тока в нейтральном проводе. Результаты измерений занести в третью строку табл. по форме 9.

По известным действующим значениям фазных напряжений и величинам фазных сопротивлений построить векторную диаграмму напряжений и токов для данного режима работы цепи (рис. 11,б).

Сопоставить результаты теоретических построений с экспериментальными данными и убедиться в том, что они практически совпадают.

Убедиться также в том, что при этом режиме:

- действующие значения фазных напряжений всех трех фаз равны между собой;
- ток в фазе А отсутствует, а токи в фазах В и С не изменились по сравнению со случаем симметричного режима работы цепи;
- в нейтральном проводе появился ток, действующее значение которого численно равно действующим значениям токов в фазах В и С.

6. Исследовать режим работы цепи при обрыве фазы А и отсутствии нейтрального провода (рис. 10,в).

Для этого отключить нейтральный провод и оставить отключенным сопротивление в фазе А.

Затем измерить действующие значения фазных и линейных напряжений приемника, действующие значения фазных токов и действующее значение напряжения между нейтральными точками приемника и источника.

Результаты измерений занести в четвертую строку табл. по форме 9.

По известным действующим значениям фазных напряжений, известным величинам фазных сопротивлений построить векторную диаграмму напряжений и токов для данного режима работы цепи (рис. 11,в). Сопоставить результаты теоретических построений с экспериментальными данными и убедиться в том, что они практически совпадают. Убедиться в том, что при этом режиме:

- действующие значения напряжений в фазах В и С составляют половину линейного напряжения U_{BC} и часть от фазного напряжения при симметричном режиме работы цепи;
- действующее значение напряжения на фазе А составляет 0,87 часть от линейного напряжения и в 1,5 раза больше фазного напряжения при симметричном режиме;
- действующее значение напряжения между нейтральными точками приемника и источника составляет половину фазного напряжения, имевшего место при симметричном режиме работы;
- ток в фазе А отсутствует, а действующие значения токов в фазах В и С равны между собой и составляют 0,87 часть от действующих значений этих токов при симметричном режиме работы.

7. Исследовать режим работы цепи при коротком замыкании фазы А и отсутствии нейтрального провода (рис. 10,г).

Для этого оставить нейтральный провод отключенным и произвести короткое замыкание фазы А.

Затем измерить действующие значения фазных и линейных напряжений приемника, действующие значения фазных токов и действующее значение напряжения между нейтральными точками приемника и источника. Результаты измерений занести в табл. по форме 9.

По известным действующим значениям фазных напряжений, известным величинам фазных сопротивлений построить векторную диаграмму напряжений и токов для данного режима работы цепи (рис. 11,г).

Сопоставить результаты теоретических построений с экспериментальными данными и убедиться в том, что они практически совпадают. Убедиться также в том, что при этом режиме:

- напряжение на фазе А отсутствует, а действующие значения напряжений на фазах В и С увеличились в $\sqrt{3}$ раз по сравнению со случаем симметричного режима работы и стали равны действующим значениям линейных напряжений;

- между нейтральными точками приемника и источника появилось напряжение, действующее значение которого численно равно действующему значению фазного напряжения при симметричном режиме;

- действующие значения токов в фазах В и С увеличились в $\sqrt{3}$ раз по сравнению со случаем симметричного режима работы;

- действующее значение тока в фазе А в $\sqrt{3}$ больше, чем в фазах В и С при данном режиме работы и в 3 раза больше, чем действующее значение тока в этой фазе при симметричном режиме работы.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схемы трехфазной цепи при всех исследуемых режимах ее работы, скопированные с экрана монитора.

2. Основные расчетные формулы.

3. Таблицы с результатами измерений.

4. Векторные диаграммы напряжений и токов для всех рассмотренных режимов работы цепи.

5. Краткие выводы по результатам работы.

Литература: [1], с. 123...142

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Известны комплексные действующие значения линейных напряжений

$$\dot{U}_{AB} = (-50 - j87) \text{ В и } \dot{U}_{BC} = (-50 + j87) \text{ В.}$$

Определить действующее значение линейного напряжения U_{BC} .

2. Для трехфазной цепи, работающей в симметричном режиме, известны действующее значение линейного напряжения $U_L = 380$ В и сопротивление фазы приемника, соединенного звездой $\underline{Z}_\phi = R = 22$ Ом. Определить действующее значение фазного тока.

3. В трехфазной цепи с нейтральным проводом, работавшей в симметричном режиме, произошел обрыв нейтрального провода. Как изменятся действующие значения напряжений на фазах приемника?

РАБОТА 5

Переходные процессы в цепи с последовательным соединением активного сопротивления с катушкой индуктивности и активного сопротивления с конденсатором

1. ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

Экспериментальное исследование переходных процессов в цепях с последовательным соединением активного сопротивления R с катушкой индуктивности L и активного сопротивления R с конденсатором C при включении их на постоянное напряжение и последующем замыкании накоротко.

1. Получение осциллограмм тока и напряжения на индуктивности при переходном процессе в цепи RL , вызванным включением ее на постоянное напряжение и последующем замыкании накоротко. Графическое нахождение постоянной времени цепи, сопоставление опытных данных с результатами теоретического расчета.

2. Получение осциллограмм тока и напряжения на емкости при переходном процессе в цепи RC , вызванным включением ее на постоянное напряжение и последующем замыкании накоротко. Графическое нахождение постоянной времени цепи, сопоставление опытных данных с результатами теоретического расчета.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Переходным процессом называют процесс перехода электрической цепи от одного установившегося режима работы к другому установившемуся режиму ее работы.

Переходный процесс возникает сразу после коммутации цепи, т. е. после включения цепи под напряжение, отключения цепи от напряжения или после каких-либо переключений элементов цепи. Его появление объясняется изменением запаса энергии в индуктивностях и емкостях цепи, которое не может происходить мгновенно (скачком). Поэтому переходный процесс в цепях, содержащих индуктивности и емкости имеет определенное временное протяжение. Момент времени, соответствующий коммутации, принимается за начало отсчета времени переходного процесса и обозначается как $t = 0$.

Для момента коммутации справедливы два важных положения, которые называются законами коммутации.

Первый закон коммутации – относится к индуктивности: ток в индуктивности при коммутациях не может изменяться мгновенно. Иначе говоря, ток в индуктивности в последний момент перед коммутацией равен току в ней в первый момент после коммутации.

Второй закон коммутации – относится к емкости: напряжение на емкости при коммутациях не может изменяться мгновенно. Иначе говоря, напряжение на емкости в последний момент перед коммутацией равно напряжению на этой емкости в первый момент после коммутации.

В данной работе исследуются переходные процессы в цепях с последовательным соединением RL и RC при включении этих цепей на постоянное напряжение, а также при отключении их от постоянного напряжения с одновременным замыканием накоротко. Схемы этих цепей, вид коммутации, графики изменения токов и напряжений на индуктивности и емкости при переходных процессах, а также аналитические выражения для исследуемых токов и напряжений приводятся в табл. 5.

Величины τ_1 и τ_2 , входящие в формулы для токов и напряжений при переходном процессе, зависят только от соотношения между параметрами цепи. Они называются постоянными времени (с) и имеют размерность времени.

$$\text{Для цепи } RL: \quad \tau_1 = \frac{L}{R}, \quad (23)$$

где L – индуктивность цепи в Гн; R – сопротивление цепи в Ом.

$$\text{Для цепи } RC: \quad \tau_2 = RC, \quad (24)$$

где C – емкость цепи в Ф.

Заметим, что величина постоянной времени τ_1 цепи RL прямо пропорциональна индуктивности цепи и обратно пропорциональна сопротивле-

нию цепи, а величина постоянной времени τ_2 цепи RC прямо пропорциональна как величине емкости цепи, так и величине сопротивления цепи.

Рассмотрим поведение токов и напряжений в исследуемых цепях при указанных выше переходных процессах.

2.1. Цепь RL при включении ее на постоянное напряжение U (поз. 1, табл. 5)

Ток в цепи i в первый момент после коммутации равен нулю, в соответствии с первым законом коммутации, так как до коммутации тока в цепи не было. Затем, постепенно нарастая в соответствии с уравнением $i = U/R(1 - e^{-t/\tau_1})$, он достигает при $t \rightarrow \infty$ своего установившегося значения, равного U/R .

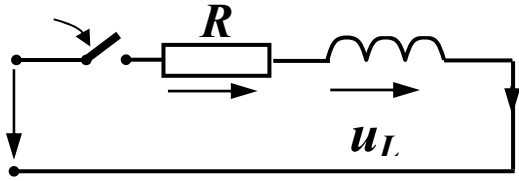
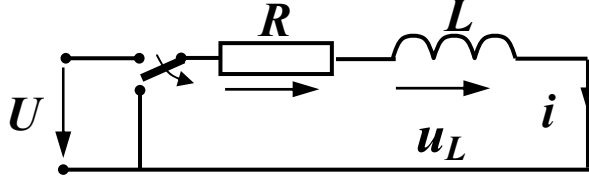
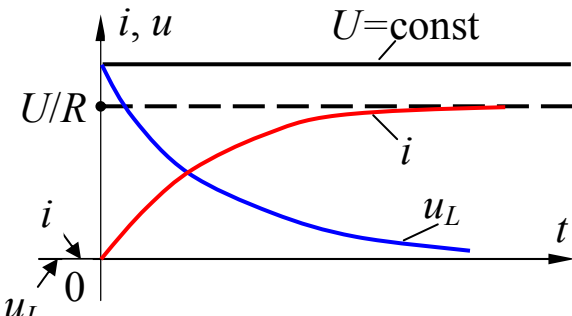
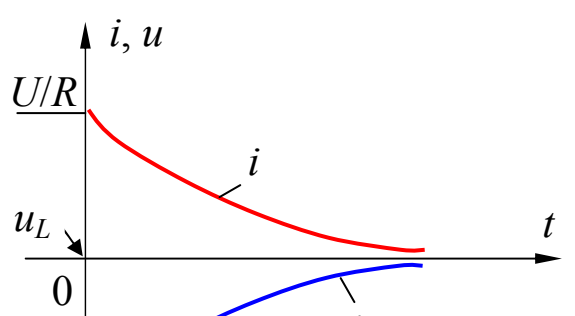
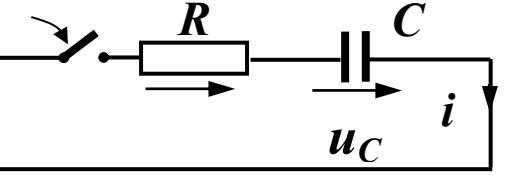
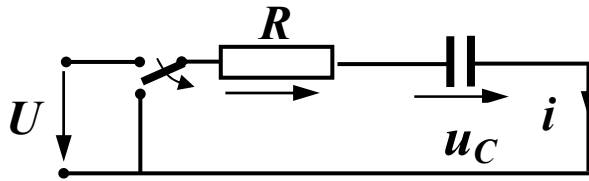
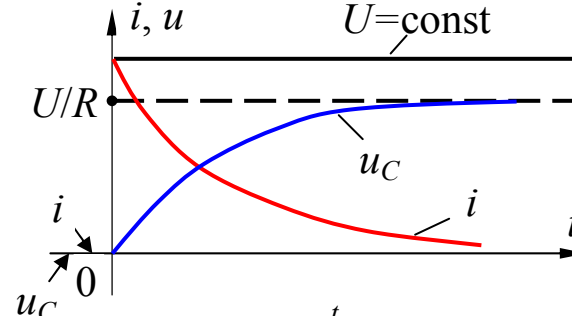
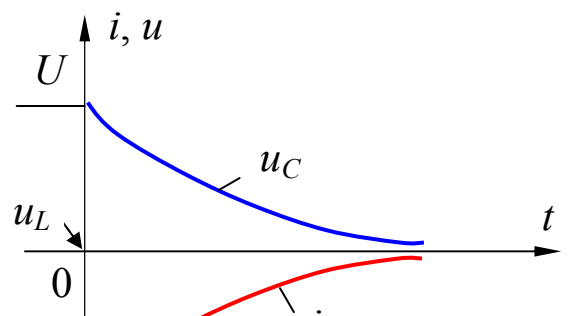
Напряжение на индуктивности u_L в первый момент после коммутации совершает скачок от нуля до значения U напряжения источника. Это объясняется тем, что в первый момент после коммутации тока в цепи нет, нет и напряжения на сопротивлении R . Поэтому все напряжение источника оказывается приложенным к индуктивности. Затем с течением времени напряжение на индуктивности, уменьшаясь в соответствии с уравнением: $u_L = Ue^{-t/\tau_1}$ при $t \rightarrow \infty$ спадает до нуля.

2.2. Цепь RL при отключении ее от постоянного напряжения U с одновременным замыканием накоротко (поз. 2, табл. 5)

Ток цепи i в первый момент после коммутации остается равным в соответствии с первым законом коммутации его установившемуся значению U/R , имевшему место до коммутации. Затем с течением времени он убывает в соответствии с уравнением $i = U/Re^{-t/\tau_1}$, и при $t \rightarrow \infty$ спадает до нуля.

Напряжение на индуктивности u_L в первый момент после коммутации совершает скачок от нуля до значения $-U$. Это объясняется тем, что в первый момент после коммутации ток в цепи равен U/R , но для замкнутой накоротко цепи RL имеем по второму закону Кирхгофа: $iR + u_L = 0$. Отсюда для первого момента времени имеем $(U/R) \cdot R + u_L = 0$ или $u_L(0) = -U$.

Таблица 5

1	Включение цепи <i>RL</i> на постоянное напряжение	2	Включение цепи <i>RL</i> на постоянное напряжение
			
			
$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$ $u_L = U e^{-\frac{t}{\tau_1}}$		$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau_1}}$ $u_L = U e^{-\frac{t}{\tau_1}}$	
3	Включение цепи <i>RC</i> на постоянное напряжение	4	Включение цепи <i>RC</i> на постоянное напряжение
			
			
$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau_2}}$ $u_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$		$i = -\frac{U}{R} \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$ $u_C = U e^{-\frac{t}{\tau_2}}$	

2.3. Цепь RC при включении ее на постоянное напряжения (поз. 3, табл. 5)

Напряжение на емкости u_C в первый момент после коммутации остается равным нулю в соответствии со вторым законом коммутации, так как до коммутации напряжения на ней не было. Затем, с течением времени напряжение на емкости увеличивается, в соответствии с уравнением $u_C = U(1 - e^{-t/\tau_2})$, и при $t \rightarrow \infty$ достигает своего установившегося значения, равного напряжению U источника.

Ток в цепи i в первый момент после подключения ее к напряжению U изменяется скачком от 0 до U/R , так как в этот момент времени $u_C = 0$ и все напряжение цепи приходится на сопротивление R . Затем с течением времени ток в цепи уменьшается в соответствии с уравнением $i = U/R e^{-t/\tau_2}$, и при $t \rightarrow \infty$ спадает до нуля.

2.4. Цепь RC при отключении ее от постоянного напряжения U с одновременным замыканием накоротко (поз. 4, табл. 5)

Напряжение на емкости u_C в первый момент после коммутации согласно второму закону коммутации остается равным напряжению U , так как до переключения рубильника все напряжение приходилось на емкость.

Затем с течением времени напряжение на емкости уменьшается в соответствии с уравнением $u_C = U(1 - e^{-t/\tau_2})$, и при $t \rightarrow \infty$ спадает до нуля.

Ток в цепи i в первый момент после переключения рубильника изменяется скачком от 0 до $-U/R$. Он изменяет направление по сравнению с зарядным током (поз. 3, табл. 5). Это происходит потому, что в первый момент коммутации напряжения на емкости в соответствии со вторым законом коммутации остается равным U . Но по второму закону Кирхгофа сумма напряжений на емкости и на сопротивлении для этой цепи равна нулю. Для первого момента после коммутации имеем

$$u_C + iR = 0, \quad \text{отсюда} \quad i(0) = -\frac{u_C}{R} = -\frac{U}{R}.$$

Затем с течением времени ток в цепи уменьшается в соответствии с уравнением $i = -U/R e^{-t/\tau_2}$, и при $t \rightarrow \infty$ спадает до нуля.

Длительность переходных процессов теоретически бесконечна, так как только при $t \rightarrow \infty$ ток цепи и напряжения на индуктивности и емкости достигают (как это выяснено выше) своих установившихся значений.

Однако практически уже через время $t = 5\tau$, прошедшее после момента коммутации, переходный процесс можно считать завершенным.

Рассмотрим причины такого положения. Изменения величины $e^{-t/\tau}$ в зависимости от времени t прошедшего с момента коммутации представлено в табл. 6.

Таблица 6

t, c	0	1τ	2τ	3τ	4τ	5τ	∞
$e^{-t/\tau}$	1	0,37	0,14	0,05	0,02	0,007	0

В верхней строчке этой таблицы дано время, выраженное в долях $\tau/t = 0; t = \tau; t = 2\tau; t = 3\tau; t = 4\tau; t = 5\tau; t = \infty$.

В нижней строке этой таблицы даны численные значения экспоненты $e^{-t/\tau}$ при различных значениях t .

Из этой таблицы следует, что уже при $t = 4\tau$ величина $e^{-t/\tau} = 0,02$, т.е. составляет только 2 % от ее первоначального значения, равного единице. Это означает, что ток в цепи и напряжения на индуктивности и емкости практически достигли своих установившихся значений и переходный процесс уже практически завершен. Экспериментальное исследование цепей RL и RC осуществляется с помощью осциллографа.

Цепь RL или RC подключается к генератору (Γ) звуковых частот (рис. 13), вырабатывающему прямоугольное напряжение частотой f . Вид этого напряжения показан на рис. 15,а.

Для получения осциллограммы тока осциллограф подключается к сопротивлению R параллельно (рис. 13). Фактически при этом на экране фиксируется осциллограмма напряжения на этом сопротивлении.

Однако, как известно из курса теоретических основ электротехники, напряжение на сопротивлении R и ток в этом сопротивлении всегда имеют одинаковую форму. Поэтому данная осциллограмма является одновременно и осциллограммой тока.

Для получения осциллограммы напряжения на индуктивности и напряжения на емкости осциллограф подключается к ним параллельно, как это показано на рис. 13.

Вид кривых токов и напряжений, полученных с помощью осциллографа для цепей RL и RC , находящихся под воздействием прямоугольного напряжения, показан на рис. 15,б и рис. 15,в.

При выбранном на этом рисунке положении осей координат моменту времени $t = 0$ соответствует появление на зажимах цепи напряжения $U = \text{const}$. Это означает фактически включение цепи под постоянное напряжение и определяет начало переходного процесса. Подробное описание поведения тока и напряжения на индуктивности тока и напряжения на индуктивности и емкости исследуемых цепей при таком переходном процессе дано выше.

Параметры цепей RL и RC подобраны таким образом, что за время одного полупериода приложенного прямоугольного напряжения переходный процесс практически завершается.

Через время $t = T/2$ после подключения исследуемой цепи к источнику прямоугольного напряжения, оно скачком (при выбранном на рис. 15 положении координатных осей) снижается до нуля. Это равносильно отключению цепи от постоянного напряжения и одновременному ее замыканию на внутреннее сопротивление источника (Γ), которым можно пренебречь по сравнению с сопротивлением цепи R . Возникающий при этом переходный процесс описан выше.

Заметим, что при использовании параметров и частот, указанных в разделе 4, этот переходный процесс также успевает практически завершиться за время действия второго полупериода прямоугольного напряжения.

Таким образом, в цепи RL и цепи RC , подверженной воздействию прямоугольного напряжения источника, периодически (с частотой $f = 1/T$) последовательно друг за другом совершается два переходных процесса:

- а) переходный процесс, связанный с включением цепи на постоянное напряжение (первый полупериод прямоугольного напряжения источника);
- б) переходный процесс, связанный с отключением цепи от постоянного напряжения и одновременным замыканием накоротко (второй полупериод прямоугольного напряжения источника).

Внешний вид осциллограмм, получаемых на экране осциллографа, показан на рис. 15,б и 15,в.

Имея осциллограммы токов и напряжений можно графически определить постоянные и времени τ_1 и τ_2 , не зная параметров цепей. Для этого надо взять любую точку на кривой тока или напряжения (рис. 15) и про-

вести через нее касательную к кривой до пересечения ее с горизонтальной прямой, определяющей уровень установившегося тока (или установившегося напряжения). Затем из данной точки кривой опустить перпендикуляр на эту горизонтальную прямую.

Точки пересечения касательной и перпендикуляра с указанной выше горизонтальной прямой отсекут на ней отрезок, численно равный постоянной времени τ . В частном случае, касательную к кривой можно проводить и из начала координат.

Найденное таким образом значение τ выражено в миллиметрах оси абсцисс. Для перевода ее в секунды необходимо предварительно найти масштаб времени α (с/мм) оси абсцисс. Если период прямоугольного напряжения T в секундах соответствует n миллиметрам на осциллограмме, то тогда масштаб оси абсцисс

$$\alpha = \frac{T}{n} = \frac{1}{nf}, \quad (25)$$

где f – частота источника в Гц.

Теперь, зная постоянную времени, выраженную в миллиметрах, легко найти ее значение в секундах:

$$\tau(c) = \tau(mm) \cdot \alpha. \quad (26)$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. «Собрать» цепь с последовательным соединением сопротивления R и индуктивности L и «подключить» ее к генератору прямоугольного напряжения, как это показано на рис. 13,а. Реальная компьютерная модель схемы представлена на рис. 14.

Установить параметры R и L , а также частоту f прямоугольного напряжения по табл. 7 для одного из приведенных там вариантов (последняя цифра шифра студента должна соответствовать номеру варианта).

Таблица 7

№ вари- анта	Параметры цепи			
	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	f , Гц
1	900	—	1	100
2	900	—	0,5	200
3	900	—	0,2	500
4	900	—	0,1	1000
5	500	—	2	100
6	500	—	1	200
7	500	—	0,4	500
8	500	—	0,3	500
9	500	—	0,2	1000
0	500	—	0,25	700
1	500	—	0,2	1000
2	500	50	—	1000
3	500	20	—	2500
4	500	10	—	5000
5	900	100	—	1000
6	900	50	—	2000
7	900	20	—	5000
8	900	10	—	10000
9	820	82	—	1000
0	800	80	—	1000

2. Скопировать прямоугольное входное напряжение.

3. «Подключить» осциллограф к сопротивлению R и получить на его экране кривую изменения тока цепи при воздействии на эту цепь прямоугольного периодического напряжения.

4. «Подключить» осциллограф к индуктивности L и получить на его экране кривую изменения напряжения на индуктивности во времени при воздействии на эту цепь прямоугольно периодического напряжения. Скопировать эту кривую.

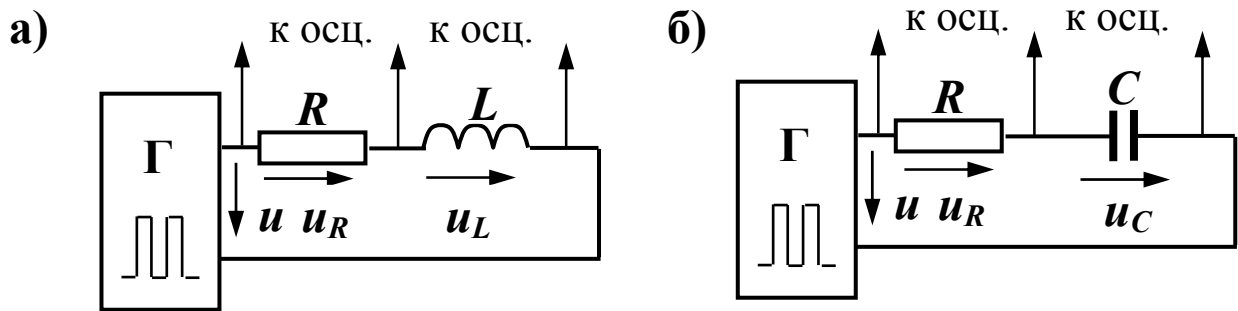


Рис. 13

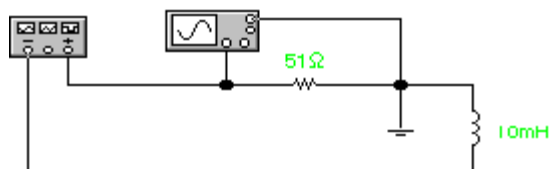


Рис. 14

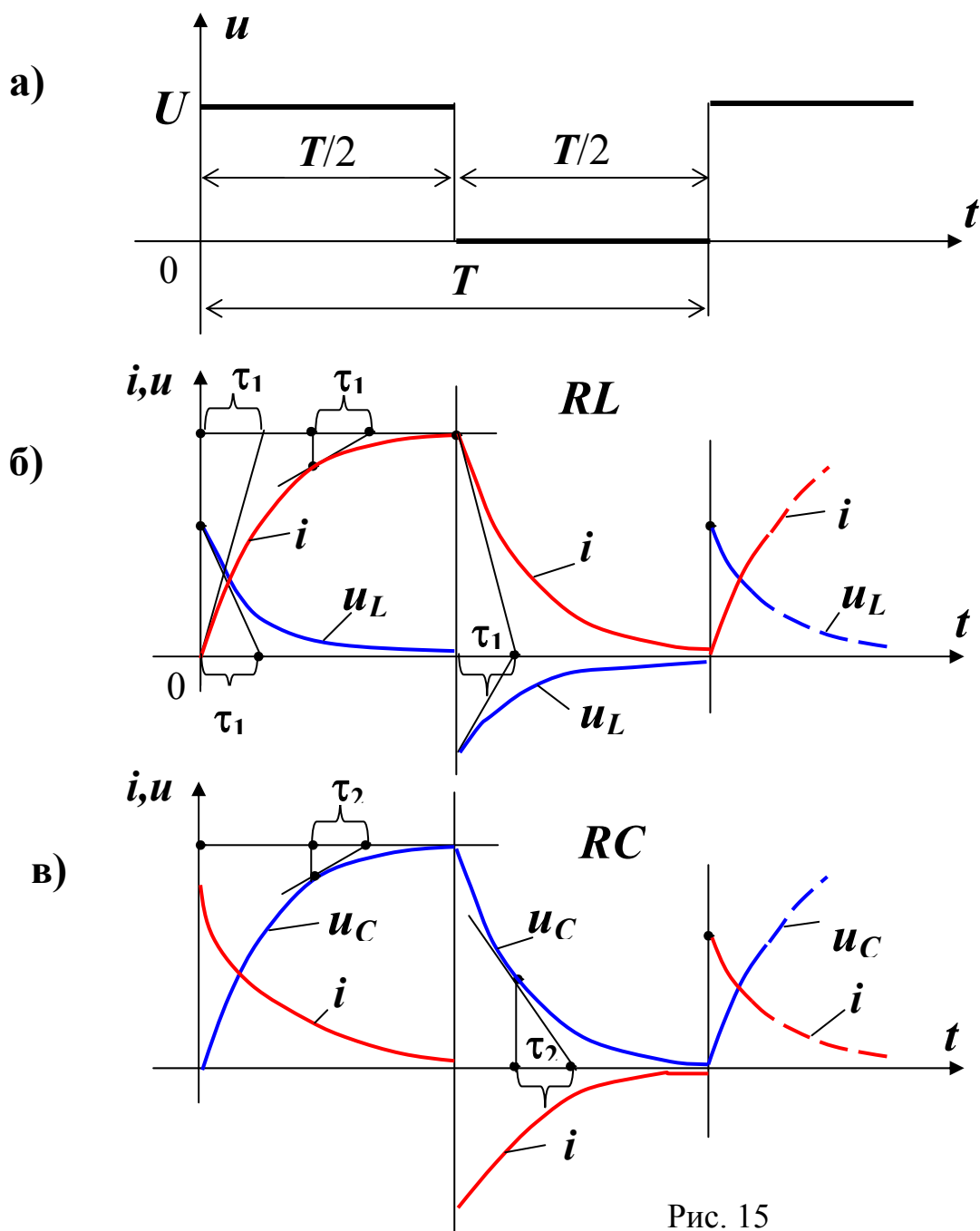


Рис. 15

5. Используя полученные кривые тока и напряжения, найти графическую постоянную времени τ_1 , выбрав для этого на этих кривых по 1-2 точке. Методика графического нахождения τ_1 дана в разделе 3 настоящего описания. Все найденные значения τ_1 должны быть одинаковыми между собой, так как величина τ_1 не зависит от тока напряжения цепи, а определяется только ее параметрами.

При определении величины τ_1 в секундах воспользуемся формулами (23) и (24) настоящего описания. Полученные таким образом значения τ_1 занести в табл. по форме 10.

Форма 10

Наименование	$\tau_{\text{экспер}}, \text{с}$	$\tau_{\text{теорет}}, \text{с}$	$\Delta = \frac{\tau_{\text{экспер}} - \tau_{\text{теорет}}}{\tau_{\text{экспер}}}$
<i>RL</i>			
<i>RC</i>			

Рассчитать теоретическое значение τ_1 по формуле (10) и занести его в табл. по форме 10. Сравнить между собой экспериментальное и теоретическое значения τ_1 . Убедиться в том, что они близки между собой.

6. «Собрать» цепь с последовательным соединением сопротивления R и емкости C на наборном поле, используя блоки переменных сопротивления и емкости лабораторного стенда, и «подключить» ее к генератору прямоугольного напряжения, как это показано на рис. 13,б. Установить параметры R и C , а также частоту f прямоугольного напряжения по табл. 7 для одного из приведенных там вариантов согласно своего шифра.

7. «Подключить» осциллограф к сопротивлению R и получить на экране осциллографа кривую изменения тока цепи во времени при воздействии на нее прямоугольного напряжения. Скопировать эту кривую.

8. «Подключить» осциллограф к емкости C и получить на его экране кривую изменения напряжения на емкости во времени при воздействии на цепь прямоугольного напряжения источника. Скопировать эту кривую.

9. Используя полученные кривые тока и напряжения, найти графически постоянную времени τ_2 , выбрав для этого по одной – две точки на кривых тока и напряжения.

Методы графического нахождения τ_2 даны в разделе 3 настоящего описания. Все найденные значения τ_2 должны быть практически одинаковыми между собой, поскольку величина τ не зависит от тока и напряжения, а определяется только параметрами цепи.

При определении величины τ_2 в секундах воспользоваться формулами 23 и 24 настоящего описания. Полученные таким образом значения τ_2 занести в табл. по форме 10.

Рассчитать теоретическое значение τ_2 по формуле (24) и занести его в табл. по форме 10. Сравнить между собой экспериментальное и теоретическое значения τ_2 . Убедиться в том, что они близки между собой.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схемы установок для исследования переходных процессов.
2. Перечень измерительных приборов и их краткие характеристики.
3. Таблица опытных данных и расчетов по форме 10.
4. Осциллограммы переходных процессов.
5. Выводы.

Литература: [1], с, 144...157

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Изменится ли ток в цепи RL скачком при включении ее на постоянное напряжения? А напряжение на индуктивности?
2. Изменится ли ток в цепи RC скачком при отключении ее от постоянного напряжения? А напряжение на емкости?
3. Сформулируйте первый и второй законы коммутации.
4. Как изменится постоянная времени цепи RL , если увеличить в два раза прикладываемое к цепи напряжение?
5. Как изменится постоянная времени цепи RL , если индуктивность цепи увеличить в два раза?

6. Как изменится постоянная времени цепи RC , если сопротивление цепи уменьшить в два раза?

7. Цепь RL включается под действием постоянного напряжения U . Какова величина установившегося тока в цепи после завершения переходного процесса?

8. Цепь RL включается под действием постоянного напряжения U . Каковы значения тока в цепи и напряжения на индуктивности в первый момент после коммутации?

9. Цепь RC отключается от действия постоянного напряжения U и тут же замыкается накоротко. Каковы значения напряжения на емкости и тока цепи в первый момент после коммутации?

10. Цепь RC включается под действием постоянного напряжения U . Какова величина установившегося напряжения на емкости после завершения переходного процесса?

Расчетно-графические лабораторные работы

Общие положения

В каждой работе предусмотрено 10 вариантов расчета. Выбор варианта определяется по последней цифре шифра студента.

При проведении экспериментального (расчетного) исследования необходимо осуществлять измерение тока, напряжения, мощности, определяющих характеристики того или иного электротехнического устройства. В данных работах предложено использовать стрелочные приборы: амперметры, вольтметры и ваттметры.

В табл. 8 приведены краткие технические данные электроизмерительных приборов. При проведении расчетно-графических исследований необходимо выбрать те из них, которые соответствуют номинальным значениям электрических параметров исследуемой схемы. Например, если номинальное напряжение цепи переменного тока равно 220 В, то следует выбрать вольтметр переменного напряжения, имеющий предел измерения 250 В. Число делений, на которое отклоняется стрелка прибора, определяется частным от деления разности между показанием прибора и нижним пределом его измерения на цену деления его шкалы C . Например, для амперметра $n_1 = (I_{\text{изм}} - I_{\text{min}})/C$. Цену деления C можно определить, как частное от деления предела измерения на число делений шкалы прибора.

Таблица 8

Данные электроизмерительных приборов

Наименование прибора	Система прибора	Технические данные
1 Вольтметр	электродинамический	30...150 В, 24 дел.
2 Вольтметр	электродинамический	50...450 В, 40 дел.
3 Вольтметр	электродинамический	0...150 В, 30 дел.
4 Амперметр	электродинамический	1...5 А, 20 дел.
5 Амперметр	электродинамический	0...2 А, 20 дел.
6 Амперметр	электродинамический	0...10 А, 20 дел.
7 Ваттметр	электростатический	2,5/5/10А, 150В, 150 дел.
8 Ваттметр	электростатический	5/10/25А, 300/450, 150 дел.

Требования к отчётам

1. Последовательность изложения результатов исследования указана в пункте «Содержание отчёта».

2. Таблица спецификации по форме 11 включает все электроизмерительные приборы, а также другие элементы цепи, обеспечивающие её работу.

Форма 11

Наименование элемента	Графическое обозначение	Назначение в цепи

3. Результаты вычислений должны иметь не менее трёх значащих цифр.

4. Масштабы графиков следует выбирать кратными 2, 4, 5, 10 или 0,5; 0,25; 0,2; 0,1.

Масштабы по осям координат должны начинаться с нуля. Масштабы шкал по осям выбираются равномерными. Цифры шкал наносят слева от оси ординат и под осью абсцисс.

Буквенные обозначения шкалы (откладываемый параметр) пишут над осью ординат и над осью в конце их. Единицы измерения параметра пишутся в конце числовой последовательности, которые проставляют соответственно слева от оси ординат и под осью абсцисс. Если в одних координатных осях

строят несколько характеристик одного аргумента, то каждая из них должна иметь свою ось ординат с собственным масштабом. По данным расчёта на график наносятся точки, ориентируясь на которые следует проводить плавные непрерывные кривые. Если на одном графике построено несколько кривых, то каждая из них должна быть отмечена соответствующим условным обозначением.

РАБОТА 6

Исследование однофазного двухобмоточного трансформатора

1. Цель работы

Расчёт внешней характеристики и КПД однофазного двухобмоточного трансформатора и оценка его свойств. Определение параметров схемы замещения. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Основные теоретические положения

Трансформатор может работать в режимах холостого хода, опытного короткого замыкания и нагрузочном. Два первых режима позволяют определить параметры схемы замещения (рис. 16), с помощью которой можно рассчитать любой режим работы трансформатора.

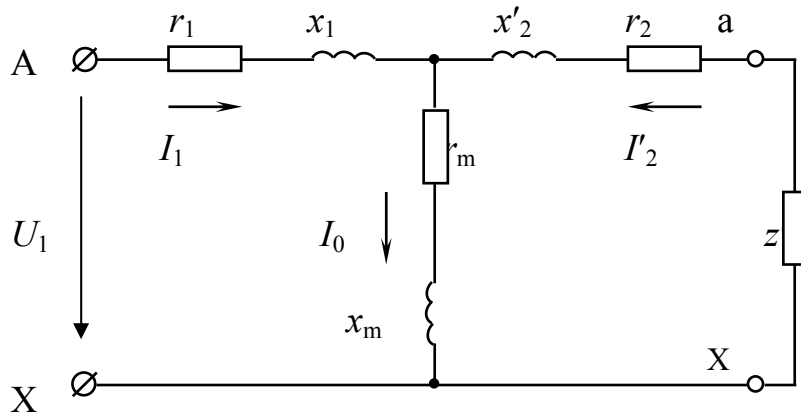


Рис. 16

Экспериментальные данные режима холостого хода позволяют вычислить коэффициент трансформации

$$k = U_{10}/U_{20};$$

активное, реактивное и полное сопротивление намагничивающего контура, эквивалентирующего магнитопровод трансформатора, Ом

$$z_m \approx U_{10}/I_{20}, r_m \approx P_{10}/I_{10}^2, x_m = \sqrt{z_m^2 + r_m^2};$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_0 = P_{10}/U_{10}I_{10}.$$

Экспериментальные данные режима опытного короткого замыкания позволяют вычислить полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания, Ом

$$z_k = U_{1k}/I_{1k}, r_k = P_{1k}/I_{1k}^2, x_k = \sqrt{z_k^2 + r_k^2}$$

и параметры обмоток схемы замещения, Ом

$$r_1 = r_2' = r_k/2, x_1 = x_2' = x_k/2,$$

а также коэффициент мощности $\cos \varphi_k = P_{1k}/U_{1k}I_{1k}$.

