

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

Кафедра теплотехники и гидравлики

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методический комплекс по дисциплине

для студентов специальности 240406.65 «Технология химической переработки
древесины» всех форм обучения

Самостоятельное учебное электронное издание

Сыктывкар 2012

УДК 621.3
ББК 31.2
Э45

Рекомендован к изданию в электронном виде кафедрой теплотехники и гидравлики
Сыктывкарского лесного института 11 мая 2012 г.

Утвержден к изданию в электронном виде советом технологического факультета
Сыктывкарского лесного института 21 июня 2012 г.

Составитель:

кандидат г.-м. наук, доцент **Л. Л. Ширяева**

Отв. редактор:

кандидат химических наук, доцент **Т. Л. Леканова**

Э45 **Электротехника и электроника** [Электронный ресурс] : учеб.-метод. комплекс по дисциплине для студ. спец. 240406.65 «Технология химической переработки древесины» всех форм обучения : самост. учеб. электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т ; сост.: Л. Л. Ширяева. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

В издании помещены материалы для освоения дисциплины «Электротехника и электроника». Приведены рабочая программа курса, сборник описаний лабораторных работ, методические указания по различным видам работ.

УДК 621.3
ББК 31.2

Самостоятельное учебное электронное издание

Составитель: **Ширяева** Любовь Леонидовна

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Электронный формат – pdf. Объем 9,1 уч.-изд. л.
Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (СЛИ),
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39, institut@sfi.komi.com, www.sli.komi.com

Редакционно-издательский отдел СЛИ.

© СЛИ, 2012
© Ширяева Л. Л., составление, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Рабочая программа дисциплины для студентов специальности 240406.65 «Технология химической переработки древесины»	4
Методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины	19
Методические рекомендации по самостоятельной подготовке теоретического материала	19
Методические рекомендации к подготовке к лабораторным работам	22
Методические рекомендации по самостоятельному выполнению контрольных работ для студентов заочной формы обучения	28
Методические рекомендации по текущему контролю	32
Сборник описаний лабораторных работ	38

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С. М. Кирова»
(СЛИ)

«Согласовано»

Декан технологического
факультета

_____ А.А. Самородницкий
" __ " _____ 20 __ г.

«Утверждаю»

Зам. директора по учебной и
научной работе

_____ Л. А. Гурьева
" __ " _____ 20 __ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
ПО ДИСЦИПЛИНЕ: ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
(обязательная)

Для подготовки дипломированного специалиста
240400.65 "Химическая технология органических веществ и топлива"
специальность: 240406 – «Технология химической переработки древесины»

Кафедра теплотехники гидравлики

	очная форма	заочная форма
Курс	2	3
Семестр	4	
<i>Всего часов:</i>	98	98
<i>В том числе аудиторных:</i>	48	12
<i>Из них:</i>		
<i>Лекции</i>	32	8
<i>Лабораторные</i>	16	4
<i>Практические</i>	-	-
<i>Самостоятельная работа</i>	50	86
<i>Контрольная</i>	-	3
<i>Экзамен</i>	4	3
<i>Зачет</i>	-	-
<i>Контроль</i>	-	9

Сыктывкар 2012

Рабочая программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования для подготовки дипломированного специалиста 240400.65 "Химическая технология органических веществ и топлива" для специальности 240406 – «Технология химической переработки древесины»

Программу переработал: доцент. _____ Ширяева Л.Л.

Переработанная рабочая программа обсуждена на заседании кафедры «Теплотехники и гидравлики», протокол № 9 от « 11 » мая 2012г.

Заведующий кафедрой, доцент, к.х.н., _____ Т. Л. Леканова

Рабочая программа рассмотрена и одобрена методической комиссией Технологического факультета, протокол № 10 от «21» июня 2012 г.

Председатель комиссии, декан технолог. ф-та. _____ А.А. Самородницкий

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

1.1. Цель преподавания дисциплины

Цель дисциплины – дать будущим инженерам-технологам знания по методам исследования, расчета и практическому применению электромагнитных процессов и преобразователей энергии.

1.2. Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины студент:

Должен знать:

- электротехническую терминологию и символику;
- основные законы электротехники;
- основные величины, характеризующие электрические и магнитные цепи и поля и единицы их измерения;
- принципы устройства основных электронных приборов;
- принципы электрических измерений электрических и неэлектрических величин;
- электрооборудование, электропривод, основы электроснабжения.

Должен уметь:

- читать электрические и электронные схемы;
- рассчитывать электрические цепи;
- выбирать электроизмерительные приборы и измерять основные электрические и неэлектрические величины;

1.3. Перечень дисциплин и тем, усвоение которых студентами необходимо для изучения дисциплины

Перед изучением курса «Электротехника и электроника» студентом должны быть изучены следующие дисциплины:

- высшая математика (обыкновенные дифференциальные уравнения, операционное исчисление, векторные и комплексные функции действительного переменного, ряды, основы теории вероятностей);
- физика (термодинамика, электричество, электромагнетизм, оптика).

1.4. Нормы государственного стандарта 2000 г.

Трудоемкость по стандарту – 98 часов, аудиторных занятий – 48 час, самостоятельная работа – 50 час.

Электрические цепи постоянного тока, линейные однофазные электрические цепи переменного тока, трехфазные электрические цепи синусоидального тока; основы промышленной электроники: электронные приборы, электрические измерения; электрооборудование: трансформаторы, электрические машины, электрический привод, электрические печи; электроснабжение.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Наименование тем, их содержание

Введение

История электротехники. Электрическая энергия, ее особенности и области применения. Электротехника и ее роль в изучении других дисциплин. Содержание и структура дисциплины. Организация учебного процесса на кафедре (1 час).

1. Электрические цепи постоянного тока

Основные понятия и величины, характеризующие электрические цепи: напряженность электрического поля, потенциал, напряжение и ЭДС, ток, сопротивление, элементы электрических цепей и схем. Источники и приемники электрической энергии,

их свойства и характеристики. Схемы замещения электротехнических устройств постоянного тока.

Электрическая энергия и мощность. Баланс мощностей. Законы Ома и Джоуля-Ленца. Законы Кирхгофа. Потенциальные диаграммы. Преобразование схем электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении пассивных элементов. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и звезды в эквивалентный треугольник. Расчет разветвленных цепей с помощью законов Кирхгофа. Система уравнений линейных электрических цепей постоянного тока.

Метод контурных токов. Метод двух узлов (4 часа).

2. Линейные однофазные электрические цепи переменного тока

Основные понятия и величины, характеризующие однофазные цепи синусоидального тока: период, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза, разность фаз. Действующее и среднее значение синусоидального тока. Генераторы синусоидальной ЭДС.

Физические явления в цепях переменного тока. Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция. Индуктивность.

Резистор, индуктивная катушка и конденсатор в цепи синусоидального тока.

Последовательное соединение резистора, индуктивной катушки и конденсатора. Разность фаз напряжения и тока. Мгновенная и средняя мощности. Активная, реактивная и полная мощности.

Изображение синусоидальных токов и напряжений в комплексной форме. Показательная, тригонометрическая и алгебраическая формы записи комплексных величин. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Комплексные сопротивление и проводимость. Комплексная мощность. Баланс мощностей. Измерение активной мощности. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока. (5 часов).

3. Трехфазные электрические цепи синусоидального тока

Понятие о трехфазных системах. Трехфазный генератор. Соединение фаз звездой и треугольником. Симметричный режим работы трехфазной цепи. Несимметричный режим работы трехфазной цепи, соединенных звездой и треугольником. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи. Измерение активной мощности трехфазной цепи (4 часа).

4. Основы промышленной электроники :

Электронные приборы

Электровакuumные и фотоэлектрические приборы. Устройство и принцип действия.

Полупроводниковые приборы: диоды, стабилитроны и тиристоры, их вольтамперные характеристики и параметры. Электрические схемы и принцип работы неуправляемых и управляемых выпрямителей. Сглаживающие фильтры. Стабилизаторы напряжения и тока. Транзисторы. Устройство и принцип действия биполярных и полевых транзисторов. Схемы включения. Входные и выходные характеристики транзисторов. Понятие об интегральных схемах и микропроцессорах.

Электронные усилители. Коэффициент усиления (4 часа).

Электрические измерения

Основные метрологические термины и определения. Виды и методы измерений. Классификация электроизмерительных приборов. Погрешности измерений и измерительных приборов.

Электромеханические показывающие приборы прямого действия. Устройство, принцип действия, области применения.

Электромеханические и электронные регистрирующие приборы. Структурные схемы, принцип действия и свойства современных цифровых измерительных приборов.

Измерение тока, напряжения, сопротивлений, мощности и учет энергии.

(4 часа)

5. Электрооборудование:

Трансформаторы

Трансформаторы. Назначение и область применения. Устройство и принцип Действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации. Уравнение электрического и магнитного состояния трансформатора. Работа трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой. (1 час).

Электрические машины

Электрические машины. Физические явления в электрических машинах. Классификация электрических машин и области их применения.

Машины постоянного тока. Устройство, принцип действия двигателя постоянного тока.

Машины переменного тока. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя. Частоты вращения магнитного поля и ротора, скольжение, вращающий момент асинхронного двигателя. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым и фазным ротором.

Синхронные машины. Устройство и принцип действия генератора и двигателя (5 часов).

Электрический привод.

Минимальные режимы работы двигателей. Нагрузка двигателя. Продолжительная и перегрузочная мощности. Выбор мощности двигателя. Способы возбуждения. Пуск двигателя. Регулирование частоты вращения.(2 часа)

Электрические печи.

Виды электрических печей, технические характеристики, способы подключения.

6. Электроснабжение

Основные понятия. Классы напряжений. Выбор сечений проводов по нагреву и допустимой потери напряжения. Расчет линий электропередачи с одним источником питания. Определение нагрузок. Основные понятия о графиках электропотребления (2 часа).

Всего – 32 часа.

2.2. Лабораторные занятия ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Изучение законов Кирхгофа (2 час).
2. Последовательное соединение RLC в однофазных цепях переменного тока (1 часа).
3. Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов (2 часа).
4. Преобразование треугольника сопротивлений в звезду (2 час).
5. Исследование однофазных трансформаторов (1 час).
6. Исследование трехфазных потребителей, соединенных в звезду (2 час).
7. Исследование трехфазных потребителей, соединенных в треугольник (2 час).
8. Исследование полупроводникового диода (1 час).
9. Исследование тиристора (1 час).
10. Исследование однофазного выпрямителя (1 час).
11. Исследование параметрического стабилизатора (1 час).

Всего – 16 часов.

2.3. Самостоятельная работа и контроль успеваемости

2.3.1. Очная форма обучения

Вид самостоятельных работ	Число часов	Вид контроля успеваемости
1. Проработка лекционного материала по конспекту и учебной литературе	16	экзамен
2. Подготовка к лабораторным работам	8	ОЛР
3. Самостоятельное изучение тем	6	экзамен
4. Подготовка к экзамену	20	экзамен
Всего	50	

Текущая успеваемость студентов контролируется опросом лабораторных работ (ОЛР), контрольным опросом на практике (КО), проверкой выполнения индивидуальных контрольных работ (КР) на практических занятиях. Итоговая успеваемость студентов определяется на экзамене.

2.3.2. Заочная форма обучения

Вид самостоятельных работ	Число часов	Вид контроля успеваемости
1. Проработка учебного материала по учебной литературе и методическим пособиям	4	экзамен
2. Подготовка к лабораторным работам	2	
3. Выполнение индивидуальных контрольных работ	26	ОЛР
4. Подготовка к экзамену	27	экзамен
5. Изучение тем, не рассмотренных на лекциях	27	экзамен
Всего	86	

2.4. Распределение часов по темам и видам занятий

2.4.1. Очная форма обучения

№ раз-дела	Раздел программы	Объем работы студента, час.					Форма контроля успеваемости
		Всего	Лекции	Лаб. Раб	Практич.	Самост. Работа	
	Введение	2	1	—	—	1	
1.	Электрические цепи постоянного тока	11	4	2	—	5	ОЛР, КР, РГР
2.	Линейные однофазные электрические цепи переменного тока	11	5	3	—	3	ОЛР, КР, РГР
3.	Трехфазные электрические цепи синусоидального тока	12	4	4	—	4	ОЛР, экзамен
4.	Основы промышленной электроники: Электронные приборы Электрические измерения	16	6	4	—	6	КР, КО

5.	Электрооборудование: Трансформаторы Электроснабжение электрические машины Электрический привод Электрические печи	20	10	3	–	7	ОЛР
6.	Электроснабжение	6	2	–	–	4	ОЛР, экзамен
7.	Подготовка к экзамену	20				20	Экзамен
Итого		98	32	16	–	50	

2.4.2. Заочная форма обучения

№ раз-дела	Раздел программы	Объем работы студента, час.					Форма контроля успеваемости
		Всего	Лекций	Лаб. Раб	Практич.	Самост. работ	
	Введение	1,5	0,5	–	–	1	
1.	Электрические цепи постоянного тока	12	2	2	–	6	ОЛР, КР
2.	Линейные однофазные электрические цепи переменного тока	12	2	2	–	6	ОЛР, КР
3.	Трехфазные электрические цепи синусоидального тока	10	2	–	–	6	экзамен
4.	Основы промышленной электроники: Электронные приборы Электрические измерения	8	–	–	–	6	Экзамен
5.	Электрооборудование: Трансформаторы Электрические машины Электрический привод Электрические печи	10,5	1,5	–	–	7	ОЛР
6.	Выполнение контрольных работ	27				27	КР
7.	Подготовка к экзамену	27				27	Экзамен
Итого		98	8	4	–	86	

3. Вопросы к экзамену для всех форм обучения

1. Основные понятия и величины, характеризующие электрические цепи: напряженность электрического поля, потенциал, напряжение и ЭДС, ток, сопротивление, элементы электрических цепей и схем.
2. Источники и приемники электрической энергии, их свойства и характеристики.
3. Схемы замещения электротехнических устройств постоянного тока.
4. Электрическая энергия и мощность.
5. Баланс мощностей.
6. Законы Ома и Джоуля-Ленца.
7. Законы Кирхгофа.
8. Потенциальные диаграммы.

9. Преобразование схем электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении пассивных элементов.
10. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и звезды в эквивалентный треугольник.
11. Расчет разветвленных цепей с помощью законов Кирхгофа.
12. Система уравнений линейных электрических цепей постоянного тока.
13. Метод контурных токов.
14. Метод двух узлов.
15. Основные понятия и величины, характеризующие однофазные цепи синусоидального тока: период, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза, разность фаз.
16. Действующее и среднее значение синусоидального тока.
17. Генераторы синусоидальной ЭДС.
18. Физические явления в цепях переменного тока. Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция. Индуктивность.
19. Резистор, индуктивная катушка и конденсатор в цепи синусоидального тока.
20. Последовательное соединение резистора, индуктивной катушки и конденсатора.
21. Разность фаз напряжения и тока.
22. Мгновенная и средняя мощности.
23. Активная, реактивная и полная мощности.
24. Изображение синусоидальных токов и напряжений в комплексной форме.
25. Показательная, тригонометрическая и алгебраическая формы записи комплексных величин.
26. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме.
27. Комплексные сопротивление и проводимость.
28. Комплексная мощность.
29. Баланс мощностей.
30. Измерение активной мощности.
31. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока.
32. Понятие о трехфазных системах.
33. Трехфазный генератор.
34. Соединение фаз звездой и треугольником.
35. Симметричный режим работы трехфазной цепи.
36. Несимметричный режим работы трехфазной цепи, соединенных звездой и треугольником.
37. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи.
38. Измерение активной мощности трехфазной цепи.
39. Электровакуумные и фотоэлектрические приборы. Устройство и принцип действия.
40. Полупроводниковые приборы: диоды, стабилитроны и тиристоры, их вольтамперные характеристики и параметры.
41. Электрические схемы и принцип работы неуправляемых и управляемых выпрямителей.
42. Сглаживающие фильтры.
43. Стабилизаторы напряжения и тока.
44. Транзисторы.
45. Устройство и принцип действия биполярных и полевых транзисторов. Схемы включения.
46. Входные и выходные характеристики транзисторов.
47. Понятие об интегральных схемах и микропроцессорах.
48. Электронные усилители. Коэффициент усиления.
49. Основные метрологические термины и определения. Виды и методы измерений.