По результатам расчёта определяют активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки трансформатора, Ом

$$r_2 = r_2'/k^2, x_2 = x_2'/k^2.$$

Режимы холостого хода и опытного короткого замыкания являются предельными режимами работы трансформатора. С помощью этих двух режимов могут быть определены рабочие характеристики трансформатора без включения его под нагрузку. Например, КПД трансформатора при известной номинальной мощности S_n определяются по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_{10} + \beta^2 P_{1k}},$$

где $\beta = I/I_n$ – коэффициент нагрузки, равный отношению текущего значения тока в обмотке трансформатора к его номинальному значению.

Изменение сопротивления нагрузки приводит к изменению величины напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Процентное изменение величины вторичного напряжения определяется выражением, %

$$\Delta u = \beta(u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2),$$

где $u_a = u_k \cos \varphi_k$, $u_p = u_k \sin \varphi_k$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах.

Величина вторичного напряжения трансформатора при изменении сопротивления нагрузки вычисляется по формуле, В

$$U_2 = \frac{(100 - \Delta u)U_{20}}{100}.$$

3. Схема исследования

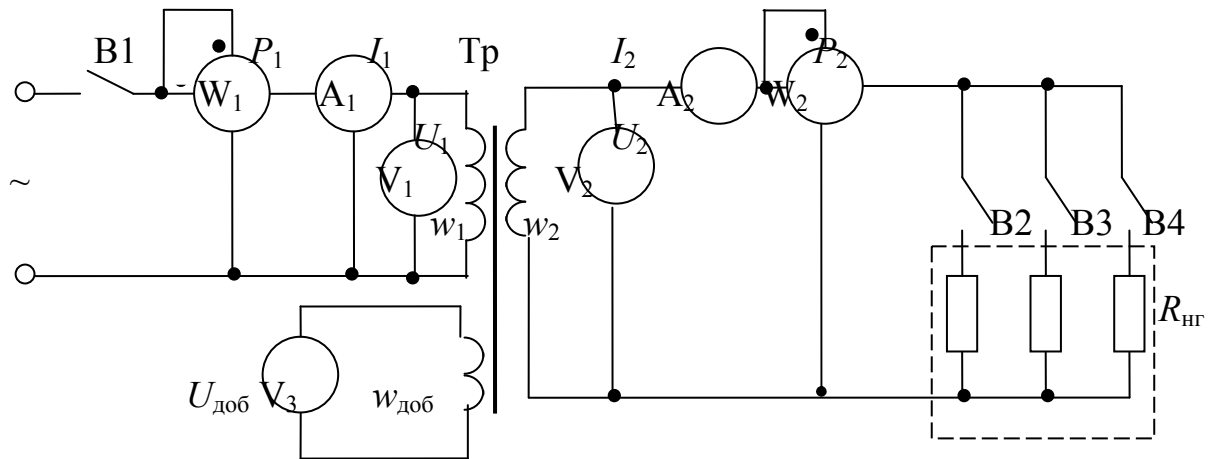


Рис. 17

Схема испытания однофазного двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 17. Первичная обмотка трансформатора включается в сеть переменного тока с частотой 50 Гц через выключатель В1. С помощью выключателей В2, В3 и В4 изменяется величина нагрузки трансформатора. Переключатель режимов работы трансформатора на схеме не показан.

4. Постановка задачи

Результаты экспериментальных исследований однофазного двухобмоточного трансформатора в режимах холостого хода и опытного короткого замыкания: напряжение холостого хода U_{10} , U_{20} , ток холостого хода I_{10} и активная мощность P_{10} , а также напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ и активная мощность $P_{1к}$ приведены в табл. 9.

Таблица 9

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_{10} , В	127	220	220	127	220	220	127	220	220	127
I_{10} , А	0,6	0,8	1,2	0,7	0,9	1,4	0,8	1,0	1,6	0,9
P_{10} , Вт	40	45	60	50	65	80	70	90	100	90
$U_{1к}$, В	10	20	30	12	24	34	12	18	28	15
$I_{1к}$, А	5,0	7,5	6,0	8,0	10	6,0	9,0	10	8,0	10
$P_{1к}$, Вт	45	60	80	75	90	100	75	120	140	85
U_{20} , В	80	120	150	100	170	130	90	140	160	110

По данным, приведённым в табл. 6, выполнить расчёт внешней характеристики и КПД трансформатора от коэффициента нагрузки β при заданном ко-

эffiциенте мощности потребителя $\cos\varphi = 1$ для нечётных вариантов и $\cos\varphi = 0,8$ (нагрузка активно-индуктивная) для чётных вариантов.

5. Последовательность расчёта

1. Начертить схему исследования, показав на ней все электроизмерительные приборы, позволяющие измерить напряжение, ток и мощность первичной и вторичной обмоток трансформатора.
2. Заполнить таблицу по форме 1 спецификации элементов схемы исследования.
3. Рассчитать параметры схемы замещения и изобразить её.
4. Задавая значения β , равными 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 от номинального тока первичной обмотки, вычислить напряжение на зажимах вторичной обмотки, ток в ней и КПД трансформатора.
5. Результаты расчёта представить в виде графиков внешней характеристики и КПД от коэффициента нагрузки трансформатора.
6. По результатам расчёта выбрать из табл. 8 методических указаний электроизмерительные приборы и заполнить таблицу по форме 11.
7. Определить число делений, на которое отклоняются их стрелки в номинальном режиме работы трансформатора.

6. Содержание расчёта

1. Цель исследований.
2. Схема исследования со спецификацией.
3. Схема замещения трансформатора и её параметры.
4. Пример расчёта номинального режима.
5. Графики внешней характеристики $U_2 = f(\beta)$ и КПД $\eta = f(\beta)$.
6. Выводы по результатам расчёта.

Литература: [2], с. 28...131

РАБОТА 7

Исследование трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

1. Цель работы

Теоретическое исследование механической характеристики и расчёт ёмкости конденсаторов, позволяющих увеличить коэффициент мощности трёхфазного асинхронного двигателя. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Основные теоретические положения

Синхронная частота вращения n_1 определяется частотой питающей сети f и числом пар полюсов p двигателя, об/мин $n_1 = 60f/p$.

Зависимость между n_1 и p для $f = 50$ Гц приведена в табл. 10.

Таблица 10

p	1	2	3	4	5
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600

Скольжение ротора при частоте вращения n : $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$.

Номинальная частота вращения, об/мин: $n_n = n_1(1 - s_n)$.

Номинальная потребляемая мощность двигателя, Вт: $P_{1н} = P_{2н}/\eta$.

Номинальный ток двигателя, А: $I_{1н} = P_{1н}/(\sqrt{3} \cdot U_{1н} \cos \varphi_n)$.

Номинальный момент на валу, Н·м: $M_{2н} = \frac{9550 P_{2н}}{n_n}$.

Критический момент, Н·м: $M_k = k_m \cdot M_{2н}$, где k_m – кратность максимального момента.

Пусковой момент, Н·м: $M_p = k_p \cdot M_{2н}$, где k_p – кратность пускового момента.

Критическое скольжение, о. е.: $s_k = s_n(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$.

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость вращающего момента от скольжения при постоянном напряжении питания при $U_1 = \text{const}$ $M = f(s)$ или $M = f(n)$.

Частота вращения n и скольжение s связаны формулой $n = n_1(1 - s)$.

Характерными точками механической характеристики являются номинальный, критический и пусковой моменты, а также соответствующие им значения скольжения.

Для приближённых расчётов механической характеристики можно использовать формулу Клосса, Н·м :

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}}}.$$

Для повышения коэффициента мощности и компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя применяют включение конденсаторов в цепь обмотки статора. Ёмкость конденсатора в одной фазе вычисляется в номинальном режиме по формуле, Ф: $C_{\phi} = I_{\phi\kappa}/2\pi f U_{\phi\kappa}$, где $I_{\phi\kappa}$, $U_{\phi\kappa}$ – ток и напряжение фазы блока конденсаторов.

Ёмкость блока конденсаторов, Ф: $C = 3C_{\phi}$.

При соединении блока конденсаторов в звезду $I_{\phi\kappa} = I_{1p}$, $U_{\phi\kappa} = U_{1н}\sqrt{3}$.

При соединении блока конденсаторов в треугольник $U_{\phi\kappa} = U_{1н}$, $I_{\phi\kappa} = I_{1p}\sqrt{3}$.

Реактивная составляющая тока статора двигателя в номинальном режиме, А: $I_{1p} = I_{1н}\sin \varphi_{н}$.

Активная мощность, потребляемая двигателем, измеряется способом двух ваттметров. Показания ваттметров вычисляются по формулам

$$P_{W1} = U_1 I_1 \cos(\varphi - 30^\circ),$$

$$P_{W2} = U_1 I_1 \cos(\varphi + 30^\circ).$$

Измеренная мощность определяется алгебраической суммой показаний ваттметров

$$P_1 = P_{W1} + P_{W2}.$$

3. Схема исследования

Схема исследования трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлена на рис. 18. Обмотка статора включается в сеть переменного тока с частотой 50 Гц прямым пуском. Амперметры А1, А2, А3 измеряют ток фаз обмотки статора, вольтметры V1, V2 – линейные напряжения, ваттметры W1, W2 – активную мощность.

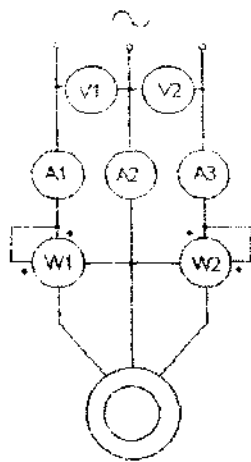


Рис. 18

4. Постановка задачи

Выполнить расчёт и построение графика механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, приведённым в табл. 11, где $P_{2н}$ – номинальная мощность двигателя; n_1 – синхронная частота вращения; η_n – номинальное значение КПД; $\cos \varphi_n$ – номинальное значение коэффициента мощности; k_m – кратность максимального момента; $k_{п}$ – кратность пускового момента.

Таблица 11

Вариант	Паспортные данные асинхронных двигателей								Сопряжение фаз блока конденсаторов
	Тип двигателя	$P_{2н}$, кВт	n_1 , об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	s_n , %	$k_{п}$	k_m	
1	4A160S2Y3	15	3000	88	0,91	2,1	1,4	2,2	Звезда
2	4A160M2Y3	18,5	3000	88,5	0,92	2,1	1,4	2,2	
3	4A180S2Y3	22	3000	88,5	0,91	1,9	1,4	2,5	
4	4A160S4Y3	15	1500	88,5	0,88	2,3	1,4	2,3	
5	4A160M4Y3	18,5	1500	88,5	0,88	2,2	1,4	2,3	
6	4A180S4Y3	22	1500	90	0,9	2	1,4	2,3	Треугольник
7	4A160S6Y3	11	1000	86	0,86	2,7	1,2	2	
8	4A160M6Y3	15	1000	87,5	0,87	2,6	1,2	2	Треугольник
9	4A160M8Y3	11	750	87	0,75	2,5	1,4	2,2	
0	4A180M8Y3	15	750	87	0,82	2,6	1,2	2	

5. Последовательность расчёта

1. Начертить схему исследования, показав на ней все электроизмерительные приборы, позволяющие измерить напряжение, ток и мощность двигателя.
2. Заполнить таблицу по форме 1 спецификации элементов схемы исследования.
3. Рассчитать номинальную и критическую частоту вращения двигателя, критическое скольжение.
4. Определить номинальный, пусковой и критический моменты двигателя.
5. Задавая значениями скольжения s , равными 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; вычислить момент двигателя по формуле Клосса. Составить таблицу расчётов, включив в неё данные номинального и критического режимов.
6. Результаты расчёта представить в виде графика механической характеристики, указав номинальный, критический и пусковой режимы.
7. Рассчитать ёмкость блока конденсаторов, позволяющих компенсировать реактивную мощность двигателя.
8. По результатам расчёта выбрать из таблицы 8 методических указаний электроизмерительные приборы и заполнить таблицу по форме 11.
9. Определить число делений, на которое отклоняются их стрелки в номинальном режиме работы двигателя.

6. Содержание отчёта

1. Цель исследований.
 2. Схема исследования со спецификацией.
 3. Расчёт и график механической характеристики $M = f(s)$.
 4. Расчёт ёмкости конденсаторов.
 6. Выводы по результатам расчёта.
- Литература: [2], с. 178...247

Методика применения программы "Моделирование электрических схем" для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Электротехника и электроника"

Общие положения

Представленная программа располагает широким набором виртуальных элементов электрических цепей, представленных в виде условных обозначений (пиктограмм), которые обладают основными свойствами реальных физических элементов: источников постоянного и переменного напряжения и тока, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, измерительных приборов и т. д.

Поэтому представленные лабораторные работы можно выполнить как на физическом стенде, так и в виртуальном исполнении на компьютере при этом все методические указания для выполнения лабораторных работ практически полностью подходят для обоих, указанных методов.

1. Открытие программы

Для обращения к программе Electronics Workbench необходимо найти в компьютере папку `c:\dir\Ewb1`, где `c:\dir` – путь для директории, в которой находится папка `Ewb1`, и запустить программу файлом `"Wewb.exe"`. Если на рабочем столе создан ярлык запускающего файла, то следует им воспользоваться для обращения к программе.

Экран дисплея делится на три части.

После этого на экране появляется графическая оболочка интерфейса программы (рис. 1), посредством которой и осуществляется компьютерное моделирование поставленных задач

1. Зона в верхней части экрана – командное меню, содержащее команды возможных действий программы.

2. Зона в правой части экрана – меню условных обозначений оборудования. Она содержит условные графические обозначения элементов, которые могут быть использованы для компьютерного модулирования процессов.

3. Остальная часть экрана – рабочая зона, в которой осуществляется построение необходимых схем.

4. Кнопка выхода из программы. При подведении к ней курсора мыши и нажатия левой кнопки будет произведён выход из программы. Поз. 5 обозначен переключатель, при включении которого после сборки схемы и задания параметров её элементов программа начинает компьютерное моделирование.

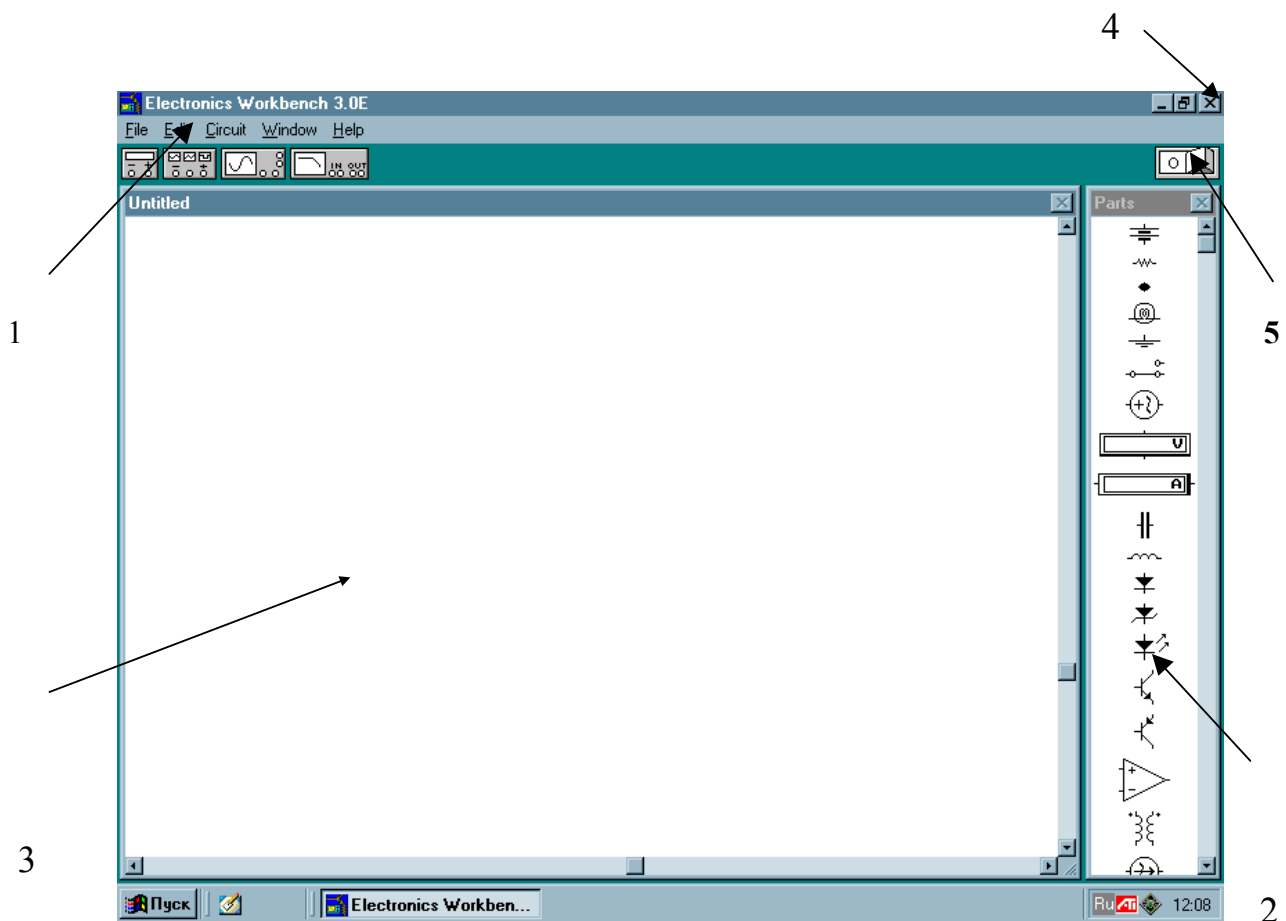
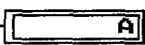


Рис. 1. Интерфейс программы Electronics Workbench 3.0E

2. Построение схем для выполнения лабораторных работ

Всего меню оборудования программы "Electronics Workbench 3.0E" содержит условные графические обозначения 42 элементов электрических схем и измерительных приборов, из которых для выполнения данных лабораторных работ нам необходимы лишь обозначения 7 из них:

-  - вольтметр;
  - амперметр;
-  - источник переменного напряжения;
  - активное сопротивление;
-  - емкость;
  - индуктивность;
  - узел электрической схемы.

Следует отметить, что в обозначении элементов использован американский стандарт, а не европейский, которые имеют отличия.

Управление выбором того или иного условного обозначения осуществляется с помощью курсора, перемещаемого мышью, и происходит следующим образом:

а) подводим курсор к обозначению элемента в правой части экрана и выделяем его одним щелчком левой кнопки манипулятора мышь (при этом он выделяется чёрным цветом);

б) не отпуская левой кнопки мыши, перетаскиваем выделенный элемент в рабочую зону экрана;

в) после помещения условного обозначения элемента в рабочую зону экрана отпускаем левую кнопку мыши;

г) выбираем другие условные обозначения, необходимые для сборки схемы, аналогичным образом и размещаем их на экране таким образом, чтобы между ними было расстояние 2-3 сантиметра.

Если в рабочую зону был вынесен неверный элемент и его необходимо удалить или возникла необходимость в корректировке собранной схемы, то для этого необходимо выполнить следующую операцию.

К условному обозначению элемента, которое подлежит удалению, подвести курсор мыши и выделить его путём однократного нажатия правой кнопки мыши (при этом он будет выделен красным цветом). Если необходимо удалить сразу несколько элементов, то их можно одновременно выделить путём нажатия левой кнопки мыши с последующим её удержанием и перемещением курсора по экрану таким образом, чтобы в образующийся прямоугольник попали все необходимые элементы, после чего их можно удалить одним из двух способов:

а) путём нажатия клавиши "Delete" на клавиатуре. При этом на экране

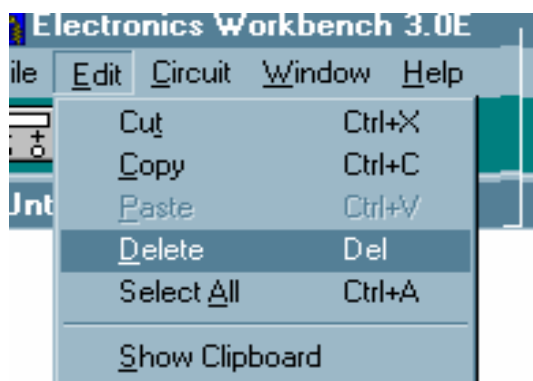


Рис. 2. Удаление элемента

1mH

появится запрос подтверждения команды удаления выделенного элемента (Delete selected components?/ Удалить выбранные элементы?). Для подтверждения удаления выбрать надпись "ДА" клавишами перемещения "<—" и "—>" и нажать клавишу "Enter", а для отмены выбрать надпись "НЕТ" и нажать клавишу "Enter";

б) выбором команды "Delete" (Удалить) из закладки "Edit" (Редактировать) командного меню программы в верхней части экрана (рис. 2).

При необходимости в изменении ориентации (поворот на 90°) условного обозначения элемента на рабочей зоне экрана его надо выделить одним щелчком левой кнопки мыши (при этом он выделяется красным цветом). Затем выбрать из закладки "Circuit" (Цепь) в командном меню программы в верхней части экрана команду "Rotate" (Вращать), после чего будет осуществлен поворот изображения элемента на 90° по часовой стрелке (рис. 3).

Для рисования соединительных линий между выбранными элементами с

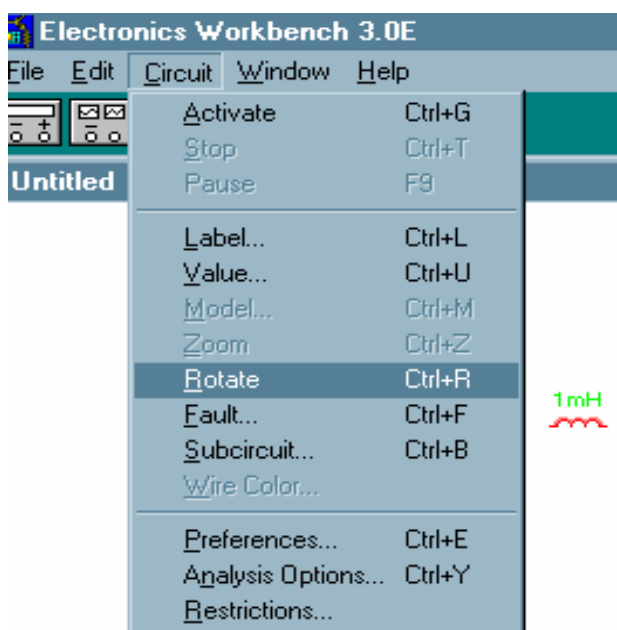


Рис. 3. Поворот элемента схемы

целью создания электрической схемы необходимо подвести курсор мыши к изображению одного из двух соединяемых элементов в том месте, где из него выходит конец соединительной линии, таким образом, чтобы он был выделен маленьким чёрным квадратом (рис. 4), после чего надо нажать левую кнопку мыши и удерживая её в этом положении подвести курсор к краю изображения другого соединяемого элемента таким образом, чтобы он был также выделен маленьким чёрным квадратом, после чего надо левую кнопку мыши отпустить. В результате произведённых операций будет нарисована соединительная линия между двумя элементами схемы.



Рис. 4. Последовательное соединение двух элементов схемы

Внимание! Одна линия может соединить не более двух точек на схеме (последовательное соединение элементов), поэтому при возникновении необходимости в параллельном соединении элементов при сборке схемы (например, подключение вольтметра, как на рис. 5) необходимо воспользоваться узлом (●) электрической схемы – из меню оборудования. Узел перетаскивается на соединительные линии между элементами схемы, параллельно которому необходимо включить какое-либо оборудование, затем рисуется соединительная линия между двумя узлами по методике, описанной выше, после чего на изображение полученной линии перетаскивается сориентированное при необходимости должным образом (повёрнуто на 90°) оборудование (вольтметр).

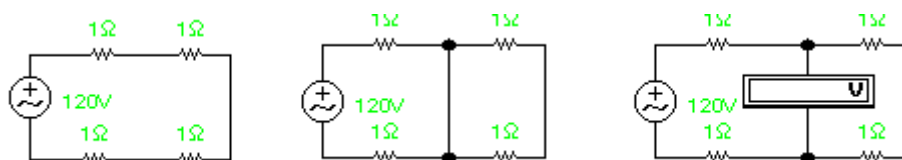


Рис. 5. Параллельное соединение элементов схемы

3. Установка параметров собранной схемы

После того как необходимая схема будет собрана в рабочей зоне программы, необходимо задать как параметры отдельных её элементов (сопротивления, ёмкости, индуктивности, источника напряжения), так и измерительных приборов, подключенных в схему (амперметр, вольтметр).

3.1. Установка параметров активного сопротивления, ёмкости и индуктивности

Данная операция осуществляется в следующей последовательности:

- а) выбрать элемент схемы, параметры которого необходимо задать путём подведения к нему курсора мыши;
- б) сделать два быстрых щелчка левой кнопкой "мыши" на изображении выбранного элемента;

в) в появившемся окне (рис. 6) задать необходимые параметры элемента путём подводки курсора в область 3 окна и нажатия левой кнопки мыши, после чего можно вводить значение параметра с клавиатуры. При необходимости в корректировке введенного значения следует удалить старое значение нажатием клавиши "Backspace", а затем ввести новое значение;

г) установить нужный порядок измерения задаваемой величины в области 4 окна при помощи кнопок прокрутки порядка 5 путём подведения к ним курсора и нажатия левой кнопки мыши;

д) подтвердить заданное значение параметра путём нажатия клавиши "Enter" или подведением курсора к клавише 6 окна и нажатием левой кнопки мыши. Окно задачи параметров ёмкости и индуктивности выглядит аналогичным образом. Процесс задачи значений их параметров происходит также по пунктам "а-д".

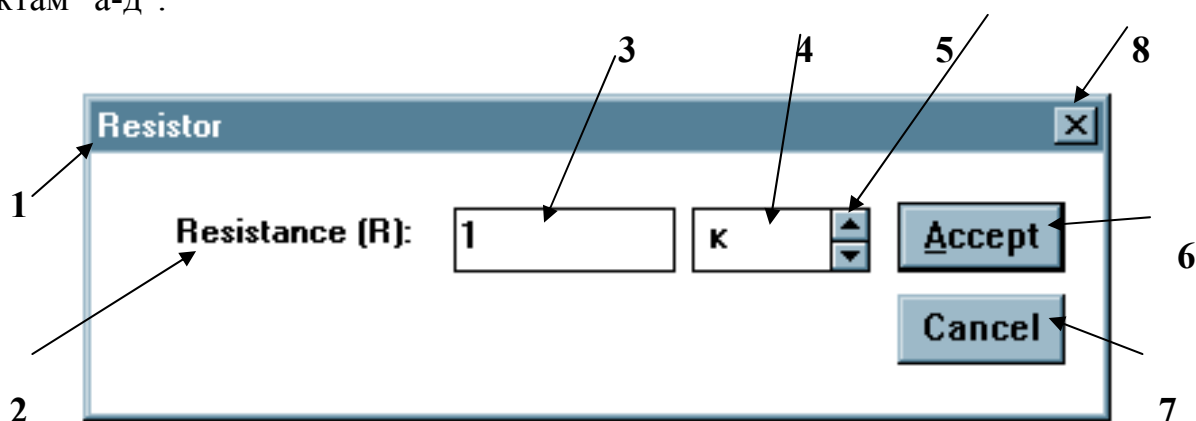


Рис. 6. Окно задачи параметров элементов схемы на примере активного сопротивления

1– Название элемента (Resistor –Активное сопротивление).

2 – Название и обозначение задаваемого параметра (Resistance [R] – Сопротивление [R]).

3 – Область задачи величины параметра (0-10000000).

4 –Область задачи порядка параметра [$10^0(k)$; $10^3(kk)$; $10^6 (Mk)$] и единицы его измерения (к - означает здесь Ом).

5 – Кнопки прокрутки порядка величины задаваемого параметра.

6 – Клавиша подтверждения задания величины параметра (Асепт-Принять).

7 – Клавиша отмены подтверждения задания величины параметра (Cancel-Отмена).

8 – Кнопка быстрого закрытия окна задачи параметров элементов схемы.

3.2. Установка параметров источника переменного напряжения

Данная операция осуществляется в следующей последовательности:

- а) выбрать источник напряжения на собранной схеме, параметры которого необходимо задать путём подведения к нему курсора "мыши";
- б) сделать два быстрых щелчка левой кнопкой "мыши" на изображении выбранного источника напряжения;
- в) в появившемся окне (рис. 7) последовательно задать необходимые параметры источника путём подводки курсора в каждую из областей 3 окна и нажатия левой кнопки мыши, после чего ввести значение параметра с клавиатуры. При необходимости в корректировке введенного значения следует удалить старое значение нажатием клавиши " Backspace ", а затем ввести новое значение.
- г) установить нужный порядок измерения задаваемых величин в каждой из областей 4 окна при помощи кнопок прокрутки порядка 5 путём подведения к ним курсора и нажатия левой кнопки мыши.
- д) подтвердить заданные значения параметров источника напряжения путём нажатия клавиши "Enter" или подведением курсора к клавише 6 окна и нажатием левой кнопки мыши.

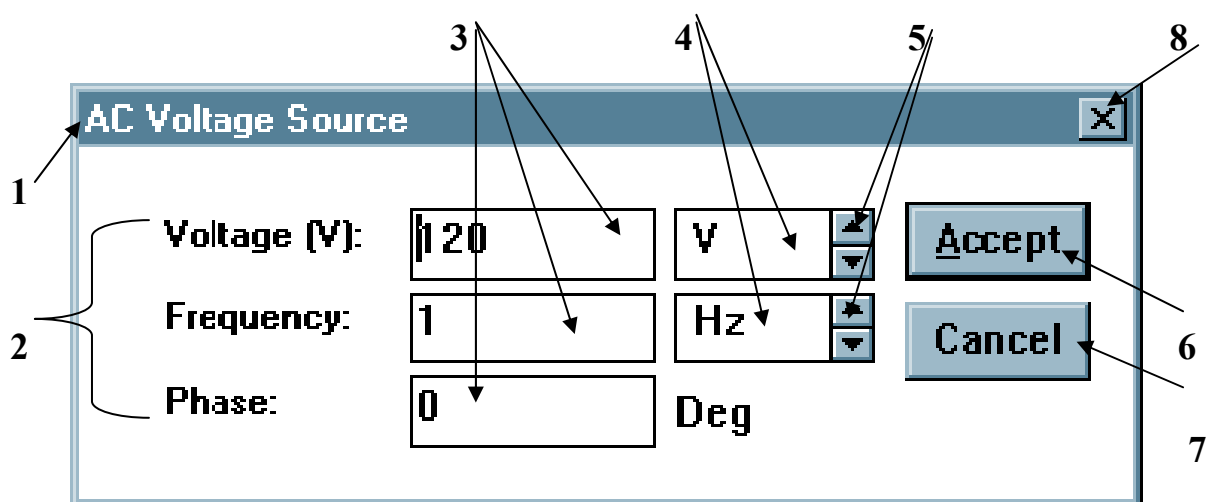


Рис. 7. Окно задачи параметров источника переменного напряжения

- 1 – Название источника (AC Voltage Source - источник переменного напряжения).
- 2 – Название и обозначение задаваемого параметра:
Voltage [V]-Напряжение [U]; Frequency [Hz]-Частота (Гц).
Phase (Deg)-Начальная фаза напряжения (град.)

3 – Область задачи величин параметров (0-10000000).

4 – Область задачи порядка параметров и единицы его измерения:

Voltage – [10^{-6} (μ V); 10^{-3} (mV); 10^0 (V); 10^3 (кV));

Frequency – [10^0 (Hz); 10^3 (kHz); 10^6 (MHz)].

5 – Кнопки прокрутки порядка величины задаваемых параметров.

6 – Клавиша подтверждения задания величин параметров источника (Accept-Принять).

7 – Клавиша отмены подтверждения задания величин параметров источника (Cancel-Отмена).

8 – Кнопка быстрого закрытия окна задачи параметров источника переменного напряжения.

3.3. Установка параметров измерительных приборов

Данная операция осуществляется в следующей последовательности:

а) Выбрать измерительный прибор (вольтметр, амперметр) на собранной схеме, параметры которого необходимо задать путём подведения к нему курсора "мыши".

б) Сделать два быстрых щелчка левой кнопкой мыши на изображении выбранного измерительного прибора.

в) В появившемся окне (рис. 8) задать необходимые параметры прибора путём подводки курсора в каждую из областей окна и нажатия левой кнопки "мыши", после чего ввести значение параметра с клавиатуры. При необходимости в корректировке введенного значения следует удалить старое значение нажатием клавиши "Backspace" на клавиатуре, а затем ввести новое значение (*рекомендуется оставить значение внутреннего сопротивления измерительных приборов "по умолчанию", то есть не изменять их*).

г) Установить режим работы приборов. Режим AC – для переменного напряжения; режим DC – для постоянного напряжения. Для этого используется прокрутка области 5. *При неправильном выборе режима вольтметр не будет показывать результаты измерений.*

д) Подтвердить заданные значения параметров измерительных приборов путём нажатия клавиши "Enter" или подведением курсора к клавише 6 окна и нажатием левой кнопки мыши.

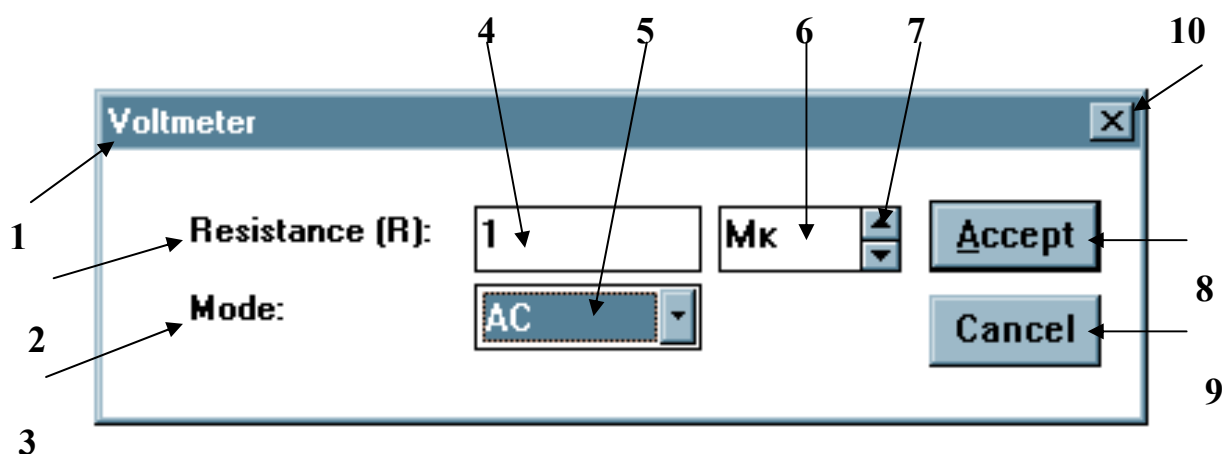


Рис. 8. Окно задачи параметров измерительных приборов
на примере вольтметра

1 – Название измерительного прибора (Voltmeter-Вольтметр).

2 – Название и обозначение задаваемого параметра (Resistance [R] – Сопротивление [R]).

3 – Название режима работы измерительного прибора (Mode-Режим).

4 – Область задачи величины параметра (0-10000000).

5 – Область задачи режима измерительного прибора:

AC – измерение переменного напряжения; DC—измерение постоянного напряжения.

6 – Область задачи порядка параметра [10^{-12} (пк); 10^{-9} (нк); 10^{-6} (мк); 10^{-3} (тк); 10^0 (к)] и единицы его измерения("к"- "0м");

7 – Кнопки прокрутки порядка величины задаваемого параметра;

8 – Клавиша подтверждения задания величины параметра (Accept-Принять).