50. Классификация электроизмерительных приборов.
51. Погрешности измерений и измерительных приборов.
52. Электромеханические показывающие приборы прямого действия. Устройство, принцип действия, области применения.
53. Электромеханические и электронные регистрирующие приборы. Структурные схемы, принцип действия и свойства современных цифровых измерительных приборов.
54. Измерение тока, напряжения, сопротивлений, мощности и учет энергии.
55. Трансформаторы. Назначение и область применения. Устройство и принцип Действия однофазного трансформатора.
56. Коэффициент трансформации.
57. Уравнение электрического и магнитного состояния трансформатора.
58. Работа трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой.
59. Электрические машины. Физические явления в электрических машинах.
60. Классификация электрических машин и области их применения.
61. Машины постоянного тока. Устройство, принцип действия двигателя постоянного тока.
62. Машины переменного тока. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.
63. Частоты вращения магнитного поля и ротора, скольжение, вращающий момент асинхронного двигателя.
64. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым и фазным ротором.
65. Синхронные машины. Устройство и принцип действия генератора и двигателя.
66. Минимальные режимы работы двигателей. Нагрузка двигателя. Продолжительная и перегрузочная мощности. Выбор мощности двигателя.
67. Способы возбуждения. Пуск двигателя. Регулирование частоты вращения.
68. Виды электрических печей, технические характеристики, способы подключения.
69. Основные понятия. Классы напряжений.
70. Выбор сечений проводов по нагреву и допустимой потере напряжения.
71. Расчет линий электропередачи с одним источником питания.
72. Определение нагрузок. Основные понятия о графиках электропотребления.
- 73.

4. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная учебная литература

1. Немцов, В. М. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : учебник / В. М. Немцов ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Абрис, 2012. – 560 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/117664/>.

Дополнительная учебная, учебно-методическая литература

1. Баби́чев, Ю. Е. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров "Информатика и вычислительная техника" и направлениям подготовки дипломированных специалистов "Информатика и вычислительная техника" и "Информационные системы" : в 2-х томах. Т. 1. Электрические, электронные и магнитные цепи / Ю. Е. Баби́чев ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Мир горной книги, 2007. – 599 с. – (Горная электромеханика). – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/79262/>.
2. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники : теория электрических цепей и электромагнитного поля [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению 654500 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2007. – 304 с.

3. Белов, Н. В. Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Белов, Ю. С. Волков ; Издательство "Лань" (ЭБС). – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 432 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/3553/>.
4. Гаврилов, Л. П. Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением ПК [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов машиностроительных вузов / Л. П. Гаврилов, Д. А. Соснин ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : СОЛОН – ПРЕСС, 2008. – 439 с. – (Библиотека студента). – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/118168/>.
5. Ермуратский, П. В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям 240100 – Химическая технология и биотехнология, 240700 – Биотехнологии, 221700 – Стандартизация и метрология, 280700 – Техносферная безопасность, 150100 – Материаловедение и технологии материалов бакалаврской подготовки / П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : ДМК Пресс, 2011. – 417 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/129904/>.
6. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника [Текст] : учеб. пособие для студ. соц. вузов, техн. отделений гуманитар. вузов и вузов неэлектротехн. профиля / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2008. – 400 с. – (Высшее профессиональное образование).
7. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника [Текст] : учеб. пособие для студ. социальных и технических отделений гуманитарных вузов и вузов неэлектротехнического профиля / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – Москва : Академия, 2005. – 400 с. – (Высшее профессиональное образование).
8. Иванов, И. И. Электротехника [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по группе направлений подготовки и спец. "Техника и технологии" / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 496 с.
9. Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс] : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки и специальностям в области техники и технологии / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов ; Издательство "Лань" (ЭБС). – Изд. 7-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 736 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/3190/>.
10. Касаткин, А. С. Электротехника [Текст] : учеб. для студ. неэлектрических спец. вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 12-е изд., стер. – Москва : Академия, 2008. – 544 с. – (Высшее профессиональное образование).
11. Касаткин, А. С. Электротехника [Текст] : учеб. для студ. неэлектротехн. спец. вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 9-е изд., стер. – Москва : Академия, 2005. – 544 с.
12. Кузовкин, В. А. Теоретическая электротехника [Электронный ресурс] : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", "Автоматизация и управление" и специальностям "Технология машиностроения", "Металлорежущие станки и инструменты", "Автоматизация технологических процессов и производств" / В. А. Кузовкин ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Логос, 2006. – 495 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/89927/>.
13. Марченко, А. Л. Основы электроники [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. вузов / А. Л. Марченко ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : ДМК Пресс, 2009. – 294 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/47452/>.
14. Наумкина, Л. Г. Электротехника и электроника (раздел Электроника) [Электронный ресурс] : учебное пособие по дисциплине "Электротехника и электроника" для студентов вузов, обучающихся по специальности 120000 "Технология машиностроения". Ч. 1. Полупроводниковые приборы и физические основы их работы / Л.

Г. Наумкина ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Московский государственный горный университет, 2005. – 90 с. – (Высшее горное образование). – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/83867/>.

15. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника [Текст] : учеб. для студ. вузов, обучающихся по направлению подготовки 230100 (654600) "Информатика и вычислительная техника" / О. П. Новожилов. – Москва : Гардарики, 2008. – 653 с.

16. Промышленная электроника [Текст] : метод. указ. к расчетно-графической работе для спец. 3113, 2102, 1502, 1704, 2301 / М-во общ. и проф. образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. лесотехн. акад., Каф. электроэнергетики ; сост. К. Ф. Майер. – Сыктывкар : СЛИ, 2005. – 31 с.

17. Промышленная электроника и схемотехника [Текст] : метод. указ. к расчетно-графической работе для спец. 719000, 311400 / М-во общ. и проф. образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. лесотехн. акад., Каф. электроэнергетики ; сост. К. Ф. Майер. – Сыктывкар : СЛИ, 2005. – 47 с.

18. Рекус, Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по неэлектротехническим спец. направлений подготовки дипломированных специалистов в области техники и технологии / Г. Г. Рекус. – Москва : Высш. шк., 2008. – 654 с.

19. Рекус, Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г. Г. Рекус ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Абрис, 2012. – 655 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/117503/>.

20. Серебряков, А. С. Линейные электрические цепи. Лабораторный практикум на IBM PC [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. С. Серебряков ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Абрис, 2012. – 134 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/117531/>.

21. Серебряков, А. С. Электротехника и электроника. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Multisim [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. С. Серебряков ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Абрис, 2012. – 337 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/117504/>.

22. Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб. пособие для студ. спец. 311400 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства" всех форм обучения. Ч. 1 / М-во образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. лесотехн. акад., Сыкт. лесн. ин-т (фил.), Каф. электроэнергетики ; сост. М. И. Успенский. – Сыктывкар : СЛИ, 2003. – 76 с.

23. Цапенко, Е. Ф. Теоретические основы электротехники для горных вузов [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов вузов. Ч. 1. Линейные электрические цепи / Е. Ф. Цапенко ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 333 с. – (Высшее горное образование). – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/100036/>.

24. Электротехника [Текст] : лаб. практикум для студ. спец. 210200, 311300, 311400, 150200, 230100, 170400, 290100, 290300, 291000, 260300, 071900, 320700 всех форм обучения / М-во образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. лесотехн. акад., Сыкт. лесн. ин-т (фил.), Каф. электроэнергетики ; сост. Ю. Я. Чукреев. – Сыктывкар : СЛИ, 2004. – 132 с.

25. Электротехника и электроника [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. В. Кононенко [и др.] ; под ред. В. В. Кононенко. – Изд. 6-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 784 с. – (Высшее образование).

Дополнительная литература

1. Абрамов, В. М. Электронные элементы устройств автоматического управления. Схемы. Расчет. Справочные данные [Текст] : справочное издание / В. М. Абрамов. – Москва : Академкнига, 2006. – 680 с.

2. Бодин, А. П. Справочник сельского электромонтера [Текст] / А. П. Бодин, Ф. И. Московкин, В. Н. Харечко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Россельхозиздат, 1986. – 335 с.
3. Боровских, Ю. И. Электрооборудование автомобилей [Текст] : справочник / Ю. И. Боровских. – Москва : Транспорт, 1971. – 191 с.
4. Бухаров, А. И. Средства заряда аккумуляторов и аккумуляторных батарей [Текст] : справочник / А. И. Бухаров, И. А. Емельянов. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
5. Бэкман, В. Катодная защита от коррозии [Текст] : справочник / В. Бэкман, В. Швенц ; под ред. И. В. Стрижевского. – Москва : Металлургия, 1984. – 495 с.
6. Воскобойников, Б. С. Словарь по гибким производственным системам и робототехнике (английский, немецкий, французский, нидерландский, русский) [Текст] : около 5 600 терминов / Б. С. Воскобойников, Б. И. Зайчик, С. М. Палей. – Москва : Рус. яз., 1991. – 392 с.
7. Гайдукевич, В. И. Справочник электромонтера строительной площадки [Текст] / В. И. Гайдукевич, Я. В. Гайдукевич. – Москва : АСВ, 2003. – 232 с.
8. Ганелин, А. М. Справочник сельского электрика (в вопросах и ответах) [Текст] / А. М. Ганелин, С. И. Коструба. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Колос, 1980. – 256 с.
9. Грабовски, Б. Краткий справочник по электронике [Текст] / Б. Грабовски. – Москва : ДМК Пресс, 2001. – 416 с. – (Справочник).
10. Кисаримов, Р. А. Справочник электрика [Текст] / Р. А. Кисаримов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 320 с.
11. Нефедова, Н. В. Карманный справочник по электронике и электротехнике [Текст] / Н. В. Нефедова, П. М. Каменев, О. М. Большунова. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 288 с. – (Высшее образование).
12. Нефедова, Н. В. Карманный справочник по электронике и электротехнике [Текст] / Н. В. Нефедова, П. М. Каменев, О. М. Большунова. – Изд. 3-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 283 с. – (Справочник).
13. Механизация и электрификация сельского хозяйства [Текст] : теоретический и научно-практический журнал. – Выходит раз в два месяца.
2008 № 1-12;
2009 № 1-6;
2010 № 1,2,4-12;
2011 № 1-12;
2012 № 1-6;
14. Ополева, Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения [Текст] : справочник : учеб. пособие для студ., обучающихся по направлению подготовки 650900 (140200) "Электроэнергетика" и спец. 100100 (140204) "Электрические станции", 100200 (140205) "Электротехнические системы и сети" и 100400 (140211) "Электроснабжение" / Г. Н. Ополева. – Москва : ФОРУМ. – [Б. м.] : ИНФРА-М, 2008. – 480 с. – (Высшее образование).
15. Петухов, В. М. Зарубежные транзисторы и их аналоги [Текст] : каталожное издание : в 5-ти томах. Т. 1 / В. М. Петухов. – Москва : РадиоСофт, 1998. – 830 с. – (Справочник).
16. Петухов, В. М. Зарубежные транзисторы и их аналоги [Текст] : каталожное издание : в 5-ти томах. Т. 2 / В. М. Петухов. – Москва : РадиоСофт, 1998. – 896 с. – (Справочник).
17. Петухов, В. М. Зарубежные транзисторы и их аналоги [Текст] : каталожное издание : в 5-ти томах. Т. 3 / В. М. Петухов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 832 с. – (Справочник).
18. Петухов, В. М. Зарубежные транзисторы и их аналоги [Текст] : каталог : в 5-ти томах. Т. 4 / В. М. Петухов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 928 с. – (Справочник).

19. Петухов, В. М. Зарубежные транзисторы и их аналоги [Текст] : каталог : 5-ти томах. Т. 5 / В. М. Петухов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 768 с. – (Справочник).
20. Петухов, В. М. Транзисторы и их зарубежные аналоги [Текст] : каталожное издание : в 4-х томах / В. М. Петухов. – 2-е изд., испр. – Москва : РадиоСофт, 1999.
- Т. 1 : Маломощные транзисторы. – 688 с. – (Справочник).
21. Петухов, В. М. Транзисторы и их зарубежные аналоги [Текст] : каталожное издание : в 4-х томах / В. М. Петухов. – 2-е изд., испр. – Москва : РадиоСофт, 1999.
- Т. 2 : Биополярные транзисторы средней и большой мощности низкочастотные. – 544 с. – (Справочник).
22. Пижурин, П. А. Справочник электрика лесозаготовительного предприятия [Текст] / П. А. Пижурин, М. В. Алексин, М. И. Яловецкий, 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Лесн. пром-сть, 1988. – 264 с.
23. Пижурин, П. А. Справочник электрика лесозаготовительных предприятий [Текст] / П. А. Пижурин, М. В. Алексин, М. И. Яловецкий. – Москва : Лесн. пром-сть, 1980. – 288 с.
24. Проблемы энергетики [Текст] : научно-технический и производственный журнал. Известия вузов/ Мин-во образования и науки Рос. Федерации, КГЭУ. – Выходит ежемесячно.
- 2008 № 7/8,9/10,11/12;
25. Семенов, В. А. Справочник молодого электромонтера по ремонту электрооборудования промышленных предприятий [Текст] / В. А. Семенов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1986. – 240 с.
26. Словарь по электронике. Английский. Немецкий. Французский. Испанский. Русский [Текст] : около 9000 терминов / под ред. И. А. Болошина, Р. Г. Мириманова. – Москва : Рус. яз., 1988. – 558 с.
27. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию [Текст] : в 2-х томах / под ред. А. А. Фёдорова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986 – 1987.
- Т. 1 : Электроснабжение. – 1986. – 568 с.
28. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию [Текст] : в 2-х томах / под ред. А. А. Фёдорова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986 – 1987.
- Т. 2 : Электрооборудование. – 1987. – 592 с.
29. Справочник по электротехническим материалам [Текст] : в 3-х томах / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Изд. 3-е, перераб. – Москва : Энергоатомиздат, 1986 – 1988.
- Т. 1. – 1986. – 368 с.
30. Справочник по электротехническим материалам [Текст] : в 3-х томах / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Москва : Энергоатомиздат, 1986 – 1988.
- Т. 2. – 1987. – 464 с.
31. Справочник по электротехническим материалам [Текст] : в 3-х томах / под ред. : Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Изд. 3-е, перераб. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986 – 1988.
- Т. 3. – 1988. – 728 с.
32. Справочник электрика деревообрабатывающего предприятия [Текст] / А. А. Пижурин и [и др.] ; под ред. А. А. Пижурина ; М-во общ. и проф. образования Рос. Федерации, Моск. гос. ун-т леса . – Москва : МГУЛ, 1999. – 340 с.
33. Теория RCL-двухполюсников и ее применение для построения моделей в импеданс-спектроскопии [Текст] : [монография] / Н. А. Секушин ; Федеральное агентство по образованию, Сыкт. лесн. ин-т – фил. ГОУ ВПО "С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова". – Сыктывкар : СЛИ, 2009. – 208 с.
34. Транзисторы [Текст] : справочник. Вып. IV. – Москва : Патриот, 1997. – 192 с.
35. Транзисторы [Текст] : справочник. Вып. V. – Москва : Патриот, 1997. – 192 с.