9 – Клавиша отмены подтверждения задания величины параметра (Cancel-Отмена).

10 – Кнопка быстрого закрытия окна задачи параметров измерительных приборов.

Окно задачи параметров амперметра выглядит аналогичным образом. И

Процесс задачи значений его параметров происходит также по пунктам "а-д".

4. Работа с осциллографом

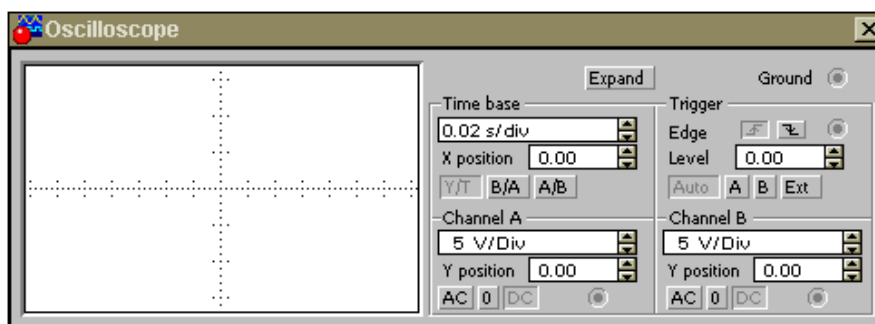


4.1. Настройка осциллографа

Для проведения измерений осциллограф нужно настроить, для чего следует задать:

1. расположение осей, по которым откладывается сигнал,
2. нужный масштаб развертки по осям,
3. смещение начала координат по осям,
4. режим работы по входу: закрытый или открытый,
5. режим синхронизации: внутренний или внешний.

Настройка осциллографа производится при помощи полей управления, расположенных на панели управления.



4.2. Панель управления

Панель управления имеет общий для обеих модификаций осциллографа вид и разделена на четыре поля управления:

1. Поле управления горизонтальной разверткой (масштабом времени).
2. Поле управления синхронизацией (запуском).
3. Поле управления каналом А.
4. Поле управления каналом В.

4.3. Управление масштабом времени

Поле управления горизонтальной разверткой (масштабом времени) служит для задания масштаба горизонтальной оси осциллографа при наблюдении напряжения на входах каналов А и В в зависимости от времени. Временной

масштаб задается в с/дел, мс/дел, мкс/дел, нс/дел. Величина одного деления может быть установлена от 0,1 нс до 1с. Масштаб может дискретно уменьшаться на один шаг при щелчке мышью на кнопке $\wedge$ справа от поля и увеличиваться при щелчке на кнопке.

Чтобы получить удобное для наблюдения изображение на экране осциллографа, установите масштаб времени таким образом, чтобы цена двух делений на горизонтальной оси примерно была равна величине, обратно пропорциональной частоте исследуемого сигнала, т. е. составляла бы период сигнала.

Например: Если Вы хотите исследовать сигнал с частотой 1 кГц установите масштаб времени равным 0,05 мс.

С помощью кнопок, расположенных в поле строки X Position, можно дискретно сдвигать начало осциллограммы по горизонтальной оси.

В этом же поле расположены три кнопки: У/Т, А/В, В/А, позволяющие задавать вид зависимости отображаемых сигналов. При нажатии на кнопку У/Т по вертикальной оси откладывается напряжение, по горизонтальной оси – время, при нажатии на кнопку А/В по вертикальной оси откладывается амплитуда напряжения на входе канала А, по горизонтальной оси – канала В и при нажатии на кнопку В/А наоборот. При этом масштаб осей определяется установками соответствующих каналов. В режимах А/В и В/А можно наблюдать частотные и фазовые сдвиги (фигуры Лиссажу), петли гистерезиса, вольтамперные характеристики и т.д.

4.4. Управление каналами А и В

Две нижних части панели осциллографа являются полями управления отображением сигналов, поданных на входы каналов А и В соответственно.

Верхнее окно в поле позволяет управлять масштабом оси отображаемого напряжения по вертикальной или горизонтальной оси. Цена деления может дискретно устанавливаться от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел. Масштаб для каждой оси устанавливается отдельно. Чтобы получить удобное для работы изображение на экране осциллографа перед началом эксперимента, установите масштаб, соответствующий ожидаемому напряжению.

Например, при подаче на вход переменного сигнала амплитудой 3 вольта установите масштаб вертикальной оси 1 В/дел.

Ниже расположено поле, которое позволяет дискретно сдвигать ось Х вверх или вниз. Для того, чтобы развести изображения от каналов А и В, воспользуйтесь сдвигом по оси У (У pos) для одного или двух каналов.

Три нижние кнопки реализуют различные режимы работы входа осциллографа по входу. Режим работы осциллографа с закрытым входом устанавливается нажатием на кнопку AC. В этом режиме на вход не пропускается постоянная составляющая сигнала. При нажатии на кнопку DC осциллограф переходит в режим с открытым входом. В этом режиме на вход осциллографа пропускаются как постоянная, так и переменная составляющая сигнала.

4.5. Управление синхронизацией

Верхнее правое поле управления Trigger определяет момент начала отображения осциллограммы на экране осциллографа. Кнопки в строке Edge задают момент запуска осциллограммы по фронту или по срезу импульса на входе синхронизации. Строка Level позволяет задавать уровень, при превышении которого происходит запуск осциллограммы. Значение уровня можно сдвинуть на 3 деления вниз или вверх.

Осциллограф имеет четыре режима синхронизации:

1. Автоматический режим (AUTO) – запуск осциллограммы производится автоматически при подключении осциллографа к схеме или при её включении. Когда «луч» доходит до конца экрана, осциллограмма снова прописывается с начала экрана (новый экран).

2. Режимы запуска по входу «А» или «В», в которых запускающим сигналом является сигнал, поступающий на соответствующий вход.

3. Режим «Внешний запуск» (EXT). В этом случае сигналом запуска является сигнал, подаваемый на вход синхронизации.

Совет: Если Вы, не видите сигнала на осциллографе или сигнал очень слабый, то нажмите кнопку Auto.

4.6. Расширенная модификация осциллографа

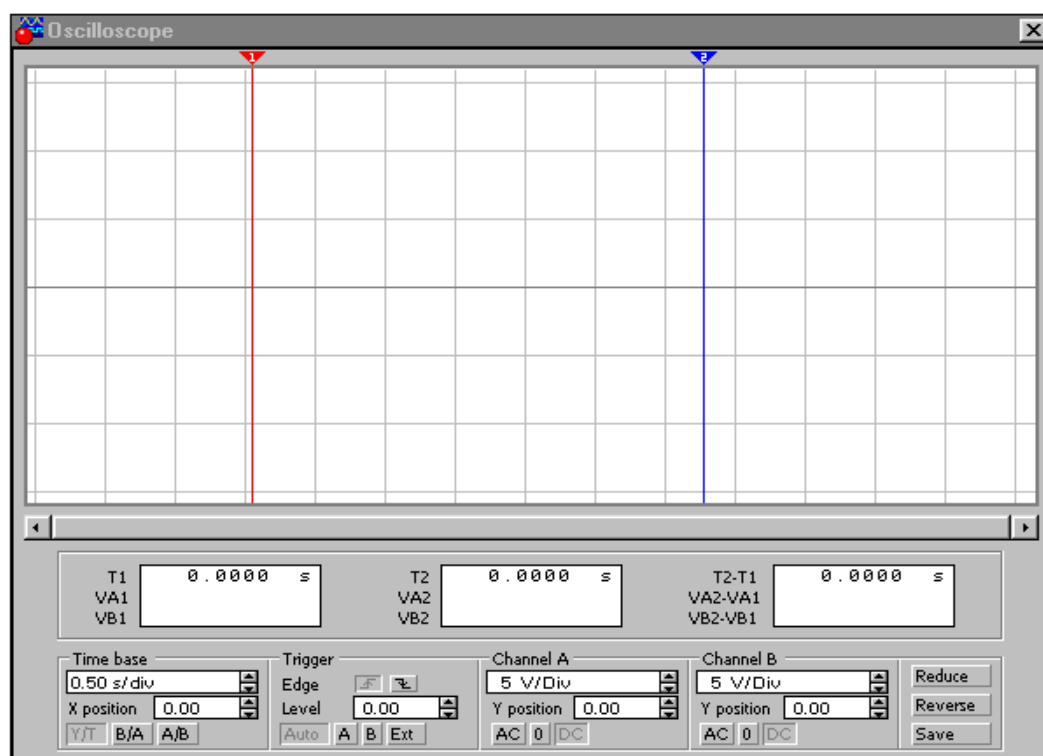
Данная модификация присутствует в версиях Ewb 4.0 и выше. Она может пригодиться для тех, кто захочет более глубоко разобраться в компьютерном моделировании электрических и электронных схем на основе версий старших версии Ewb 3.0

Нажатие клавиши Expand на панели простой модели открывает окно расширенной модели осциллографа. Панель расширенной модели осциллографа в отличие от простой модели расположена под экраном и дополнена тремя информационными табло, на которые выводятся результаты измерений. Кроме того, непосредственно под экраном находится линейка прокрутки, позволяю-

шая наблюдать любой временной отрезок процесса от момента включения до момента выключения схемы. В сущности, расширенная модель осциллографа это совершенно другой прибор, позволяющий намного удобнее и более точно проводить численный анализ процессов.

На экране осциллографа расположены два курсора, обозначаемые 1 и 2, при помощи которых можно измерить мгновенные значения напряжений в любой точке осциллограммы. Для этого просто перетащите мышью курсоры за треугольники в их верхней части в требуемое положение. Координаты точек пересечения первого курсора с осциллограммами отображаются на левом табло, координаты второго курсора – на среднем табло. На правом табло отображаются значения разностей между соответствующими координатами первого и второго курсоров. Результаты измерений, полученные при помощи расширенной модели осциллографа, можно записать в файл. Для этого нажмите кнопку Save (Сохранить) и в диалоговом окне введите имя файла.

Чтобы вернуться к прежнему изображению осциллографа – нажмите клавишу Reduse, расположенную в правом нижнем углу.



5. Функциональный генератор

Генератор является идеальным источником напряжения, вырабатывающим сигналы синусоидальной, прямоугольной или треугольной формы.

На экран выводится уменьшенное изображение генератора.



Крайний правый или левый выводы служат для подачи переменного напряжения на схему. Средний вывод генератора при подключении к схеме обеспечивает общую точку для отсчета амплитуды напряжения. Его необходимо **заземлять или присоединять к проводу**, который заземлен. Напряжение на правом выводе изменяется в положительном направлении относительно общего вывода, напряжение на левом выводе – в отрицательном. Для представленных лабораторных работ это является не принципиальным.

Двойным щелчком мыши на уменьшенном изображении открывается увеличенное изображение генератора. (рис. 4) Можно задать следующие параметры:

- частоту выходного напряжения,
- скважность,
- амплитуду выходного напряжения,
- постоянную составляющую выходного напряжения.

5.1. Настройка генератора

Установка формы сигнала

Выберите требуемую форму выходного сигнала и нажмите на кнопку с соответствующим изображением.

DUTY CYCLE (скважность). Этот параметр определяется для сигналов треугольной и прямоугольной формы.

Установка частоты сигнала

Частота генератора может регулироваться от 1 Гц до 999 МГц. Значение частоты устанавливается в строке FREQUENCY с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, в правом - единица измерения (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц соответственно).

Установка амплитуды выходного напряжения

Амплитуда выходного напряжения может регулироваться от 0 мВ до 999 кВ.

Амплитуда устанавливается в строке AMPLITUDE с помощью клавиатуры и стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, в правом – единица измерения (μV , mV, V, kV – мкВ, мВ, В, кВ соответственно).

3.5. Практические занятия

Общие указания

Целью выполнения практических занятий является закрепление теоретических знаний и умение применять полученные знания в практических задачах.

Оформление можно выполнить в произвольной форме. На титульном листе обязательно указывается номер специальности студента и его личный шифр. В содержание отчета должны быть представлены: условие задачи и схема цепи; все расчеты, в том числе и промежуточные; приведены формулы и промежуточные математические преобразования в общем виде.

Занятие 1

Расчет простых цепей постоянного тока

Основные положения

Основными законами, на базе которых разработаны методы расчета цепей, являются закон Ома и законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа – **алгебраическая сумма токов в проводах, сходящихся в любом узле, равна нулю:**

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

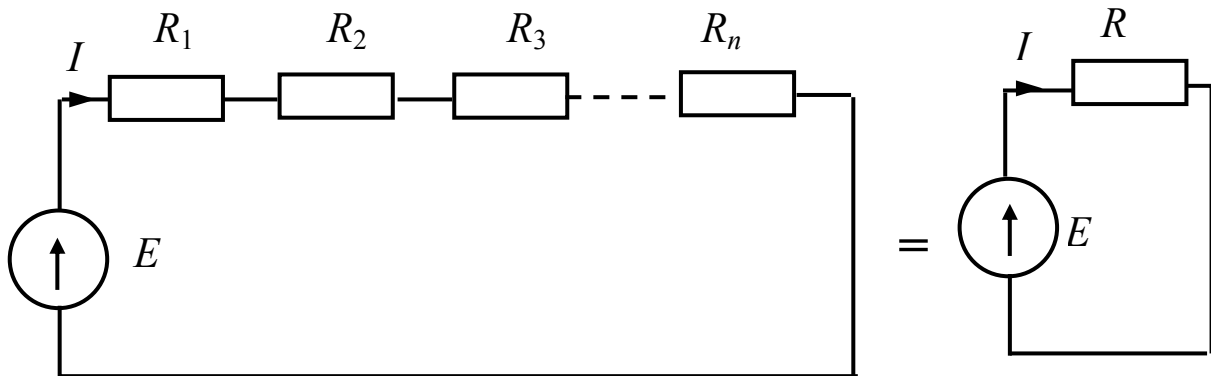
При этом рекомендуется токи направленные к узлу брать со знаком +, а токи направленные от узла брать со знаком –.

Второй закон Кирхгофа – **алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках контура равна алгебраической сумме ЭДС этого контура**

$$\sum_{k=1}^M U_k = \sum_{k=1}^N E_k.$$

Последовательное соединение

При последовательном соединении сопротивлений величина тока во всех элементах одинакова



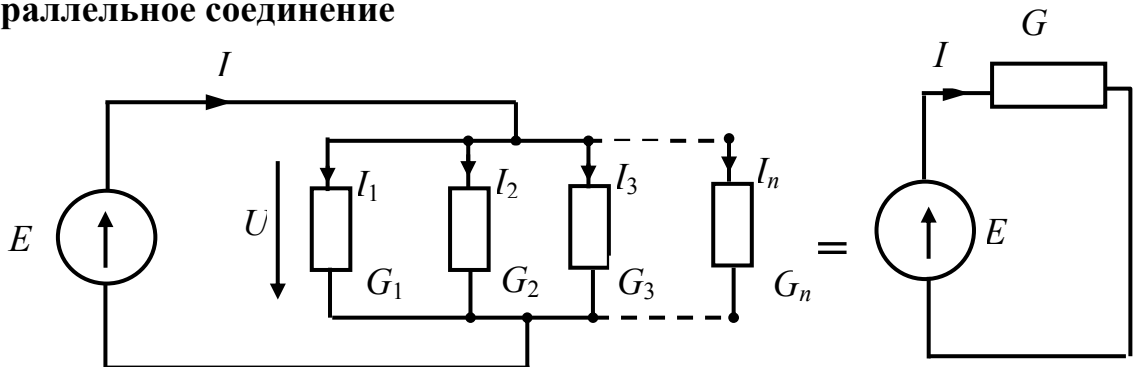
При последовательном соединении общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений, включенных последовательно:

$$R = \sum_{k=1}^N R_k. \quad (1)$$

Напряжения на отдельных участках цепи по закону Ома:

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2; \quad U_3 = IR_3; \dots U_n = IR_n.$$

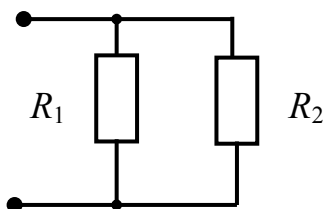
Параллельное соединение



При параллельном соединении общая проводимость цепи равна сумме проводимостей, включенных параллельно.

$$G = \sum_{k=1}^N G_k. \quad (2)$$

Общее сопротивление двух параллельно соединенных сопротивлений на основании (2) равно:



$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}, \quad R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Пример 1. Определить общее сопротивление R_{123456} цепи, имеющей последовательно и параллельно соединенные сопротивления.

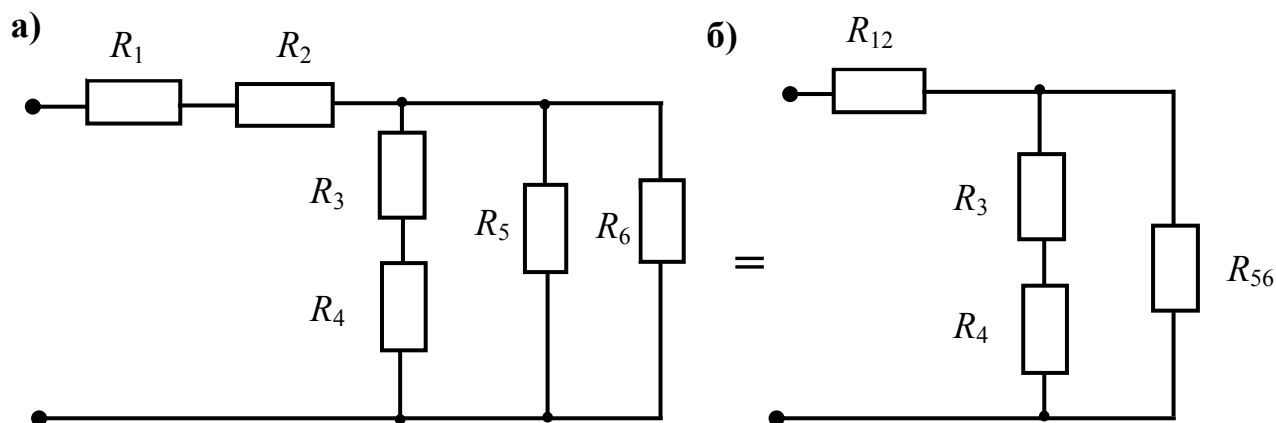


Рис. 1

Переходим от схемы рис. 1,а к эквивалентной схеме рис. 1,б

$$R_{12} = R_1 + R_2, \quad R_{56} = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}.$$

На основании рис 1,б легко найти общее сопротивление R_{123456} цепи:

$$R_{123456} = R_{12} + \frac{R_{34} R_{56}}{R_{34} + R_{56}}, \quad \text{где } R_{34} = R_3 + R_4.$$

Рекомендуем затем разобрать [пример1 задачи 1](#) из контрольной работы.

Задание для самостоятельной работы

Для схемы рис. 2,а,б определите ток в сопротивлении R_2 . При этом все сопротивления равны 4 Ом, а $E = 12$ В

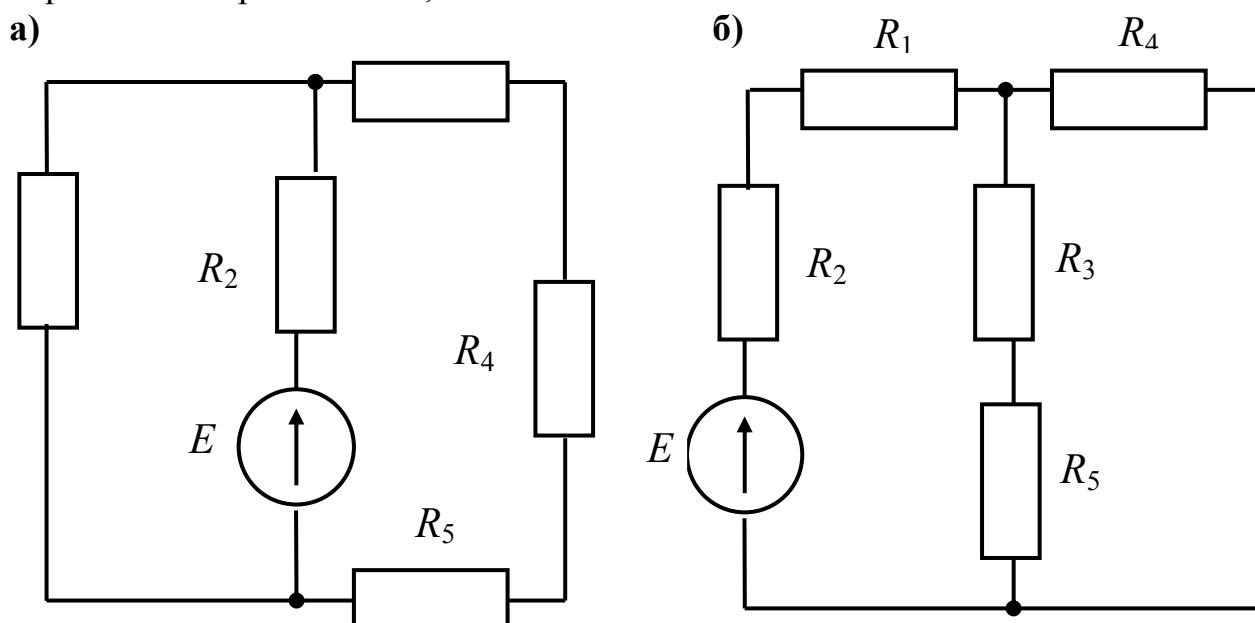


Рис. 2

Занятие 2

Расчет цепей синусоидального тока с помощью векторных диаграмм

Основные положения

Любой синусоидальный процесс, изменяющийся по синусоидальному закону (ток, напряжение, ЭДС и т.д.), можно изобразить в виде вектора.

Для построения векторных диаграмм необходимо знать фазовые соотношения между током и напряжением в элементах цепи. На рис. 3 представлены фазовые соотношения на элементах R , L и C . При этом синусоидальные токи и напряжения изображены в виде мгновенных функций и соответствующих им векторов.

Кроме этого, рекомендуем проработать материал темы 3 опорного конспекта.

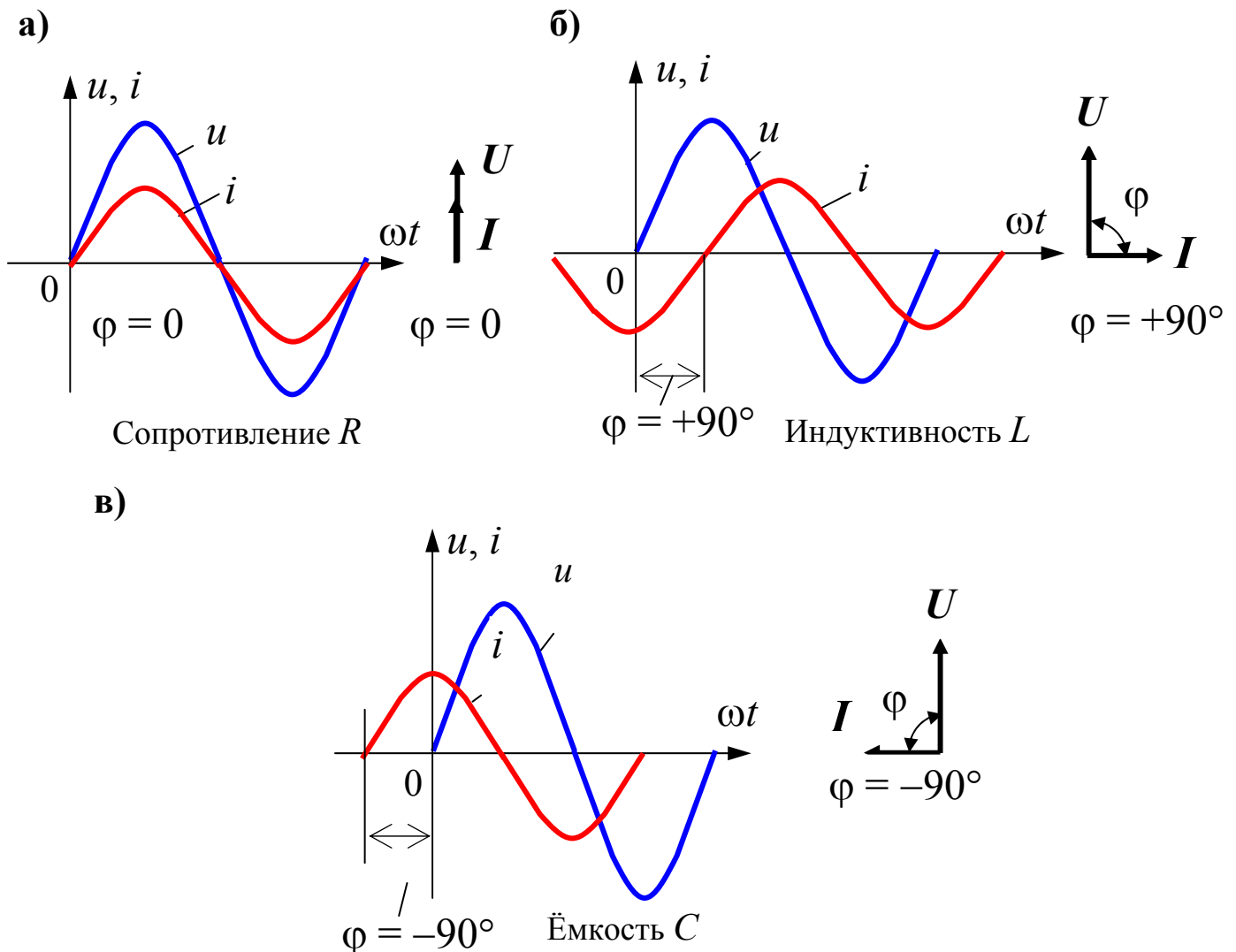


Рис. 3

Пример 2. Катушка индуктивности с параметрами R и L соединена последовательно с сопротивлением $R_1 = 100$ Ом и подключена к источнику синусоидального напряжения частотой $f = 50$ Гц (рис. 4). В цепь включены три вольтметра электромагнитной системы, показания которых известны: $U_1 = 100$ В, $U_2 = 100$ В, $U = 175$ В.

Требуется определить параметры R и L катушки индуктивности, угол сдвига фаз φ_{RL} между напряжением и током катушки и угол сдвига фаз φ между напряжением и током цепи. Задачу решить с помощью векторной диаграммы графически.

Решение. На основании второго закона Кирхгофа ($\bar{U} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2$) строим векторную диаграмму напряжений (рис. 5).

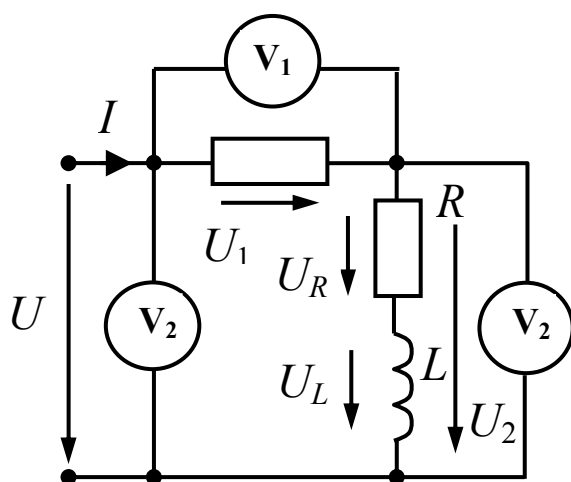


Рис. 4

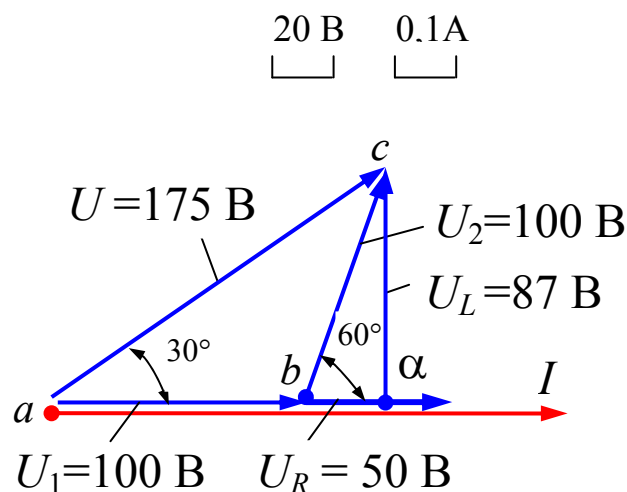


Рис. 5

Для этого проводим в произвольном направлении вектор тока $\bar{I}$, действующее значение которого

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{100}{100} = 1 \text{ А.}$$

Вектор напряжения $\bar{U}_1$ совпадает по фазе с вектором тока I (как напряжение на активном сопротивлении), поэтому откладываем $\bar{U}_1$ вдоль $\bar{I}$ в принятом масштабе напряжений. Векторы $\bar{U}$ и $\bar{U}_2$ действующих значений напряжений опережают вектор I тока по фазе (как напряжения индуктивной цепи) и поэтому откладываем их от вектора $\bar{I}$ против часовой стрелки. Из начала вектора $\bar{U}_1$ (точка a) описываем циркулем дугу окружности радиусом U , а из конца вектора $\bar{U}_1$ (точка b) дугу окружности радиусом U_2 . Пересечение этих двух дуг (точка c) определяет положение векторов $\bar{U}$ и $\bar{U}_2$ на векторной диаграмме. Затем из точки "с" опускаем перпендикуляр cd на направление вектора $\bar{I}$ и таким образом разлагаем вектор $\bar{U}$ на две составляющие: век-

тор $\overline{U}_R$, совпадающий по фазе с вектором тока $\overline{I}$ и вектор $\overline{U}_L$, опережающий $\overline{I}$ на 90° . Измерив длину этих векторов линейкой, получаем: $U_R = 50$ В и $U_L = 87$ В.

Теперь находим активное R и индуктивное X_L сопротивления катушки

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{50}{1} = 50 \text{ Ом}; \quad X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{87}{1} = 87 \text{ Ом}.$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{87}{314} = 0,27 \text{ Гн, где } \omega = 2\pi f = 314 \text{ 1/с}.$$

Проверку расчетов производим по формуле (для катушки)

$$z_K = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{50^2 + 87^2} = 100 \text{ Ом},$$

что совпадает с полным сопротивлением катушки, полученным в результате непосредственных измерений

$$z = \frac{U_2}{I} = \frac{100}{1} = 100 \text{ Ом}.$$

Угол сдвига фаз φ_{RL} между напряжением и током в катушке индуктивности и угол сдвига фаз φ между напряжением и током всей цепи определяем из векторной диаграммы путем непосредственных измерений с помощью транспортира: $\varphi_{RC} = 60^\circ$; $\varphi = 30^\circ$.

Задание для самостоятельной работы

Задача 1. Электрический конденсатор представлен последовательной схемой с параметрами R и C .

Требуется определить параметры R и C этого конденсатора, воспользовавшись тремя вольтметрами и дополнительным сопротивлением R_1 , включенным последовательно с конденсатором (рис. 6). Исходные данные: $U_1 = 20$ В; $U_2 = 20$ В; $U = 34,5$ В; $R_1 = 10$ Ом; $f = 100$ Гц.

Задачу решить с помощью векторной диаграммы графически.

Задачу рекомендуем решать следующим образом

В начале выберите произвольно направление тока (цепь последовательная), например, как на рис. 6,б, на котором указаны, но не обозначены направления напряжений на элементах цепи. Затем в масштабе постройте известные напряжения и определите величину напряжений на отдельных элементах цепи. По закону Ома определите величины неизвестных сопротивлений.

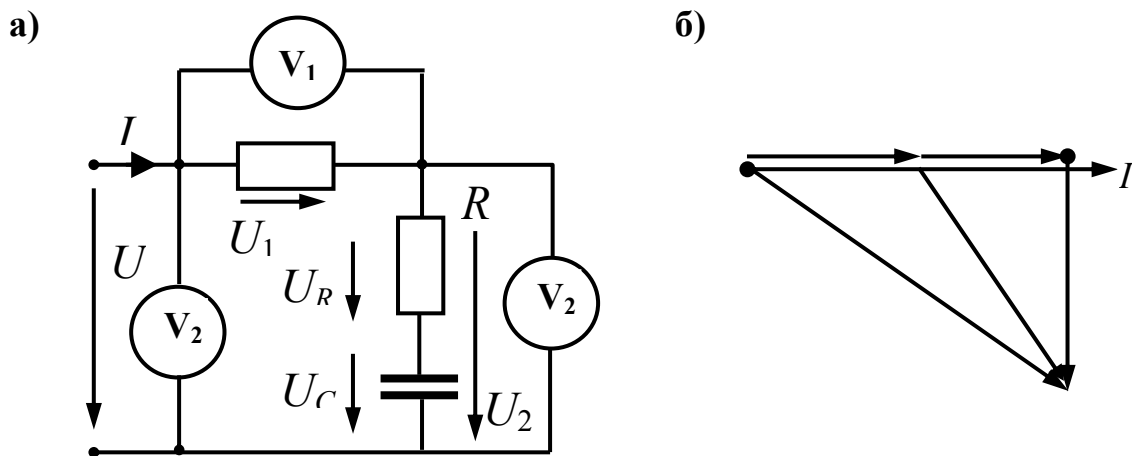


Рис. 2.4

Занятие 3

Расчет цепей синусоидального тока комплексным методом Основные положения

Комплексный (символический) метод расчета цепей основан на том, что вектора, изображающие функции времени, могут быть записаны с помощью комплексных чисел.

Уравнения (закон Ома и законы Кирхгофа) являются алгебраическими и аналогичны этим же уравнениям для цепей постоянного тока. Поэтому все методы расчета цепей постоянного тока можно применить для расчета комплексных токов и напряжений. Последним этапом в комплексном методе расчета является переход от найденных комплексных токов и напряжений к соответствующим мгновенным (действующим) значениям токов и напряжений.

Расчет цепей комплексным методом рекомендуется вести в следующей последовательности:

1. Изображаем заданные синусоидальные напряжения и параметры реактивных элементов комплексными числами.
2. Используя законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, составляем уравнения для определения комплексных токов (напряжений).
3. Определяем комплексные токи в ветвях в результате решения алгебраических уравнений п. 2. Основные алгебраические действия с комплексными числами, которые используются на этом этапе, приведены в приложении.
4. С учетом соответствия преобразуем найденные комплексные токи в ветвях в соответствующие мгновенные значения.

Рекомендуем проработать материал темы 4 опорного конспекта.

Пример 3. Определить мгновенное значение тока на входе цепи (рис. 7), у которой, $x_C = 12 \text{ Ом}$, $x_L = 3 \text{ Ом}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $u = 12 \sin \omega t$.

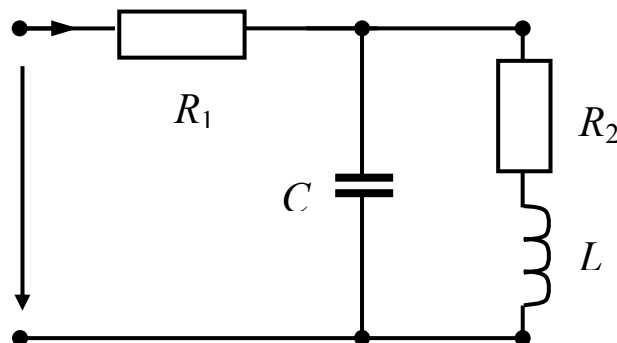


Рис. 7

Решение. 1. Изобразим синусоидальное входное напряжение и параметры реактивных элементов L и C комплексными числами:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j0} = 12; \quad jX_L = j3 \text{ Ом}; \quad -jX_C = -12 \text{ Ом}.$$

Если начальная фаза ψ_u входного напряжения в условии задачи не задана, то ее рекомендуется взять равной нулю ($\psi_u = 0$).

2. Используя закон Ома в комплексной форме, составим уравнение для определения комплексной амплитуды тока на входе цепи:

$$\dot{I}_m = \dot{U}_m / \underline{Z},$$

где $\underline{Z}$ – комплексное сопротивление цепи определяется по аналогичным правилам расчета полного сопротивления резистивной цепи постоянного тока

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= R_1 + \frac{-jX_C(R_2 + jX_L)}{R_2 + jX_L - jX_C} = R_1 + \frac{X_C X_L - jX_C R_2}{R_2 + j(X_L - X_C)} = 10 + \frac{36 - j120}{10 - j12} = \\ &= \frac{(36 - j120)(10 + j12)}{(10 - j12)(10 + j12)} = 7,37 - j3,44. \end{aligned}$$

3. Определим амплитуду комплексного тока на входе цепи:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{\underline{Z}} = \frac{12}{7,37 - j3,44} = \frac{12}{8,1e^{-j25^\circ}} = 1,48e^{j25^\circ}.$$

4. Преобразуем амплитуду комплексного тока на входе цепи в мгновенное значение синусоидального тока:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 1,48 \sin(\omega t + 25^\circ).$$

Задание для самостоятельной работы

Задача 2. Определить мгновенные и действующие значения тока на входе цепи (рис. 8), у которой, $x_C = 12 \text{ Ом}$; $x_L = 8 \text{ Ом}$; $R = 10 \text{ Ом}$; $U = 12 \text{ В}$.