36. Транзисторы [Текст] : справочник. Вып. VI. – Москва : Патриот, 1997. – 192 с.
37. Транзисторы [Текст] : справочник. Вып. VII. – Москва : Патриот, 1997. – 192 с.
38. Успенский, М. И. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях [Текст] : монография / М. И. Успенский, И. В. Кызродев ; отв. ред. А. В. Булычев ; Коми НЦ УрО РАН, Ин-т соц.-экон. и энерг. проблем Севера. – Сыктывкар : [б. и.], 2010. – 122 с.
39. Хрулев, А. К. Диоды и их зарубежные аналоги [Текст] : справочник : в 3-х томах. Т. 1 / А. К. Хрулев, В. П. Черепанов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 640 с.
40. Хрулев, А. К. Диоды и их зарубежные аналоги [Текст] : справочник : в 3-х томах. Т. 2 / А. К. Хрулев, В. П. Черепанов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 640 с.
41. Хрулев, А. К. Диоды и их зарубежные аналоги [Текст] : справочник : в 3-х томах. Т. 3 / А. К. Хрулев, В. П. Черепанов. – Москва : РадиоСофт, 1999. – 704 с.
42. Шпаннеберг, Х. Электрические машины. 1000 понятий для практиков [Текст] : справочник / Х. Шпаннеберг ; пер. с нем. В. А. Алешечкин ; ред. А. Н. Лебедевский. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 252 с.
43. Шумилова, Г. П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур [Текст] / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцева ; Коми НЦ УрО РАН, Ин-т соц.-экон. и энерг. проблем Севера. – Екатеринбург : [б. и.], 2008. – 88 с.
44. Электробезопасность на промышленных предприятиях [Текст] : справочник. – Киев : Техника, 1985. – 288 с.
45. Электроника [Текст] : энциклопедический словарь / ред. В. Г. Колесников. – Москва : Сов. энциклопедия, 1991. – 668 с.
46. Электронная техника и радиоэлектроника. Терминология [Текст] : справочное пособие. Вып. 9. – Москва : Изд-во стандартов, 1991. – 168 с.
47. Электронные приборы и устройства на их основе [Текст] : справочная книга / Ю. А. Быстров [и др.] ; под ред. Ю. А. Быстрова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : РадиоСофт, 2002. – 656 с.
48. Электротехнические материалы [Текст] : справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 503 с.
49. Электротехнический справочник [Текст] : в 4-х томах. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под ред. В. Г. Герасимова, В. В. Фролова. – 9-е изд., стер. – Москва : Изд-во МЭИ, 2003. – 440 с.
50. Электротехнический справочник [Текст] : в 3-х томах : в 2-х книгах / под ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – 7-е изд., испр. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1988.
Т. 3. Кн. 1 : Производство и распределение электрической энергии. – 1988. – 880 с.
51. Электротехнический справочник [Текст] / ред. В. Г. Герасимов [и др.]. – 7-е изд., испр. и доп. – Москва : Энергоатомиздат.
Т. 3. Кн. 2 : Использование электрической энергии. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 615 с.
52. Электротехнический справочник [Текст] : в 3-х томах / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – Москва : Энергоиздат.
Том III, Кн. 1 : Производство, передача и распределение электрической энергии. – 656 с.
53. Электротехнический справочник [Текст] : в 3-х томах / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – Москва : Энергоиздат.
Том III, Кн. 2 : Использование электрической энергии. – 560 с.
54. Электротехнический справочник [Текст] : в 3-х томах. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.

55. Электротехнический справочник [Текст] : в 4-х томах. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под ред. В. Г. Герасимова. – 9-е изд., стер. – Москва : Изд-во МЭИ, 2003. – 518 с.

56. Электротехнический справочник [Текст] : в 4-х томах. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под ред. В. Г. Герасимова. – 9-е изд., стер. – Москва : Изд-во МЭИ, 2004. – 964 с.

57. Электротехнический справочник [Текст] : в 4-х томах. Т. 4. Использование электрической энергии / под ред. В. Г. Герасимова. – 9-е изд., стер. – Москва : Изд-во МЭИ, 2004. – 696 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Методические рекомендации по самостоятельной подготовке теоретического материала

Самостоятельная работа студентов по изучению отдельных тем дисциплины включает поиск учебных пособий по данному материалу, проработку и анализ теоретического материала, контроль знаний по данной теме с помощью нижеперечисленных вопросов и заданий.

Наименование темы	Контрольные вопросы и задания
Введение.	1. Что принято называть электрическим устройством? 2. Что называется электрической цепью? 3. Что такое электрическая ветвь? 4. Какие вы знаете приемники, источники электрической энергии? 5. Что такое контур электрической цепи?
1. Линейные электрические цепи постоянного тока.	1. Единицы измерения электрических величин I, U, R, E. 2. Как определяется сила тока? 3. Что называется потенциалом, разностью потенциалов? 4. Обозначения резисторов, ЭДС на схемах. 5. Законы Кирхгофа и их применение для расчетов электрических цепей. 6. Методы эквивалентного преобразования схем: последовательное, параллельное соединение. Преобразование «треугольника» в «звезду». 7. Метод контурных токов. 8. Метод узловых потенциалов. 9. В чем заключается метод наложения? 10. Как вычисляется работа и мощность электрической цепи? 11. Как вычисляется баланс мощности электрической цепи? 12. В каком случае энергия потребителя имеет максимальное значение?
2. Линейные электрические цепи синусоидального тока.	1. Назовите элементы электрической цепи переменного тока и как они изображаются на схемах? 2. Как получается синусоидальный ток? 3. Как определяется максимальное среднее и действующее значение синусоидальных величин? 4. Как записывают синусоидальные величины? 5. Записать закон Ома в комплексной форме для резистивного, индуктивного и емкостного элементов. 6. Записать закон Кирхгофа в комплексной форме. 7. Как записывается комплексное сопротивление неразветвленного участка цепи $\dot{Z}$? 8. Как рассчитывается активная, реактивная, комплексная и полная мощность? 9. Как рассчитывается баланс мощности в цепи синусоидального тока? 10. В чем заключается резонанс напряжений?

3. Трехфазные цепи.	11. В чем заключается резонанс токов? 1. Напишите выражения для мгновенных значений напряжений, образующих трехфазную симметричную систему (для фазы А начальную фазу напряжения принять равной нулю). 2. Приемник соединен треугольником. В фазу А включен реостат, в фазу В – катушка (L,R), в фазу С – конденсатор. Начертите топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов. 3. Действующее значение линейного тока в симметричном приемнике, соединенном по схеме «звезда» без нейтрального провода, равно I. В одном из линейных проводов произошел обрыв. Чему равны токи в двух других линейных проводах? 4. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной системы. 5. Трехфазный приемник соединен по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Фазные токи в приемнике равны соответственно 50, 80 и 20 А и сдвинуты относительно фазных напряжений соответственно на углы -30°, -60°, и $+60^\circ$. Начертите топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов. 6. Докажите, что в симметричной трехфазной системе токов сумма их мгновенных значений всегда равна нулю. 7. Начертите топографическую диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов для трехфазной системы, соединенной по схеме «звезда» с нейтральным проводом, если в одну фазу включен резистор с сопротивлением R, а в другие катушки индуктивности L_1 и L_2. 8. Изобразите топографическую диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов для трехфазной системы, соединенной по схеме «треугольник», если в одну фазу включен элемент с параметром R, во вторую – с параметром L, в третью с параметром C.
4. Электромагнитные устройства, электрические машины и аппараты	1. Изобразите (схематически) однофазный трансформатор и объясните принцип его работы. 2. Выведите выражения для действующих ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора основным магнитным потоком. 3. В чем состоит режим холостого хода трансформатора? Начертите векторную диаграмму режима холостого хода. 4. Что называют коэффициентом трансформации трансформатора? 5. Напишите уравнения напряжений (уравнения электрического состояния) для первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений. 6. Начертите схему опыта холостого хода трансформатора и объясните, какие величины

	определяются в этом опыте. 7. Почему в опыте холостого хода мощность потерь в меди настолько мала, что ею можно пренебречь? 8. Начертите схему опыта короткого замыкания трансформатора и объясните, какие величины определяются в этом опыте. 9. Почему в опыте короткого замыкания мощность потерь в стали настолько мала, что ею можно пренебречь?
5. Электронные приборы и устройства	1. Назовите полупроводниковые материалы? 2. Виды полупроводников. 3. Что такое генерация, рекомбинация? 4. Какие явления возникают в пограничном слое p- и n-полупроводников под действием электрического поля. 5. Что такое полупроводниковый диод, его характеристика. 6. Виды диодов, их характеристика. 7. Что такое биполярный транзистор, его характеристика. 8. Что такое полевой транзистор, его характеристика. 9. Какие бывают тиристоры? 10. Схема простейшего выпрямителя. 11. Какие бывают выпрямители? 12. Что такое инверторы? 13. Схема усилительного каскада. 14. Схема дифференциального усилителя. 15. Что такое операционный усилитель? 16. Схема усилителя мощности.
6. Электрические измерения и приборы	1. Сформулируйте определения понятий абсолютной, относительной и приведенной погрешностей. Какой из этих погрешностей оценивается точность измерительного прибора? 2. Изобразите схематически устройства приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и индукционной систем и объясните принципы их работы. 3. В Чем различие между приборами электродинамической и ферродинамической систем? К приборам какой системы относятся ваттметры? 4. начертите схему включения в цепь ваттметра, предназначенного для измерения активной мощности, потребляемой приемником. 5. Для чего служит шунт в амперметре? Выведите формулу для определения значения сопротивления шунта. 6. Изобразите схему измерения напряжения с помощью трансформатора напряжения и напишите формулу для определения искомого напряжения.
7. Электропривод	1. Что такое статическая и динамическая нагрузки? 2. Уравнение движения электропривода. 3. Что такое динамический момент? Приведенный момент инерции?

	4. Основные режимы работы электропривода. 5. Как правильно выбрать мощность двигателя? 6. Что такое коэффициент перегрузки по моменту?
8. Электроснабжение	1. Что называют электроприемником? На какие группы они подразделяются? 2. Что такое номинальная мощность? 3. Что такое максимальная нагрузка? 4. Назовите режимы работы нейтралей электрических сетей.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Самостоятельная работа студентов по подготовке к лабораторным работам, оформлению и защите лабораторных работ включает проработку и анализ теоретического материала, описание проделанной экспериментальной работы с приложением графиков, таблиц, расчетов, а также самоконтроль знаний по теме лабораторной работы с помощью нижеперечисленных вопросов и заданий.

1. Изучение законов Кирхгофа.	1. Дайте определение ветви, узла и контура для схемы электрической цепи. 2. По каким правилам производится нанесение токов на схему замещения электрической цепи? 3. Что означает знак «минус», полученный в результате расчета токов? 4. Сформулируйте и запишите закон Ома для участка цепи и для замкнутого контура. 5. Какие соединения называются последовательными и параллельными? Как определить эквивалентные сопротивления при таких соединениях элементов? 6. В чем заключается суть расчета электрических цепей с применением метода преобразования (свертывания)? 7. Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа, приведите примеры их написания. 8. Что такое независимый контур? Каким образом можно найти их число для любой схемы электрической цепи? 9. Перечислите известные вам методы расчета линейных электрических цепей. 10. Поясните, что такое потенциальная диаграмма и для каких целей она предназначена. 11. Что такое баланс мощности? Напишите выражение баланса мощности для электрической цепи с одним источником питания и семью
-------------------------------	---

	резисторами. 12. В цепи действует несколько источников питания. Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные – в режиме потребителя. По какому признаку определяется режим работы тех и других источников питания?
2. Последовательное соединение RLC в однофазных цепях переменного тока.	1. Приведите формулы определения индуктивного, емкостного и полного сопротивлений электрической цепи. От каких параметров электрической цепи синусоидального тока они зависят? 2. Какие элементы электрической цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные R, L и C, и каким образом влияют на сдвиг фаз между током и напряжением? 3. Почему сдвиг фаз между напряжением U и током I положителен при активно – индуктивном характере и отрицателен при активно – емкостном? 4. Что такое векторная (топографическая) диаграмма напряжений? Приведите процесс ее построения для электрической цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные R, L и C. 5. Как по векторной диаграмме, треугольникам сопротивлений и мощностей определить характер изменения нагрузки? 6. Приведите формулы определения активной, реактивной и полной мощности. Какое влияние на мощность оказывает сдвиг фаз между током и напряжением? 7. Приведите векторные (топографические) диаграммы напряжений для схем последовательного соединения: а) резистора и катушки индуктивности; б) резистора и емкости; в) катушки индуктивности и емкости. 8. Приведите формулу Томсона, объясните ее физический смысл. 9. Объясните явление резонанса напряжений, чем он характеризуется. 10. Нарисуйте частотные характеристики и объясните их.
3. Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов.	1. По каким правилам производится нанесение токов на схему замещения электрической цепи? 2. Что означает знак «минус»,

	полученный в результате расчета токов? 3. Дайте определение собственного и взаимного сопротивлений, контурного тока и контурной ЭДС. 4. Что такое независимый контур и каким образом можно найти их число для любой схемы электрической цепи? 5. Каким образом определяются истинные токи в ветвях схемы по найденным величинам контурных токов? 6. Перечислите известные вам методы расчета линейных электрических цепей. 7. Поясните, что такое потенциальная диаграмма и для каких целей она строится. 8. Что такое баланс мощности? Напишите выражение баланса мощности для электрической цепи с тремя источниками питания и четырьмя резисторами. 9. В цепи действуют несколько источников питания. Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные – в режиме потребителя. По какому признаку определяется режим работы тех и других источников питания? 10. Изложите сущность расчета цепей с помощью применения метода контурных токов. Приведите пример с числом узлов не менее двух. 11. В чем состоит принцип наложения? 12. Изложите сущность расчета цепей с помощью применения метода наложения. Приведите пример.
4. Преобразование треугольника сопротивлений в звезду.	1. Сформулируйте и запишите закон Ома для участка цепи и для замкнутого контура. 2. Что называется электрическим сопротивлением, как оно вычисляется? 3. Что называем электрической проводимостью, в чем она измеряется? 4. Какие соединения называются последовательными и параллельными? Как определить эквивалентные сопротивления при таких соединениях элементов? 5. Перечислите известные вам методы расчета линейных электрических цепей. 6. Как рассчитывается коэффициент полезного действия цепи? 7. Как определяются потенциалы точек цепи?

	8. Поясните, что такое потенциальная диаграмма, и для каких целей она строится. 9. Выведите формулы расчета эквивалентных сопротивлений при замене треугольника соединений резисторов в соединение – звезда.
5. Исследование однофазных трансформаторов.	1. Объяснить устройство и принцип действия однофазного трансформатора. 2. Можно ли включать трансформатор в цепь постоянного тока с напряжением, равным номинальному? 3. Перечислите потери в трансформаторе и объясните их физическую природу. 4. Какие потери мощности не зависят от нагрузки трансформатора и как их определяют? 5. Для чего нужен сердечник в трансформаторе? Будет ли работать трансформатор с деревянным сердечником? 6. Характеристики трансформатора. Объясните причины, вызывающие их изменение в зависимости от нагрузки. 7. Почему нельзя получить коэффициент трансформации k по показаниям вольтметров в первичной и вторичной обмотках при нагруженном трансформаторе? 8. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора, какой величины напряжение подводится к первичной обмотке и какие потери определяют этим опытом? 9. Укажите способы определения коэффициента полезного действия трансформатора.
6. Исследование трехфазных потребителей, соединенных в звезду.	1. Какое соединение называется соединением «звездой»? 2. Приведите порядок построения векторной диаграммы для случая соединения потребителей с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз по схеме звезда с нейтральным проводом (четырёхпроводная система). 3. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе и почему? 4. Почему на нулевой провод не ставится предохранитель? 5. Каковы особенности режима работы

	потребителей, соединенных «звездой», при несимметричной нагрузке фаз с нулевым проводом и без него? 6. Как определить расчетным путем напряжения на фазах приемника электрической энергии при их соединении «звездой» без нейтрального провода? Как сделать это же путем экспериментальных замеров? 7. Приведите порядок построения векторной диаграммы для случая соединения потребителей с неравномерной нагрузкой фаз по схеме «звезда» без нейтрального провода (трехпроводная система). 8. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных «звездой», при обрыве фазы с нулевым проводом и без него? 9. Как измеряется мощность в цепи трехфазного тока при четырехпроводной системе? 10. Как вычисляется активная, реактивная и полная мощности трехфазного тока при соединении потребителей «звездой» с симметричной и несимметричной нагрузкой фаз приемника?
7. Исследование трехфазных потребителей, соединенных в треугольник.	1. Какое соединение называется соединением «треугольником»? 2. Как строится векторная диаграмма напряжений и совмещенная с ней векторная диаграмма токов для случая соединения потребителей по схеме треугольник? Покажите процесс их построения при равномерной и неравномерной нагрузках в фазах. 3. Каковы особенности режима при обрыве одной из фаз приемника при соединении потребителей «треугольником»? Покажите порядок построения векторной диаграммы для этого случая. 4. Каковы особенности режима при обрыве двух фаз приемника при соединении потребителей «треугольником»? Покажите порядок построения векторной диаграммы для этого случая. 5. Каковы особенности режима при обрыве одного линейного провода при соединении потребителей

	«треугольником»? Как строится векторная диаграмма для этого случая? Почему, несмотря на обрыв одного линейного провода, имеется мощность во всех трех фазах? 6. Как вычисляется активная, реактивная и полная мощности трехфазного тока при соединении потребителей «треугольником» с симметричной и несимметричной нагрузкой фаз приемника? 7. Почему в методе двух ваттметров сумма показаний двух однофазных ваттметров равна полной мощности трехфазной системы?
8. Исследование полупроводникового диода.	1. Можно ли применять закон Ома для полупроводниковых приборов? 2. Как определяется дифференциальное сопротивление диодов? 3. Зависит ли сопротивление полупроводникового диода от приложенного напряжения? 4. Может ли сопротивление диода принимать отрицательные значения? 5. Объясните принцип действия туннельного диода. 6. Как зависит сопротивление диодов от магнитной индукции? 7. Объясните зависимость межбарьерной емкости диода от приложенного напряжения? 8. Объясните вольт – фарадную характеристику варикапа.
9. Исследование тиристора	1. Как определяют дифференциальное и статическое сопротивления? 2. В чем заключается принцип действия биполярного транзистора? 3. Какая из схем включения биполярного транзистора наиболее предпочтительнее и почему?
10. Исследование однофазного выпрямителя.	1. Какие свойства диодов используются в выпрямительных устройствах? 2. Приведите показатели выпрямителей однофазного тока для одно- и двухполупериодного выпрямления. 3. Укажите особенности двухполупериодной схемы выпрямления однофазной цепи.
11. Исследование параметрического стабилизатора.	1. Каков принцип работы параметрического стабилизатора напряжения?