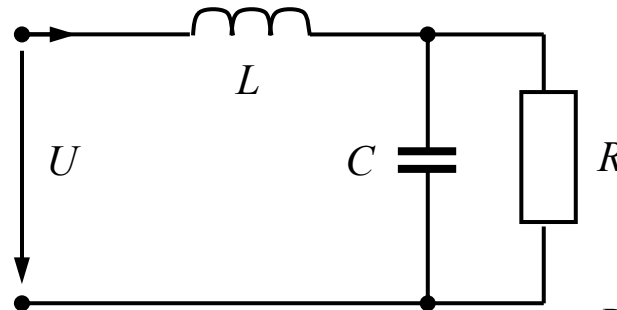


Рис. 8

Занятие 4

Расчет трехфазных электрических цепей

Основные положения

Трехфазная цепь может быть соединена звездой и треугольником.

Трехфазная цепь, соединенная по схеме, – звезда, имеет ряд особенностей.

1. Фазные токи равны токам в линейных проводах: $\dot{I}_\phi = \dot{I}_л$.

2. Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N$ равен алгебраической сумме комплексных токов всех трех фаз.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N. \quad (4.3)$$

При отсутствии или обрыве нейтрального провода

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

В этом случае, зная два линейных тока, можно легко найти третий ток.

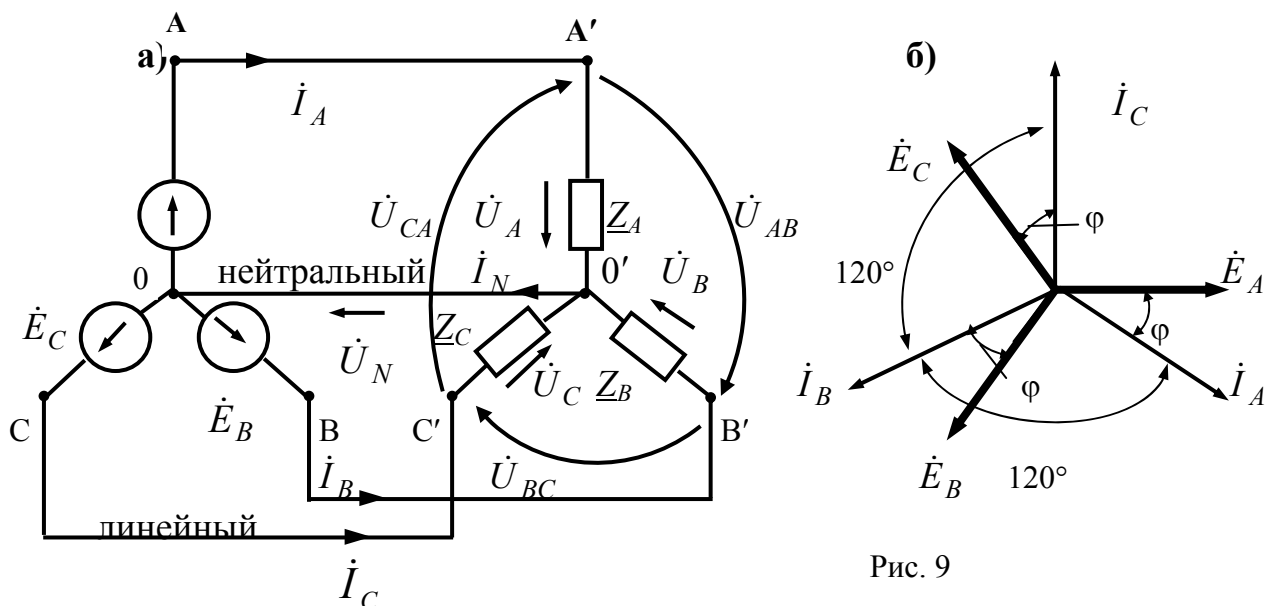


Рис. 9

3. При симметрии фазных ЭДС и равенстве комплексных сопротивлений всех трех фаз цепи ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi = R \pm jX$) комплексные токи, определяемые в соответствии с формулой закона Ома ($\dot{I}_\phi = \dot{U}_\phi / \underline{Z}_\phi$), имеют одинаковые действующие значения и сдвинуты друг относительно друга по фазе на 120° (как это показано на рис. 4.1,б). Они образуют симметричную систему фазных токов.

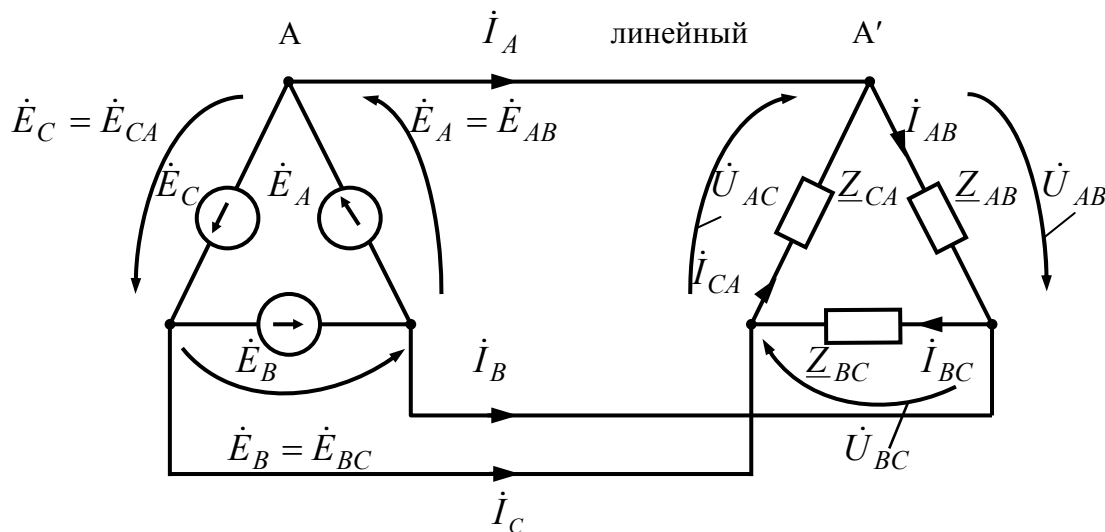


Рис. 10

Трехфазная цепь, связанная треугольником, имеет ряд особенностей.

1. Напряжения между линейными проводами ($\dot{U}_л$) одновременно являются и фазными ($\dot{U}_\phi$) напряжениями: $\dot{U}_л = \dot{U}_\phi$.

2. В трехфазной цепи, соединенной треугольником различают фазные ($\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}$ и $\dot{I}_{CA}$) и линейные ($\dot{I}_A, \dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$) токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

В частном случае, при симметрии ЭДС и нагрузке

$$I_л = \sqrt{3} I_\phi.$$

Мощности трехфазной цепи

Для трехфазной симметричной цепи независимо от способа ее соединения

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cos \varphi;$$

$$Q = \sqrt{3} U_л I_л \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{3} U_л I_л.$$

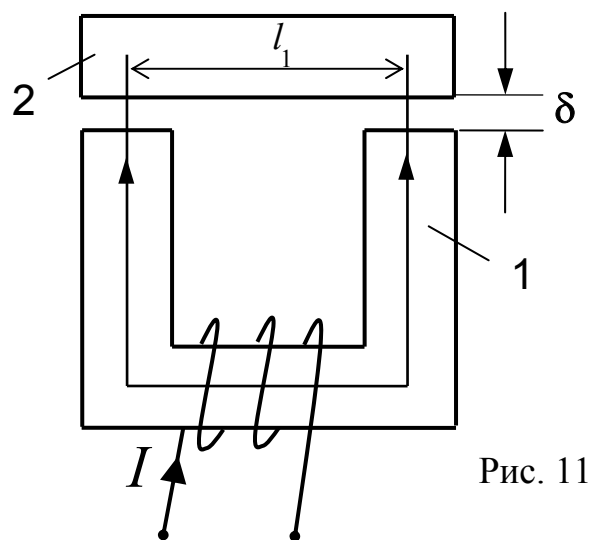
Задание для самостоятельной работы

Задача 3. Для симметричной трехфазной системы соединенной по схеме звезда известны: фазное напряжение $U_\phi = 220$, В; параметры нагрузки фазы А ($x_L = 5$, Ом $x_C = 10$, Ом, $R = 12$, Ом). Требуется определить активную реактивную и полную мощности трехфазной цепи, и, как изменятся эти мощности, если нагрузку соединить по схеме треугольник.

Занятие 5

Расчет магнитных цепей постоянного тока

Пример 4. Какова должна быть величина тока в обмотке электромагнита (рис. 11) для создания силы притяжения $f = 2000$ Н. Число витков обмотки $w = 628$. Электромагнит состоит из сердечника (поз. 1, рис. 11) и ярма (поз. 2, рис. 11). Параметры магнитопровода – $\ell_1 = 0,25$ м, $\ell_2 = 0,6$ м. Сечения магнитопровода, ярма и сердечника одинаковы: $S_1 = S_2 = S = 25 \cdot 10^{-4}$ м². Величина зазора – $\Delta = 0,001$ м. Кривые намагничивания материала сердечника (кривая 1) и ярма (кривая 2) приведены на рис. 12.



Решение. Сила притяжения, создаваемая электромагнитом, зависит от величины магнитного потока в зазоре и сечения зазора S_δ

$$f = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S_\delta};$$

поэтому можно найти величину магнитного потока, необходимого для создания этой силы:

$$\Phi = \sqrt{f \cdot 2\mu_0 \cdot S_\delta} = \sqrt{2000 \cdot 2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{-4}} = 25 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Схема замещения магнитной цепи изображена на рис. 13, где R_{M1} – магнитное сопротивление сердечника, R_{M2} – магнитное сопротивление якоря, $R_{M\delta}$ – магнитное сопротивление двух зазоров. По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи МДС равна сумме магнитных напряжений участков

$$F = WI = U_{M1} + U_{M2} + U_{M\delta} = H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 + H_\delta \cdot 2\Delta.$$

Площади сечения сердечника, якоря и зазора одинаковы, поэтому магнитная индукция на всех участках

$$B_1 = B_2 = B_\delta = \frac{\Phi}{S} = \frac{25 \cdot 10^{-4}}{25 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ Тл.}$$

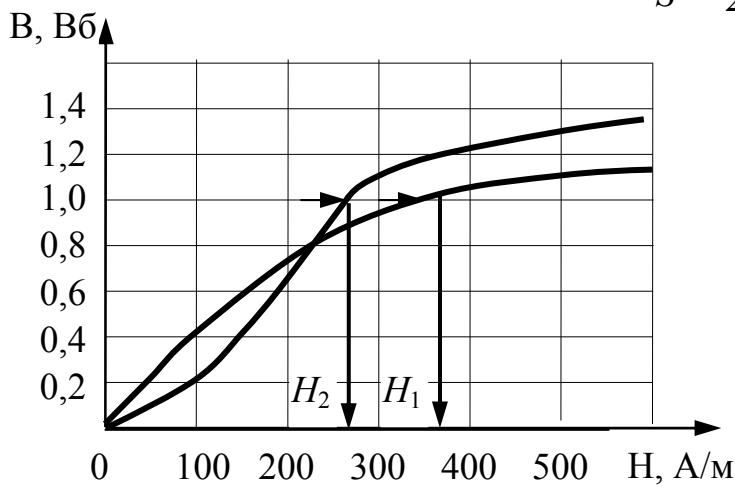


Рис. 12

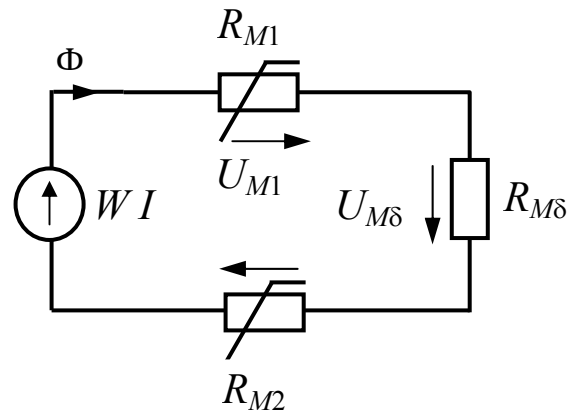


Рис. 13

По кривым намагничивания (рис. 12) для сердечника (поз. 1) и якоря (поз. 2) определим напряженности магнитного поля: $H_1 = 375 \text{ А/м}$, $H_2 = 275 \text{ А/м}$.

Напряженность магнитного поля в зазоре равна

$$H_\delta = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1}{1,257 \cdot 10^{-6}} = 795545 \text{ А/м.}$$

В результате необходимая МДС вычисляется как

$$F = H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 + H_\delta \cdot 2\Delta = 375 \cdot 0,25 + 275 \cdot 0,6 + 795545 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1860 \text{ А,}$$

а ток в обмотке электромагнита, необходимый для создания силы в 2000 Н, равен

$$I = \frac{F}{W} = \frac{1860}{628} = 3 \text{ А.}$$

Задание для самостоятельной работы

Задача 4. Известны средняя длина l магнитопровода (рис. 14,а) $l = 40$ см, величина зазора $\Delta = 3$ мм, площадь сечения магнитопровода $S = 2 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$, количество витков $w = 500$, кривая намагничивания сердечника (рис. 5.4,б), магнитный поток $\Phi = 24 \text{ мВб}$. Определить величину тока I в катушке.

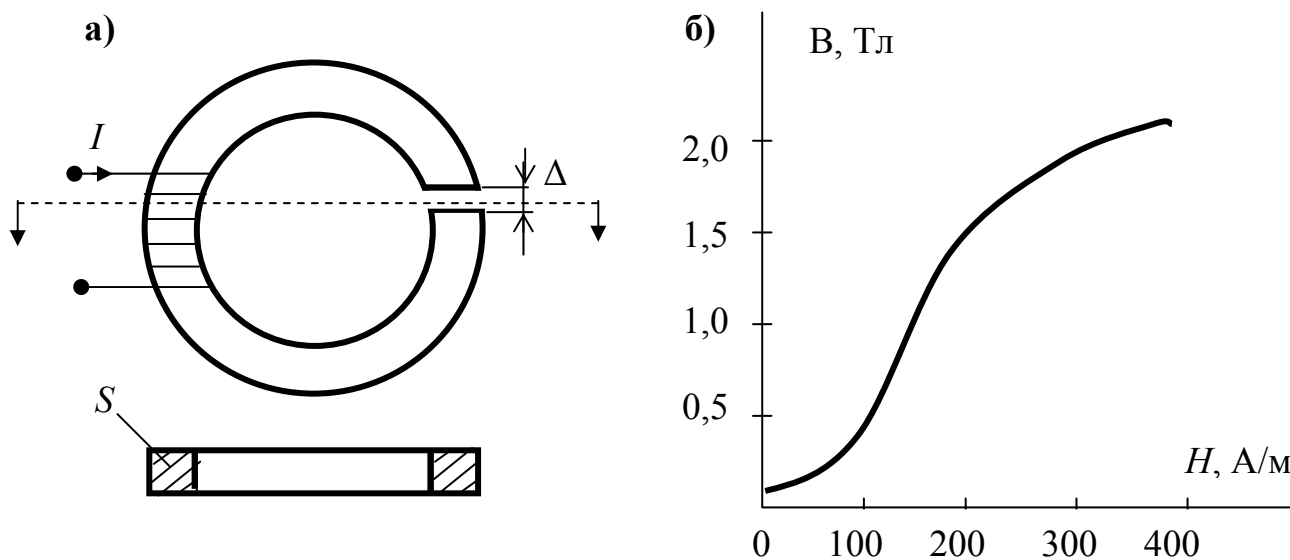


Рис. 14

4. БЛОК КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Общие указания

Блок контроля освоения дисциплины включает:

1. Контрольную работу и методические указания к ее выполнению.

Количество задач и их номера зависят от специальности студента, о чем указано в предисловии к разделу «**Информация о дисциплине**» (стр. 5).

Каждая задача имеет варианты. Порядок выбора варианта указан в методических указаниях к выполнению контрольной работы.

2. Блок тестов текущего (промежуточного) контроля.

Приводятся 16 тестов текущего контроля по каждой теме дисциплины. Кроме этого, предлагаются по темам (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10), которые наиболее трудно усваиваются студентами, тренировочные (репетиционные) тесты. После работы (время не ограничено) с тренировочными тестами можно проверить ответы – они приведены на стр. 373. Завершив работу с тренировочным тестом по теме, студент получает у своего тьютора аналогичный контрольный тест. Время ответа и число попыток для ответа для контрольного теста ограничено. Для тем, в которых отсутствует тренировочный тест, студенту сразу предлагается контрольный тест.

Номера тестов и их количество зависят от специальности студентов. Информация об этом представлена в табл. 1 на следующей странице.

3. Блок итогового контроля по дисциплине «Электротехника и электроника. Ч 1» (электротехника).

Студенты всех специальностей и всех форм обучения сдают экзамен по билетам. В данном блоке приводятся вопросы для подготовки к экзамену. Кроме экзаменационных вопросов, в билете будет дана задача, которая близка по содержанию к задачам из контрольной работы и примерам из практических занятий. Поэтому в процессе подготовки к экзамену рекомендуем повторить методику решения задач из контрольной работы и задач из практических занятий.

4.1. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению

Контрольные задания охватывают основные разделы дисциплины и являются важным этапом в процессе ее изучения. Проверка знаний дисциплины на экзамене включает решение задач, которые близки по тематике и методике решения к задачам из контрольной работы.

Номер варианта студенты выбирают по трем последним цифрам своего шифра. Пояснения даны в соответствующих таблицах в условиях задачи.

ЗАДАЧА 1

Цепь постоянного тока с одним источником ЭДС представлена на рис. 1. Параметры резистивных элементов, величина ЭДС E и вариант схемы указаны в табл. 1.

Требуется определить токи во всех резистивных элементах и проверить полученные результаты с помощью первого или второго законов Кирхгофа.

Таблица 1

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Схема на рис. 1	а	б	в	г	д	е	а	б	в	г
Буква рис.1 выбирается по последней цифре шифра										
$E, \text{В}$	6	8	10	12	14	16	18	20	24	36
Величина E выбирается по предпоследней цифре шифра										
$R_1 = R_2, \text{Ом}$	2	4	6	8	5	4	3	2	1	6
$R_3 = R_4, \text{Ом}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значения $R_1 - R_4$ выбираются по третьей от конца цифре шифра										

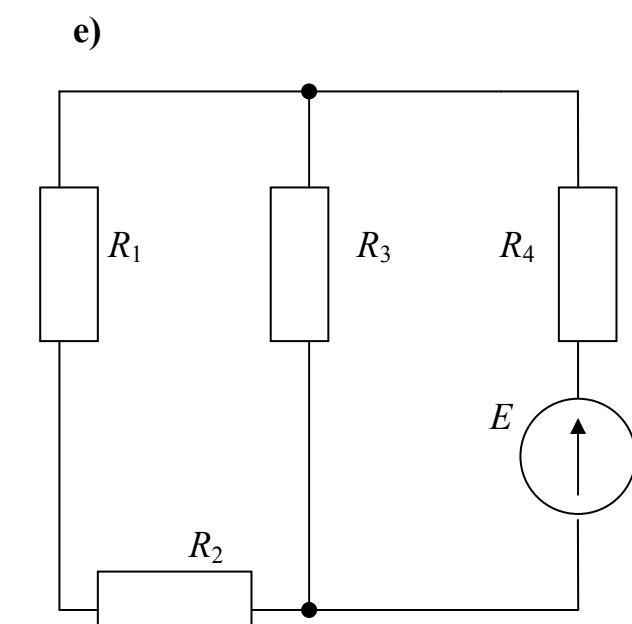
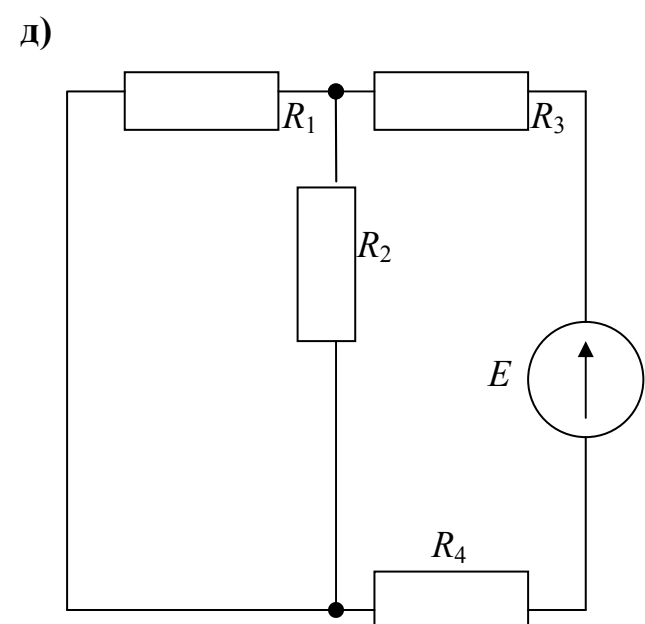
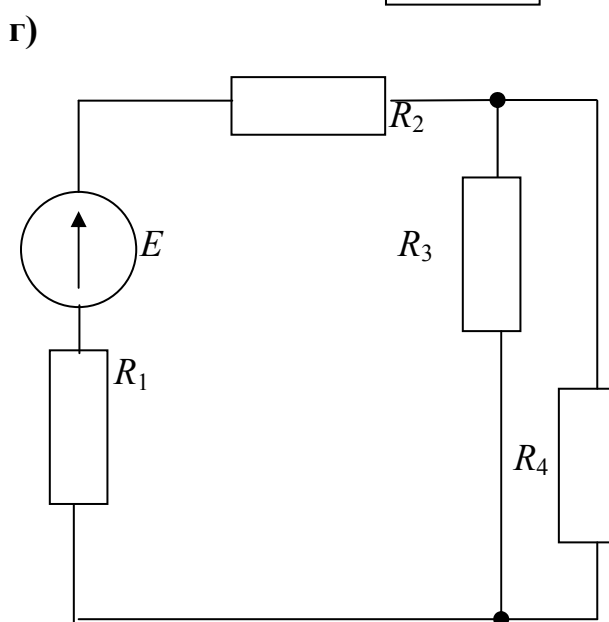
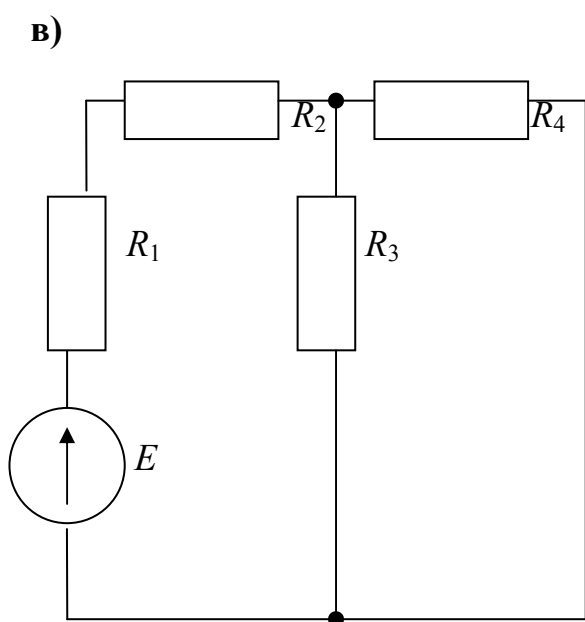
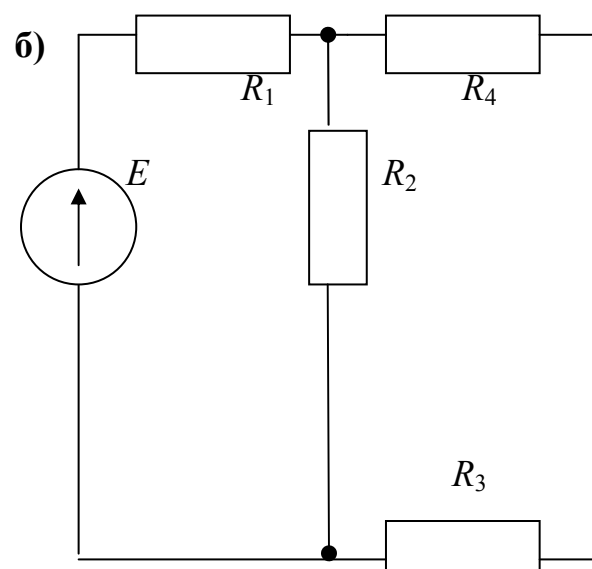
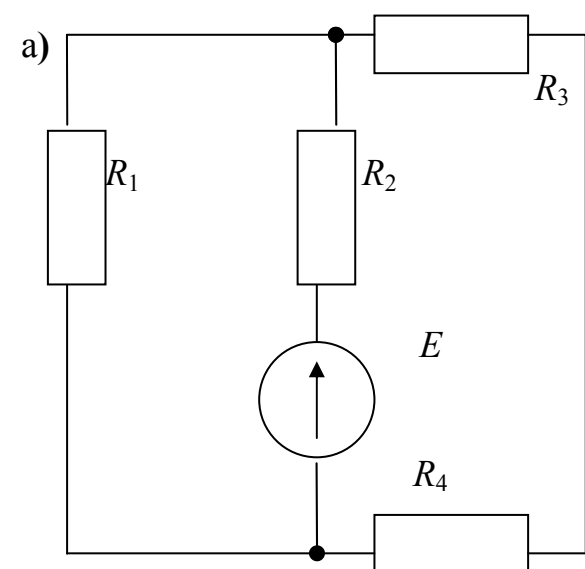


Рис. 1

Методические указания

Для решения этой задачи необходимо изучить материал курса, относящийся к расчету простых цепей постоянного тока [1], с. 5...11; [2], с. 19...46 или [5], с. 3...9.

Расчет простых резистивных цепей с одним источником целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1. Выбрать произвольно в ветвях схемы положительные направления токов, обозначив их стрелками и буквой I_k с соответствующим индексом ($k \in [1, 2, \dots]$).

2. Привести схему к одноконтурному виду путем поэтапного объединения последовательно и параллельно соединенных сопротивлений.

3. Определить ток в одноконтурной схеме.

4. Определить напряжения на всех ветвях исходной схемы путем обратного поэтапного разворачивания схемы.

5. С помощью закона Ома определить искомые токи в ветвях.

6. Выполнить проверку полученных результатов, используя первый или второй закон Кирхгофа.

Пример 1. Определить постоянные токи во всех сопротивлениях электрической схемы (рис. 2). Параметры цепи: $R_1=R_2=4 \text{ Ом}$, $R_3=R_4=1 \text{ Ом}$, $R_5=6 \text{ Ом}$, $E=9 \text{ В}$.

Решение. 1. Выберем произвольно в ветвях положительные направления токов и промаркируем их I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 .

2. Преобразуем поэтапно исходную схему в одноконтурную схему. Последовательность преобразований наглядно представлена на рис. 2, где

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \text{ Ом}; \quad (\text{рис. 2,б})$$

$$R_{123} = R_{12} + R_3 = 2 + 1 = 3 \text{ Ом}; \quad (\text{рис. 2,в})$$

$$R_{1235} = \frac{R_{123} \cdot R_5}{R_{123} + R_5} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \text{ Ом}; \quad (\text{рис. 2,г})$$

3. Определим ток I_4 и напряжение U_{34} на участке 3-4 для одноконтурной схемы (рис. 2,г).

$$I_4 = \frac{E}{R_{1235} + R_4} = \frac{9}{2 + 1} = 3 \text{ А}; \quad U_{34} = I_4 \cdot R_{1235} = 3 \cdot 2 = 6 \text{ В}.$$

4. Определим токи I_3 и I_5 напряжение U_{12} на сопротивлении R_{12} (рис. 2,в).

$$I_3 = \frac{U_{34}}{R_{12} + R_3} = \frac{6}{2+1} = 2 \text{ A}; \quad I_5 = \frac{U_{34}}{R_5} = \frac{6}{6} = 1 \text{ A}.$$

5. Определим напряжение U_{12} на сопротивлении R_{12} и токи I_1, I_2 , (рис. 2,б).

$$U_{12} = I_3 \cdot R_{12} = 2 \cdot 2 = 4 \text{ В}; \quad I_1 = \frac{U_{12}}{R_1} = \frac{4}{4} = 1 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{4}{4} = 1 \text{ A}.$$

Проверим полученные результаты с помощью первого закона Кирхгофа. Для узла 3 (рис. 2,а) имеем $I_4 - I_3 - I_5 = 3 - 2 - 1 = 0$ – верно.

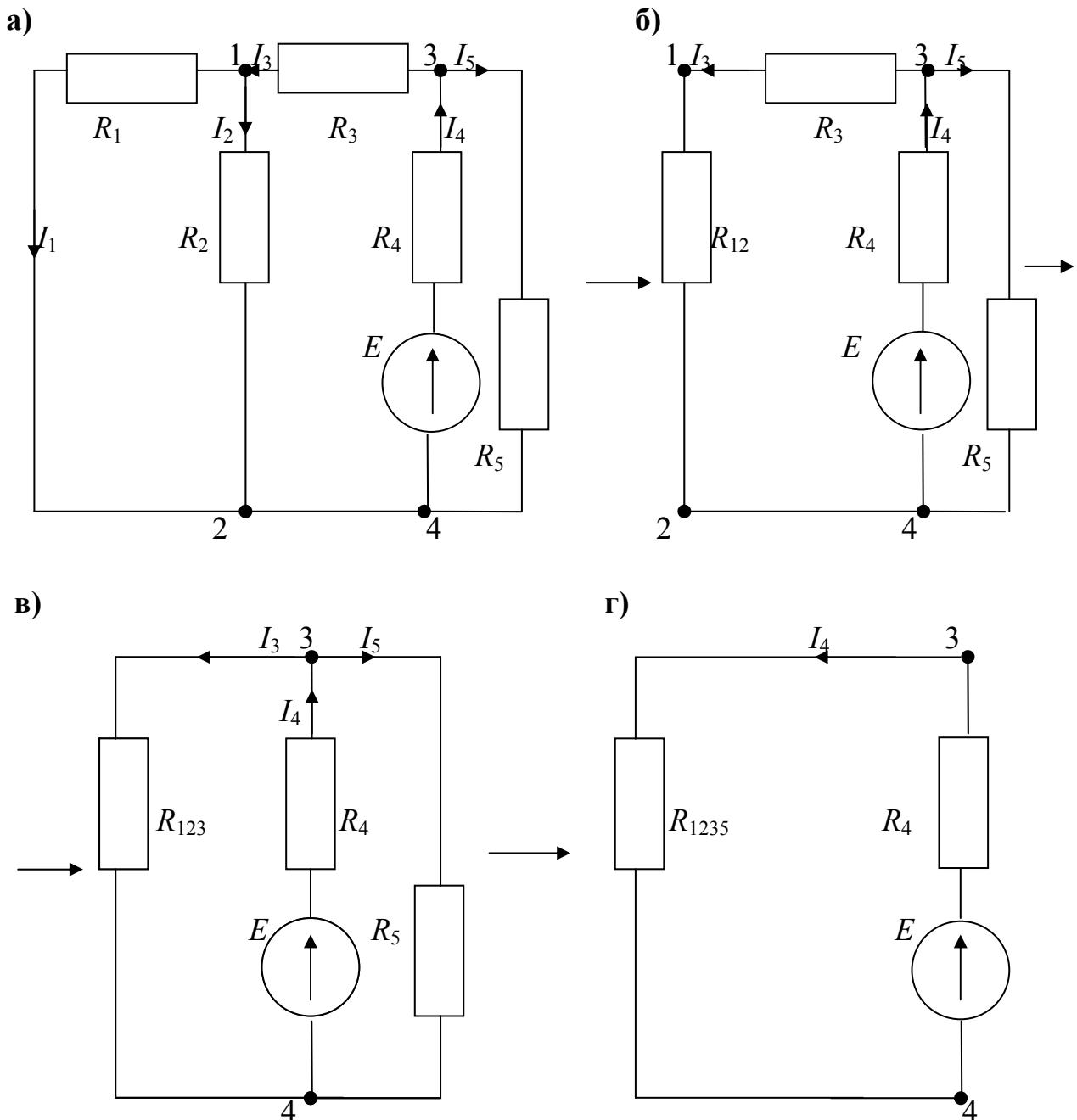


Рис. 2

ЗАДАЧА 2

Схема соединения цепи постоянного тока приведена на рис. 3. Параметры элементов цепи приведены в табл. 2. Требуется составить систему уравнений для определения токов в ветвях методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

Таблица 2

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Схема на рис. 3	а	б	в	г	д	е	а	б	в	г
Вариант схемы выбирается по последней цифре шифра										
$E_1 = E_2 = E_3$, В	36	34	32	30	100	220	18	20	12	24
R_1 , Ом	4	8	12	16	20	24	18	14	10	6
R_2 , Ом	5	10	15	20	25	30	25	20	15	10
R_3 , Ом	2	4	6	8	10	12	10	8	6	4
Значения E , R_1 , R_2 , R_3 выбираются по предпоследней цифре шифра										
R_4 , Ом	3	6	10	9	12	15	20	12	9	6
$R_5 = R_6$, Ом	20	12	30	16	40	30	10	14	15	16
Значения R_4 , R_5 и R_6 выбираются по третьей от конца цифре шифра										

Методические указания

Для решения этой задачи необходимо изучить материал курса, относящийся к расчету токов и напряжений в сложных линейных электрических цепях [1], с. 202...211, [2], с. 30...33; [5], с. 25...41. Расчет сложной цепи на основе законов Кирхгофа целесообразно выполнить в следующей последовательности:

1. Определить все ветви на схеме и произвольно задать в них стрелками направления токов, обозначая их буквами с индексами.
2. Определить и пронумеровать все узлы схемы и для них, кроме любого одного, записать уравнения по первому закону Кирхгофа.
3. Определить все независимые контуры на схеме и произвольно задать их направления обхода.
4. Для всех контуров п. 3 записать уравнения по второму закону Кирхгофа, учитывая при этом, что направления напряжений на элементах совпадают с направлениями соответствующих токов в этих элементах.

В результате из п. 2 и п. 4 получаем систему линейных алгебраических уравнений, порядок которой равен числу ветвей.

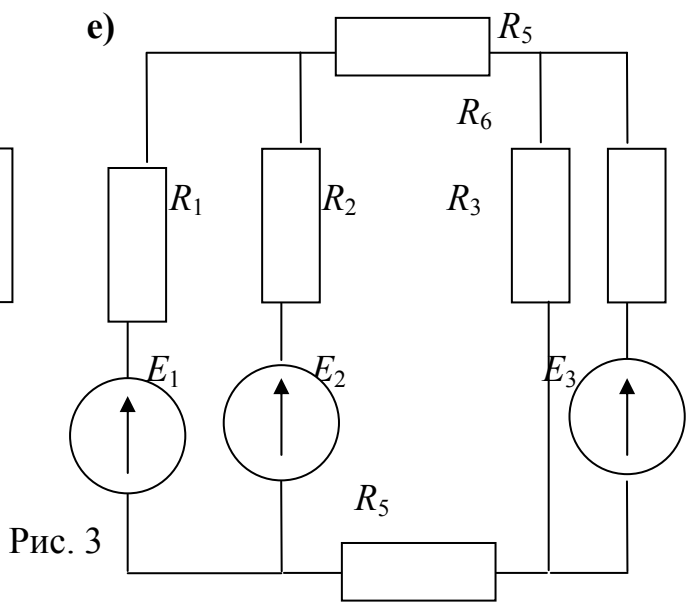
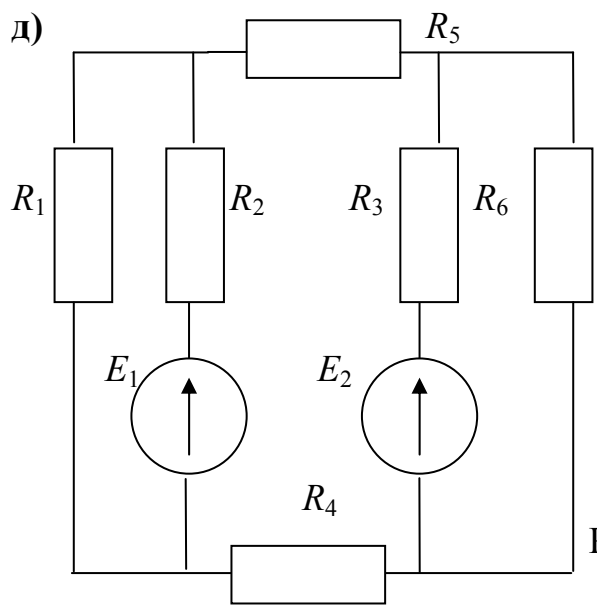
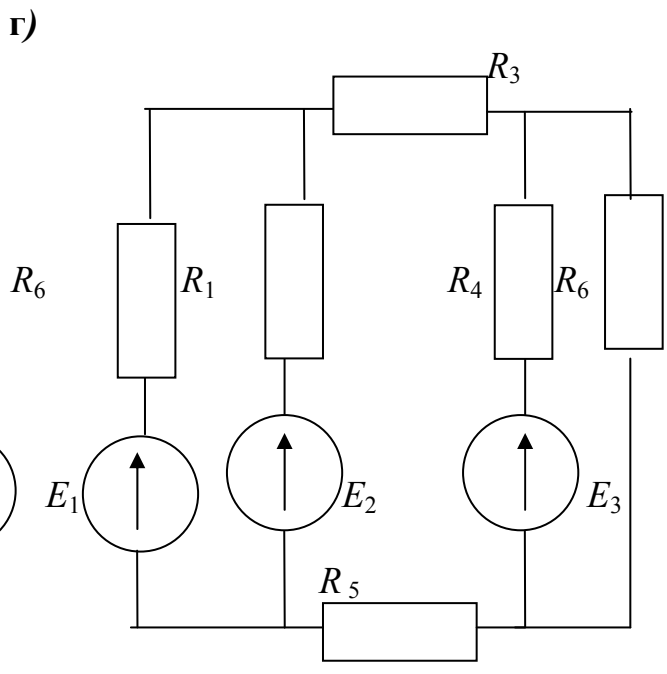
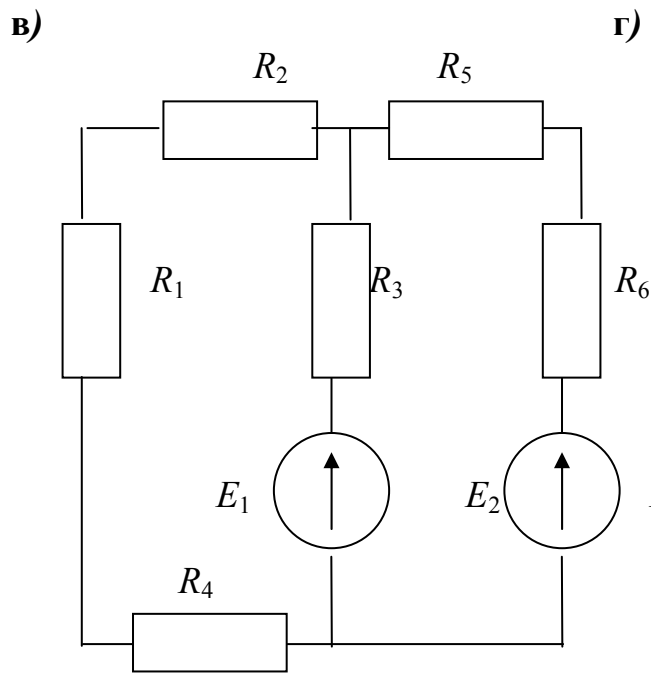
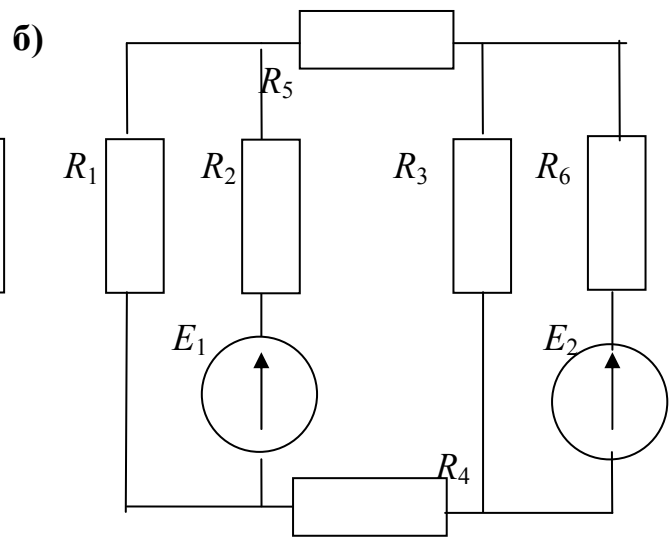
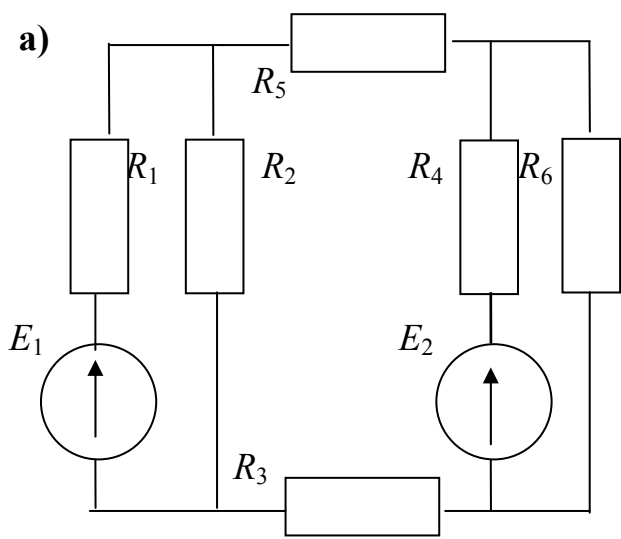


Рис. 3

ЗАДАЧА 3

К электрической цепи (рис. 4) приложено синусоидальное напряжение u , действующее значение которого U и частота f известны. Параметры цепи заданы в табл. 3, $f = 400$ Гц.

Требуется: 1. Определить действующее и мгновенные значения тока на входе цепи комплексным (символическим) методом. 2. Определить, как изменится ток в цепи, если в ней произвести замены: входное синусоидальное напряжение на постоянное напряжение U_0 , реактивные элементы L и C на резистивные элементы R_3 и R_4 . При этом задаться условием $U = U_0$; $X_L = R_3$; $X_C = R_4$.

Таблица 3

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
а б в г д а б в г д										
Схема на рис.4										
Буква рис. 6 выбирается по последней цифре шифра										
$U, В$	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Значение U выбирается по предпоследней цифре шифра										
$R_1 = R_2, Ом$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
$L, мГн$	4	4,8	5,6	6,4	7,2	8	8,8	9,6	8	8,8
$C, мкФ$	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40
Значения L, C, R выбираются по третьей от конца цифре шифра										

Методические указания

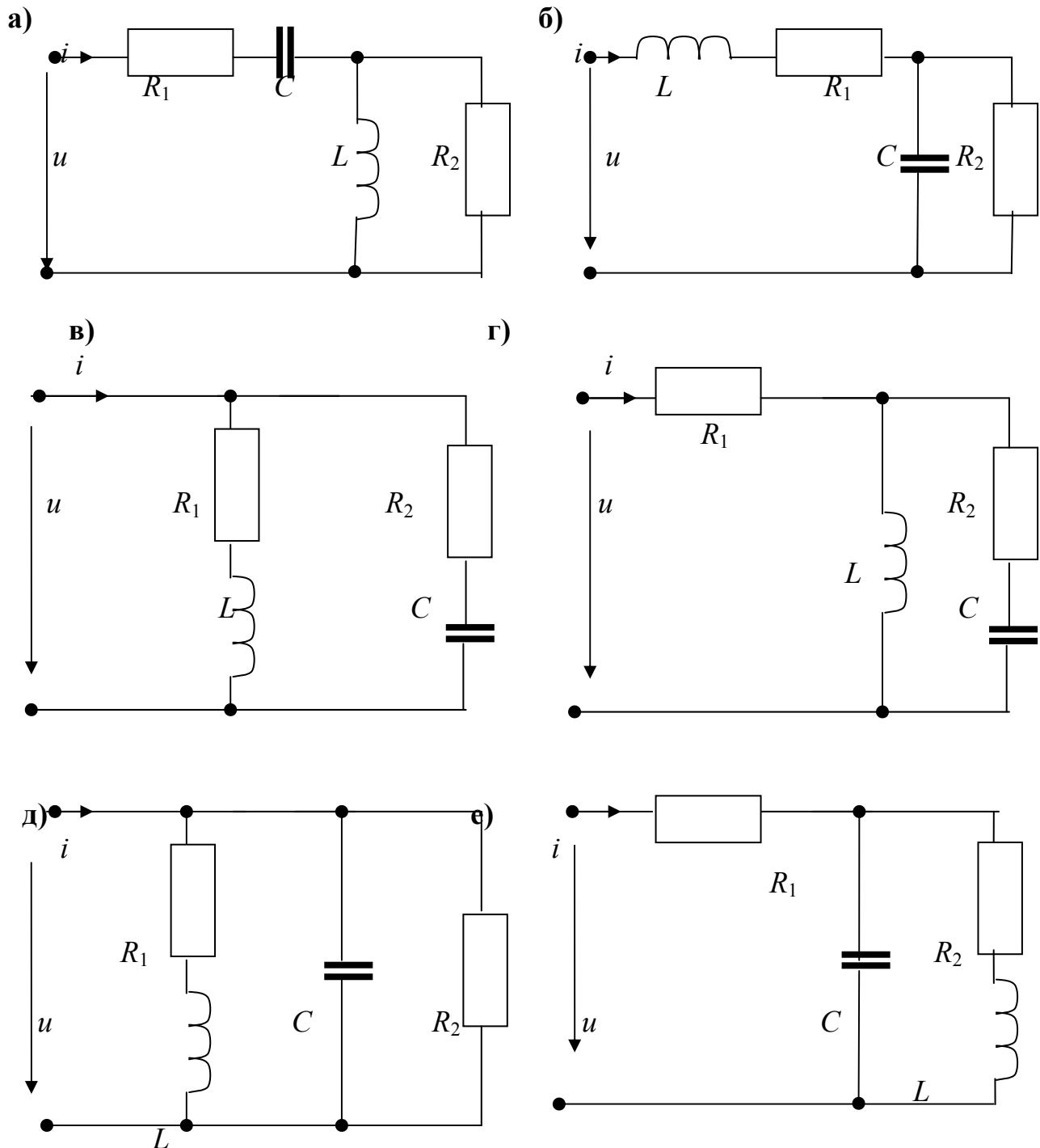
Для решения задачи необходимо изучить материал курса, относящийся к расчету простых цепей синусоидального тока комплексным методом [1], с. 67...82 или [2], с. 76...103.

Комплексный (символический) метод расчета цепей основан на том, что вектора, изображающие функции времени, могут быть записаны с помощью комплексных чисел, например, в показательной форме:

$$\dot{I} = I e^{j\Psi_i}; \quad \dot{U} = U e^{j\Psi_u}, \quad (1)$$

где I и U – модули комплексных действующих значений тока $\dot{I}$ и напряжения $\dot{U}$, равные действующим значениям тока и напряжения; Ψ_i и Ψ_u – аргументы

комплексных действующих значений тока и напряжения, равные начальным фазам тока и напряжения. Напомним, что положительные углы (фазы) откладываются от оси вещественных чисел против часовой стрелки, а отрицательные углы (фазы) – по часовой стрелке от оси вещественных чисел.



Соотношения аналогичные (1), можно записать и для комплексных амплитуд тока, напряжения и ЭДС:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}; \quad \dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}; \quad \dot{E}_m = E_m e^{j\psi_e}, \quad (2)$$

где $\dot{I}_m = I \sqrt{2}$; $\dot{U}_m = U \sqrt{2}$; $\dot{E}_m = E \sqrt{2}$.

В комплексном методе вводят понятия о комплексном сопротивлении $\underline{Z}$

и комплексной проводимости $\underline{Y}$:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}; \quad \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}.$$

Для параметров R, L, C комплексные сопротивления равны

$$\underline{Z}_R = R; \quad \underline{Z}_L = jX_L; \quad X = \omega L; \quad \underline{Z}_C = -jX_C; \quad X_C = 1/\omega C. \quad (3)$$

Важно отметить, что уравнения связи между комплексными токами и напряжениями для всех элементов становятся алгебраическими:

$$\dot{U} = \underline{Z} \dot{I}, \quad (4)$$

а комплексные действующие значения токов и напряжений удовлетворяют уравнениям закона Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^N \dot{I}_k = 0; \quad \sum_{k=1}^M \dot{U}_k = \sum_{k=1}^M \dot{I}_k \underline{Z}_k = \sum_{k=1}^N \dot{E}_k. \quad (5)$$

Уравнения (5), (6) являются алгебраическими, а не дифференциальными, что имело бы место при оперировании с мгновенными значениями токов и напряжений в результате расчета цепей с реактивными элементами. Более того, эти уравнения аналогичны уравнениям цепи постоянного тока. Поэтому все методы расчета цепей постоянного тока можно применить для расчета комплексных токов и напряжений. Последним этапом в комплексном методе расчета является переход от найденных комплексных токов и напряжений к соответствующим мгновенным (действующим) значениям токов и напряжений.

Расчет цепей комплексным методом рекомендуется вести в следующей последовательности:

1. Изображаем заданные синусоидальные напряжения и параметры реактивных элементов комплексными числами (2), (3).

2. Используя законы Ома (4) и Кирхгофа (5) в комплексной форме, составляем уравнения для определения комплексных токов (напряжений).

3. Определяем комплексные токи в ветвях в результате решения алгебраических уравнений п. 2. Основные алгебраические действия с комплексными числами, которые используются на этом этапе, приведены в приложении.

4. С учетом соответствия преобразуем найденные комплексные токи в ветвях в соответствующие мгновенные значения.

Пример 2. Определить мгновенные и действующие значения тока на входе цепи (рис. 4,е), у которой $C = 200$ мкФ, $L = 10$ мГн, $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $u = 12\sin(314t + \pi/6)$

Решение. 1. Изобразим синусоидальное входное напряжение и параметры реактивных элементов L и C комплексными числами:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\frac{\pi}{6}} = 12e^{j\frac{\pi}{6}}; \quad jX_L = j\omega L = j314 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = j3,14 \text{ Ом};$$

$$-jX_C = -j/\omega C = \frac{-j}{314 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = -j15,92 \text{ Ом}.$$

Если начальная фаза ψ_u входного напряжения в условии задачи не задана, то ее рекомендуется взять равной нулю ($\psi_u = 0$).

2. Используя закон Ома в комплексной форме, составим уравнение для определения комплексной амплитуды тока на входе цепи:

$$\dot{I}_m = \dot{U}_m / \underline{Z},$$

где $\underline{Z}$ – комплексное сопротивление цепи определяется по аналогичным правилам расчета полного сопротивления резистивной цепи постоянного тока:

$$\underline{Z} = R_1 + \frac{-jX_C(R_2 + jX_L)}{R_2 + jX_L - jX_C} = R_1 + \frac{X_C X_L - jX_C R_2}{R_2 + j(X_L - X_C)} = 10 + \frac{50 - j159}{10 - j12,76} = 19,6 - j3,6.$$

3. Определим амплитуду и действующее значение комплексного тока на входе цепи:

$$\dot{I}_m = \frac{12e^{j\frac{\pi}{6}}}{19,6 - j3,6} = \frac{12e^{j\frac{\pi}{6}}}{20e^{-j\frac{\pi}{18}}} = 0,6e^{j\frac{\pi}{4,5}} = 0,6(\cos 40^\circ + j\sin 40^\circ) = \sqrt{2}(0,33 + j0,28);$$

$$\dot{I} = 0,33 + j0,28, \quad I = \sqrt{0,33^2 + 0,28^2} = 0,42$$

4. Преобразуем амплитуду комплексного тока на входе цепи в мгновенное значение синусоидального тока:

$$i = I_m \sin(314t + \psi_i) = 0,6 \sin(314t + \pi/4,5) \text{ А}.$$

ЗАДАЧА 4

Схема соединения трехфазного потребителя, линейное напряжение, его частота и параметры элементов фаз, соединенных последовательно, приведены в табл. 4. Требуется начертить схему соединения и определить: действующие значения линейных и фазных токов; активную, реактивную и полную мощности потребителя, работающего в симметричном режиме. По результатам расчета построить векторные диаграммы токов и напряжений для симметричного режима.

Таблица 4

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Схема	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ
Вариант схемы выбирается по последней цифре шифра										
R_{ϕ} , Ом	3	4	6	8	9	10	12	16	15	20
*) L_{ϕ} , мГн	95	92	127	102	134	112	134	166	159	64
*) C_{ϕ} , мкФ	122	99	99	84	106	72	55	79	127	81
Значения R_{ϕ} , L_{ϕ} , C_{ϕ} , выбираются по предпоследней цифре шифра										
U_{ϕ} , В	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
f , Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Значения U_{ϕ} , f выбираются по третьей от конца цифре шифра										

*) при расчете реактивных сопротивлений X_L и X_C округлять их до целых чисел.

Методические указания

Перед решением задачи необходимо изучить материал курса, относящийся к расчету трехфазных цепей [1], с. 94...110 или [2], с. 107...123.

При расчете трехфазных цепей необходимо четко представлять схему соединения фаз приемника и потребителя и связанные с этим соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами в симметричном режиме. Расчет в этом случае сводится к расчету одной фазы и выполняется по закону Ома. В случае несимметричного режима, полученного, например, в результате обрыва провода одной из фаз потребителя, расчет следует проводить отдельно для каждой фазы потребителя. При этом удобно воспользоваться методом узловых напряжений.

Построение векторных диаграмм начинают с выбора масштабов тока и напряжения. На комплексной плоскости, относительно начала координат показывают изображения фазных напряжений и соответствующих им фазных токов. Векторы линейных токов и напряжений определяются схемой соединения, т. е. соотношениями между линейными и фазными значениями конкретной схемы.

Мощность трехфазной системы в случае симметричного режима равна утроенному произведению мощности одной фазы. В случае несимметричного режима работы потребителя мощность трехфазной системы равна сумме соответствующих активных и реактивных мощностей фаз. Полная мощность трехфазной системы вычисляется по выражению теоремы Пифагора.

ЗАДАЧА 5

В цепи постоянного тока (рис. 5), состоящей из резистивных и реактивного элементов, происходит коммутация. При этом ключ из положения 1 переходит в положение 2, а соединение в точке 0 остается неизменным. Параметры цепи заданы (табл. 5).

Требуется: 1. Определить мгновенные значения тока и напряжения на реактивном элементе, решив задачу классическим методом. 2. Построить эпюры напряжения и тока в интервале от $t = 0$ до $t = 4\tau$.

Таблица 5

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Схема на рис. 10	а	в	г	д	е	ж	з	б	в	г
L , мГн	2	-	4	-	8	-	10	4	-	8
C , мкФ	-	10	-	20	-	30	-	-	40	-
Вариант схемы и значения L , C выбираются по последней цифре шифра										
U , В	6	8	10	12	14	16	18	20	24	36
Значение U выбирается по предпоследней цифре шифра										
$R_1 = R_2$, Ом	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Значения R_1 , R_2 выбирается по третьей от конца цифре шифра										

Методические указания

Перед решением задачи необходимо изучить материал курса, относящийся к расчету переходных процессов в линейных цепях классическим методом [1], с. 198... 217 или [2], с. 427...440.

Расчет переходных процессов классическим методом рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

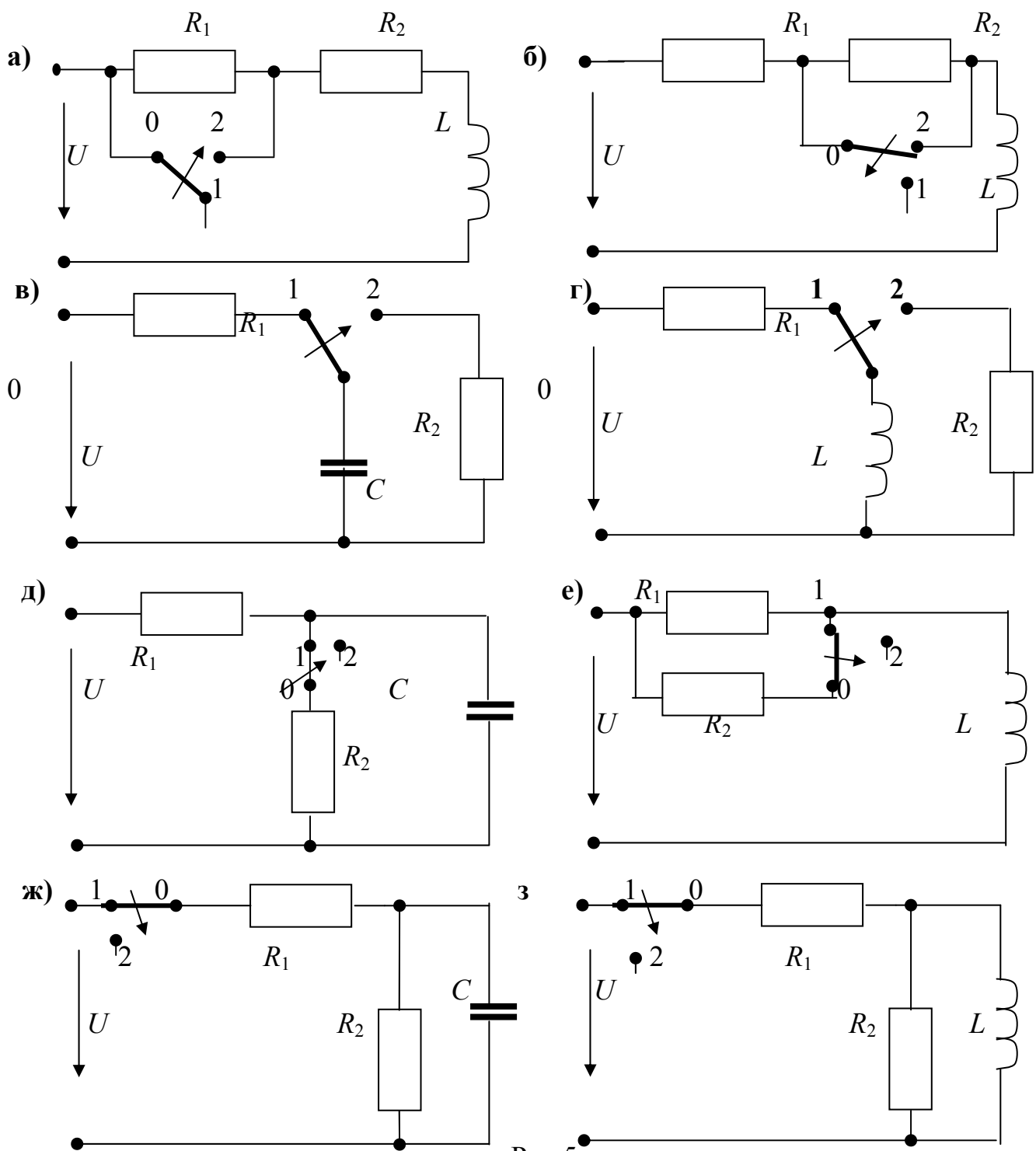


Рис.5

1. Определить начальные условия переходного процесса, т.е. значения тока в индуктивном элементе и напряжение на емкостном элементе в до-коммутационной цепи в момент, непосредственно предшествующий моменту коммутации.

2. Для цепи, образовавшейся после коммутации, составить дифференциальное уравнение на основании законов Кирхгофа и уравнений связи между мгновенными током и напряжением в элементах R , L и C .

При этом для цепей с емкостью составляем уравнение, в котором неизвестной функцией является напряжение на емкости, для цепей с индуктивностью – неизвестной функцией является ток в индуктивности.

3. Находим решение дифференциального уравнения п. 2 в виде суммы установившейся и свободной составляющих, например, для тока:

$$i_L = i_{LY} + i_{LCB}.$$

При этом сначала находим установившуюся составляющую, а затем свободную составляющую в виде экспоненциальной функции, для которой определяется степенной показатель λ (величина, обратная постоянной времени цепи) и постоянная интегрирования на основании начальных условий и законов коммутации.

4. Находим решение дифференциального уравнения п. 2 в виде суммы установившейся и свободной составляющих, например, для тока:

$$i_L = i_{LY} + i_{LCB}.$$

При этом сначала находим установившуюся составляющую, а затем свободную составляющую в виде экспоненциальной функции, для которой определяется степенной показатель λ (величина, обратная постоянной времени цепи) и постоянная интегрирования на основании начальных условий и законов коммутации.

Пример 3. В цепи постоянного тока (рис. 5,а) происходит коммутация. Параметры цепи и величина постоянного напряжения известны: Ом, $L=10$ мГн, $U=10$ В. Определить ток $i(t)$ в цепи и напряжение на индуктивном элементе $u_L(t)$ в переходном режиме классическим методом.

Решение. 1. Определяем начальные условия, т.е. ток $i_L(-0)$ в индуктивном элементе в докоммутационной цепи:

$$i_L(-0) = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{10}{5 + 5} = 1 \text{ А.}$$

2. Составим по второму закону Кирхгофа уравнение и, используя уравнения связи между мгновенными $i(t)$ и $u(t)$, приведем его к дифференциальному виду, в котором неизвестным является искомый ток в цепи $i(t) = i_L(t)$:

$$u_L + u_{R2} = U, \quad L \frac{di}{dt} + R_2 i = U.$$

3. Находим решение дифференциального уравнения в виде суммы установившегося тока i_y и свободного тока i_{CB} :

$$i = i_y + i_{CB},$$

где установившийся постоянный ток в цепи равен

$$i_y = U/R_2 = 10/5 = 2 \text{ А},$$

а свободный ток определяется из решения однородного дифференциального

$$L \frac{di_{CB}}{dt} + R_2 i_{CB} = 0$$

уравнения

в виде $i_{CB} = Ae^{\lambda t}$, где $\lambda = -R_2/L = 5 \cdot 10^2$ - корень характеристического уравнения

$$L\lambda + R_2 = 0.$$

Таким образом, решение дифференциального уравнения принимает вид

$$i = i_Y + Ae^{-5 \cdot 10^{2t}}.$$

4. Находим постоянную интегрирования A с учетом начального условия и закона коммутации:

$$i_L(-0) = i_L(+0) = 1 \text{ А.}$$

Подставив в решение дифференциального уравнения $t = 0$ и полученное значение $i(0) = 1$, получим $1 = 2 + A$, откуда $A = -1$.

В результате этого выражение для мгновенного тока в переходном режиме принимает вид

$$i = 2 - e^{-5 \cdot 10^{2t}} \text{ А.}$$

Подставив в уравнение связи $u_L = L di/dt$ выражение для тока i , получим напряжение на индуктивном элементе в переходном режиме:

$$u_L = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^2 e^{-5 \cdot 10^{2t}} = 5e^{-5 \cdot 10^{2t}} \text{ В.}$$

ЗАДАЧА 6

По обмоткам, намотанным на магнитопровод, выполненный в виде тороида вращения, с числом витков w_1 и w_2 пропускаются соответственно токи I_1 и I_2 (рис. 6). Магнитопровод имеет воздушные зазоры длиной Δ_l .

Требуется рассчитать магнитный поток Φ в магнитопроводе, магнитную индукцию B , а также напряженности магнитного поля, соответственно, в ферромагнитном участке магнитопровода – H_1 и в воздушных зазорах – H_Δ .

Необходимые данные приведены в табл.6. Кривые намагничивания используемых материалов представлены в виде графиков (рис. 7).

Методические указания

Перед решением данной задачи необходимо изучить материалы курса, относящийся к расчету переходных процессов в линейных цепях классическим методом: [1], с. 230...249 или [2], с. 319...332, [4], с. 465...504.

Предложенная для решения задача является обратной задачей расчета ферромагнитных цепей, так как по заданной МДС требуется определить магнитный поток. Для аналитического решения она требует или аналитического выражения характеристик намагничивания используемых в цепи материалов, или применения метода последовательных приближений.

Наиболее просто подобные задачи решаются графическими приемами. При этом исходными данными для расчета нелинейных магнитных цепей являются магнитные характеристики участков магнитной цепи, которые не являются заданными характеристиками, а должны быть построены в процессе

расчета цепи по заданным геометрическим размерам участков и характеристикам намагничивания материалов, из которых выполнены эти участки.

Таблица 6

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Число витков	w_1	25	40	65	70	80	85	90	95	60	50
обмоток	w_2	50	60	95	90	85	80	70	65	40	60
Число витков w_1 и w_2 выбирается по последней цифре шифра											
I_1 , А		15	10	15	10	5	10	5	2	5	10
I_2 , А		10	15	20	15	10	15	10	12	15	25
Магнитопровод изотропный материал		- Армко -			- Ст.1511 -			-Ст.Э22-		- СТ.Э21 -	
Значения токов I_1 и I_2 , марка стали выбираются по предпоследней цифре шифра											
Геометрические размеры:											
R , м		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,6
r , см		5	6	7	8	9	10	11	10	9	8
Δ_1		1	2	3	4	-	2	1	2	3	1
$\Delta_i \cdot 10^{-4}$, м Δ_2		-	1	1	4	-	2	3	-	-	1
Δ_3		-	-	1	1	1	2	-	-	-	-
Δ_4		2	2	-	1	1	-	1	2	3	1
Значения R , r , Δ_i , R_4 выбираются по третьей от конца цифре шифра											

В связи с тем, что магнитный поток участка пропорционален магнитной индукции:

$$\Phi_k = S_k B_k,$$

а магнитное напряжение пропорционально напряженности магнитного поля

$$U_{Mk} = l_k H_k,$$

магнитная характеристика участка, выполненного из ферромагнитного материала, будет изображаться кривой (кривая 1, рис. 8,а), подобной кривой намагничивания данного материала.

Для построения такой характеристики необходимо задаться рядом точек на кривой намагничивания, выписать соответствующие им пары значений B_k и H_k и по приведенным формулам, зная площадь S_k поперечного сечения участка и его длину l_k , рассчитать ряд парных значений Φ_k и U_{Mk} . Нанося по полученным координатам точки на плоскость с системой осей Φ_k и U_{Mk} , нетрудно провести по ним искомую магнитную характеристику.

$$\Phi_K = f(U_{MK}).$$

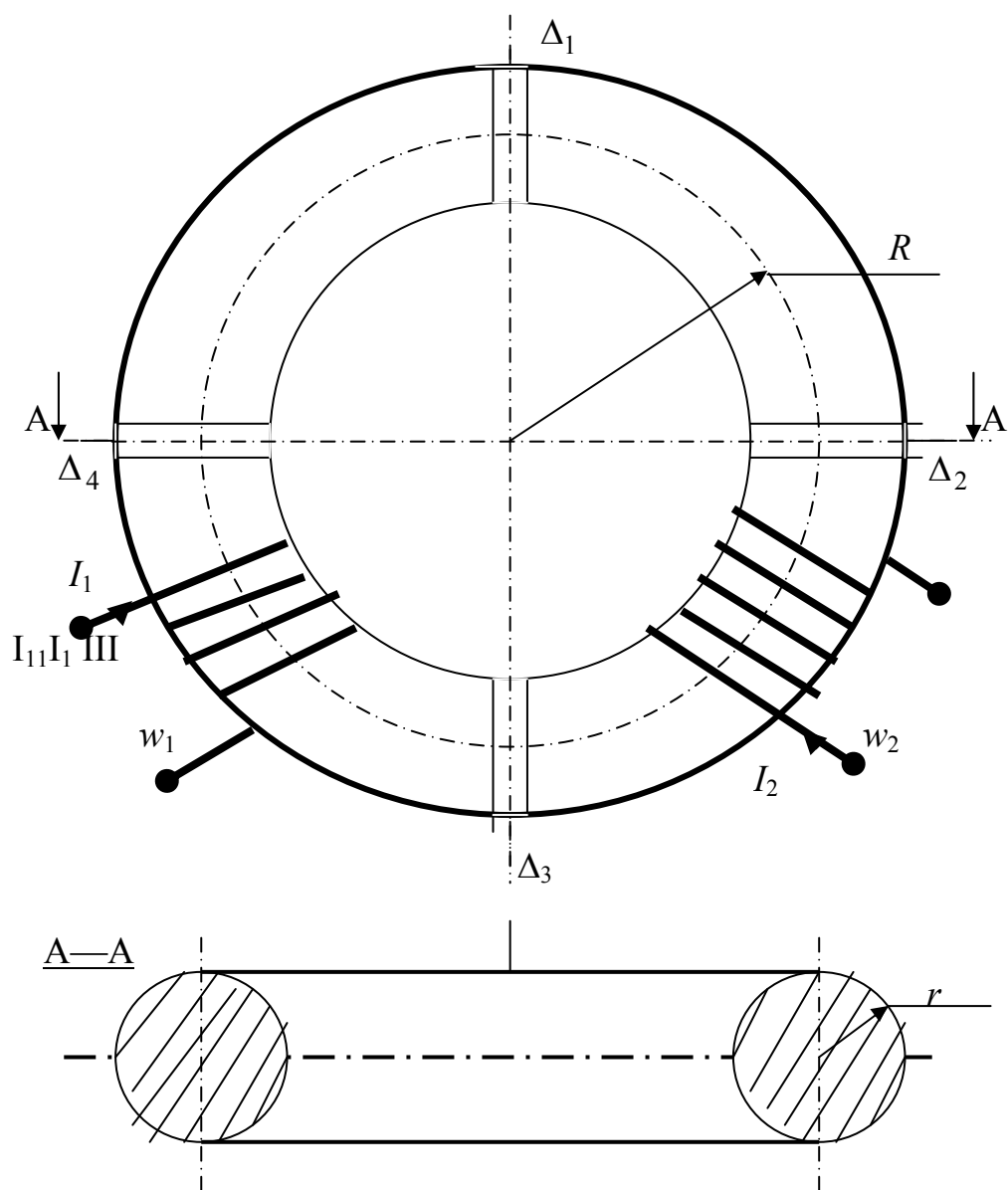


Рис. 6

Заметим, что магнитная характеристика участка, выполненного из материала с постоянной магнитной проницаемостью μ_k , представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (линия 2, рис. 8,а). Построение ее можно осуществить по одной точке, координаты которой должны быть связаны между собой уравнением

$$\Phi_k = S_k B_k = S_k \mu_k H_k = \frac{S_k \mu_k}{l_k} U_{Mk}.$$

В частном случае, когда таким участком является немагнитный, например, воздушный зазор, магнитная проницаемость участка принимается равной магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м ($\mu_k = \mu_0$).