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

Согласно учебному плану по специальности предусмотрено выполнение двух контрольных работ. Каждый студент очной формы обучения выполняет контрольные работы по индивидуальному заданию контрольной работы №1, №2. Номер варианта указывается преподавателем.

Контрольная работа для заочной формы обучения

Задача 1.

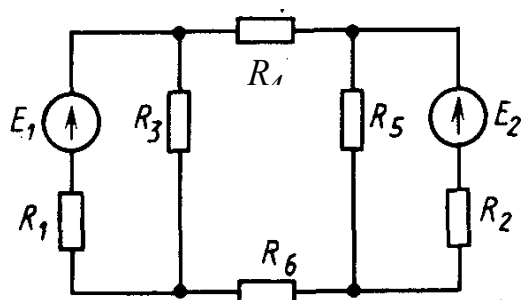


Рис. 1

В цепи постоянного тока (рис.1) ЭДС источников питания равны E_1 и E_2 , а сопротивления ветвей – $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$. Параметры ЭДС и сопротивлений приведены в табл. 1. Определить и проверить заданными в варианте методами токи в ветвях цепи. Составить баланс активной мощности и построить потенциальную диаграмму для внешнего контура схемы замещения.

Таблица 1

№ варианта	Данные к задаче №1									Метод расчета	Метод проверки
	E_1, B	E_2, B	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$			
1(31)	180	170	0,1	0,15	1,8	0,8	2,2	1,25		Конт. ур-ний	Законов К-фа
32	180	170	0,1	0,15	1,8	0,8	2,2	1,25		Наложения	Законов К-фа
33	180	170	0,1	0,1	1,5	1,0	2,5	1,5		Законов К-фа	Конт. ур-ний
34	185	177	0,1	0,1	1,5	0	2,0	1,5		Двух узлов	Законов К-фа
35	150	160	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	0		Двух узлов	Конт. ур-ний
36	120	114	0,1	0,1	1,5	0,5	2,0	1,0		Законов К-фа	Конт. ур-ний
37	120	106	0,1	0,15	1,5	0,5	2,0	0		Двух узлов	Конт. ур-ний
38	120	126	0,1	0,2	1,5	0	2,0	1,0		Двух узлов	Конт. ур-ний
39	120	126	0,1	0,2	1,5	0,5	2,0	1,0		Конт. ур-ний	Законов К-фа
40	120	115	0,1	0,15	1,5	0,5	2,0	1,0		Наложения	Законов К-фа
11(41)	210	201	0,1	0,1	2,0	1,0	2,5	1,5		Конт. ур-ний	Законов К-фа
42	125	119	0,1	0,1	1,5	0,5	2,0	1,0		Наложения	Законов К-фа
43	120	115	0,1	0,15	1,5	0,5	2,0	1,0		Законов К-фа	Конт. ур-ний
44	215	207	0,1	0,15	2,0	0	2,5	1,5		Двух узлов	Законов К-фа
45	220	208	0,1	0,2	2,0	1,0	2,5	0		Двух узлов	Конт. ур-ний
46	225	218	0,15	0,25	2,0	1,0	1,5	2,5		Законов К-фа	Конт. ур-ний
47	220	208	0,1	0,2	2,0	1,0	2,5	0		Двух узлов	Конт. ур-ний
48	180	170	0,1	0,1	1,5	0	2,5	1,5		Двух узлов	Конт. ур-ний
49	170	160	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	1,0		Конт. ур-ний	Законов К-фа
50	185	177	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	1,5		Наложения	Законов К-фа
21(51)	190	180	0,1	0,1	1,2	0,8	2,0	1,7		Конт. ур-ний	Законов К-фа
52	190	180	0,1	0,1	1,2	0,8	2,0	1,7		Наложения	Законов К-фа
53	110	100	0,1	0,1	1,2	0,5	1,8	1,0		Законов К-фа	Конт. ур-ний
54	150	160	0,1	0,1	1,5	0	2,0	1,5		Двух узлов	Законов К-фа

55	120	114	0,1	0,1	1,5	0,5	2,0	0	Двух узлов	Конт. ур-ний
56	220	215	0,1	0,2	2,0	1,0	2,5	1,5	Законов К-фа	Конт. ур-ний
57	220	208	0,1	0,2	2,0	0	2,5	1,5	Двух узлов	Конт. ур-ний
58	225	218	0,15	0,25	2,0	1,0	1,5	0	Двух узлов	Конт. ур-ний
59	210	201	0,1	0,1	2,0	1,0	2,5	1,5	Конт. ур-ний	Законов К-фа
60	170	160	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	1,0	Наложения	Законов К-фа
31(61)	120	115	0,1	0,15	1,5	0,5	2,0	1,0	Конт. ур-ний	Законов К-фа
62	215	207	0,1	0,15	2,0	1,0	2,5	1,5	Наложения	Законов К-фа
63	185	177	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	1,5	Законов К-фа	Конт. ур-ний
64	215	207	0,1	0,15	2,0	0	2,5	1,5	Двух узлов	Законов К-фа
65	170	160	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	0	Двух узлов	Конт. ур-ний
66	190	180	0,1	0,1	1,2	0,8	2,0	1,7	Законов К-фа	Конт. ур-ний
67	110	100	0,1	0,1	1,2	0,5	1,8	0	Двух узлов	Конт. ур-ний
68	185	177	0,1	0,1	1,5	0	2,0	1,5	Двух узлов	Конт. ур-ний
69	185	177	0,1	0,1	1,5	1,0	2,0	1,5	Конт. Ур-ний	Законов К-фа
40(70)	110	100	0,1	0,1	1,2	0,5	1,8	1,0	Наложения	Законов К-фа

Задача 2.

В цепи переменного тока (рис.2) ЭДС источника питания равна $\dot{E}_1$ или $\dot{E}_2$, а сопротивления ветвей – $R_1, R_2, Z_3, R_4, Z_5, R_6$. Параметры ЭДС и сопротивлений приведены в табл. 2. Определить, известным Вам методом, токи в ветвях цепи. Представить их в комплексной ($I \cdot e^{j\psi}$) и тригонометрической ($i = I_m \sin(314t + \psi_i)$) формах записи. Частоту (f) в цепи принять равной 50 Гц. Составить баланс активных и реактивных мощностей. Построить векторную диаграмму для внешнего контура схемы.

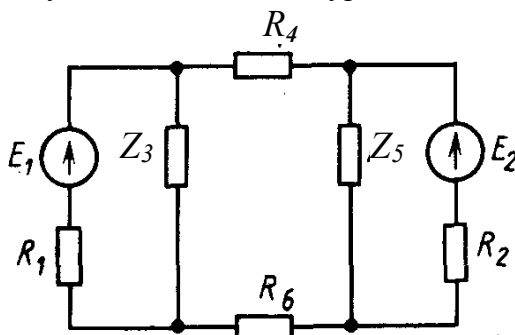


Рис. 2. Схема цепи переменного тока

Таблица 2

№ варианта	Данные к задаче №2							
	$E_1, В$	$E_2, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$Z_3, Ом$	$R_4, Ом$	$Z_5, Ом$	$R_6, Ом$
1(31)	170	0	0,2	1,3	$1,5+j0,9$	2,5	$2,5-j4,0$	2,0
32	210	0	0,25	2,2	$2,1-j0,7$	3,0	$2,5-j4,0$	2,0
33	0	110	3,2	0,3	$1,9+j0,6$	1,0	$2,0-j2,0$	3,0
34	0	110	1,25	0,15	$1,6+j0,9$	2,5	$2,0-j1,8$	2,0
35	100	0	0,2	1,3	$1,5-j0,8$	3,0	$2,0+j2,6$	1,0
36	140	0	0,25	3,2	$1,5-j0,9$	3,5	$2,0-j2,4$	2,0
37	0	135	1,2	0,2	$2,0+j1,3$	2,5	$2,0+j1,4$	3,0
38	0	205	2,25	0,2	$2,0-j1,6$	2,0	$2,0-j2,6$	3,5

39	185	0	0,2	2,3	$1,8+j1,9$	3,0	$2,0-j20$	2,0
40	210	0	0,25	3,3	$2,0-j1,4$	3,0	$2,0+j4,0$	1,5
11(41)	0	235	2,2	0,25	$2,0+j2,5$	1,5	$2,5-j2,5$	1,0
42	0	245	3,25	0,2	$2,0-j150$	2,5	$2,5+j2,5$	2,0
43	200	0	0,2	2,3	$2,0+j1,4$	4,5	$2,5-j1,6$	1,5
44	180	0	0,25	1,15	$2,8+j0,8$	2,8	$2,4+j2,4$	1,4
45	0	180	1,2	0,3	$1,5+j0,9$	2,5	$2,5+j4,0$	2,0
46	0	200	2,25	0,2	$2,1-j0,7$	3,0	$2,5-j4,0$	2,0
47	130	0	0,2	3,3	$1,9+j0,6$	1,0	$2,0-j2,0$	3,0
48	130	0	0,25	2,15	$1,6+j0,9$	2,5	$2,0-j1,8$	2,0
49	0	120	2,2	0,3	$1,5-j0,8$	3,0	$2,0+j2,6$	1,0
50	0	130	3,25	0,2	$1,5-j0,9$	3,5	$2,0-j2,4$	2,0
21(51)	150	0	0,2	1,2	$2,0+j1,3$	2,5	$2,0+j1,4$	3,0
52	220	0	0,25	2,2	$2,0-j1,6$	2,0	$2,0-j2,6$	3,5
53	0	185	2,2	0,3	$1,8+j1,9$	3,0	$2,0-j20$	2,0
54	0	210	2,25	0,3	$2,0-j1,4$	3,0	$2,0+j4,0$	1,5
55	220	0	0,2	2,25	$2,0+j2,5$	1,5	$2,5-j2,5$	1,0
56	220	0	0,25	3,2	$2,0-j150$	2,5	$2,5+j2,5$	2,4
57	210	0	0,2	2,3	$2,2+j1,5$	2,8	$2,2-j1,2$	2,2
58	180	0	0,25	2,15	$1,6+j0,7$	1,8	$2,0+j2,2$	1,8
59	0	220	2,2	0,3	$1,8+j0,9$	2,2	$2,2+j4,0$	2,2
60	0	180	1,25	0,2	$2,2-j0,8$	1,4	$2,2-j4,0$	1,6
31(61)	140	0	0,2	1,3	$1,6+j0,6$	1,2	$2,4-j1,0$	2,6
62	140	0	0,25	1,15	$1,75+j0,6$	1,2	$2,4-j0,8$	1,6
63	0	130	1,2	0,3	$1,75-j0,4$	2,2	$2,4+j1,6$	2,1
64	0	120	2,25	0,2	$1,75-j0,8$	1,2	$2,4-j1,4$	1,2
65	145	0	0,2	2,2	$2,2+j1,0$	1,5	$2,4+j0,4$	2,2
66	225	0	0,25	1,2	$2,2-j1,4$	1,2	$2,4-j1,6$	2,4
67	0	185	2,2	0,3	$1,6+j0,7$	2,2	$2,4-j4,0$	3,1
68	0	220	1,25	0,3	$2,2-j1,0$	2,2	$2,4+j4,0$	2,3
69	235	0	0,2	2,25	$2,2+j0,8$	1,2	$2,8-j0,5$	2,2
40(70)	225	0	0,25	1,2	$2,2-j1,1$	2,2	$2,8+j0,5$	1,2

Задача 3.

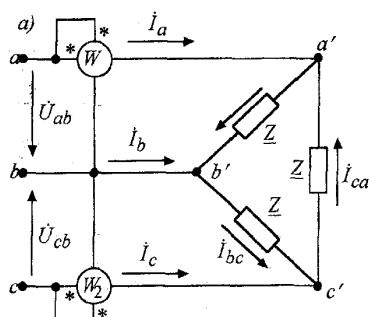


Рис. 3.

К трехфазной сети с симметричным линейным напряжением $U_{\text{л}}$ (U_{ab} , U_{cb}) подключен симметричный трехфазный приемник, соединенный треугольником (рис.3). Полное сопротивление каждой фазы Z (табл.3). Определить токи в фазах приемника, показания каждого ваттметра, баланс активных мощностей. Построить топографическую диаграмму напряжений и показать на них векторы токов.

Таблица 3

№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом	№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом	№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом	№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом
31	127	$3+j4$	42	380	$15+j8$	53	220	$10-j5$	64	127	$5+j10$
32	220	$6+j8$	43	220	$8-j6$	54	127	$4+j2$	65	127	$5-j1,5$
33	127	$3-j4$	44	127	$1,5+j4$	55	380	$25+j20$	66	220	$10-j8$
34	380	$6+j10$	45	220	$8+j6$	56	220	$8+j7$	67	380	$25+j10$
35	127	$4-j8$	46	380	$21-j15$	57	380	$35-j20$	68	127	$5+j15$
36	220	$8+j12$	47	220	$18+j12$	58	127	$4+j6$	69	380	$12-j10$
37	380	$12+j12$	48	127	$5+j8$	59	220	$8+j15$	70	220	$4-j12$
38	127	$6+j8$	49	127	$8-j6$	60	380	$8+j16$			
39	220	$8+j22$	50	220	$14-j16$	61	220	$14+j6$			
40	380	$16+j12$	51	127	$15+j20$	62	220	$18+j15$			
41	127	$4-j8$	52	220	$12-j8$	63	380	$18-j26$			

Задача №4

К трехфазной сети с симметричным линейным напряжением $U_{\text{л}}$ (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca}) подключен симметричный трехфазный приемник, соединенный звездой (рис.4). Полное сопротивление каждой приемника Z . Определить токи в фазах нагрузки и линейных проводах, а также потребляемую нагрузкой активную мощность, баланс активных мощностей. Построить топографическую диаграмму фазных и линейных напряжений и показать на них векторы токов.

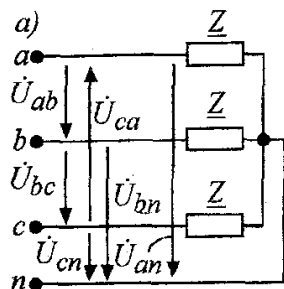


Рис.4.

Таблица 4

№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом	№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом	№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом	№ вариан та	$U_{\text{л}}$ B	Z Ом
31	220	$1+j2$	42	380	$25-j18$	53	220	$12+j10$	64	220	$15-j10$
32	220	$6+j10$	43	220	$10+j6$	54	220	$14-j20$	65	220	$5+j5$
33	380	$3+j4$	44	220	$10+j4$	55	380	$20-j15$	66	220	$12+j10$
34	380	$4+j8$	45	220	$5-j6$	56	220	$8+j7$	67	380	$20-j15$
35	220	$6+j8$	46	380	$11-j15$	57	380	$25-j10$	68	380	$15-j8$
36	220	$4+j3$	47	220	$8-j4$	58	380	$4-j10$	69	380	$18+j12$
37	380	$14-j10$	48	380	$15-j8$	59	220	$10-j13$	70	220	$11+j14$
38	380	$18-j10$	49	380	$18-j9$	60	380	$10-j6$			
39	220	$8+j12$	50	220	$18+j12$	61	127	$4+j6$			
40	380	$12+j14$	51	127	$9+j8$	62	220	$9+j15$			
41	127	$6+j8$	52	127	$18-j6$	63	380	$9+j16$			

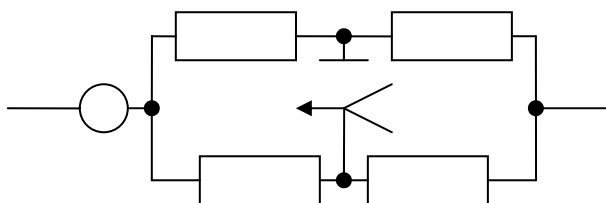
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕКУЩЕМУ КОНТРОЛЮ

Рубежные контрольные мероприятия

Текущая успеваемость студентов контролируется промежуточной аттестацией в виде тестирования. Тесты промежуточной аттестации включают пройденный материал на лекциях и темы, включенные в лабораторные занятия.