Обратная задача в неразветвленной цепи с несколькими участками, когда по заданным токам I_1 и I_2 в обмотках с w_1 и w_2 требуется найти магнитный поток цепи, решается путем построения на одном графике и в одном масштабе магнитных характеристик всех участков цепи с последующим их сложением в направлении оси магнитных напряжений. В соответствии с равенством

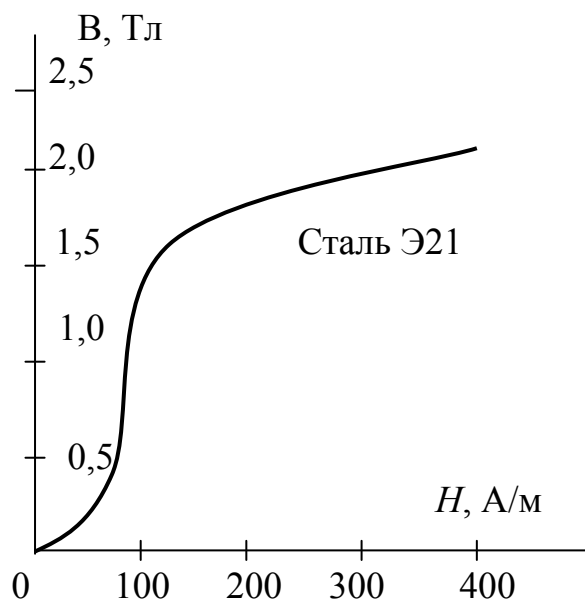
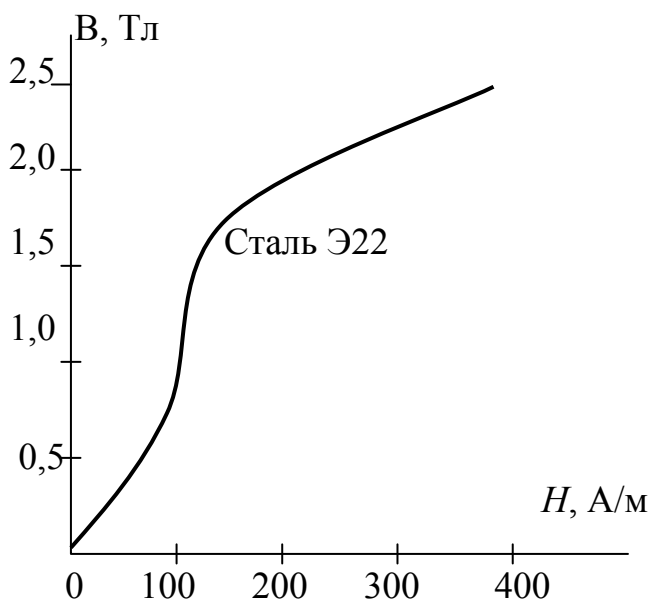
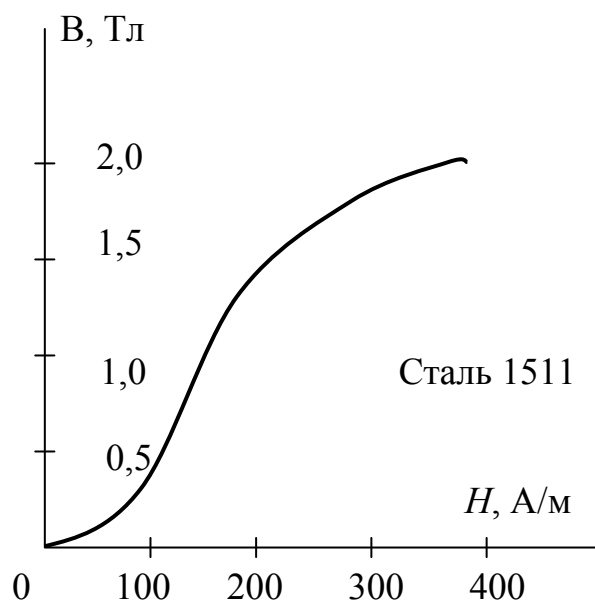
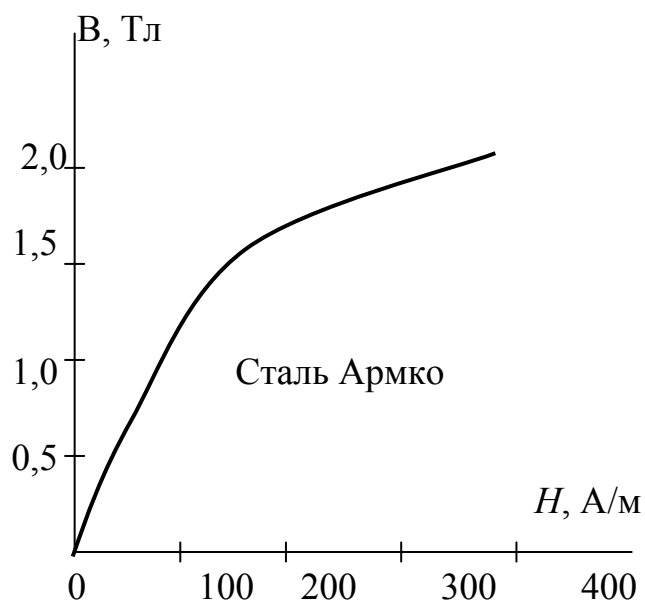


Рис. 7

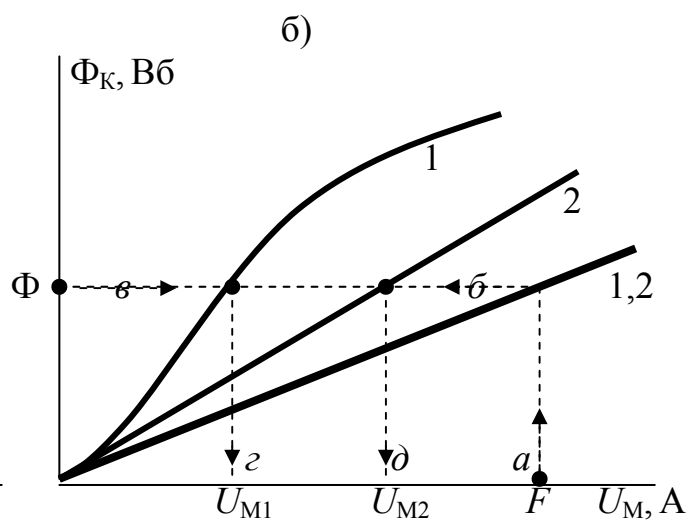
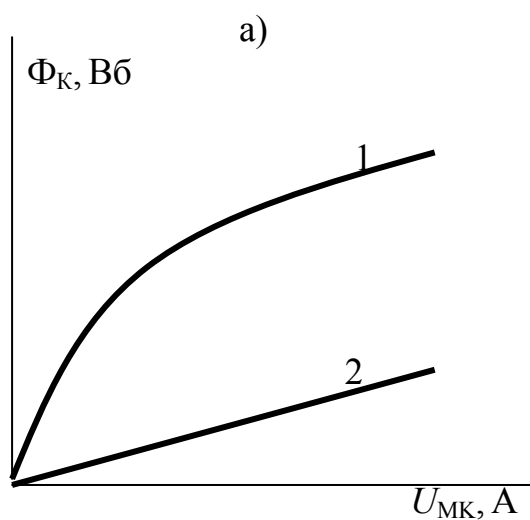


Рис. 8

$$F = F_1 + F_2 = w_1 I_1 + w_2 I_2 = \sum_{k=1}^N U_{Mk},$$

справедливым для такой цепи, полученная суммарная кривая будет представлять зависимость $\Phi = f(F)$ магнитного потока цепи от магнитодвижущей силы (МДС) обмотки (рис. 8,б, кривая 1,2).

Пользуясь кривой 1,2, вычислив предварительно МДС обмотки при заданных токах

$$F = F_1 + F_2 = w_1 I_1 + w_2 I_2,$$

можно определить искомый поток цепи, а при необходимости и магнитные напряжения на отдельных участках.

На рис. 8,б описанные построения выполнены для примера магнитной цепи, представленной на рис. 6 и состоящей из двух участков, один из которых является воздушным зазором. По результирующей характеристике, показанной на рис. 8,б толстой линией 1,2, операцией а-б находят магнитный поток в цепи, а с помощью операций в-г и в-д по магнитным характеристикам 1 и 2 отдельных участков определяют магнитные напряжения U_1 и U_2 на участках цепи.

Алгоритм решения задачи

1. Используя кривую намагничивания рекомендуемого для соответствующего варианта материала магнитопровода, строят магнитную характеристику участка 1 длиной $\left(l - \sum_{i=1}^{i=4} \Delta_i\right)$, представляющую собой зависимость $\Phi_1 = f(U_{M1})$,

$$\text{где } \Phi_1 = S_1 B_1, \quad U_{M1} = \left(l - \sum_{i=1}^{i=4} \Delta_i\right) H_1, \quad S_1 = \pi r^2.$$

Для этого задаются рядом точек на кривой намагничивания.

2. Аналогичным образом строится магнитная характеристика воздушного зазора

$$\Delta = \sum_{i=1}^{i=4} \Delta_i \text{ (участок 2), представляющая собой зависимость } \Phi_2 = f(U_{M2}).$$

Учитывая то обстоятельство, что $\mu_2 = \mu_0$, построение прямой линии осуществляется по двум точкам: точке начала координат и точке, координаты которой связаны уравнением

$$\Phi_2 = S_2 B_2 = \frac{S_2 \mu_0}{\Delta} U_{M2} = \frac{\pi r^2 \mu_0}{\Delta} U_{M2},$$

где $S_2 = S_1$.

3. Строится суммарная магнитная характеристика цепи

$$\Phi = f(F) = \left(\sum_{k=1}^{k=2} U_{MK} \right).$$

Для ее построения на одном графике и в одном масштабе наносятся магнитные характеристики $\Phi_1 = f(U_{M1})$ и $\Phi_2 = f(U_{M2})$. Сложение осуществляется в направлении оси магнитных напряжений (рис. 8,б), так как участки соединены последовательно.

4. По заданным токам I_1, I_2 , числам витков w_1, w_2 определяется суммарная МДС обмоток:

$$F = F_1 + F_2 = w_1 I_1 + w_2 I_2.$$

5. Используя суммарную магнитную характеристику 1,2 магнитопровода, определяют магнитный поток Φ .

6. Рассчитывают магнитную индукцию в магнитопроводе

$$B = \Phi/S_1, \text{ Тл }.$$

7. По магнитным характеристикам 1 и 2 определяют: U_{M1} и U_{M2} , а также напряженности магнитного поля соответствующих участков (А/м):

$$H_1 = \frac{U_{M1}}{l - \Delta}, \quad H_2 = \frac{U_{M2}}{\Delta},$$

где $l = 2\pi R - \Delta$, м; $\Delta = \sum_{i=1}^{i=4} \Delta_i$, м.

ЗАДАЧА 7

Однофазный двухобмоточный трансформатор испытан в режимах холостого хода и опытного короткого замыкания. Показания электроизмерительных приборов по результатам испытаний приведены в табл. 7.

Таблица 7

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_{10} , В	220	380	220	380	220	380	220	380	220	380
I_{10} , А	0,4	0,25	0,2	0,3	0,25	0,2	0,6	0,8	0,42	0,39
P_{10} , В	50	60	30	70	40	50	60	55	50	64
U_{20} , В	13	27	40	14	27	41	6	132	120	35
Значения $U_{10}, I_{10}, P_{10}, U_{20}$ выбираются по последней цифре шифра										
$U_{1к}$, В	25	40	25	50	25	50	40	26	18	30
$I_{1к}$, А	6	7	10	9	7	6	10	10	6	6
$P_{1к}$, Вт	80	81	90	160	80	111	164	95	75	85
$I_{2к} = U_{10}/U_{20}$, А										
Значения $U_{1к}, I_{1к}, P_{1к}$ выбираются по предпоследней цифре шифра										
$\cos \varphi_2$	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	0,8
Значения $\cos \varphi_2$ выбираются по третьей от конца цифре шифра										

Требуется:

1. Начертить схему исследования трансформатора, пояснить принцип его работы и цель исследования режимов холостого хода и опытного короткого замыкания. 2. Выполнить расчет: сопротивлений «Т»-образной схемы замещения, полной мощности и коэффициента полезного действия в номинальном режиме работы на нагрузку активно-индуктивного характера.

Методические указания

Перед решением данной задачи целесообразно повторить раздел 1.1 рабочей программы, где рассматриваются вопросы особенностей расчета электрических и магнитных цепей переменного тока, а затем переходить к изучению принципа работы трансформатора и его физических процессов, используя для этого литературу, указанную в разделе 1.8.

Основные положения теории трансформаторов можно сформулировать в виде следующих тезисов: 1. При работе трансформатора часть потребляемой им электрической энергии преобразуется в тепло. Эта энергия остается потерянной, и ее отдельные составляющие называются потерями. Различают постоянные потери и переменные потери. Потери считаются постоянными, если они не зависят от величины тока. К ним относятся потери в сердечнике магнитопровода. Потери, зависящие от тока, называются переменными. К ним относятся потери в обмотках трансформатора.

2. Магнитный поток в сердечнике трансформатора при изменении нагрузки в диапазоне от холостого хода до номинального режима остается постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода.

3. Постоянство магнитного потока определяет постоянство его намагничивающей силы (МДС). Поэтому всякое изменение тока вторичной обмотки принуждает изменяться ток первичной обмотки, настолько чтобы общая МДС обмоток оставалась неизменной.

4. Схема замещения трансформатора – электрически соединенных активных и реактивных сопротивлений, которая будучи подключена на место реального трансформатора, потребляет такой же ток и имеет одинаковый с ним сдвиг фаз. Соотношения между токами и напряжениями в реальной схеме замещения трансформатора описываются уравнениями одинакового вида. Это позволяет, пользуясь принципом "приведения", выполнить расчет сопротивления одной фазы трансформатора по результатам экспериментального исследования в режимах холостого хода и короткого замыкания. Отметим, что в соответствии с

принципом приведения принимают число витков вторичной обмотки w_2' приведенного трансформатора равным числу витков первичной обмотки, т. е. полагают коэффициент приведенного трансформатора равным единице:

$$K_{тр пр} = w_1/w_2 = 1.$$

При этом, чтобы МДС приведенного трансформатора не изменилась и оставалась равной МДС исходного трансформатора, изменяют ток I_2 и напряжение U_2 вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2' = I_2 / K_{TP}; \quad U_2' = K_{TP} U_2; \quad K_{TP} = w_1 / w_2.$$

Это приводит к изменению сопротивлений (r_2', X_2') , связанных со вторичной обмоткой приведенного трансформатора.

5. Напряжение вторичной обмотки трансформатора зависит от числа ее витков и характера сопротивления нагрузки.

Алгоритм решения задачи

1. Расчет сопротивлений "Т" образной схемы замещения и обмоток трансформатора.

Полное, активное и индуктивное сопротивления (Ом) намагничивающего контура трансформатора вычисляются по формулам

$$z_0 = U_{10} / I_{10}, \quad r_0 = P_{10} / I_{10}^2, \quad X_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Сопротивление короткого замыкания трансформатора, равное суммарному активному сопротивлению обмоток, вычисляют по формулам:

$$z_K = U_{1K} / I_{1K}, \quad r_K = P_{1K} / I_{1K}^2, \quad X_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

Для расчета сопротивлений обмоток по данным опытного короткого замыкания трансформатор считают приведенным. Параметры приведенной обмотки обозначают штрихом сверху. Для приведенного трансформатора полагают, что мощность электрических потерь (Ом) делятся поровну между обмотками. На основании этого можно записать:

$$r_1 = r_2' = r_K / 2, \quad X_1 = X_2' = X_K / 2.$$

Активное и реактивное сопротивления обмоток вычисляют по формулам:

$$r_2 = r_2' / K_{TP}^2, \quad X_2 = X_2' / K_{TP}^2.$$

где K_{TP} – коэффициент трансформации, вычисляемой по формуле

$$K_{TP} = U_{10} / U_{20}.$$

2. Расчет полной мощности и коэффициента полезного действия трансформатора.

Напряжение короткого замыкания трансформатора, выраженное в процентах

$$u_K = (U_{1K} / U_{1n}) \cdot 100, \quad \%, \quad \text{где } U_{1n} = U_{10}, \text{ В.}$$

Коэффициент мощности трансформатора в режиме опытного короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1K}}.$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах

$$u_a = u_K \cdot \cos \varphi_K, \%; \quad u_p = u_K \cdot \sin \varphi_K, \%.$$

Падение напряжения на внутреннем сопротивлении вторичной обмотки трансформатора, выраженное в процентах

$$\Delta u_H = u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2, \%,$$

где $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности потребителя.

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в номинальном режиме

$$U_{2H} = \frac{100 - \Delta u_H}{100} \cdot U_{20}.$$

Полная мощность трансформатора $S_H = U_{2H} \cdot I_{2H}$, В·А, где $I_{2H} = I_{2K}$.

Активная мощность вторичной обмотки трансформатора в номинальном режиме (Вт):

$$P_{2H} = S_H \cdot \cos \varphi_2.$$

Активная мощность первичной обмотки трансформатора больше активной мощности вторичной обмотки трансформатора на величину потерь (Вт):

$$P_{1H} = P_{2H} + P_{10} + P_{1K}.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta_H = \left(P_{2H} / P_{1H} \right) \cdot 100 \, \%.$$

ЗАДАЧА 8

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, подключенный к трехфазной сети переменного тока частотой $f = 50$ Гц, имеет следующие номинальные данные, приведенные в табл. 8: мощность на валу P_{2H} , линейное напряжение U_{1H} , схема соединения обмоток статора, частота вращения ротора n_H , коэффициент мощности $\cos \varphi_H$, кратность критического K_M и пускового K_{II} моментов.

Требуется:

1. Начертить схему включения двигателя, пояснить принцип его работы и назначение элементов схемы. 2. Определить число пар полюсов обмотки статора; номинальное, критическое пусковое скольжение и соответствующие им моменты на валу; возможность пуска двигателя с номинальной нагрузкой при снижении номинального напряжения на 10 %.

Методические указания

Решение задачи следует начинать после изучения устройства и принципа действия трехфазных асинхронных машин.

Следует обратить особое внимание на электромагнитные процессы, возникающие в асинхронном двигателе как при его пуске, так и в процессе работы.

Векторная диаграмма и схема замещения фазы асинхронного двигателя облегчают изучение его работы и используются при выводе основных уравнений. Эксплуатационные параметры асинхронного двигателя наглядно демонстрируются при помощи механических и рабочих характеристик.

Таблица 8

Последняя, пред- последняя или третья от конца цифра шифра сту- дента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P_{2H} , кВт	1,2	1,5	1,1	1,5	2,2	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5
U_{1H} , В	220	220	380	380	220	380	220	380	380	220
Схема соединения	Δ	Δ	Y	Y	Δ	Y	Δ	Y	Y	Δ
*) $n_H \cdot 10^{-1}$ об/мин	288	283	278	272	268	146	141	136	131	96
Значения P_{2H} , U_{1H} , n_H и сх. соединения выбираются по последней цифре шифра										
$\cos \varphi_H$	0,87	0,85	0,86	0,84	0,82	0,79	0,81	0,89	0,75	0,78
K_M	2,4	2,2	2,3	2,5	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
K_{II}	1,4	1,5	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	1,6	1,7	1,5
Значения $\cos \varphi_H$, K_M и K_{II} выбираются по третьей от конца цифре шифра										

*) Значение n_H необходимо умножить на 10.

Алгоритм решения задачи

Для определения числа пар полюсов обмотки статора воспользуемся формулой, устанавливающей связь синхронной частоты вращения магнитного поля статора n_1 , (об/мин) с частотой питающего напряжения f и числом пар полюсов обмотки

$$n_1 = 60f/p.$$

Число пар полюсов p вычислим, приняв $n_1 = n_H$, по соотношению:

$$p = 60f / n_H,$$

беря во внимание по конструктивным соображениям только целую часть.

Скольжение ротора в номинальном режиме определяется по формуле:

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}$$

Вращающий момент на валу, развиваемый двигателем в номинальном режиме вычисляется по формуле

$$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_H},$$

где P_{2H} выражено в кВт, M_H – Н·м,

Скольжение ротора в критическом режиме вычисляется по формуле:

$$s_{KP} = s_H \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right),$$

т. е. частота вращения ротора в этом режиме (об/мин) равна

$$n_{KP} = n_1 (1 - s_{KP}).$$

Вращающий момент, развиваемый двигателем в критическом режиме работы

$$M_{KP} = K_M \cdot M_H.$$

При пуске двигателя в ход частота вращения ротора $n_r = 0$, поэтому скольжение ротора $s_r = 1$.

Вращающий момент, развиваемый двигателем в момент пуска

$$M_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot M_H,$$

Величина этого момента определяет возможность пуска двигателя с номинальным моментом, если $M_{\Pi} > M_H$, или в режиме холостого хода, с последующим увеличением нагрузки на валу, если $M_{\Pi} < M_H$.

Вращающий момент, развиваемый двигателем, пропорционален квадрату приложенного напряжения. При номинальном напряжении эта зависимость определяется выражением.

$$M_H = C_M \cdot U_H^2,$$

где C_M постоянный коэффициент, определяемый конструктивными особенностями машины.

Если напряжение на зажимах двигателя изменять, например, в сторону уменьшения, то будет изменяться и величина вращающего момента на валу двигателя. Например, $U = 0,9U_H$, тогда

$$M = C_M (0,9U_H)^2 = 0,81C_M U_H^2 = 0,81M_H.$$

Вычислив величину момента на валу, следует определить значение пускового момента двигателя при пониженном напряжении:

$$M_{\Pi} = K_M \cdot M$$

и сделать вывод о возможности пуска двигателя в ход.

ЗАДАЧА 9

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные, приведенные в табл. 10: мощность на валу P_{2H} ; напряжение U_H ; частота вращения якоря n_H ; коэффициент полезного действия η_H ; сопротивление цепей якоря $R_{\text{я}}$ и возбуждения $R_{\text{в}}$ соответственно.

Требуется:

1. Начертить схему включения двигателя пояснить принцип его работы и назначение элементов схемы.

2. Определить сопротивление пускового реостата для условия $I_{\Pi} = 2,5I_{\text{ян.}}$.

Методические указания

Изучение электрических машин постоянного тока надо начинать с их принципа работы и устройства.

Учитывая, что машина постоянного тока обратима, т. е. может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, изучение таких вопросов, как коллектор, реакция якоря, электромагнитный момент и способ возбуждения необходимо рассматривать в сопоставлении для обоих режимов.

Таблица 9

Последняя, предпоследняя или третья от конца цифра шифра студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P_{2H} кВт	1	1,2	1,5	1,7	2,2	2,5	3,4	4,0	5,3	7
U_H , В	110	110	110	110	110	220	220	220	220	220
*) $n_H \cdot 10^{-1}$ об/мин	300	220	150	220	150	220	220	150	300	220
Значения P_2 , U_H , n_H выбираются по последней цифре шифра										
$R_{я}$, Ом	1,2	0,8	0,48	0,34	0,23	0,62	0,44	0,31	0,29	0,16
R_B , Ом	202	160	110	80	70	220	170	185	135	110
Значения $R_{я}$, R_B выбираются по предпоследней цифре шифра										
η_H , %	77	78	80	81	82	83	84	85	86	87
Значение η_H выбирается по третьей от конца цифре шифра										

*) Значение n_H необходимо умножить на 10.

Изучая работу машин постоянного тока в режиме двигателя, надо обратить особое внимание на пуск, назначение пусковых и регулировочных сопротивлений, способы регулирования частоты вращения якоря и вращающий момент двигателя; в режиме генератора – на самовозбуждение. Характеристики генераторов и двигателей дают наглядное представление об эксплуатационных свойствах электрических машин.

Алгоритм решения задачи

Электрическая мощность P_{1H} (Вт) двигателя в номинальном режиме

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H,$$

где η_H – коэффициент полезного действия двигателя, выраженный в относительных единицах (о. е.).

Ток, потребляемый двигателем, в номинальном режиме от питающей сети

$$I_H = P_{1H} / U_H,$$

Ток, протекающий в цепи обмотки возбуждения

$$I_B = U_H / R_B,$$

Ток, протекающий в цепи якоря двигателя, определяется по уравнению первого закона Кирхгофа

$$I_{яH} = I_H - I_B,$$

Пусковой ток по условию задачи должен составлять $2,5I_{яH}$, что достигается включением в цепь якоря внешнего, по отношению к двигателю пускового реостата. Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_{\Pi} = 2,5I_{яH} = \frac{U_H}{R_{я} + R_{д}},$$

откуда следует, что

$$R_{д} = \frac{U_H}{I_{\Pi}} - R_{я}$$

Потери (Вт) в обмотке якоря и цепи возбуждения в номинальном режиме работы

$$\Delta P_{яH} = I_{яH}^2 R_{я}, \quad \Delta P_B = I_B^2 R_B.$$

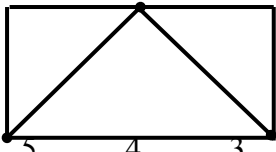
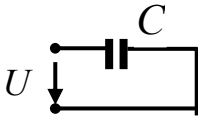
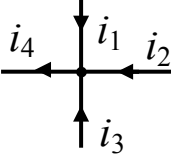
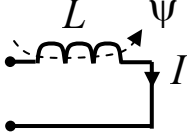
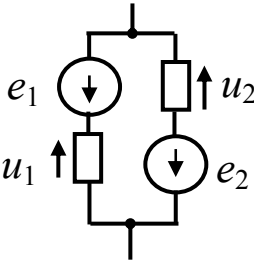
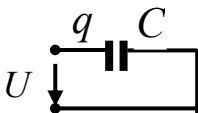
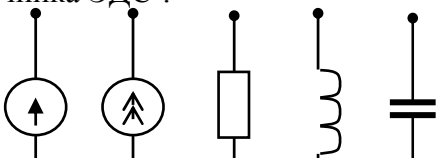
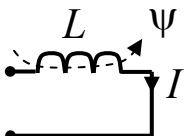
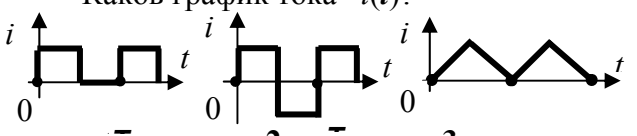
Вращающий момент (Н·м) двигателя в номинальном режиме

$$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_H},$$

где P_{2H} – механическая мощность двигателя, выраженная в кВт.

4.2. Текущий контроль (вопросы для самопроверки, тестовые задания)

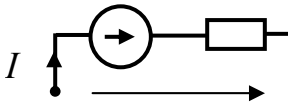
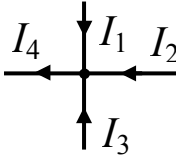
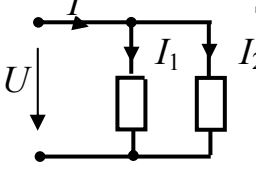
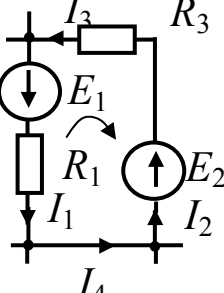
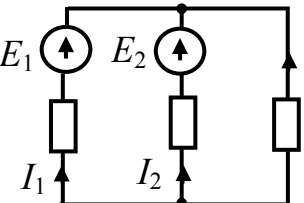
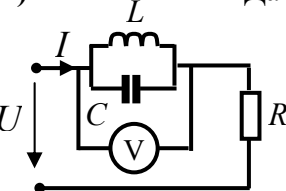
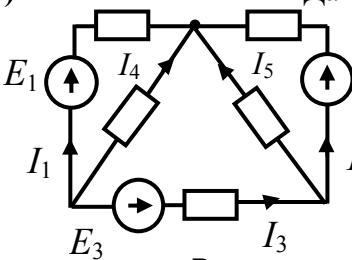
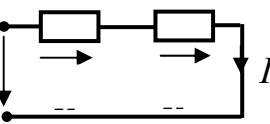
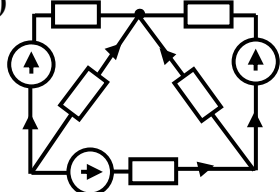
Тема 1. Репетиционный тест 1

1) Дана структурная схема цепи. Сколько узлов в данной цепи?  1. 5 2. 4 3. 3 4. 6 5. 7	6) Дано: $q = 0,2$ Кл; $C = 1000$ мкФ. Определите напряжение на конденсаторе U В.  1. 100 2. 200 3. 300 4. 400 5. 500
2) Найдите правильное уравнение:  1. $i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$ 2. $-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 = 0$ 3. $+i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$ 4. $-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 = 0$ 5. $-i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0$	7) Дано: $L = 10$ мГн; $\psi = 1$ Вб. Определите ток в катушке индуктивности I А.  1. 400 2. 300 3. 200 4. 100 5. 500
3) Выберите правильное уравнение:  1. $-e_1 + e_2 = u_1 - u_2$ 2. $e_1 + e_2 = -u_1 - u_2$ 3. $e_1 - e_2 = u_1 + u_2$ 4. $e_1 - e_2 = u_1 - u_2$ 5. $e_1 - e_2 = -u_1 - u_2$	8) Дано: $W_C = 0,1$ Дж; $U = 100$ В. Определите емкость конденсатора C мкФ.  1. 60 2. 50 3. 40 4. 30 5. 20
4) Каково графическое изображение источника ЭДС?  1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $W_M = 40$ Дж; $I = 20$ А. Определите индуктивность катушки L Гн.  1. 0,6 2. 0,5 3. 0,4 4. 0,3 5. 0,2
5) По какому соотношению определяется индуктивность цепи? 1. Li 2. $\frac{q}{u}$ 3. $\frac{Cu^2}{2}$ 4. $\frac{\Psi}{i}$ 5. $\frac{Li^2}{2}$	10) Дан график напряжения $u(t)$  Каков график тока $i(t)$?  1. 2. 3.

Тема 1. Тест 1

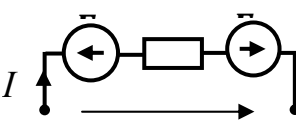
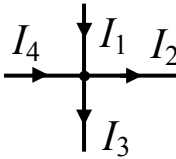
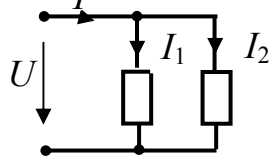
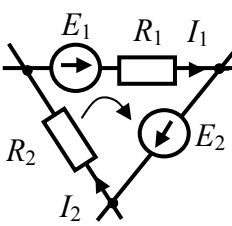
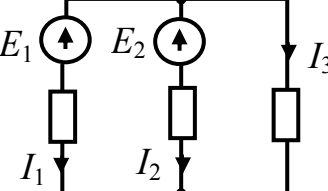
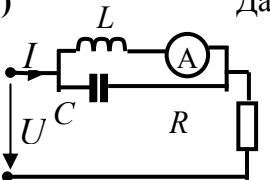
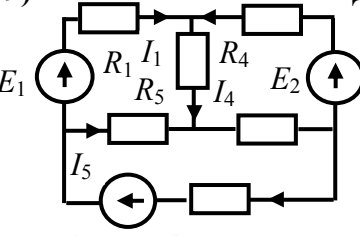
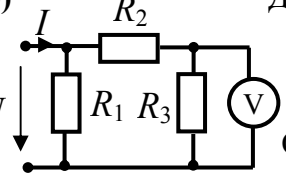
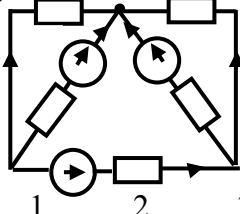
1) Дана структурная схема цепи. Сколько в ней контуров? 1. 2. 3. 4. 5.	6) Дано: $q = 0,3$ Кл; $U = 500$ В. Определите емкость конденсатора C мкФ. 200 300 400 500 600 1. 2. 3. 4. 5.
2) Найдите правильное уравнение: 1. $-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 = 0$ 2. $-i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = 0$ 3. $+i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$ 4. $-i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$ 5. $-i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0$	7) Дано: $I = 100$ А; $\psi = 1$ Вб. Определите индуктивность катушки L Гн 0,04 0,03 0,02 0,01 0,005 1. 2. 3. 4. 5.
3) Выберите правильное уравнение: 1. $e_1 + e_2 = u_1 + u_2$ 2. $e_1 - e_2 = u_1 - u_2$ 3. $e_1 - e_2 = u_1 + u_2$ 4. $e_1 - e_2 = u_1 - u_2$ 5. $e_1 - e_2 = -u_1 - u_2$	8) Дано: $C = 60$ мкФ; $U = 100$ В. Определите энергию электрического поля конденсатора $W_{\text{э}}$ Дж. 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 1. 2. 3. 4. 5.
4) Каково графическое изображение сопротивления R? 1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $W_M = 5$ Дж; $L = 0,1$ Гн. Определите ток в катушке индуктивности I А. 25 20 15 10 5 1. 2. 3. 4. 5.
5) По какому соотношению определяется емкость цепи? Li $\frac{Li^2}{2}$ $\frac{Cu^2}{2}$ $\frac{\Psi}{i}$ $\frac{q}{u}$ 1. 2. 3. 4. 5.	10) Дан график напряжения $u(t)$ Каков график тока $i(t)$? 1. 2. 3.

Тема 2. Репетиционный тест 2

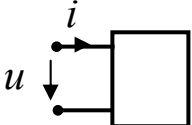
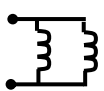
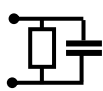
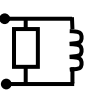
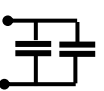
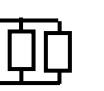
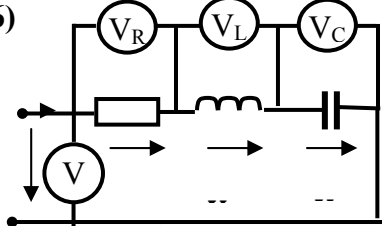
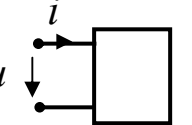
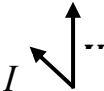
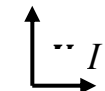
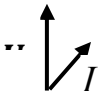
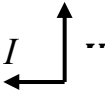
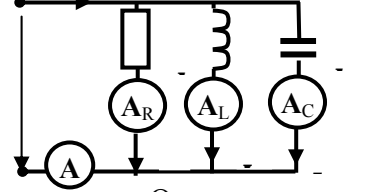
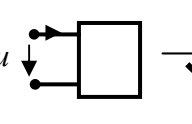
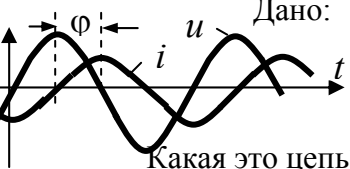
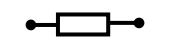
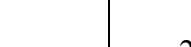
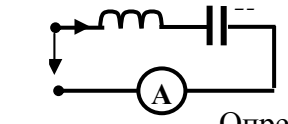
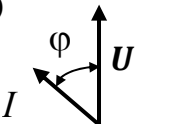
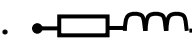
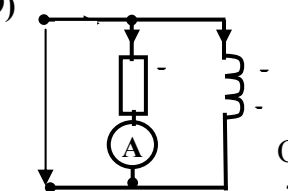
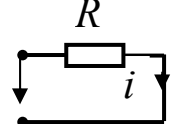
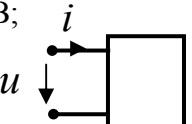
1) Укажите уравнение второго закона Кирхгофа. 1. $U = IR$ 2. $\sum_{m=1}^M E_m = \sum_{n=1}^N I_n R_n$ 3. $\sum_{m=1}^M E_m I_m = \sum_{n=1}^N U_n I_n$ 4. $\sum_{k=1}^K I_k = 0$	6) Дано: $U = 100 \text{ В}$; $R = 20 \text{ Ом}$; $I = 10 \text{ А}$. Определите ЭДС цепи $E \text{ В}$.  20 40 60 80 100 1. 2. 3. 4. 5.
2) Найдите правильное уравнение:  1. $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$ 2. $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$ 3. $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$ 4. $-I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$ 5. $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$	7) Дано: $I = 5 \text{ А}$; $I_2 = 2 \text{ А}$; $U = 100 \text{ В}$. Определите мощность в сопротивлении R_1 в ваттах.  100 200 300 400 500 1. 2. 3. 4. 5.
3) Выберите правильное уравнение:  1. $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_3 R_3$ 2. $E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_3 R_3$ 3. $-E_1 - E_2 = -I_1 R_1 - I_3 R_3$ 4. $-E_1 + E_2 = I_1 R_1 + I_3 R_3$ 5. $E_1 - E_2 = -I_1 R_1 - I_3 R_3$	8) Дано: $I_1 = 3 \text{ А}$; $I_2 = 7 \text{ А}$. Найдите ток $I_3 \text{ А}$.  3 -4 4 10 -10 1. 2. 3. 4. 5.
4) Дано: $U = 100 \text{ В}$; $R = 50 \text{ Ом}$; $L = 10 \text{ мГн}$; $C = 100 \text{ мкФ}$. Определите показания вольтметра, вольт.  0 20 30 40 50 1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $E_3 = 100 \text{ В}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $R_4 = 10 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $I_4 = 5 \text{ А}$; $I_5 = 10 \text{ А}$. Определите ток $I_3 \text{ А}$.  1 2 3 4 5 1. 2. 3. 4. 5.
5) Дано: $I = 10 \text{ А}$; $R_1 = 50 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$. Определите напряжение $U \text{ В}$.  100 200 500 700 800 1. 2. 3. 4. 5.	10) Сколько уравнений надо составить по законам Кирхгофа для определения токов всех ветвей?  2 4 5 6 7 1. 2. 3. 4. 5.

Тема 2.

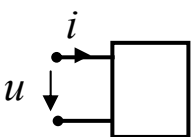
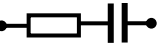
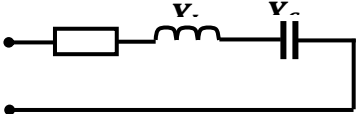
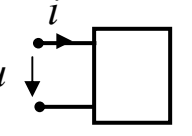
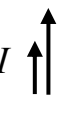
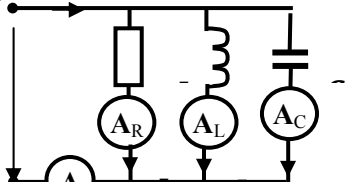
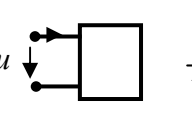
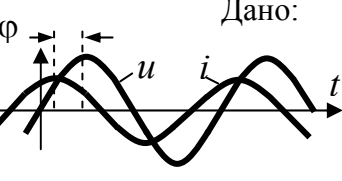
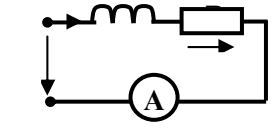
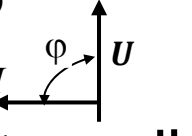
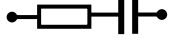
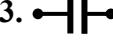
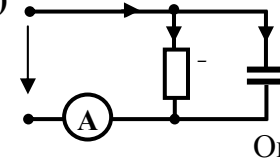
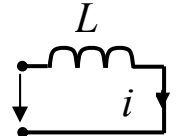
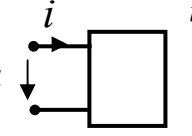
Тест 2

1) Укажите уравнение баланса мощностей. 1. $U = IR$ 2. $\sum_{m=1}^M E_m I_m = \sum_{n=1}^N U_n I_n$ 3. $\sum_{m=1}^M E_m = \sum_{n=1}^N I_n R_n$ 4. $P = UI$	6) Дано: $E_1 = 200 \text{ В};$ $E_2 = 100 \text{ В};$ $R = 10 \text{ Ом};$ $I = 10 \text{ А}.$ Определите напряжение $U \text{ В}.$  100 150 200 250 300 1. 2. 3. 4. 5.
2) Найдите правильное уравнение:  1. $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$ 2. $I_1 - I_2 = I_3 + I_4$ 3. $-I_1 + I_2 = I_3 + I_4$ 4. $I_1 + I_4 = I_2 + I_3$ 5. $I_1 - I_4 = I_2 - I_3$	7) Дано: $U = 100 \text{ В};$ $R_1 = 20 \text{ Ом};$ $R_2 = 20 \text{ Ом}.$ Определите мощность на зажимах цепи в ваттах.  500 1000 1500 2000 2500 1. 2. 3. 4. 5.
3) Выберите правильное уравнение:  1. $E_1 + E_2 = -I_1 R_1 + I_2 R_2$ 2. $-E_1 + E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2$ 3. $E_1 + E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2$ 4. $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$ 5. $E_1 - E_2 = -I_1 R_1 + I_2 R_2$	8) Дано: $I_2 = 2 \text{ А};$ $I_3 = 4 \text{ А}.$ Определите ток $I_1 \text{ А}.$  0 -2 -4 -6 8 1. 2. 3. 4. 5.
4) Дано: $U = 200 \text{ В};$ $R = 20 \text{ Ом};$ $L = 0,1 \text{ Гн};$ $C = 100 \text{ мкФ}.$ Определите показания амперметра, ампер.  10 15 20 25 30 1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $E_1 = 100 \text{ В};$ $I_1 = 10 \text{ А}; I_5 = 4 \text{ А};$ $R_1 = R_4 = R_5 = 10 \text{ Ом}.$ Найдите ток $I_4 \text{ А}.$  3 4 5 6 8 1. 2. 3. 4. 5.
5) Дано: $U = 30 \text{ В};$ $I = 20 \text{ А};$ $R_1 = 3 \text{ Ом};$ $R_3 = 2 \text{ Ом}.$ Определите показания вольтметра, вольт.  5 10 15 20 25 1. 2. 3. 4. 5.	10) Сколько уравнений надо составить по законам Кирхгофа для определения токов всех ветвей?  1 2 3 4 5 1. 2. 3. 4. 5.

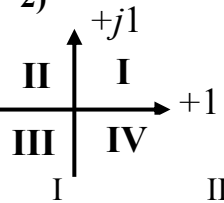
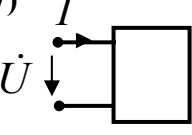
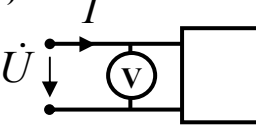
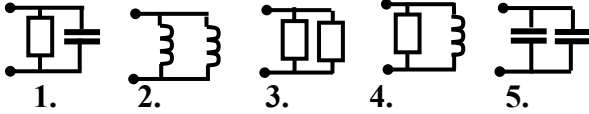
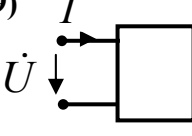
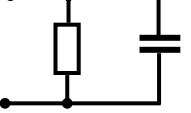
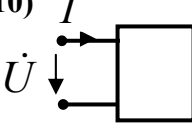
Тема 3. Репетиционный тест 3

1) Дано: $u = 141\sin(628t + 120^\circ)$ В; $i = 14,1\sin(628t + 30^\circ)$ А.  Определите, какая это цепь:      1. 2. 3. 4. 5.	6)  Даны показания вольтметров: $V = 50$ В; $V_C = 40$ В; $V_L = 70$ В. Определите показание V_R, вольт. 100 1. $\sqrt{50}$ 2. 40 3. 50 4. 30 5.
2) Дано: $u = 100\sin(942t - 140^\circ)$ В; $i = 10\sin(942t - 50^\circ)$ А. Какова векторная диаграмма цепи?       1. 2. 3. 4. 5.	7)  Даны показания амперметров: $A = 10$ А; $A_L = 12$ А; $A_C = 4$ А. Определите показание A_R ампер. 4 1. 6 2. 8 3. 10 4. 12 5.
3)   Дано: ϕ Какая это цепь?      1. 2. 3. 4. 5.	8)  Дано: $U = 10$ В; $X_L = 6$ Ом; $X_C = 8$ Ом. Определите показание амперметра, ампер. 2 1. 3 2. 4 3. 5 4. 6 5.
4) Дана векторная диаграмма цепи.  Укажите, какая это цепь?      1. 2. 3. 4. 5.	9)  Дано: $U = 20$ В; $b_L = 0,4$ См; $y = 0,5$ См. Определите показание амперметра, ампер. 8 1. 7 2. 6 3. 5 4. 4 5.
5) Дано: $u = 2\sin(\omega t + 60^\circ)$ В;  Какова начальная фаза напряжения в градусах? 0 1. -30 2. 30 3. 60 4. -60 5.	10) Дано: $u = 100\sqrt{2}\sin(\omega t + 20^\circ)$ В;  $i = 1\sqrt{2}\sin(\omega t - 40^\circ)$ А. Определите реактивное сопротивление в омах. 100 1. 87 2. 50 3. 40 4. 30 5.

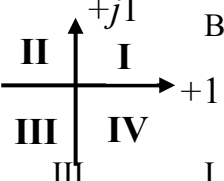
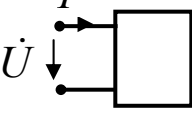
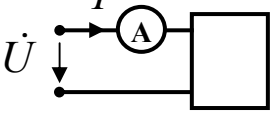
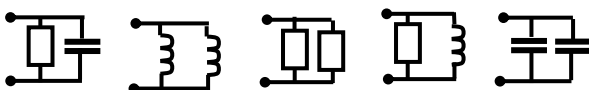
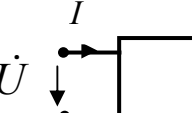
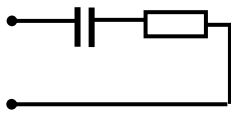
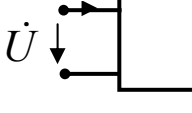
Тема 3. Тест 3

1) Дано: $u = 100\sqrt{2} \sin(314t + 20^\circ)$ В; $i = 10\sqrt{2} \sin(314t + 110^\circ)$ А. Определите, какая это цепь?  1.  3.  5.  2.  4. 	6) Дано: $R = 3 \text{ Ом};$ $X_L = 7 \text{ Ом};$ $X_C = 3 \text{ Ом}.$  Определите полное сопротивление цепи в омах. 13 11 10 7 5 1. 2. 3. 4. 5.
2) Дано: $u = 100\sin(942t + 90^\circ)$ В; $i = 5\sin(942t + 90^\circ)$ А. Какова векторная диаграмма цепи?  1.  2.  3.  4.  5. 	7) Даны показания амперметров: $A - 10 \text{ А};$ $A_R - 6 \text{ А};$ $A_C - 4 \text{ А}.$  Определите показание A_L ампер. 4 6 8 10 12 1. 2. 3. 4. 5.
3) Дано:   Какая это цепь? 1.  2.  3.  4.  5. 	8) Дано: $U = 40 \text{ В};$ $X_L = 8 \text{ Ом};$ $R = 6 \text{ Ом}.$  Определите напряжение U_R, В. 10 18 36 24 50 1. 2. 3. 4. 5.
4) Дана векторная диаграмма цепи. Укажите, какая это цепь?  1.  3.  5.  2.  4. 	9) Дано: $U = 12 \text{ В};$ $R = 3 \text{ Ом};$ $X = 4 \text{ Ом}.$  Определите показание амперметра, ампер. 6 5 4 3 2 1. 2. 3. 4. 5.
5) Дано: $i = 25\sin(942t + 90^\circ)$ А;  Какова начальная фаза напряжения в градусах? -90 -120 120 180 -180 1. 2. 3. 4. 5.	10) Дано: $u = 282\sin(\omega t - 20^\circ)$ В; $i = 14,1\sin(\omega t - 50^\circ)$ А. Определите полное сопротивление в омах.  20 30 40 50 60 1. 2. 3. 4. 5.

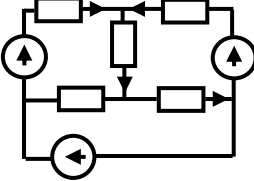
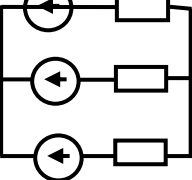
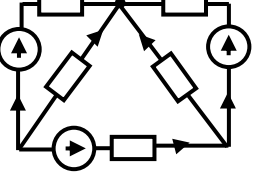
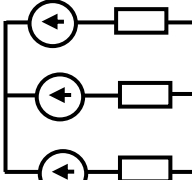
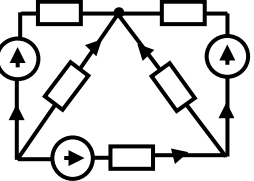
Тема 4. Репетиционный тест 4

1) Дано: $\dot{U} = 100e^{j37^\circ}$ В. Какова алгебраическая форма записи? 1. $100\cos 37^\circ - j100\sin 37^\circ$ 2. $100 + j37$ 3. $100\sin 37^\circ - j100\cos 37^\circ$ 4. $100\cos 37^\circ + j100\sin 37^\circ$ 5. $100\sin 37^\circ + j100\cos 37^\circ$	6) Дано: $\dot{U} = (-30 + j40)$ В. Какова показательная форма записи ? 1. $\sqrt{30^2 + 40^2} e^{-j\arctg(3/4)}$ 2. $\sqrt{30^2 + 40^2} e^{-j\arctg(4/3)}$ 3. $\sqrt{30^2 + 40^2} e^{j[180^\circ + \arctg(4/3)]}$ 4. $\sqrt{30^2 + 40^2} e^{j[180^\circ - \arctg(4/3)]}$
2) Дано: $\dot{U} = (-70 + j50)$ В. В каком квадранте комплексной плоскости находится вектор напряжения?  1. I 2. II 3. III 4. IV	7) Дано: $\dot{U} = 120e^{j55^\circ}$ В; $I = 6e^{j25^\circ}$ А. Определите реактивное сопротивление цепи, См.  1. $20\sin 30^\circ$ 2. $20\sin 80^\circ$ 3. $20\cos 30^\circ$ 4. $20\sin 80^\circ$ 5. 20
3) Дан комплексный ток $\dot{I} = 5e^{-j45^\circ}$ А. Найдите соответствующую ему синусоиду тока. 1. $5\sin(\omega t - 45^\circ)$ 2. $5\sin(\omega t + 45^\circ)$ 3. $5\sqrt{2}\sin(\omega t - 45^\circ)$ 4. $5\sqrt{2}\sin(\omega t + 45^\circ)$ 5. $5\sqrt{2}\sin 45^\circ$	8) Дано: $\dot{I} = (40 + j30)$ А; $\underline{Z} = (3 + j4)$ Ом. Определите показания вольтметра, вольт.  1. 90 2. 100 3. 120 4. 160 5. 250
4) Дана комплексная проводимость цепи $\underline{Y} = 0,01e^{j90^\circ}$ См. Укажите, какая это цепь?  1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $\dot{U} = 10e^{j30^\circ}$ В; $\dot{I} = 1e^{j90^\circ}$ А. Определите активную проводимость цепи, сименс.  1. $0,1\sin 30^\circ$ 2. $0,1\cos 90^\circ$ 3. $0,1\cos 30^\circ$ 4. $0,1\cos 60^\circ$ 5. 0,1
5) Дано: $G = 0,6$ См; $b = 0,8$ См. Укажите комплексную проводимость цепи $\underline{Y}$ См.  1. $0,8 + j0,6$ 2. $0,8 - j0,6$ 3. $0,6 + j0,8$ 4. $0,6 - j0,8$ 5. $-j1,4$	10) Дано: $\dot{U} = 200$ В; $\dot{I} = (10 + j20)$ А. Определите реактивную мощность цепи, вар.  1. 2000 2. 4000 3. 5000 4. 6000 5. 8000

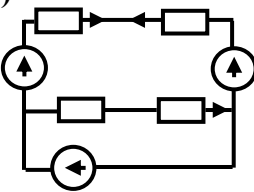
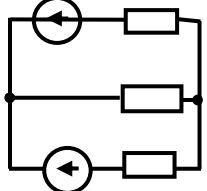
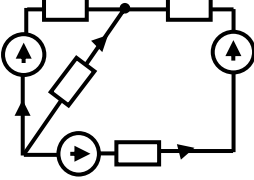
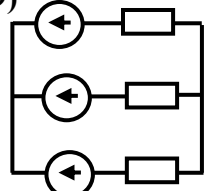
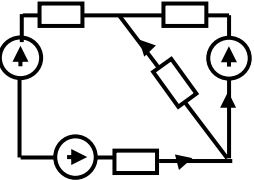
Тема 4. Тест 4

1) Дано: $\dot{I} = 8e^{-j80^\circ}$ А. Какова алгебраическая форма записи ? $8\cos 80^\circ + j8\sin 80^\circ$ $8\cos 80^\circ - j8\sin 80^\circ$ $8\sin 80^\circ + j8\cos 80^\circ$ $8\sin 80^\circ - j8\cos 80^\circ$ $8 - j80$	6) Дано: $\underline{Z} = (4 + j3)$ Ом. Какова показательная форма записи ? $\sqrt{4^2 + 3^2} e^{j\arctg(4/3)}$ $\sqrt{4^2 + 3^2} e^{-j\arctg(3/4)}$ $\sqrt{4^2 + 3^2} e^{j\arctg(3/4)}$ $\sqrt{4^2 + 3^2} e^{-j\arctg(4/3)}$
2) Дано: $\dot{U} = (50 - j60)$ В. В каком квадранте комплексной плоскости находится вектор напряжения?  1. 2. 3. 4.	7) Дано: $\dot{U} = (30 + j40)$ В; $\dot{I} = (4 + j3)$ А. Определите полное сопротивление цепи в омах.  3. 4. 5. 7. 10. 1. 2. 3. 4. 5.
3) Дан комплексный ток $\dot{I} = 14,1e^{j120^\circ}$ А. Найдите соответствующую ему синусоиду тока. $14,1\sin(\omega t + 120^\circ)$ $14,1\sqrt{2}\sin(\omega t + 120^\circ)$ $14,1\sqrt{2}\sin(\omega t - 120^\circ)$ $14,1\sin(\omega t - 120^\circ)$ $14,1\sin 120^\circ$	8) Дано: $\dot{I} = (60 - j80)$ А; $\underline{Z} = 2$ Ом. Определите показания амперметра, ампер  30. 40. 50. 60. 80. 1. 2. 3. 4. 5.
4) Дана комплексная проводимость цепи $\underline{Y} = (0,8 + j0,6)$ См. Укажите, какая это цепь?  1. 2. 3. 4. 5.	9) Дано: $\dot{U} = 100e^{j110^\circ}$ В; $\dot{I} = 5e^{j70^\circ}$ А. Определите полную проводимость цепи, сименс.  1. $0,05\cos 40^\circ$ 3. $0,05\cos 180^\circ$ 2. $0,05\sin 40^\circ$ 4. $0,05$ 5. $0,05\cos 180^\circ$
5) Дано: $R = 6$ Ом; $X = 8$ Ом. Укажите комплексное сопротивление цепи $\underline{Z}$ Ом.  1. $6 + j8$ 3. $8 + j6$ 2. $j14$ 4. $8 - j6$ 5. $6 - j8$	10) Дано: $\dot{U} = (100 + j200)$ В; $\dot{I} = 10$ А. Определите активную мощность цепи, ватт.  1000. 2000. 3000. 4000. 5000. 1. 2. 3. 4. 5.

Тема 5. Репетиционный тест 5

1)  Сколько уравнений надо составить для расчета контурных токов? 6 5 4 3 2 1. 2. 3. 4. 5.	6) Какое положение лежит в основе метода наложения? 1. Уравнение первого закона Кирхгофа. 2. Уравнение второго закона Кирхгофа. 3. Уравнение баланса мощностей. 4. Теорема об активном двухполюснике. 5. Независимость действия источников.
2)  Сколько уравнений надо составить для расчета цепи методом на основе законов Кирхгофа? 1 2 3 4 5 1. 2. 3. 4. 5.	7) Сколько уравнений надо составить для счета цепи методом контурных токов? Их количество равно: 1. Числу ветвей цепи. 2. Числу узлов цепи. 3. Числу контуров цепи. 4. Числу независимых контуров цепи. 5. Числу источников энергии цепи.
3)  Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений? 4 2 5 6 7 1. 2. 3. 4. 5.	8) Укажите неизвестные величины, относительно которых составляется система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа? 1. Токи во всех ветвях цепи. 2. Токи в независимых контурах. 3. Токи во внешних контурах. 4. Напряжения между узлами. 5. Токи во всех контурах цепи.
4) Требуется рассчитать цепь по законам Кирхгофа. Чему равно число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа? 1. На единицу меньше числа узлов. 2. На единицу больше числа узлов. 3. Числу ветвей цепи. 4. Числу контуров цепи. 5. Числу узлов цепи.	9)  Сколько уравнений надо составить для расчета контурных токов? 6 5 4 3 2 1. 2. 3. 4. 5.
5)  Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений? 5 3 2 4 6 1. 2. 3. 4. 5.	10) Каковы ограничения на применение метода наложения? 1. Только к цепям постоянного тока. 2. Только к цепям синусоид. тока. 3. Только к линейным цепям. 4. Только к нелинейным цепям. 5. Только к цепям с одним источником.

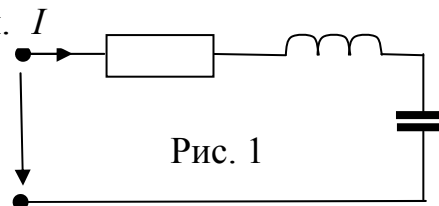
Тема 5. Тест 5

1)  Сколько уравнений надо составить для расчета цепи по законам Кирхгофа? 6 5 4 3 2 1. 2. 3. 4. 5.	6) Какое положение лежит в основе метода наложения? 1. Уравнение первого закона Кирхгофа. 2. Уравнение второго закона Кирхгофа. 3. Уравнение баланса мощностей. 4. Теорема об активном двухполюснике. 5. Независимость действия источников.
2)  Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений? 1 2 3 4 5 1. 2. 3. 4. 5.	7) Сколько уравнений надо составить для расчета цепи методом узловых напряжений? Их количество равно: 1. Числу ветвей цепи. 2. На единицу меньше числа узлов. 3. Числу контуров цепи. 4. Числу независимых контуров цепи. 5. Числу источников энергии цепи.
3)  Сколько уравнений надо составить для расчета контурных токов? 4 3/2 5 6 7 1. 2. 3. 4. 5.	8) Укажите неизвестные величины, относительно которых составляется система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа? 1. Токи во всех ветвях цепи. 2. Токи в независимых контурах. 3. Токи во внешних контурах. 4. Напряжения между узлами. 5. Токи во всех контурах цепи.
4) Требуется рассчитать цепь по законам Кирхгофа. Чему равно число уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа? 1. На единицу меньше числа узлов. 2. На единицу больше числа узлов. 3. Числу ветвей цепи. 4. Числу независимых контуров цепи. 5. Числу узлов цепи.	9)  Сколько уравнений надо составить для расчета контурных токов? 6 5 4 3 2 1. 2. 3. 4. 5.
5)  Сколько уравнений надо составить для расчета узловых напряжений? 5 3 2 4 6 1. 2. 3. 4. 5.	10) Каковы ограничения на применение метода контурных токов? 1. Только к цепям постоянного тока. 2. Только к цепям синусоид. тока. 3. Только к линейным цепям. 4. Только к нелинейным цепям. 5. Только к цепям с одним источником.

Тема 6. Тест 6

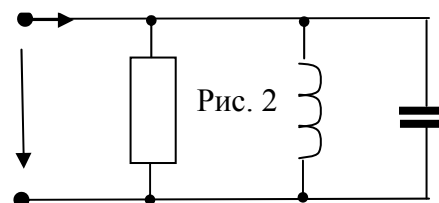
1. Цепь находится в режиме резонанса. Как изменится ток I в цепи, если уменьшить емкостное сопротивление?

- 1 - Уменьшится. 2 - Увеличится. 3 - Не изменится. 4 – Не достаточно данных для ответа



2. Цепь находится в режиме резонанса. Как изменится ток I в цепи, если уменьшить емкостное сопротивление?

- 1 - Уменьшится. 2 - Увеличится. 3 - Не изменится. 4 – Не достаточно данных для ответа.



3. Цепь (рис. 2) находится в режиме резонанса. Укажите, какой элемент этой цепи можно изменять, чтобы в ней сохранился резонанс?

1 – Индуктивность. 2 – Емкость. 3. - Сопротивление.

4. Чему равно входное полное сопротивление Z цепи, представленной на рис.1 первого вопроса?

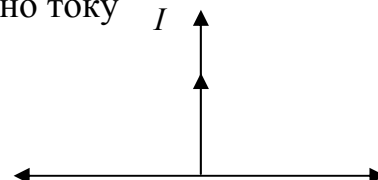
$$\begin{array}{cccc} Z = R, & Z = \omega L, & Z = 1/\omega C, & Z = \omega L - 1/\omega C, \\ \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{3} & \mathbf{4} \end{array}$$

5. Может ли возникнуть в линейной цепи, содержащей активные и реактивные элементы (индуктивности и емкости), резонанс, если изменять величину напряжения на входе цепи?

1 – нет, 2 - да 3 - Не достаточно данных для ответа.

6. Для цепи (рис.1) построена векторная диаграмма для режима резонанса. Укажите направление вектора входного напряжения.

1. По направлению тока. 2. Вправо перпендикулярно току 3. Влево перпендикулярно току



7. Уравнение равновесий напряжений для первой катушки, индуктивно связанной со второй катушкой, имеет вид

$$u_1 = u_{L1} \pm u_{M12} = \frac{d\psi_{L1}}{dt} \pm \frac{d\psi_{M12}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}.$$

В каких случаях в уравнении ставится знак (+)?

1. При согласном включении катушек.
2. При встречном включении катушек.
3. Недостаточно данных для ответа.

8. Какие изменения необходимо выполнить, чтобы в уравнении для второй катушки, индуктивно связанной с первой катушкой, устранить ошибки.

$$u_2 = L_1 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}.$$

1. i_1 заменить на i_2 , 2. i_2 заменить на i_1 , 3. M заменить на L_2 , 4. M заменить на L_1 . 5. L_1 заменить на L_2

2.

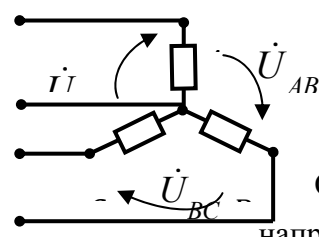
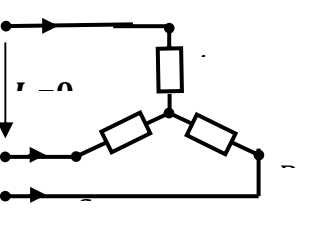
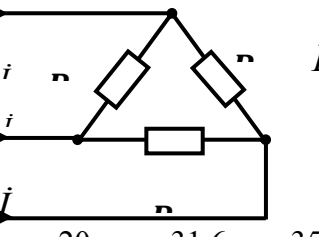
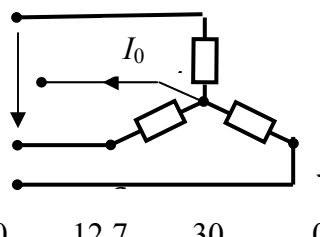
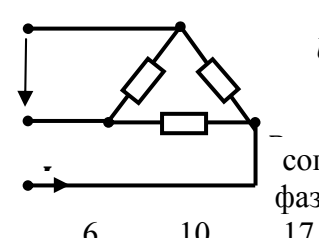
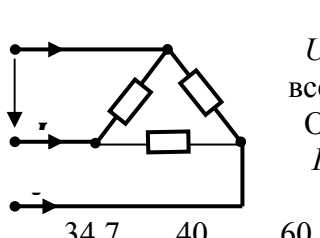
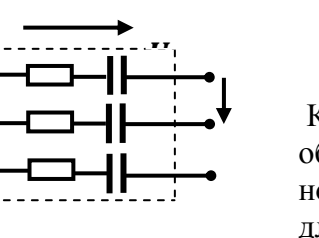
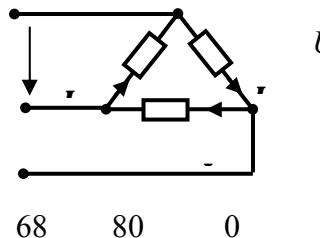
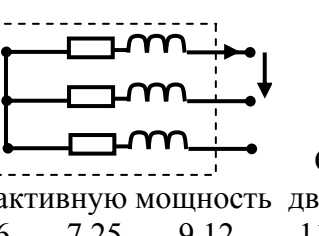
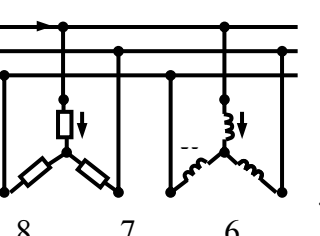
9. Определить величину коэффициента магнитной связи двух индуктивно связанных катушек, если $X_{L1} = X_{L2} = 12$ Ом, $X_M = 6$ Ом.

- | | | | | | |
|---|---|---|-----|---|----|
| | 2 | 4 | 0,5 | 6 | 72 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

10. Цепь с последовательным соединением двух идеальных ($R=0$) индуктивно связанных катушек имеет при согласном их включении $X_{\text{согл}} = 100$ Ом, а при встречном включении $X_{\text{встр.}} = 40$ Ом. Определить величину сопротивления взаимной индуктивности этих катушек (Ом).

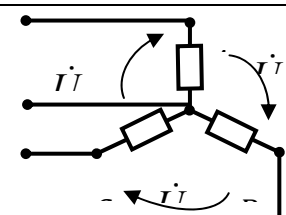
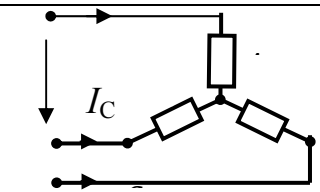
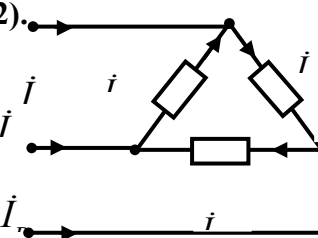
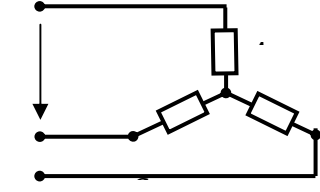
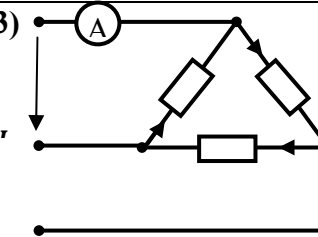
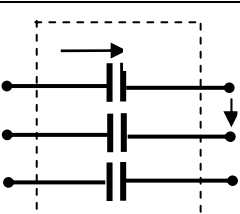
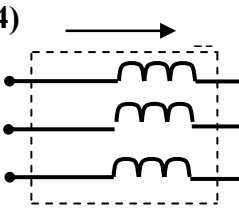
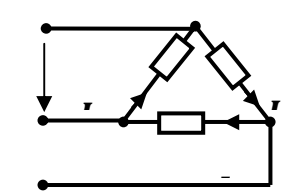
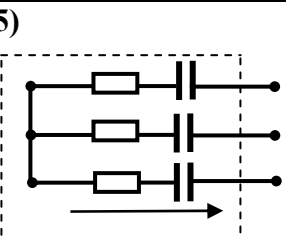
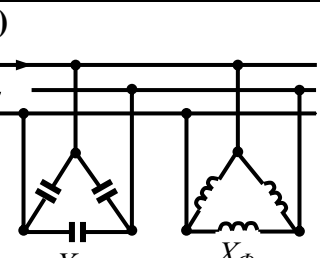
- | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|----|
| | 40 | 30 | 20 | 2,5 | 60 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

Тема 7. Репетиционный тест 7

1)  Дано: $\dot{U}_{BC} = -j200 \text{ В};$ $\dot{U}_{CA} = j300 \text{ В};$ Определите напряжение $\dot{U}_{AB}$, В. 100 j100 j500 -j500 -j100 1. 2. 3. 4. 5.	6)  Дано: $U_L = 200 \text{ В};$ все $R = 20 \text{ Ом}.$ Определите I_B. 5,7 10 20 38 40 1. 2. 3. 4. 5.
2)  Дано: $\dot{I}_A = j30 \text{ А};$ $\dot{I}_C = -j10 \text{ А}.$ Определите $\dot{I}_B$, А 10 20 31,6 35 40 1. 2. 3. 4. 5.	7)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ все $R = 22 \text{ Ом}.$ Определите I_0, А 10 12,7 30 0 20 1. 2. 3. 4. 5.
3)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ $I_L = 38 \text{ А}.$ Найдите сопротивление фазы R_ϕ, Ом. 8 6 10 17,3 22 1. 2. 3. 4. 5.	8)  Дано: $U_L = 660 \text{ В};$ все $R = 33 \text{ Ом}.$ Определите ток I_A, А 20 34,7 40 60 120 1. 2. 3. 4. 5.
4)  Дано: Требуется, чтобы $U_\phi = 380 \text{ В};$ Как соединить обмотки трехфазного приемника для его работы при $U_L = 660 \text{ В}?$ треугол. параллел. звездой последов. 1. 2. 3. 4.	9)  Дано: $U_L = 440 \text{ В};$ все $R = 11 \text{ Ом}.$ Определите ток I_{AB} 68 80 0 23 40 1. 2. 3. 4. 5.
5)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ $I_L = 10 \text{ А};$ $\cos \phi = 0,8.$ Определите активную мощность двигателя, кВт. 5,26 7,25 9,12 11,4 15,2 1. 2. 3. 4. 5.	10)  Дано: $U_\phi = 120 \text{ В};$ $X_\phi = 40 \text{ Ом};$ $R_\phi = 30 \text{ Ом}.$ Определите линейный ток I_L. 8 7 6 5 4 1. 2. 3. 4. 5.

Тема 7.

Тест 3.7

1)  Дано: $\dot{U}_{AB} = -j100 \text{ В};$ $\dot{U}_{BC} = j200 \text{ В}$ Определите напряжение $\dot{U}_{CA}$, В. 1. $j100$ 2. $j300$ 3. $-j300$ 4. $-j100$ 5. 100	6)  Дано: $U_L = 400 \text{ В};$ $R = 20 \text{ Ом}.$ Определите ток I_C, А 8,7 10 11,5 17,3 20 1. 2. 3. 4. 5.
2)  Дано: $\dot{I}_A = -j50 \text{ А};$ $\dot{I}_B = j100 \text{ А}.$ Определите $\dot{I}_C$, А. $j 50$ $-j100$ $j150$ $-j 50$ 150 1. 2. 3. 4. 5.	7)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ $R = 38 \text{ Ом}.$ Определите Фазный ток, А 4,3 5,8 10 17,3 34,6 1. 2. 3. 4. 5.
3)  Дано: $U_L = 380 \text{ В};$ $R = 38 \text{ Ом}.$ Определите показание - амперметра А, ампер. 5,8 8,7 10 17,3 20 1. 2. 3. 4. 5.	8)  Дано: $U_\phi = 380 \text{ В}.$ Как соединить фазы приемника для его работы при $U_L = 660 \text{ В}.$ треугол. последов. параллел. звездой 1. 2. 3. 4.
4)  Дано: $U_\phi = 220 \text{ В};$ $X_A = X_B = X_C.$ Определите линейное напряжение U_L трехфазного приемника. 127 220 380 660 1000 1. 2. 3. 4. 5.	9)  Дано: $U_L = 660 \text{ В};$ $R = 38 \text{ Ом}.$ Определите ток I_{AB}, А 8,7 10 17,3 22 38 1. 2. 3. 4. 5.
5)  Дано: $\underline{Z}_\phi = 30 - j40 \text{ Ом};$ $U_\phi = 200 \text{ В}.$ Определите реактивную мощность S, квар. 0,6 1,2 1,92 2,2 3,8 1. 2. 3. 4. 5.	10)  Дано: $U_L = 440 \text{ В};$ $X_\phi = 38 \text{ Ом}.$ Определите линейный ток I_L, ампер. 0 10 17,3 20 34,6 1. 2. 3. 4. 5.

Тема 8. Тест 8.

1. Чему равна постоянная составляющая?

1. Среднему значению несинусоидального напряжения за период.
2. Действующему значению напряжения.
3. Амплитудному значению первой гармоники напряжения.

2. По мере роста номера гармоники амплитуда...

1. Увеличивается.
2. Уменьшается.
3. Остается без изменений.

3. От чего зависит состав гармоник?

1. От формы напряжения.
2. От периода несинусоидального периодического напряжения
3. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

4. Действующее значение несинусоидального тока равно:

1. Среднеквадратичному значению тока за период.
2. Среднему значению тока за период.
3. Амплитудному значению первой гармоники тока.

5. Мгновенное значение несинусоидального тока представлено в виде ряда

$i = 4 + 3\sqrt{2} \sin(\omega t + \pi/3) + 1,41 \sin(2\omega t + \pi/4)$. Чему равно действующее значение тока?

1. 5,1 А. 2. 3 А. 3. 1,41 А. 4. 8 А.

6. Мгновенное значение несинусоидального тока представлено в виде ряда

$i = 4 + 4 \sin(\omega t + \pi/3) + 1,41 \sin(2\omega t + \pi/4)$. Чему равна постоянная составляющая тока?

1. 5 А. 2. 4 А. 3. 9,41 А. 4. 5,41 А.

7. Чему равна активная мощность в цепи при несинусоидальном токе и напряжении?

1. Сумме постоянной мощности и активных мощностей всех гармоник.
2. Активной мощности первой гармоники.
3. Сумме активных мощностей всех гармоник.
4. Постоянной мощности.

8. Известны несинусоидальные ток i и напряжение u на входе цепи:

$$i = \sqrt{2} \sin(\alpha + 20^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(2\alpha + 13^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(3\alpha - 17^\circ),$$
$$u = 2 + \sqrt{2} \sin(\alpha + 35^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(2\alpha + 63^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(3\alpha + 37^\circ).$$

Чему равна полная мощность?

1. 15 ВА. 2. 9 ВА. 3. 0 ВА. 4. 8 ВА.

9. Известны несинусоидальные ток i и напряжение u на входе цепи:

$$i = \sqrt{2} \sin(\omega t + 20^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(2\omega t + 13^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(3\omega t - 17^\circ),$$

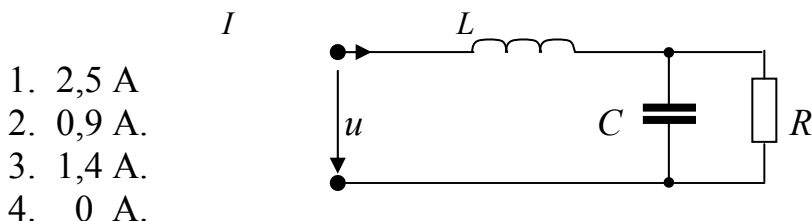
$$u = 2 + \sqrt{2} \sin(\omega t + 35^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(2\omega t + 63^\circ) + 2\sqrt{2} \sin(3\omega t + 37^\circ).$$

Чему равна постоянная мощность?