Тест ВАРИАНТ №1

1. Как изменятся показания амперметра, если замкнуть рубильник (выключатель)?
(Сопротивление всех резисторов одинаково).



- 1) Возрастет в 2 раза.
- 2) Уменьшится в 2 раза.
- 3) Возрастет в 4 раза.
- 4) Уменьшится в 4 раза.

2. Определить какие из трех источников ЭДС генерируют энергию, а какие потребляют, если $R_1 = 6 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $E_1 = 10 \text{ В}$; $E_2 = 30 \text{ В}$; $E_3 = 30 \text{ В}$.

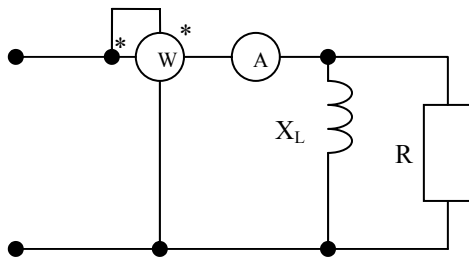
3. Схема электрической цепи состоит из 5 узлов и 8 ветвей с источниками ЭДС и резисторами. Сколько уравнений необходимо составить для нахождения токов в ветвях схемы по заданным величинам ЭДС и резисторов при методе непосредственного применения законов Кирхгофа

- 1) 13
- 2) 5
- 3) 8
- 4) 4
- 5) 12.

4. Мгновенное значение напряжения $U = 564 \sin(\omega t - \pi/3) \text{ [В]}$. Фазовый сдвиг между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/6$. Какое из перечисленных ниже выражений для мгновенного значения тока i верно, если его действующее значение $I = 10 \text{ А}$.

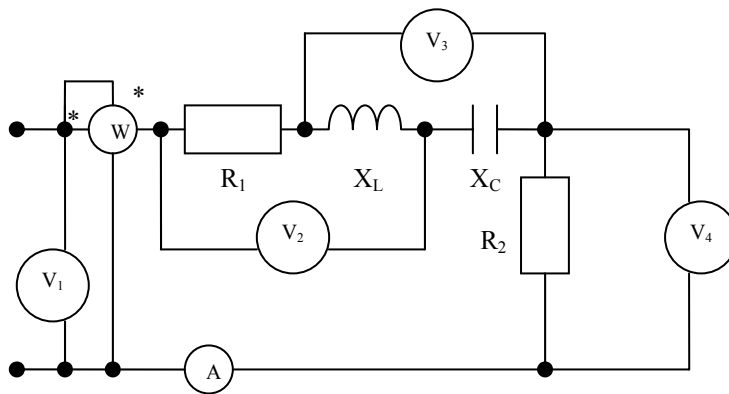
- 1) $i = 10 \sin(\omega t - \pi/2)$
- 2) $i = 10 \sin(\omega t - \pi/6)$
- 3) $i = 14.1 \sin(\omega t - \pi/3)$
- 4) $i = 7.07 \sin(\omega t + \pi/2)$
- 5) $i = 14.1 \sin(\omega t + \pi/2)$

5. Сопротивление элементов электрической цепи равны $X_L=R=2\text{ Ом}$. Показание ваттметра равно 32 Вт. Какую силу тока покажет амперметр?



1. 8 A
2. 4 A
3. $4\sqrt{2}$ A
4. 2 A
5. $\sqrt{2}$ A

6. В схеме наблюдается резонанс напряжения. Показания вольтметра V_4 равно 4 В. Сопротивления $R_1=R_2=4\text{ Ом}$, $X_C=3\text{ Ом}$. Выбрать правильный ответ в показаниях приборов.

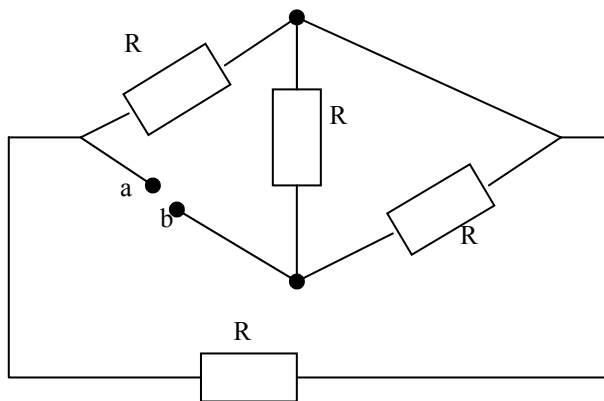


1. Вольтметр V_1 показывает 14 В
2. Вольтметр V_3 показывает 16 В
3. Ваттметр показывает 16 Вт
4. Вольтметр V_2 показывает 5 В
5. Амперметр показывает 4 А.

7. Нагрузка трехфазного приемника симметрична и соединена по схеме «звезда». Как изменится мощность на нагрузке при переключении рубильника К на схему соединения «треугольник».

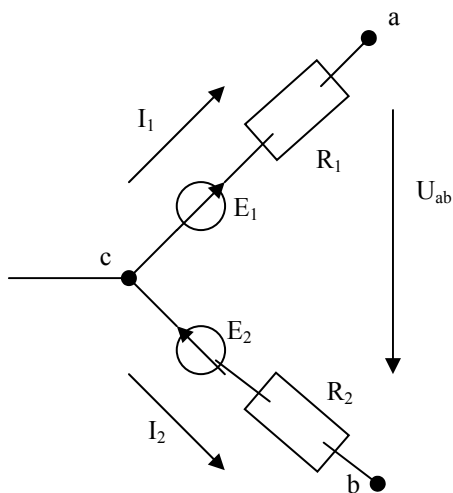
ВАРИАНТ №2

1. Определить входное сопротивление цепи относительно зажимов а б (R_{ab}), если сопротивления всех резисторов в схеме равно R.



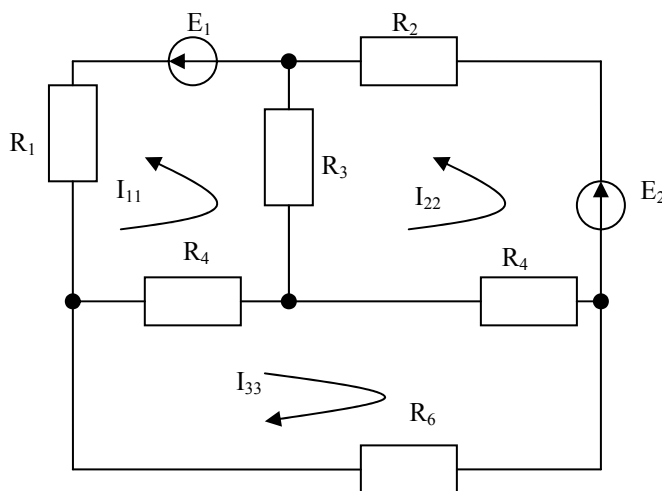
- 1) $R_{ab}=R/2$
- 2) $R_{ab}=\frac{3}{2} R$
- 3) $R_{ab}=R$
- 4) $R_{ab}=2R$
- 5) $R_{ab}=R/3$

2. Чему равно напряжение U_{ab} , если $I_1=2A$, $I_2=2A$, $R_1= R_2=4 \text{ Ом}$, $E_1= E_2=4 \text{ В}$.



- 1) +10 В
- 2) +8 В
- 3) - 24 В
- 4) 4 В
- 5) 0 В

3. Известны параметры схемы электрической цепи: ЭДС E_1 и E_2 и сопротивления $R_1 - R_6$. Задача нахождения токов в ветвях решается методом контурных токов. На схеме обозначены контурные токи I_{11} , I_{22} , I_{33} . Какое сочетание из перечисленных ниже трех уравнений составленных для трех независимых контуров не верно:



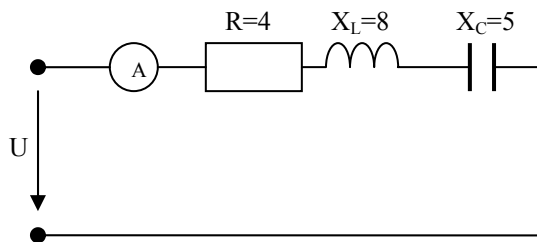
$$\begin{aligned} I_{11}(R_1+R_3+R_4) - I_{22}R_3+I_{33}R_5 &= E_1 & (1) \\ I_{11}R_3+I_{22}(R_1+R_3+R_5)+I_{33}R_5 &= E_2 & (2) \\ I_{11}R_4 - I_{22}R_5+I_{33}(R_4+R_5+R_6) &= 0 & (3) \end{aligned}$$

1. Уравнения (1) и (3)-верны (2) не верно
2. Уравнение (1) верно, (2) и (3) не верны
3. Уравнения (1) и (2)-верны (3) не верно
4. Уравнения (2) и (3)-верны (1) не верно
5. Уравнение (2) верно, (1) и (3) не верны

4. Напряжение синусоидального тока описывается выражением в комплексной форме вида $U=50\sqrt{3} - j50[V]$. Чему равна амплитуда и начальная фаза при аналитическом описании напряжения. Выберите правильный ответ.

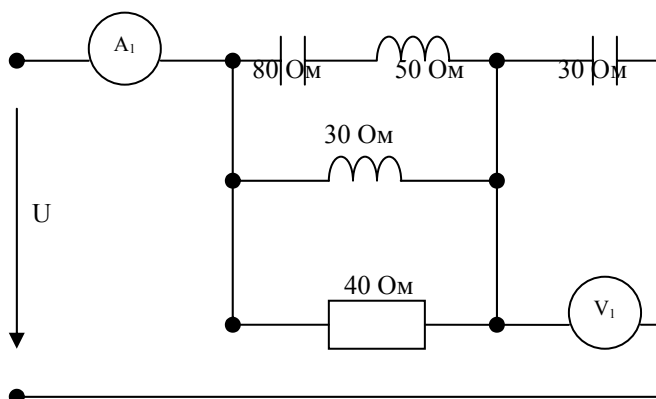
- 1). 100В и 60°
- 2). 141В и 30°
- 3). 100В и -30°
- 4). 141В и -60°
- 5). 141В и -30°

5. В последовательной цепи RLC, сопротивления элементов в Ом указаны на рисунке. Показание амперметра равно 2 А. Чему равно напряжение U , приложенное к данной цепи?



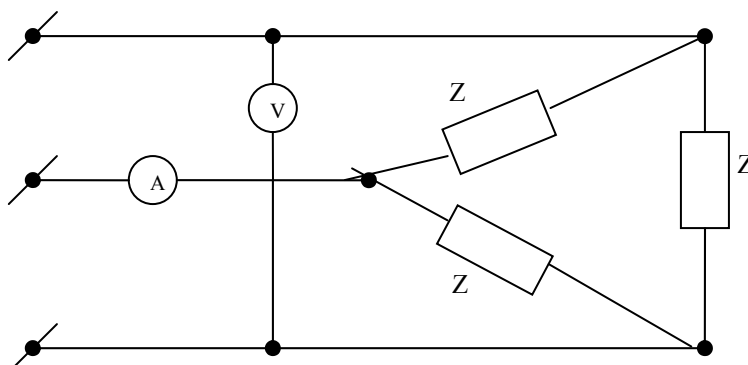
- 1) 17В
- 2) 22В
- 3) 34В
- 4) 68В
- 5) 10В

6. Определить показания вольтметра V_1 , если напряжение $U=100$ В. Величины сопротивлений указаны на схеме.



- 1) 60 В
- 2) 20 В
- 3) 15 В
- 4) 30 В
- 5) 50 В

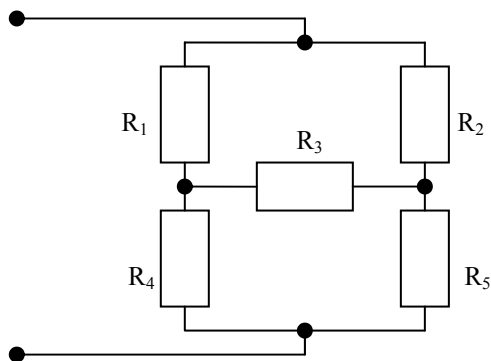
7. Сопротивление каждой фазы трехфазного приемника равно 10 Ом. Система напряжений симметричная. Что покажет вольтметр, если амперметр показывает 17,3 А.



- 1) 50 Вт
- 2) 73 Вт
- 3) 300 Вт
- 4) 100 Вт
- 5) 173 Вт

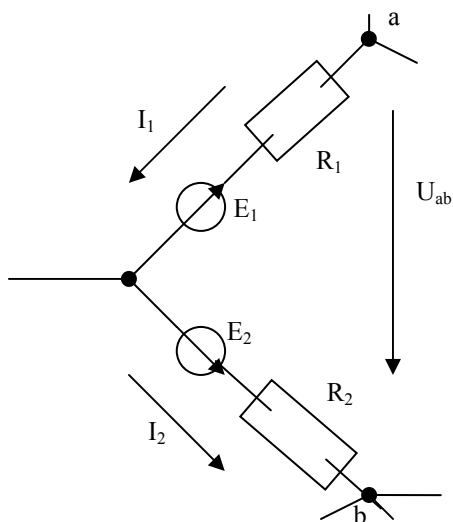
ВАРИАНТ №3

1. Определить эквивалентное сопротивление цепи, R_3 , если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 4 \text{ Ом}$.



- 1) $R_3 = 5 \text{ Ом}$
- 2) $R_3 = 20 \text{ Ом}$
- 3) $R_3 = 6 \text{ Ом}$
- 4) $R_3 = 16 \text{ Ом}$
- 5) $R_3 = 4 \text{ Ом}$

2. На рисунке показана часть сложной цепи. Известны токи $I_1 = 3 \text{ А}$, $I_2 = 2,4 \text{ А}$; ЭДС $E_1 = 70 \text{ В}$, $E_2 = 20 \text{ В}$; сопротивления $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$. Чему равно напряжение U_{ab} ?



- 1) $U_{ab} = -62 \text{ В}$
- 2) $U_{ab} = 56 \text{ В}$
- 3) $U_{ab} = 14 \text{ В}$
- 4) $U_{ab} = 86 \text{ В}$
- 5) $U_{ab} = -14 \text{ В}$

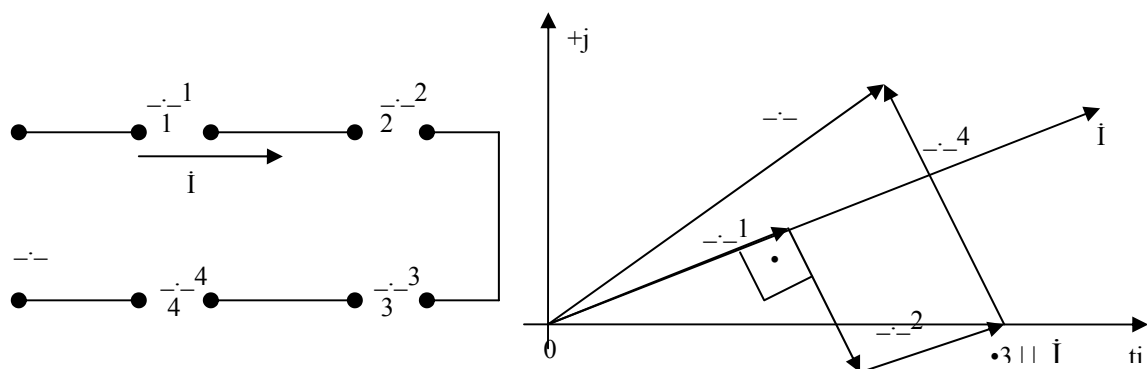
3. Схема электрической цепи состоит из 6 узлов и 10 ветвей с заданными параметрами источников ЭДС и резисторов. Сколько уравнений необходимо составить при решении задачи нахождения токов в ветвях схемы методом контурных токов?

- 1). 4; 2). 10; 3). 5; 4). 9 5). 6.

4. Действующее значение синусоидального тока проходящего в катушке равно $50 + j50 \text{ А}$. Какое из перечисленных ниже выражений для мгновенного значения тока верно, если частота в цепи равна 50 Гц .

- 1). $i = 70,7 \sin(314t + 45^\circ)$; 2). $i = 50 \sin(628t + 60^\circ)$; 3). $i = 100 \sin(314t - 60^\circ)$
 4). $i = 70,7 \sin(628t + 45^\circ)$; 5). $i = 100 \sin(314t + 45^\circ)$

5. Электрическая цепь состоит из 4-х последовательно соединенных элементов. Приведена топографическая диаграмма напряжений. Какое из перечисленных ниже сочетаний элементов характеризует эту диаграмму верно?



- 1). 1-R; 2-C; 3-L; 4-C.
- 2). 1-L; 2-C; 3-R; 4-L.
- 3). 1-R; 2-C; 3-R; 4-L.
- 4). 1-R; 2-L; 3-R; 4-C.
- 5). 1-C; 2-R; 3-L; 4-R.

Критерии оценки знаний студентов

Оценка **"отлично"** выставляется студенту за:

- а) глубокое усвоение программного материала по всем разделам курса, изложение его на высоком научно-техническом уровне.
- б) ознакомление с дополнительной литературой и передовыми научно-техническими достижениями в области производства пищевой продукции;
- в) умение творчески подтвердить теоретические положения процессов и расчета аппаратов соответствующими примерами, умелое применение теоретических знаний при решении практических задач.

Оценка **"хорошо"** выставляется студенту за:

- а) полное усвоение программного материала в объеме обязательной литературы по курсу;
- б) владение терминологией и символикой изучаемой дисциплины при изложении материала;
- в) умение увязывать теоретические знания с решением практических задач;
- г) наличие не искажающих существа ответа погрешностей и пробелов при изложении материала.

Оценка **"удовлетворительно"** выставляется студенту за:

- а) знание основных теоретических и практических вопросов программного материала;
- б) допущение незначительных ошибок и неточностей, нарушение логической последовательности изложения материала, недостаточную аргументацию теоретических положений.

Оценка **"неудовлетворительно"** выставляется студенту за:

- а) существенные пробелы в знаниях основного программного материала.
- б) недостаточный объем знаний по дисциплине для дальнейшей учебы и профессиональной деятельности.

СБОРНИК ОПИСАНИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Методы расчета электрических цепей

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Метод преобразования электрической цепи

Цель работы

1. Изучение метода преобразования (свертывания) электрической цепи и его проверка.
2. Изучение метода непосредственного применения законов Кирхгофа для расчета электрической цепи постоянного тока и его экспериментальная проверка.
3. Экспериментальная проверка справедливости законов Кирхгофа.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для прохождения электрического тока, а также электромагнитные процессы, в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении. Для расчета и анализа электрической цепи, состоящей из любого количества различных элементов, удобно эту цепь представить в виде схемы замещения.

Схема замещения – это расчетная модель электрической цепи. Схема замещения электрической цепи включает в себя источники мощности (активные элементы) и приемники (пассивные элементы). В качестве пассивного линейного элемента в цепях постоянного тока выступает *резистор*, имеющий электрическое сопротивление R . Единица измерения – ом. Величина, обратная сопротивлению, называется *электрической проводимостью*:

$$G = 1/R.$$

Единица измерения – сименс (См). В качестве активных элементов, источников электромагнитной энергии, в схеме замещения используются так называемые источники ЭДС и тока.

Участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток, называется *ветвью*. Место соединения трех и более ветвей называется *узлом*. Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называется *контуром электрической цепи*.

Закон Ома. Этот закон применяется для ветви или для одноконтурной замкнутой цепи (не имеющей разветвлений). При написании закона Ома следует, прежде всего, выбрать произвольно некоторое условно-положительное направление тока. Для ветви, состоящей только из резисторов и не содержащей ЭДС (например, для ветви mn , рис. 1.1), при положительном направлении тока от точки m к точке n применяется **закон Ома для участка цепи**:

$$I_4 = (\varphi_m - \varphi_n)/R_{mn} = U_{mn}/R_{mn},$$

где φ_m, φ_n – потенциалы точек m и n ; U_{mn} – разность потенциалов или напряжение между точками m и n ; $R_{mn} = R_4 + R_5$ – общее (эквивалентное) сопротивление ветви между точками m и n .

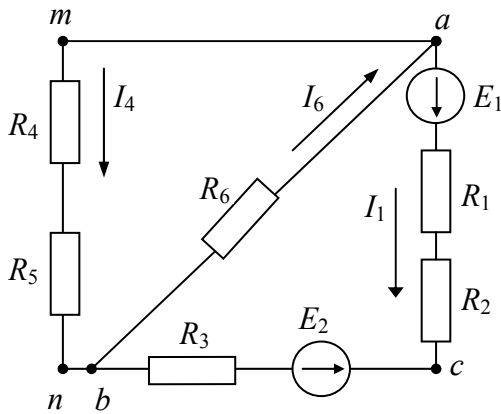


Рис. 1.1. Схема цепи

Для ветви электрической цепи, содержащей ЭДС и резисторы (например, для ветви acb , рис. 1.1):

$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum E}{\sum R_{ab}} = \frac{U_{ab} + \sum E}{\sum R_{ab}},$$

где $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ – напряжение на концах ветви acb , отсчитываемое по выбранному положительному направлению тока; $\sum E = E_1 + E_2$ – алгебраическая сумма ЭДС, находящихся в этой ветви; $\sum R_{ab} = R_1 + R_2 + R_3$ – арифметическая сумма ее сопротивлений. Со знаком «+» берут ЭДС, в которых их направления совпадают с выбранным положительным направлением тока, а со знаком «-» – ЭДС с противоположными направлениями.

Для замкнутой одноконтурной цепи применяется **полный (обобщенный) закон Ома**:

$$I = \sum E / \sum R,$$

где $\sum E$ – алгебраическая сумма ЭДС контура; $\sum R$ – арифметическая сумма сопротивлений контура.

Законы Кирхгофа. Для написания законов Кирхгофа необходимо задаться условно-положительными направлениями токов каждой ветви.

Первый закон Кирхгофа применяется для узлов электрической цепи: *алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю*, т. е.

$$\sum_{j=1}^m I_j = 0,$$

где m – число ветвей, соединенных в данном узле.

Приняв токи, направленные от узла, условно положительными, а направленные к нему – отрицательными, для узла a схемы рис. 1.1 уравнение первого закона Кирхгофа примет вид:

$$I_1 + I_4 - I_6 = 0.$$

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи: алгебраическая сумма падений напряжений на элементах (резисторах) замкнутого контура электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре, т. е.

$$\sum_{j=1}^g R_j I_j = \sum_{j=1}^p E_j,$$

где g – число пассивных элементов (резисторов) в контуре; p – число ЭДС рассматриваемого контура.

Для записи второго закона Кирхгофа произвольно выбирают направление обхода контура. При записи левой части равенства со знаком «+» берутся падения напряжения на тех резисторах, в которых выбранное положительное направление тока совпадает с направлением обхода (независимо от направления ЭДС в этих ветвях), а со знаком «–» берутся падения напряжения на тех резисторах, в которых положительное направление тока противоположно направлению обхода. При записи правой части равенства положительными принимаются ЭДС, направления которых совпадают с выбранными направлениями обхода контура (независимо от направления тока, протекающего через них), и отрицательными, когда направления ЭДС не совпадают с выбранными направлениями обхода контура. Законы Кирхгофа должны выполняться для любого момента времени. Для внешнего контура электрической цепи (рис. 1.1) при его обходе от точки a по часовой стрелке второй закон Кирхгофа примет вид:

$$I_1 R_1 + I_1 R_2 + I_1 R_3 - I_4 (R_4 + R_5) = E_1 - E_2.$$

Расчет любой сложной электрической цепи состоит в определении токов в ветвях схемы по заданным параметрам схемы замещения (величины ЭДС и сопротивлений). Любая сложная электрическая цепь состоит из n узлов и m ветвей.

Метод эквивалентного преобразования цепей применяется для расчета электрических цепей с одним источником питания. Метод основан на последовательном упрощении структуры электрической цепи путем сокращения числа ее узлов и контуров. Преобразование называется эквивалентным, если выполняется условие неизменности токов и напряжений ветвей в тех частях схемы, которые не затронуты преобразованием, т. е. режим остальной части цепи не изменяется.

Простейшие преобразования пассивных ветвей включают замену последовательно соединенных ветвей с сопротивлениями R_k одной ветвью с эквивалентным сопротивлением:

$$R_{\Sigma} = \sum R_k$$

и параллельных ветвей с проводимостями G_k эквивалентной ветвью с проводимостью

$$G_{\Sigma} = \sum G_k.$$

К более сложным относятся преобразования трехлучевой звезды (рис. 1.2а) в эквивалентный треугольник (рис. 1.2б) и наоборот. На рис. 1.2 указаны напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , токи I_a , I_b и I_c – одинаковые для обеих схем. Это основное условие эквивалентного взаимного преобразования звезды сопротивлений в треугольник сопротивлений.

Формулы преобразования:

– из треугольника в эквивалентную звезду:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}},$$

$$R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}},$$

$$R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}};$$

– из звезды в эквивалентный треугольник:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c},$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a},$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}.$$

В результате последовательного применения преобразований структура цепи упрощается, и цепь приводится к простейшему виду, содержащему лишь последовательное или параллельное соединение элементов.

Пример 1.1. Задана мостовая схема (рис. 1.3а), в которой сопротивление R и ЭДС E известны. Необходимо найти токи в ветвях электрической цепи методом преобразований.

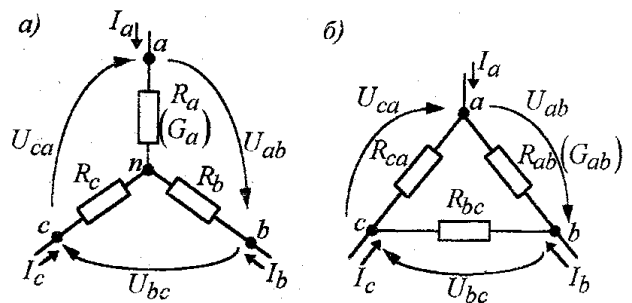


Рис.1.2.

Рис. 1.2. Эквивалентное преобразование пассивных ветвей

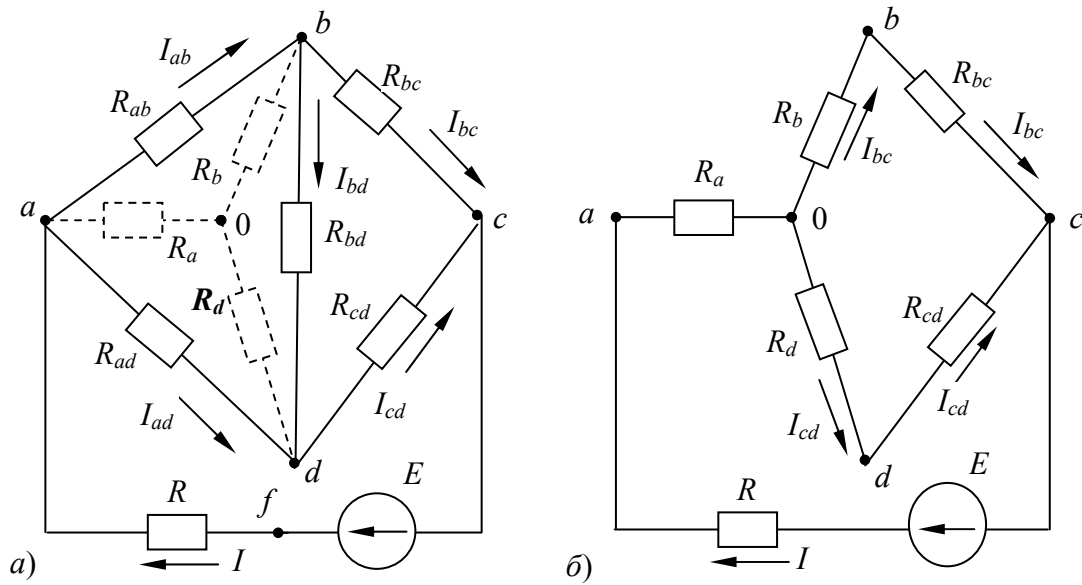


Рис. 1.3. Мостовая схема

Решение. Заменяем треугольник сопротивлений R_{ab} , R_{bd} , R_{ad} эквивалентной звездой сопротивлений R_a , R_b , R_d , лучи которых исходят из узла 0 и на рис. 1.3а изображены штриховой линией. В результате получим упрощенную схему (рис. 1.3б), эквивалентное сопротивление которой равно:

$$R_3 = R + R_a + \frac{(R_b + R_{bc})(R_d + R_{cd})}{R_b + R_{bc} + R_d + R_{cd}}.$$

Ток в неразветвленной части цепи:

$$I = E / R_3.$$

Ток в параллельных ветвях последовательно соединенных сопротивлений:

$$R_b, R_{bc} \Rightarrow I_{bc} = I \frac{R_d + R_{cd}}{R_b + R_{bc} + R_d + R_{cd}};$$

$$R_d, R_{cd} \Rightarrow I_{cd} = I \frac{R_b + R_{bc}}{R_b + R_{bc} + R_d + R_{cd}}.$$

Нахождение токов в остальных ветвях исходной схемы I_{ab} , I_{ad} , I_{bd} можно осуществить применением второго закона Кирхгофа для замкнутых контуров исходной схемы (рис. 1.3а):

$$- b, d, c, b \Rightarrow I_{bd}R_{bd} + I_{cd}R_{cd} - I_{bc}R_{bc} = 0 \Rightarrow \text{ток } I_{bd};$$

$$- a, b, c, a \Rightarrow I_{ab}R_{ab} + I_{bc}R_{bc} + IR = E \Rightarrow \text{ток } I_{ab};$$

$$- a, d, c, a \Rightarrow I_{ad}R_{ad} + I_{dc}R_{dc} + IR = E \Rightarrow \text{ток } I_{ad}.$$

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа. Общее число взаимно независимых уравнений, составленных по обоим законам Кирхгофа, должно быть равно числу неизвестных токов, т. е. числу ветвей расчетной схемы m . Число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, равно числу узлов без единицы, т. е.

$$k_1 = n - 1.$$

Число взаимно независимых уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно числу так называемых независимых контуров:

$$k = m - k_1 = m - n + 1.$$

Независимый контур – это контур схемы, в котором хотя бы одна ветвь не входила бы в другой контур. Таким образом, общее число уравнений, составляемых по первому и второму законам Кирхгофа, равно числу ветвей схемы, т. е.

$$m = k_1 + k.$$

Пример 1.2. Для мостовой схемы рис. 1.3а определить токи в ветвях электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

Решение. Проведем анализ предложенной схемы электрической цепи. Схема состоит из 4 узлов ($n = 4$) и 6 ветвей ($m = 6$). Следовательно, число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, равно трем ($4 - 1 = 3$). Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно также трем ($6 - 4 + 1 = 3$).

Далее, необходимо выбрать три контура, причем таким образом, чтобы одна из ветвей каждого контура не входила бы в другие выбранные нами контуры. Выбираем отмеченные в предыдущем примере контуры b, d, c, b ; a, b, c, a и a, d, c, a . В контуре b, d, c, b ветвью, не входящей в другие контуры, служит ветвь bd . В контуре a, b, c, a такой ветвью служит ветвь ab . И, наконец, в контуре a, d, c, a ветвью, не входящей в другие контуры, служит ветвь ad . Выбранные таким образом контуры являются независимыми. Направление обхода контуров примем направленным по ходу часовой стрелки.

Общее число уравнений, составляемых по первому и второму законам Кирхгофа, равно числу ветвей схемы, т. е. шести:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ab} - I_{bc} - I_{bd} = 0 \Rightarrow \text{узел } b, \\ I_{bc} - I_{cd} - I = 0 \Rightarrow \text{узел } c, \\ I_{ad} - I_{bd} - I_{cd} = 0 \Rightarrow \text{узел } d, \end{array} \right\} \Rightarrow \text{первый закон Кирхгофа,}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{bc}R_{bc} - I_{cd}R_{cd} - I_{bd}R_{bd} = 0 \Rightarrow \text{контур } b, d, c, b, \\ IR + I_{ab}R_{ab} + I_{bc}R_{bc} = E \Rightarrow \text{контур } a, b, c, a, \\ IR + I_{ad}R_{ad} + I_{cd}R_{cd} = E \Rightarrow \text{контур } a, d, c, a. \end{array} \right\} \Rightarrow \text{второй закон Кирхгофа.}$$

Решив полученную систему уравнений шестого порядка, получим искомые значения токов $I_{ab}, I_{bc}, I_{cd}, I_{ad}, I_{bd}, I$.