1. 15 ВА. 2. 9 ВА. 3. 0 ВА. 4. 8 ВА.

10. Для цепи дано $X_L = \omega L = 3 \text{ Ом}$, $R = 4$, $X_C = 1/\omega C = 4 \text{ Ом}$;

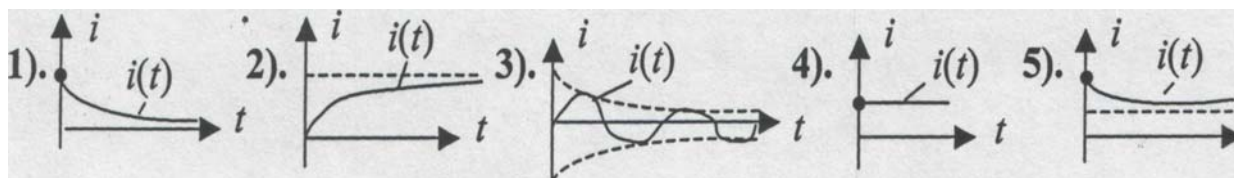
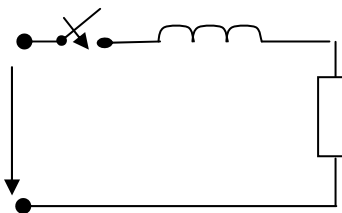
$u = 10 + 5\sqrt{2} \sin \omega t + 2\sqrt{2} \sin 3\omega t$. Определите постоянную составляющую тока на входе цепи.



Тема 9. Тест 9

1. Цепь с последовательным соединением сопротивления R и индуктивности L включается под постоянного напряжения U .

Требуется указать характер изменения тока во времени $i(t)$ переходном процессе, возникшее после включения

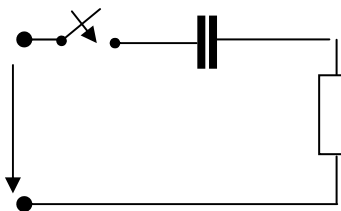


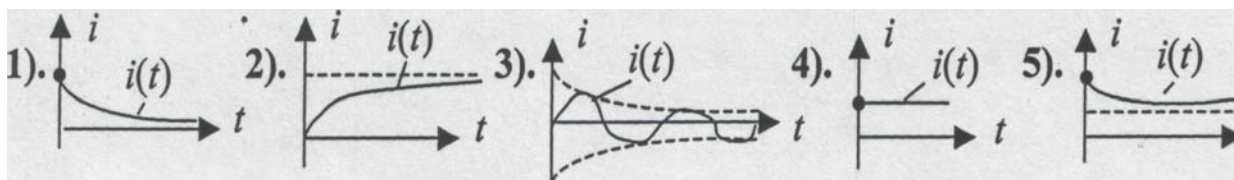
2. Цепь $R L$ (рис 1-го вопроса). Чему равно время переходного процесса, если $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 100 \text{ мГн}$?

1. 4 с. 2. $4 \cdot 10^{-3}$ с. 3. 1 с. 4. $1 \cdot 10^{-4}$ с. 5. 10 с.

3. Цепь с последовательным соединением сопротивления R и емкости C включается под постоянного напряжения U .

Требуется указать характер изменения тока во времени $i(t)$ переходном процессе возникшее после включения





4. Цепь RC (рис 2-го вопроса). Чему равно время переходного процесса, если $R=10\text{ Ом}$, $C=100\text{ мкФ}$?

1. 4 с. 2. $4 \cdot 10^{-3}$ с. 3. 1 с. 4. $1 \cdot 10^{-2}$ с. 5. 10 с.

5. В какой момент времени следует определять начальные условия?

1. До коммутации.
2. После коммутации.
3. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

6. Как используют законы коммутации при расчете переходных процессов?

1. Для определения начальных условий.
2. Для определения принужденной составляющей процесса.
3. Для определения постоянной времени цепи.
4. Для определения постоянной интегрирования при решении дифференциального уравнения.
5. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

7. Принужденный (установившийся) ток в цепи определяют:

1. До коммутации в момент времени непосредственно предшествующий моменту коммутации.
2. После коммутации в момент времени, непосредственно следующий за моментом коммутации.
3. После коммутации при времени стремящемся, к бесконечности.
4. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

8. Начальные условия используют при расчете переходных процессов:

1. Для определения принужденной составляющей процесса.
2. Для определения постоянной времени цепи.
3. Для определения постоянной интегрирования при решении дифференциального уравнения.
4. Для составления дифференциального уравнения.

9. Укажите, какие две величины являются начальными условиями?

1. Ток в индуктивности и ток в сопротивлении в момент времени, непосредственно прилегающий к моменту коммутации.
2. Ток в индуктивности и ток в емкости в момент времени, непосредственно прилегающий к моменту коммутации.
3. Ток в индуктивности и напряжение на емкости в момент времени, непосредственно прилегающий к моменту коммутации.
4. Напряжение на индуктивности и напряжение на емкости в момент времени, непосредственно прилегающий к моменту коммутации.

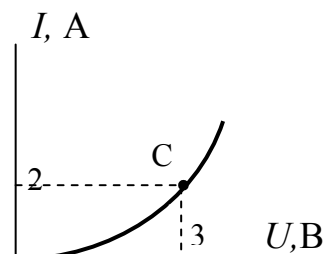
10. Влияют ли начальные условия на характер переходных процессов?

1. Влияют.
2. Не влияют.
3. Влияют только при больших токах в индуктивностях и напряжениях на емкостях.
4. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

Тема 10. Репетиционный тест 10

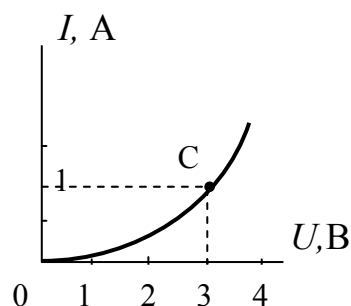
1. Определите величину статического сопротивления в точке С.

3	2	0,66	1,5	6
1	2	3	4	5



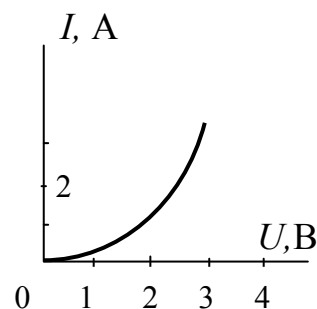
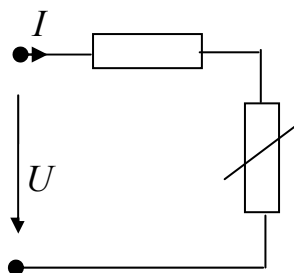
2. Определите величину дифференциального сопротивления в точке С.

2	1	3	0.33	0
1	2	3	4	5



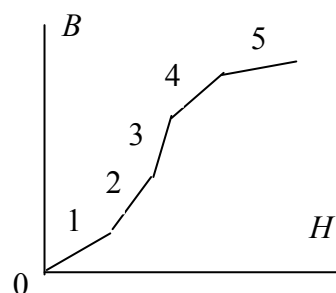
3. Известны постоянное напряжение $U = 4$ В, $R = 2$ Ом, вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления. Определить ток I , А

2	2,5	3	3,5	4
1	2	3	4	5



4. На каком участке кривой намагничивания магнитная проницаемость μ будет наименьшая?

5	2	3	4	1
1	2	3	4	5



5. Если в замкнутом ферромагнитном сердечнике с воздушным зазором уменьшить только длину зазора. Что произойдет с магнитным сопротивлением?

1 – уменьшится, 2 – увеличится, 3 – не изменится, 4 – не достаточно данных для ответа.

6. Дано: напряженность магнитного поля $H = 200 \text{ А/м}$, длина замкнутого магнитопровода $l = 0,4 \text{ м}$, постоянный ток через обмотку $I = 2 \text{ А}$. Определить число витков обмотки.

1 - 100, 2 - 200, 3 – 80, 4 – 40, 5 – 80.

7. По какой формуле определяется магнитное напряжение?

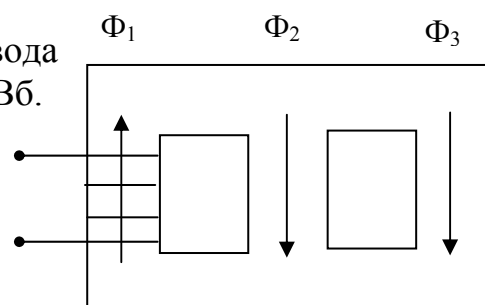
1. $U_M = F/\Phi$, 2. $U_M = H \cdot l$, 3. $U_M = R_M \cdot H$, 4. $U_M = B \cdot S$, 5. $U_M = F \cdot \Phi$

8. Что произойдет с магнитным потоком в сердечнике, если бы магнитная проницаемость этого сердечника уменьшилась?

1 – уменьшится, 2 – увеличится, 3 – не изменится, 4 – не достаточно данных для ответа.

9. Во втором и третьем стержнях магнитопровода потоки соответственно равны $\Phi_2 = 3 \text{ Вб}$, $\Phi_3 = 1 \text{ Вб}$. Определить поток Φ_1 .

2 4 3 1 $\sqrt{10}$
1 2 3 4 5



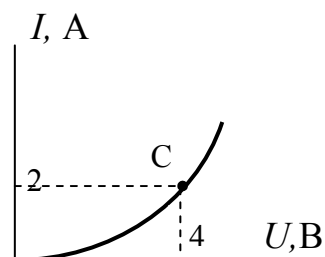
10. По какой формуле рассчитывается магнитное сопротивление R_M магнитопровода?

1 $R_M = \frac{\mu S}{l}$, 2 $R_M = \frac{l}{\mu S}$, 3 $R_M = \frac{Sl}{\mu}$, 4 $R_M = \mu Sl$.

Тема 10 Тест 10

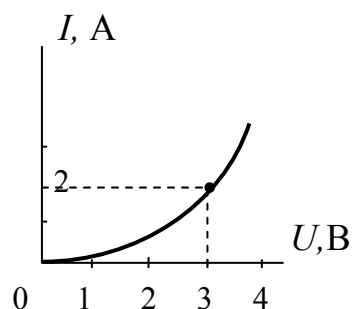
1. Определите величину статического сопротивления в при токе $I = 2 \text{ А}$

3 2 0,66 1,5 6
1 2 3 4 5

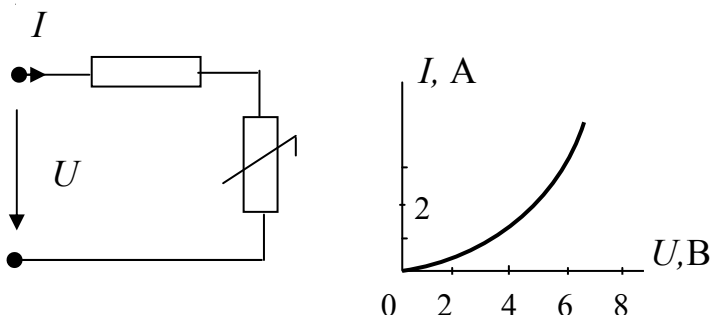


2. Определите величину дифференциального сопротивления при $I = 2 \text{ А}$

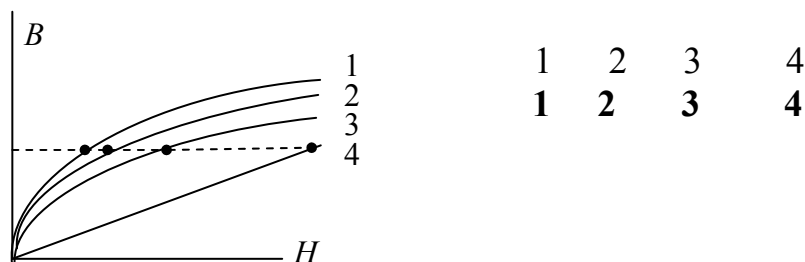
2 1 3 0,5 0
1 2 3 4 5



3. Известны постоянное напряжение $U = 4$ В, $R = 2$ Ом, вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления. Определить ток I , А
- | | | | | |
|---|-----|---|-----|---|
| 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

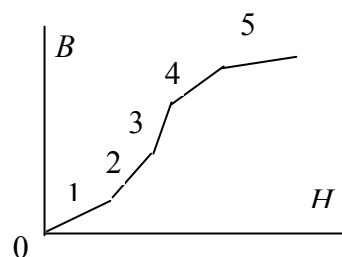


4. Какая из кривых намагничивания в указанных точках имеет наименьшую магнитную проницаемость?



5. На каком участке кривой намагничивания магнитная проницаемость μ будет наибольшая?

5	2	3	4	1
1	2	3	4	5



6. Какая формула верна для определения относительной магнитной проницаемости μ ?

1. $\mu_a = \mu_0^2 \cdot \mu$, 2. $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$, 3. $\mu = \mu_0 \cdot \mu_a$, 4. $\mu_0 = \mu_a \cdot \mu$.

7. Если увеличить магнитное сопротивление зазора. Что произойдет с магнитным потоком рассеяния?

1. Уменьшится. 2. Увеличится. 3. Не изменится 4. Не достаточно данных для ответа.

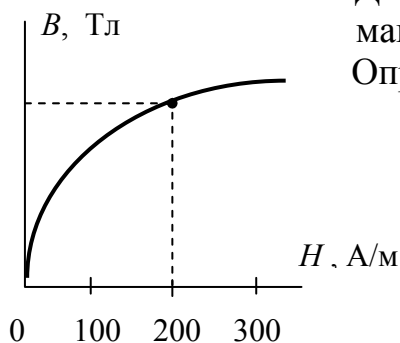
8. Какой закон лежит в основе первого закона для магнитных цепей?

1. $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I$, 2. $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$, 3. $\sum_{K=1}^N I_K = 0$, 4. $u = w \frac{d\Phi}{dt}$,

9. Какой закон лежит в основе второго закона для магнитных цепей?

1. $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I$, 2. $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$, 3. $\sum_{K=1}^N I_K = 0$, 4. $u = w \frac{d\Phi}{dt}$,

10.



Дано: кривая намагничивания, длина l замкнутого магнитопровода 20 см, индукция B сердечника 1 Тл
Определить МДС.

4000	40	1000	10
1	2	3	4

Тема 11. Тест 11

1. Какой магнитный поток называется потоком рассеяния?

1. Поток, у которого часть пути проходит вне сердечника по воздуху.
2. Поток, у которого весь путь проходит вне сердечника по воздуху.
3. Поток, у которого весь путь проходит по сердечнику.

2. Укажите правильную формулу для определения потокосцепления.

1. $\psi_s = w\Phi_s$.
2. $\psi_s = w/\Phi_s$.
3. $\psi_s = \Phi_s/w$.

3. С какой целью используют в дросселе сердечник, изготовленный из ферромагнитных сталей?

1. Из конструктивных соображений.
2. Для увеличения магнитного потока.
3. Для увеличения магнитного сопротивления.
4. Для уменьшения потерь мощности в сердечнике.

4. Уравнение, описывающее электромагнитные процессы в дросселе, имеет вид

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt}.$$

Укажите, какой процесс отражает сопротивление R ?

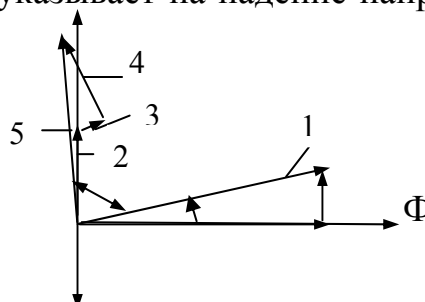
1. Потери мощности в активном сопротивлении обмотки.
2. Потери мощности в ферромагнитном сердечнике.
3. Потери мощности в активном сопротивлении обмотки и ферромагнитном сердечнике.

5. Что является причиной нелинейных свойств дросселя?

1. Ферромагнитный сердечник.
2. Активное сопротивление обмотки.
3. Сопротивление индуктивности рассеяния.

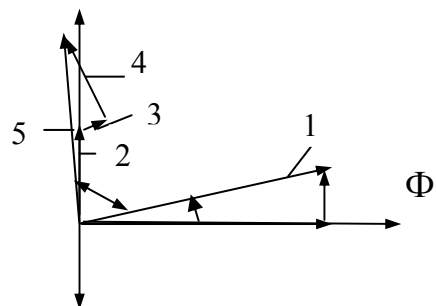
6. Какой вектор на векторной диаграмме указывает на падение напряжения на сопротивлении обмотки?

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5



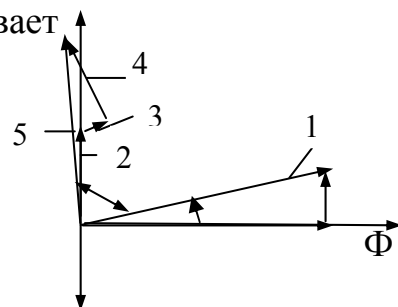
7. Какой вектор на векторной диаграмме указывает на падение напряжения на сопротивлении индуктивности рассеяния обмотки?

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5



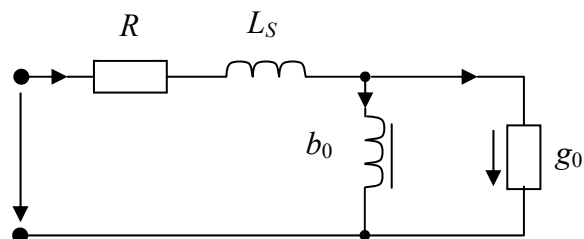
8. Какой вектор на векторной диаграмме указывает на реактивную составляющую тока дросселя?

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5



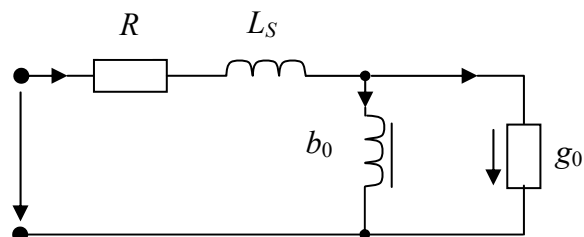
9. Какой элемент на схеме замещения дросселя отражает потери мощности в сердечнике?

R	L_S	b_0	g_0
1	2	3	4



10. Какой элемент на схеме замещения дросселя обусловлен наличием потока рассеяния.

R	L_S	b_0	g_0
1	2	3	4



Тема 12. Тест 12

1. Каковы условия снятия внешней характеристики однофазного трансформатора $U_2 = f(I_2)$?
 1. $U_1 = \text{const}$.
 2. $\cos \varphi_2 = \text{const}$
 3. $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$
2. Какой режим работы трансформатора позволяет точно определить коэффициент трансформации?
 1. Режим холостого хода
 2. Нагрузочный режим.
 3. Для ответа на вопрос недостаточно данных.
3. В каких режимах может работать силовой трансформатор?
 1. В режиме холостого хода
 2. В нагрузочном режиме.
 3. Во всех перечисленных режимах
4. У однофазного трансформатора номинальное напряжение и ток в первичной обмотке $U_1 = 220 \text{ В}$, $I_1 = 20 \text{ А}$; во вторичной обмотке - $U_2 = 440 \text{ В}$, $I_2 = 10 \text{ А}$. Какой это трансформатор?
 1. Понижающий.
 2. Повышающий.
 3. Для ответа на вопрос недостаточно данных.
5. У однофазного трансформатора номинальное напряжение и ток в первичной обмотке $U_1 = 660 \text{ В}$, $I_1 = 10 \text{ А}$; во вторичной обмотке - $U_2 = 220 \text{ В}$, $I_2 = 30 \text{ А}$. Какой это трансформатор?
 1. Понижающий.
 2. Повышающий.
 3. Для ответа на вопрос недостаточно данных.
6. Какие законы лежат в основе принципа действия трансформатора?
 1. Закон Кирхгофа.
 2. Закон Ома.
 3. Закон электромагнитной индукции.
7. Чему равно напряжение на первичной обмотке трансформатора в соответствии с уравнением электрического состояния?
 1. ЭДС, наводимой в витках обмотки основным магнитным потоком.
 - 2.падением напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки.

3. Падением напряжения на контактах.
 4. ЭДС рассеяния первичной обмотки.
 5. Падением напряжения на нагрузке.
- 8. Режим холостого хода позволяет определить:**
1. Сопротивление первичной обмотки.
 2. Сопротивление вторичной обмотки.
 3. Индуктивность рассеяния первичной обмотки.
 4. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки .
 5. Коэффициент трансформации.
- 9. Режим короткого замыкания позволяет определить.**
1. Сопротивления первичной и вторичной обмоток.
 2. Номинальное напряжение первичной обмотки.
 3. Потери мощности в магнитопроводе.
 4. Номинальный ток в первичной обмотке.
- 10. Что влияет на потери мощности в сердечнике?**
1. Ток нагрузки.
 2. Частота входного напряжения.
 3. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Тема 13. Тест 13

- 1. Определить частоту вращения магнитного поля статора n_1 АД, если число пар полюсов $p = 1$, частота тока $f = 50$ Гц.**
1. $n_1 = 3000$ об/ мин.
 2. $n_1 = 2000$ об/ мин.
 3. $n_1 = 1500$ об/ мин.
 4. $n_1 = 1000$ об/ мин.
- 2. С какой целью АД с фазным ротором снабжают контактными кольцами и щетками?**
1. Для соединения ротора с регулировочным реостатом.
 2. Для соединения статора с регулировочным реостатом.
 3. Для подключения двигателя к электрической сети.
- 3. Частота вращения асинхронного двигателя $n_1 = 1000$ об/мин. Частота вращения ротора $n_2 = 950$ об/мин. Определить скольжение.**
1. $s = 0,05$.
 2. $s = 0,05$.
 3. $s = 0,01$.
 4. $s = 0,02$.
- 4. Чему равен КПД асинхронного двигателя в режиме холостого хода?**
1. 0.

2. 95 %.
3. Для ответа на вопрос недостаточно данных.
5. Как изменить направление вращения магнитного поля статора АД?
 1. Достаточно изменить порядок чередования всех трех фаз.
 2. Достаточно изменить порядок чередования всех двух фаз.
 3. Это невозможно.
6. Частота вращения магнитного поля асинхронного двигателя $n_1 = 1500$ об/мин. Частота вращения ротора $n_2 = 1470$ об/мин. Определить скольжение s .
 1. $s = 0,02$.
 2. $s = 0,2$.
 3. $s = 0,1$
 4. Для решения задачи недостаточно данных
7. Как называется основная характеристика АД?
 1. Внешняя характеристика.
 2. Механическая характеристика.
 3. Регулировочная характеристика.
8. Почему магнитопровод статора АД набирают из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга?
 1. Для уменьшения потерь мощности от перемагничивания.
 2. Для уменьшения потерь мощности на вихревых токах.
 1. Из конструктивных соображений.
9. Как изменится ток в обмотке ротора АД при увеличении механической нагрузки на валу?
 1. Увеличится.
 2. Не изменится.
 3. Уменьшится.
10. Определите скольжение трехфазного АД, если известно, что частота вращения ротора n_2 отстает от частоты вращения магнитного поля n_1 на 50 об/ мин ($n_1 = 1000$)
 1. $s = 0,05$
 2. $s = 0,04$.
 3. $s = 0,01$.
 4. $s = 0,02$.

Тема 14. Тест 14

1. Синхронные двигатели относятся к двигателям:
 1. С регулируемой частотой вращения;
 2. С нерегулируемой частотой вращения;
 3. Со ступенчатым регулированием частоты вращения.
2. Включение синхронного генератора в энергосистему производится:
 1. В режиме холостого хода.

2. В рабочем режиме.
3. В режиме короткого замыкания.
- 3. К какому источнику электрической энергии подключается обмотка статора СД?**
 1. К источнику постоянного тока.
 2. К источнику однофазного переменного тока.
 3. К источнику трехфазного переменного тока.
- 4. При работе синхронного генератора электромагнитный момент является?**
 1. Вращающимся.
 2. Тормозящим.
 3. Нулевым.
- 5. В качестве каких устройств используются синхронные машины?**
 1. Генераторы.
 2. Двигатели.
 3. Синхронные компенсаторы.
 4. Все перечисленные
- 6. Каким способом можно изменять в широких пределах коэффициент мощности у синхронного двигателя?**
 1. Воздействуя на ток в обмотке статора.
 2. Воздействуя на ток возбуждения.
 3. Это сделать невозможно.
- 7. С какой скоростью вращается ротор синхронного генератора?**
 1. С той же скоростью, что и магнитное поле статора.
 2. Со скоростью, большей скорости вращения магнитного поля токов статора.
 3. Со скоростью, меньшей скорости вращения магнитного поля токов статора.
- 8. С какой целью на роторе СД размещают дополнительную короткозамкнутую обмотку?**
 1. Для увеличения вращающего момента.
 2. Для пуска двигателя
 3. Для регулирования скорости.
 4. Для увеличения коэффициента мощности.
- 9. Синхронные компенсаторы в режиме перевозбуждения потребляют из сети:**
 1. Индуктивный ток.
 2. Емкостной ток.
 3. Активный ток.

10. С какой целью используют синхронные компенсаторы?

1. Для увеличения коэффициента мощности.
2. Для синхронизации частоты в системах с малой мощностью.
3. Для компенсации емкостного тока в сети.

Тема 15. Тест 15

1. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения это генератор, имеющий:

1. Параллельную обмотку возбуждения.
2. Последовательную обмотку возбуждения.
3. Последовательную и параллельную обмотки возбуждения.
4. Независимую обмотку возбуждения.

2. Генератор постоянного тока с самовозбуждением – это генератор, у которого обмотки возбуждения питаются:

1. От независимого источника питания.
2. От напряжения самого генератора.
3. От аккумуляторной батареи.

3. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением – эта зависимость:

1. $U = f(I_{НАГР})$.
2. $U = f(I_{ВОЗБ})$.
3. $I = f(I_{нагр})$.

4. Пусковой ток двигателя постоянного тока превышает номинальный ток из-за:

1. Отсутствия противоЭДС в момент пуска.
2. Большого сопротивления обмотки возбуждения
3. Малого сопротивления обмотки возбуждения.
4. Для ответа на вопрос не достаточно данных.

5. Номинальный ток двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением равен 20 ампер. Чему равен ток обмотки возбуждения?

1. $I_B = 200 \text{ A}$.
2. $I_B = 40 \text{ A}$.
3. $I_B = 20 \text{ A}$.
4. $I_B = 10 \text{ A}$.

6. Сердечник якоря МПТ набирают из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга:

1. Для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов.
2. Из конструктивных соображений.
3. Для уменьшения магнитного сопротивления потоку возбуждения.

7. Каково назначение реостата в цепи возбуждения генератора постоянного тока?

1. Регулировать напряжение на зажимах генератора.

2. Регулировать скорость вращения якоря.
 3. Регулировать ток нагрузки.
 4. Ограничивать пусковой ток.
8. Каково назначение реостата в цепи возбуждения двигателя постоянного тока?
1. Регулировать напряжение на зажимах.
 2. Регулировать скорость вращения якоря.
 3. Регулировать ток нагрузки.
 4. Ограничивать пусковой ток.
9. Механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения:
1. Мягкая.
 2. Жесткая.
 3. Для ответа на вопрос не достаточно данных.
10. Номинальный ток двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением равен $I_{\text{ном}} = 50 \text{ А}$. Чему равен ток обмотки возбуждения?
1. $I_{\text{в}} = 100 \text{ А}$.
 2. $I_{\text{в}} = 150 \text{ А}$.
 3. $I_{\text{в}} = 200 \text{ А}$.
 4. $I_{\text{в}} = 50 \text{ А}$.

Тема 16. Тест 16

1. Электрические измерения проводятся в соответствии ...
 1. С государственными эталонами,
 2. С международными,
 3. Не учитывают государственные и международные эталоны.
2. Как обычно производится индикация показаний в аналоговых приборах?
 1. Посредством стрелки.
 2. Посредством цифрового дисплея.
 3. Посредством цифрового дисплея и стрелки.
3. Какой основной блок присутствует в цифровых приборах?
 1. Аналого- цифровой преобразователь.
 2. Усилитель.
 3. Индикатор.
4. Что измеряют измерители полных сопротивлений.
 1. Емкость конденсатора.
 2. Сопротивление резистора.
 3. Индуктивность катушки индуктивности.
 4. Полное сопротивление (импеданс) соединения конденсатора или катушки индуктивности с резистором.
 5. Все перечисленное в пунктах 1, 2, 3, 4, 5.
5. На каком принципе устроены магнитоэлектрические приборы?
 1. Используется сила взаимодействия магнитного поля с током в витках обмотки подвижной части.

2. Используется тепловой эффект тока.
 3. Используется соотношение между током и напряжением согласно закону Ома.
6. Сколько «плеч» имеет электрическая схема измерительного моста?
- 1, 2, 3, 4.
1 2 3 4
7. Какое значение указывают приборы при измерении переменных токов и напряжений?
- 1 – амплитудное, 2 – действующее, 3 - среднее 4 - мгновенное.**
8. Какая формула верна для определения электрической энергии W ?
- 1 2 3 4.
- $W = \int_{t_1}^{t_2} u i dt .$ $W = \int u i dt .$ $W = UI \cos \varphi ,$ $W = UI .$
9. В каких единицах измеряется энергия?
- 1 Вт·с, 2 Вт, 3 ВА, 4 вар.**
10. Какие обмотки содержит индукционный счетчик электроэнергии?
- 1 - только токовую 2 - только обмотку напряжения 3 - обмотки напряжения и токовую.**

4.3. Итоговый контроль

Вопросы, подлежащие к изучению, для соответствующей специальности отмечены знаком +. Шифр специальности студента и соответствующий номер, который указан ниже, приведен в предисловии в разделе 1. «Информация о дисциплине» на стр. 5.

	расчету цепей синусоидального тока								
9	Действующие значения синусоидальных токов и напряжений	+	+	+	+	+	+	+	+
10	Элементы в цепи синусоидального тока	+	+	+	+	+	+	+	+
11	Цепь с последовательным соединением R, L, C при синусоидальном напряжении	+	+	+	+	+	+	+	+
12	Цепь с параллельным соединением R, L, C при синусоидальном напряжении	+	+	+	+	+	+	+	+
13	Мощность цепи синусоидального тока	+	+	+	+	+	+	+	+
14	Комплексный метод расчета простых цепей синусоидального тока	+	+	+	+	+	+	+	+
15	Метод контурных токов							+	+
16	Метод узловых напряжений (узловых потенциалов)								+
17	Метод эквивалентного источника								+
18	Метод наложения								+
19	Баланс мощностей цепи синусоидального тока			+	+	+	+	+	+
20	Резонанс в последовательной цепи из элементов R, L, C (резонанс напряжений)			+	+	+	+	+	+
		1	2	3	4	5	6	7	8
21	Резонанс в параллельной цепи из элементов R, L, C (резонанс токов)							+	+
22	Особенности расчета цепей синусоидального тока при наличии взаимных индуктивностей	+	+	+	+	+	+	+	+
23	Цепь с трансформаторной связью между катушками			+	+	+	+	+	+
24	Соединение трехфазной цепи звездой	+	+	+	+	+	+	+	+
25	Соединение трехфазной цепи треугольником	+	+	+	+	+	+	+	+
26	Мощность трехфазной цепи			+	+	+	+	+	+
27	Расчет линейных цепей с несинусоидальными ЭДС							+	+
28	Классический метод расчета переходных процессов							+	+
29	Расчет переходных процессов в цепях с одним накопителем энергии - индуктивностью							+	+
30	Расчет переходных процессов в цепях с одним накопителем энергии – емкостью							+	+
32	Нелинейные электрические элементы и их параметры								
33	Графический метод расчета простых нелинейных цепей постоянного тока			+	+	+	+	+	+

34	Законы и параметры магнитных цепей	+	+	+	+	+	+	+	+
35	Электромагнитные процессы в катушке с ферромагнитным сердечником (уравнение и схема замещения)				+	+	+	+	+
36	Назначение и принцип действия трансформатора	+	+	+	+	+	+	+	+
37	Режимы холостой ход и короткое замыкание трансформатора			+	+	+			
38	Векторная диаграмма и схема замещения трансформатора			+	+	+			
39	Внешняя характеристика трансформатора и его КПД			+	+	+			
40	Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя	+	+	+	+	+	+		+
41	Энергетическая диаграмма АД			+	+	+			
42	Механические характеристики АД			+	+	+			
43	Пуск асинхронных двигателей			+	+	+			
44	Устройство и принцип действия синхронной машины			+	+				
		1	2	3	4	5	6	7	8
45	Внешние характеристики синхронного генератора и включение их на параллельную нагрузку			+	+				
46	Пуск в ход синхронных двигателей			+	+				
47	Синхронные компенсаторы								
48	Устройство и принцип действия машин постоянного тока	+	+	+	+	+	+		+
49	Механическая характеристика двигателя постоянного тока и способы регулирования его частоты вращения			+	+	+			

ПРАВИЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ НА ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Номера специальностей	Номера тестов
-----------------------	---------------

№ теста	Раздел, тема	Номер вопроса / Номера правильных ответов										
1	Раздел 1, тема 1	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	3	3	1	1	4	2	4	5	5	2
2	Раздел 1, тема 2	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	2	1	3	1	4	5	3	5	5	3
3	Раздел 1, тема 3	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	1	5	5	1	4	3	2	4	3	1
4	Раздел 2, тема 4	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	4	1	3	5	4	4	1	5	4	2
5	Раздел 2, тема 5	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	3	3	2	3	3	5	3	1	5	4
7	Раздел 3, тема 7	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	5	2	4	3	1	1	4	1	4	4
10	Раздел 5, тема 10	Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Правильный ответ	4	2	1	1	1	4	2	1	1	2

Номера тестов для ответа

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
240401.65	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-
240301.65	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-
261001.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-
280202.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-
190701.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
140101.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
140104.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
150104.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
190205.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
190601.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
151001.61	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
151001.65	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
150202.65	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
220100-62	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-
200102.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-
200102.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-
150501.65	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-
320101.65	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
200402.65	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
200501.65	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
210201.65	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
080502.65	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-

Знак «+» означает, что данный тест будет представлен студенту и на него надо дать ответ.

Знак «-» означает, что указанный тест не будет дан студенту.

Содержание

1. Информация о дисциплине	3
1.1. Предисловие.....	3
1.2. Содержание дисциплины.....	8
2. Рабочие учебные материалы.....	11
2.1. Рабочая программа.....	11
2.2. Тематический план дисциплины.....	16
2.3. Структурно-логическая схема дисциплины.....	21
2.4. Временной график изучения дисциплины.....	22
2.5. Практический блок.....	25
2.6. Рейтинговая система оценки знаний.....	27
3. Информационные ресурсы дисциплины.....	29
3.1. Библиографический список.....	29
3.2. Опорный конспект.....	30
Введение.....	30
<i>Раздел 1. Основы теории электрических цепей.....</i>	<i>32</i>
<i>Раздел 2. Методы расчета электрических цепей</i>	<i>71</i>
<i>Раздел 3. Резонанс, индуктивно связанные цепи и трехфазные цепи.....</i>	<i>96</i>
<i>Раздел 4. Несинусоидальные токи, напряжения и переходные процессы</i>	<i>119</i>
<i>Раздел 5 . Нелинейные электрические и магнитные цепи</i>	<i>137</i>
<i>Раздел 6. Электрические машины</i>	<i>153</i>
<i>Раздел 7. Электрические измерения и приборы</i>	<i>203</i>
Глоссарий.....	216
3.3. Технические и программные средства обеспечения дисциплины....	222
3.4. Лабораторные работы.....	223
3.5. Практические занятия.....	298
4. Блок контроля освоения дисциплины.....	311
4.1. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению.....	312
4.2. Текущий контроль	338
4.3. Итоговый контроль.....	370

Виноградов Александр Леонидович
Евсеев Михаил Евгеньевич
Прокофьев Владимир Николаевич

Электротехника и электроника
Ч. 1. Электротехника

Редактор И.Н. Садчикова

Сводный темплан 2007 г.
Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.П.005641.11.03
от 21.11.2003 г.

Подписано в печать 27.12.07	Формат 60 x 84 1/16
Б.кн.-журн.	Изд-во СЗТУ
П.л. 23,5	Заказ 1798
Б.л. 12	
Тираж 300	

Северо - Западный государственный заочный технический университет
Изд-во СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации университетов
России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5