Баланс мощностей. На основании закона сохранения электрической энергии мощность, развиваемая источниками электрической энергии $P_{\text{и}}$, должна быть равна мощности, расходуемой в приемниках энергии $P_{\text{п}}$:

$$\sum P_{\text{и}} = \sum P_{\text{п}}$$

или

$$\sum_{j=1}^p E_j I_j = \sum_{j=1}^g R_j I_j^2.$$

Здесь $\sum_{j=1}^p E_j I_j$ – алгебраическая сумма мощностей источников (слагаемые положительны при совпадении направления действия ЭДС с направлением тока и отрицательны в противном случае); $\sum_{j=1}^g R_j I_j^2$ – арифметическая сумма тепловых потерь на резисторах.

Потенциальной диаграммой называется зависимость потенциала от сопротивления. Потенциальная диаграмма строится, как правило, для замкнутого контура электрической цепи. Построение потенциальной диаграммы требует определения разности потенциалов между определенными точками схемы электрической цепи. Для построения диаграммы потенциал одной из точек рассматриваемого контура принимается равным нулю. На участке электрической цепи между точками a и b с сопротивлением R_i и током I_i разность потенциалов равна падению напряжения, т. е.

$$\varphi_{ab} = I_i R_i.$$

Если участок цепи включает только ЭДС E_i , то разность потенциалов

$$\varphi_{ab} = E_i.$$

После определения потенциалов всех точек рассматриваемого контура строится потенциальная диаграмма. По оси сопротивлений R в масштабе откладываются величины всех сопротивлений, входящих в контур, по оси потенциалов – потенциалы, соответствующие каждой точке и каждому сопротивлению. Таким образом, получается некая ломаная линия, характеризующая изменение потенциала в контуре, причем потенциалы начальной и конечной точек должны быть одинаковы.

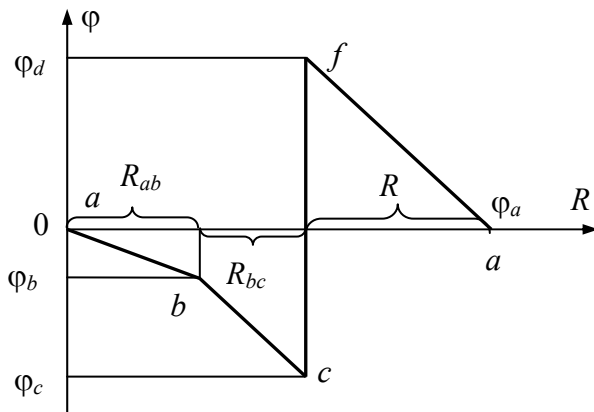
В качестве примера рассмотрим построение потенциальной диаграммы для контура $abcfa$ схемы, изображенной на рис. 1.3а, в предположении его обхода по ходу часовой стрелки. Условимся, что токи I_{ab} , I_{bc} и I в ветвях, входящих в этот контур, уже определены и соответствуют показанным на схеме направлениям. Величины сопротивлений и ЭДС также известны. Для построения потенциальной диаграммы (рис. 1.4) примем потенциал точки (узла) a равным нулю, т. е. $\varphi_a = 0$. Определим потенциалы остальных точек (узлов):

$$b: \quad \varphi_b = \varphi_a - I_{ab} R_{ab};$$

$$c: \quad \varphi_c = \varphi_b - I_{bc} R_{bc};$$

$$f: \quad \varphi_f = \varphi_c + E;$$

$$a: \quad \varphi_a = \varphi_f - IR.$$



Отложим в масштабе сопротивлений по оси абсцисс значения сопротивлений R_{ab} , R_{bc} и R (рис. 1.4), а по оси ординат – значения потенциалов, соответствующие этим сопротивлениям. Соединив полученные точки, мы получаем искомую ломаную линию, которая и носит название потенциальной диаграммы.

Оборудование

1. Лабораторный промышленный модуль 17Л-03.
2. Лабораторный стенд – схема электрической цепи для исследования законов Кирхгофа и изучения методов преобразования электрической цепи и непосредственного применения законов Кирхгофа.

Выполнение работы

На универсальном лабораторном модуле смонтирован стенд, содержащий электрическую цепь со сменными резистивными элементами, имеющими смешанное соединение (рис. 1.5). Постоянное напряжение на элементы электрической цепи подается от генератора напряжения (ГН2), имеющего два режима работы 0–12 В и 12–24 В, определяемые переключателем. Наличие такого генератора позволяет провести экспериментальные исследования по распределению токов в сложной электрической цепи и проверить их с теоретически полученными результатами. Напряжение генератора задается преподавателем после получения допуска к выполнению данной работы.

Установите в разъемы стенда резистивные элементы, соответствующие вашему варианту (табл. 1.1) или непосредственно заданные преподавателем.

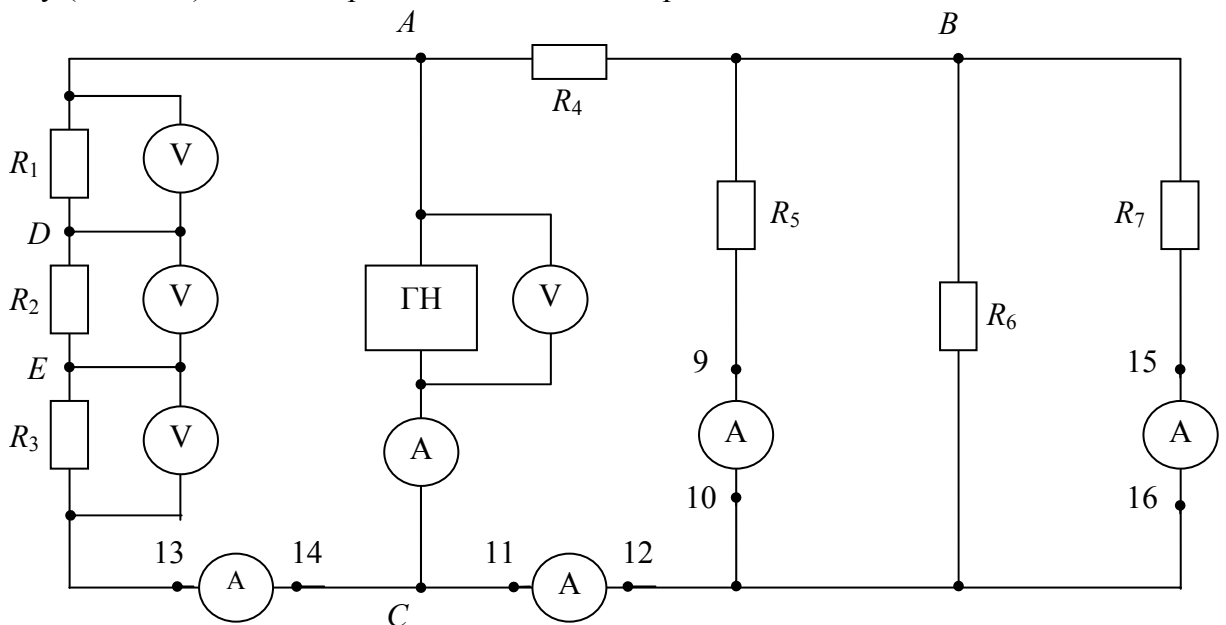


Рис. 1.5. Электрическая цепь лабораторного стенда

Таблица 1.1

Номера вариантов подключения резисторов

№ варианта	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	R_7 , Ом
1	51	100	150	100	1K	1K	510
2	100	200	100	150	910	510	1K
3	150	300	200	200	820	820	1,5K
4	51	200	150	100	680	750	2,0K
5	68	150	510	470	750	910	680
6	47	200	470	510	200	510	820
7	200	300	100	51	1,2K	2,2K	620

Исходные данные, соответствующие вашему варианту, занесите табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

E	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7

Теоретическая подготовка и расчеты

1. Изучите теорию методов расчета электрических цепей, порядок выполнения данной работы, ознакомьтесь с лабораторным стендом и электрической схемой цепи (рис. 1.4). Ответьте на контрольные вопросы и получите допуск у преподавателя на выполнение данной работы.

2. Проведите анализ схемы электрической цепи лабораторного стенда (рис. 1.5). Есть ли в этой схеме параллельно и последовательно соединенные резисторы? Сколько эта схема содержит ветвей (m), узлов (n), контуров и независимых контуров (N_k)?

3. Задайтесь условно-положительными направлениями токов ветвей и произвольно, по правилам их выбора, выберите независимые контуры. Обозначьте стрелками направления их условного обхода.

4. Применив метод эквивалентного преобразования электрической цепи, найдите токи в схеме электрической цепи постоянного тока (рис. 1.5) для исходных данных вашего варианта. Проверьте выполнение первого закона Кирхгофа для узлов электрической цепи. Найдите напряжение между узлами A , B и C .

5. Напишите необходимое и достаточное число уравнений для расчета данной схемы электрической цепи (рис. 1.5) методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Подставьте значения, найденные в предыдущем пункте токов, в эту систему уравнений. Проверьте, тождественны ли они. В случае выполнения тождеств на всех уравнениях найденные значения токов занесите в табл. 1.3 под буквой «Т» (теоретический). Рассчитайте падения напряжения на резистивных элементах и занесите их значения в табл. 1.4 (под буквой «Т»).

Таблица 1.3

Расчетные и экспериментальные значения токов
на элементах электрической цепи

$E, В$	$I_1(R_1)$		$I_2(R_2)$		$I_3(R_3)$		$I_4(R_4)$		$I_5(R_5)$		$I_6(R_6)$		$I_7(R_7)$	
	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э

Таблица 1.4

Расчетные и экспериментальные значения падений напряжений
на элементах электрической цепи

$E, В$	$U_1(R_1)$		$U_2(R_2)$		$U_3(R_3)$		$U_4(R_4)$		$U_5(R_5)$		$U_6(R_6)$		$U_7(R_7)$	
	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э

6. Покажите результаты всех ваших расчетов преподавателю и после их проверки вы допускаетесь к выполнению экспериментальной части работы.

7. Проверьте баланс мощности. Его результаты сведите в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Проверка баланса мощности

Мощность, Вт	Участок цепи								Цепь в целом
	$A-C$	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	
источника		—	—	—	—	—	—	—	
потребителя	—								

8. Для внешнего контура электрической цепи проведите построение потенциальной диаграммы. Потенциал точки A схемы примите равным нулю. Заполните табл. 1.6, проведя обход внешнего контура против хода часовой стрелки.

Таблица 1.6

Потенциалы точек внешнего контура

Показатель	Точка электрической цепи					
	A	$D(R_1)$	$F(R_2)$	$C(R_3)$	$B(R_7)$	$A(R_4)$
Сопротивление между точками цепи	0					
Потенциал точки φ , В	0					0

Примечание: п. 7 и 8 можно выполнить в домашних условиях при подготовке отчета о лабораторной работе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с лабораторным блоком 17Л-03, найдите необходимые для выполнения работы блоки, регуляторы, гнезда, проведите подготовку электрической цепи к выполнению экспериментов.

1.1. Установите прибор АВ2 в положение 50 мА, а переключатель АВ2/МВА переведите в верхнее положение. Подключите этот прибор к гнездам 13–14 схемы, соблюдая полярность.

1.2. Переведите переключатель 0–12/12–24 В блока ГН2 в положение, соответствующее вашему заданию.

1.3. В блоке контроля напряжения модулей (правый нижний измерительный модуль) переведите переключатель f_x/f_z в нижнее положение.

1.4. Нижний правый переключатель этого прибора установите в положение 25 В ГН2.

1.5. Установите прибор АВ1 в положение 50 мА, а переключатель АВ1/АВ0 в верхнее положение.

1.6. Подключите прибор АВ1 к гнездам 11–12, строго соблюдая полярность. Установите перемычки из коротких проводов в гнездах 9–10, 15–16.

2. Под контролем преподавателя или лаборанта включите стенд. Измерение напряжений и токов необходимо производить строго под контролем преподавателя или лаборанта. Вольтметр подключается только параллельно сопротивлениям, миллиамперметр – только последовательно. Зная напряжения и токи на участках цепи из теоретических расчетов, определяйте пределы измерений приборов заранее и не позволяйте приборам зашкаливать.

2.1. Подайте напряжения согласно вашей расчетной части от 0 до 12 или от 12 до 24 В от источника напряжения ГН2.

2.2. Произведите измерение напряжений, а затем и токов на всех участках электрической цепи.

2.3. Результаты измерений занесите в табл. 1.3 и 1.4 под буквой «Э» (эксперимент).

Контрольные вопросы

1. Дайте определение ветви, узла и контура для схемы электрической цепи.

2. По каким правилам производится нанесение токов на схему замещения электрической цепи?

3. Что означает знак «минус», полученный в результате расчета токов?

4. Сформулируйте и запишите закон Ома для участка цепи и для замкнутого контура.

5. Какие соединения называются последовательными и параллельными? Как определить эквивалентные сопротивления при таких соединениях элементов?

6. Приведите основные условия и формулы эквивалентного преобразования треугольника сопротивлений в звезду сопротивлений и наоборот.

7. В чем заключается суть расчета электрических цепей с применением метода преобразования (свертывания)?

8. Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа, приведите примеры их написания для схемы (рис. 1.5).

9. Что такое независимый контур? Каким образом можно найти их число для любой схемы электрической цепи?

10. Перечислите известные вам методы расчета линейных электрических цепей.

11. Поясните, что такое потенциальная диаграмма и для каких целей она предназначена.

12. Что такое баланс мощности? Напишите выражения баланса мощности для электрической цепи с одним источником питания и семью резисторами.

13. В цепи действует несколько источников питания. Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные – в режиме потребителя. По какому признаку определяется режим работы тех и других источников питания?

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.
3. Расчетные формулы и подробный процесс определения токов с применением методов:
 - преобразования электрической цепи;
 - непосредственного применения законов Кирхгофа.
4. Таблицы с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных, формы которых приведены в данном описании.
5. Расчет баланса мощности и соответствующую ему таблицу.
6. Таблицу потенциалов и потенциальную диаграмму на миллиметровке.
7. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Методы расчета электрических цепей

Метод контурных токов

Принцип наложения

Метод наложения

Цель работы

1. Изучение методики расчета электрических цепей методом контурных токов.
2. Экспериментальная проверка работоспособности методов контурных токов и наложения.
3. Проверка принципа наложения опытным путем.
4. Освоение методики расчета электрических цепей методом наложения.

Краткие теоретические сведения

Расчет сложных электрических цепей при наличии двух и более источников питания выполняется специальными методами. Одним из основных является **метод контурных токов**. Этот метод позволяет сократить число уравнений, по сравнению с методом непосредственного применения законов Кирхгофа, до числа так называемых независимых контуров. Напомним, *независимый контур* – это контур, в котором хотя бы одна ветвь не входит в другие, выбранные вами контуры. Число независимых контуров N_k для любой сколь угодно сложной схемы электрической цепи определяется простым выражением:

$$N_k = m - n + 1,$$

где m и n – соответственно число ветвей и узлов схемы.

Для понимания данного метода введем несколько понятий.

Контурный ток – некий условный (воображаемый) ток, замыкающийся только по своему независимому контуру, неизменный по величине для всех ветвей, входящих в контур; его обозначения I_{11} , I_{22} , I_{33} и т. д.

Собственное сопротивление контура – арифметическая сумма сопротивлений, входящих в независимый контур; его обозначения R_{11}, R_{22}, R_{33} и т. д.

Взаимные или смежные сопротивления – сопротивления между независимыми контурами; их обозначения $R_{12}, R_{21}, R_{13}, R_{31}$ и т. д.

Собственные контурные ЭДС – алгебраическая сумма ЭДС, входящих в независимый контур; их обозначения E_{11}, E_{22}, E_{33} и т. д.

При применении этого метода для расчета электрических цепей выбирают независимые контуры и произвольно обозначают в них направление контурных токов. При этом по любой ветви должен проходить хотя бы один выбранный контурный ток. Затем для каждого независимого контура записываются уравнения второго закона Кирхгофа. В эти уравнения должны входить только выбранные вами контурные токи. Если бы i -й независимый контур не был бы электрически связан с другими контурами, то второй закон Кирхгофа для него имел бы простой вид:

$$I_{ii}R_{ii} = E_{ii}.$$

Для учета влияния смежных с i -м контуром k -х контуров последнее уравнение должно быть дополнено слагаемыми падений напряжений на взаимных (смежных) сопротивлениях: $I_{ik}R_{ik}$. Причем, если падение напряжения $I_{ik}R_{ik}$ совпадает с таковым при действии контурного тока в рассматриваемом i -м независимом контуре, то оно учитывается со знаком «+», в противном случае берется знак «–». Таким образом, уравнения для i -го контура в общем виде можно представить в виде:

$$I_{ii}R_{ii} + I_{ik}R_{ik} = E_{ii}.$$

Уравнения по второму закону Кирхгофа для выбранных независимых контуров в общем виде представляются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{12} + \dots + R_{1i}I_{ii} + \dots + R_{1k}I_{kk} &= E_{11}, \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + \dots + R_{2i}I_{ii} + \dots + R_{2k}I_{kk} &= E_{22}, \\ \dots \\ R_{j1}I_{11} + R_{j2}I_{22} + \dots + R_{ji}I_{ii} + \dots + R_{jk}I_{kk} &= E_{jj}, \\ \dots \\ R_{k1}I_{11} + R_{k2}I_{22} + \dots + R_{ki}I_{ii} + \dots + R_{kk}I_{kk} &= E_{kk}. \end{aligned} \right\}$$

Решение системы уравнений, составленной для контурных токов, позволяет определить некие контурные, условные токи. Цель же расчета любым методом (и методом контурных токов в частности) состоит в определении истинных токов в ветвях расчетной схемы замещения электрической цепи. Эти токи в каждой ветви находятся как алгебраическая сумма всех контурных токов, протекающих через рассматриваемую ветвь. В соответствии с определением независимого контура найденные при решении системы уравнений контурные токи всегда будут равны токам ветвей, не входящих в другие контуры. Направление тока будет зависеть от совпадения или несовпадения его с выбранным направлением обхода контурного тока. Токи в остальных ветвях расчетной схемы легко определяются по первому закону Кирхгофа.

Пример 2.1. Для цепи схемы (рис. 2.1), пользуясь методом контурных токов, определить токи, если известны ЭДС и номиналы всех резисторов.

Решение.

1. Топологический анализ: схема содержит ветвей $m = 6$ и узлов $n = 4$. Значит, число независимых контуров $N_k = m - n + 1$ равно трем. По известным правилам выберем независимые контуры (обозначены на схеме). Контуры независимы, т. к. в первом контуре ветвь с током I_5 не входит в другие контуры, во втором такой ветвью является ветвь с током I_1 и в третьем – с током I_2 .

2. Зададимся условно-положительными направлениями токов ветвей $I_1, I_2, \dots, I_6$ и контурных токов I_{11} в контуре 1, I_{22} в контуре 2 и I_{33} в контуре 3 и определим собственные сопротивления контуров:

$$R_{11} = R_4 + R_5 + R_6 + R_8 \text{ Ом};$$

$$R_{22} = R_1 + R_3 + R_6 + R_8 \text{ Ом};$$

$$R_{33} = R_2 + R_4 + R_3 + R_7 \text{ Ом}.$$

3. Определим взаимные сопротивления контуров:

$$R_{12} = R_{21} = R_6 + R_8 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_{31} = -R_4 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = R_{32} = R_3 \text{ Ом}.$$

Знак « $\rightarrow$ » у сопротивлений означает, что контурные токи смежных контуров, проходящие через эти сопротивления, направлены навстречу друг другу.

5. Контурные ЭДС равны $E_{11} = 0 \text{ В}$; $E_{22} = E_1 \text{ В}$; $E_{33} = E_2 \text{ В}$.

6. Система уравнений в контурных токах и уравнения с учетом значений собственных и взаимных сопротивлений и контурных ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} &= E_{11}, \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} &= E_{22}, \\ R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} &= E_{33}. \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} (R_4 + R_5 + R_6 + R_8)I_{11} + (R_6 + R_8)I_{22} - R_4I_{33} &= 0, \\ (R_6 + R_8)I_{11} + (R_1 + R_3 + R_6 + R_8)I_{22} + R_3I_{33} &= E_1, \\ -R_4I_{11} + R_3I_{22} + (R_4 + R_5 + R_6 + R_8)I_{33} &= E_2. \end{aligned} \right\}$$

7. Решив эту систему, получим значения контурных токов: I_{11} ; I_{22} ; I_{33} .

8. Токи независимых ветвей выбранных контуров: $I_1 = I_{22}$; $I_2 = I_{33}$; $I_5 = I_{11}$. Остальные токи – по первому закону Кирхгофа:

$$I_3 = -I_{22} - I_{33} = -I_1 - I_2;$$

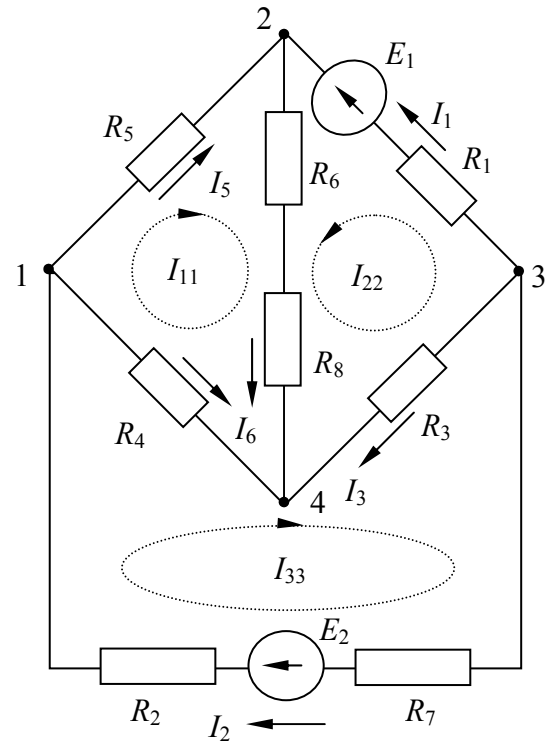


Рис. 2.1. Схема электрической цепи

$$I_4 = I_{33} - I_{11} = I_2 - I_5;$$

$$I_6 = I_{11} + I_{22} = I_5 + I_1.$$

Другим методом расчета электрических цепей является **метод наложения**. Он основан на *принципе наложения*. Суть этого принципа состоит в том, что искомые токи ветвей сложной электрической цепи с несколькими источниками ЭДС равны алгебраической сумме токов, порождаемых в этих ветвях действием каждой ЭДС в отдельности. Таким образом, искомые токи в ветвях являются результатом наложения токов, получаемых от действия отдельных источников ЭДС. Расчет электрической цепи методом наложения производят в следующем порядке:

- 1) в исходной цепи поочередно оставляют только по одному источнику питания (ЭДС), тем самым заменяя исходную схему несколькими эквивалентными (в сумме);
- 2) используя метод эквивалентного преобразования цепей или любой другой метод, рассчитывают токи всех ветвей от действия каждой ЭДС в отдельности;
- 3) определяют токи в исходной схеме алгебраическим (с учетом их направлений) суммированием (наложением) соответствующих токов расчетных схем с одним источником ЭДС.

Этот метод эффективен при расчете цепей, содержащих небольшое число источников ЭДС.

Пример 2.2. Определить токи в ветвях схемы предыдущего примера (рис. 2.1), но пользуясь принципом наложения.

Решение.

1. Оставим те же условно-положительные направления токов в ветвях, что и при решении задачи методом контурных токов (рис. 2.1).
2. Рассчитаем токи от действия ЭДС E_1 , исключив источник ЭДС E_2 (схема рис. 2.2a). Цепь с одним источником, поэтому можно применить метод свертывания. Сопротивления R_2 , R_7 и R_6 , R_8 соединены последовательно, поэтому

$$R_{27} = R_2 + R_7;$$

$$R_{68} = R_6 + R_8.$$

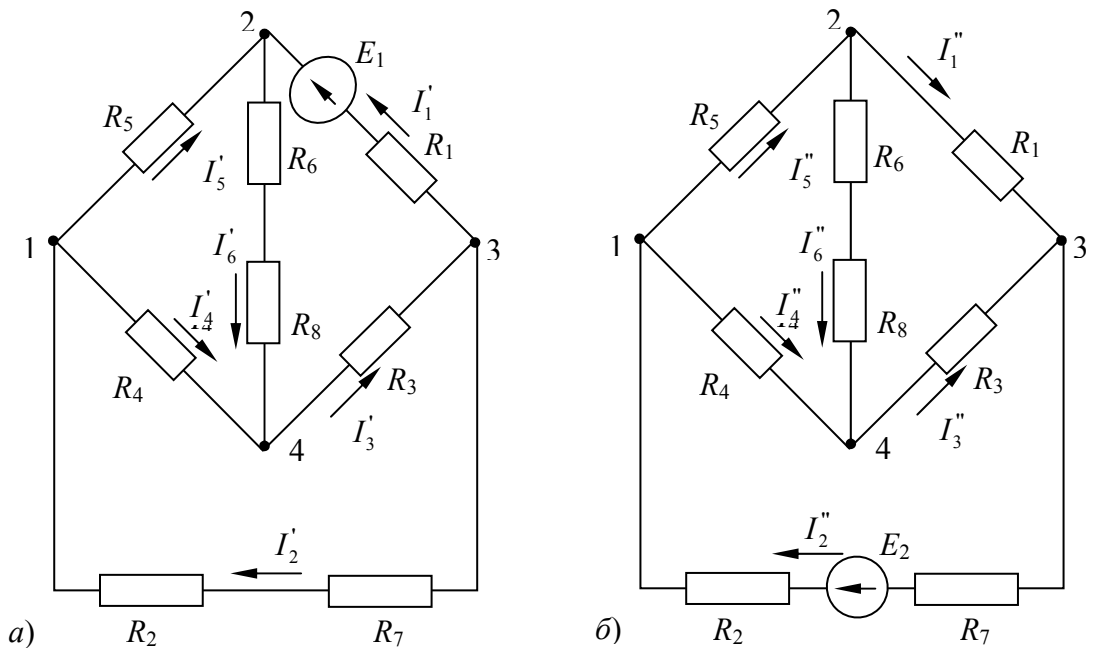


Рис. 2.2. Схема электрической

Преобразуем треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_{68} в эквивалентную звезду сопротивлений R_{45}, R_{468}, R_{568} :

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5 + R_{68}};$$

$$R_{468} = \frac{R_4 R_{68}}{R_4 + R_5 + R_{68}};$$

$$R_{568} = \frac{R_5 R_{68}}{R_4 + R_5 + R_{68}}.$$

После таких преобразований схема электрической цепи значительно упрощается, в ней остаются только последовательно-параллельные участки.

Эквивалентное сопротивление цепи R'_3 равно:

$$R'_3 = R_1 + R_{568} + \frac{(R_{27} + R_{45})(R_3 + R_{468})}{R_{27} + R_{45} + R_3 + R_{468}}.$$

Ток I'_1 от действия ЭДС $E_1 \Rightarrow I'_1 = E_1 R'_3$. Токи $I'_2, I'_3, I'_3, I'_4, I'_5, I'_6$ в остальных ветвях схемы рис. 2.2a находятся путем обратного «разворачивания» схемы и здесь не приводится.

3. Рассчитаем токи от действия ЭДС E_2 , исключив источник ЭДС E_1 (схема рис. 2.2б). Аналогично предыдущему пункту преобразуем тот же самый треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_{68} в эквивалентную звезду сопротивлений R_{45}, R_{468}, R_{568} и определим эквивалентное сопротивление R'_3 :

$$R_9'' = R_2 + R_7 + R_{45} + \frac{(R_1 + R_{568})(R_3 + R_{468})}{R_1 + R_{568} + R_3 + R_{468}}.$$

Ток I_2' от действия ЭДС $E_2 \Rightarrow I_2'' = E_1 / R_9''$. Токи I_1'' , I_3'' , I_4'' , I_5'' , I_6'' в остальных ветвях схемы рис. 2б находятся известными способами.

4. Проведем наложение режимов и определим токи в ветвях:

$$I_1 = I_1' - I_1''; \quad I_2 = I_2' + I_2'';$$

$$I_3 = -I_3' - I_3''; \quad I_4 = I_4' + I_4'';$$

$$I_5 = -I_5' + I_5''; \quad I_6 = I_6' + I_6''.$$

При наложении токов частичные токи берутся со знаком «+», если они совпадают с условно-положительными направлениями исходной схемы, и со знаком «-» в противном случае.

Оборудование

1. Лабораторный стенд.
2. Цифровые мультиметры М832 – 2 шт.
3. Источники ЭДС – 4 шт.

Выполнение работы

На лабораторном стенде представлена схема электрической цепи (рис. 2.3), включающая в себя два источника ЭДС и шесть резистивных элементов, номиналы которых можно легко прочесть, т. к. надписи на сопротивлениях обращены к студенту. Буква E в обозначении означает [Ом]. Например, при надписи $51E$ сопротивление резистора равно 51 Ом, при надписи $2K$ сопротивление резистора 2 кОм = 2000 Ом. Выпишите номиналы резисторов в табл. 2.1.

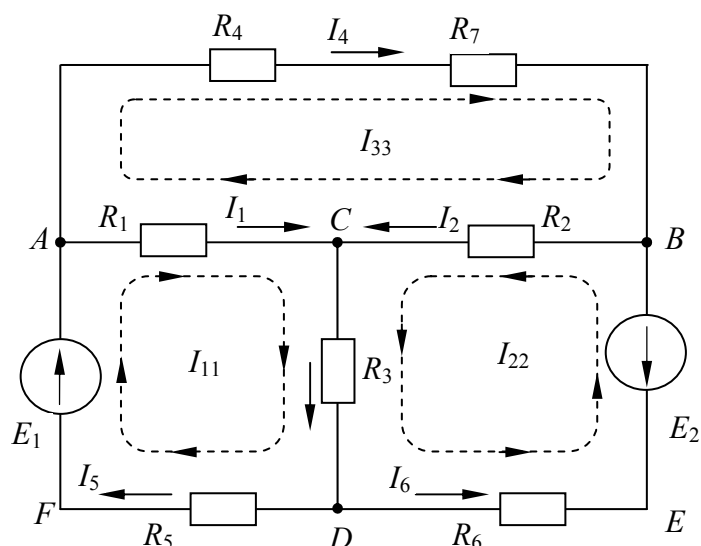


Рис. 2.3. Схема стенда для исследования электрических цепей постоянного тока

Таблица 2.1

Исходные данные к расчетной схеме (рис. 2.3)

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$	$R_7, \text{Ом}$

Стенд включает в себя четыре независимых источника ЭДС постоянного тока (банки аккумулятора), выводы которых представлены на правой стороне стенда и обозначены E_1 , E_2 , E_3 и E_4 . Установите измерительный прибор М832 в режим измерения напряжения DCU – 20 В и под контролем преподавателя или лаборанта измерьте величины двух ЭДС, соответствующих вашему варианту в табл. 2.2, или непосредственно заданных преподавателем. Обратите внимание на полярность включения ЭДС. Обратное включение ЭДС означает изменение ее полярности (стрелки на стенде).

Таблица 2.2

Номера вариантов подключения ЭДС

	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ЭДС E_1	пр. – E_1	пр. – E_2	пр. – E_3	пр. – E_1	обр. – E_2	обр. – E_3	обр. – E_1	обр. – E_3
ЭДС E_2	пр. – E_2	пр. – E_3	пр. – E_4	пр. – E_4	пр. – E_3	обр. – E_4	пр. – E_2	обр. – E_2

Примечание: прямое (пр.) – направление стрелок в обозначении ЭДС схемы замещения и источника питания совпадают, обратное (обр.) – в противном случае.

Теоретическая подготовка и расчеты

1. Изучите теорию методов расчета электрических цепей, порядок выполнения данной работы, ознакомьтесь с лабораторным стендом и электрической схемой цепи (рис. 2.3). Ответьте на контрольные вопросы и получите допуск у преподавателя на выполнение данной работы.

2. Проведите топологический анализ схемы электрической цепи лабораторного стенда (рис. 2.3). Сколько в этой схеме замещения ветвей (m), узлов (n), контуров и независимых контуров (N_k)?

3. Задайтесь условно-положительными направлениями токов ветвей $I_1, I_2, I_3, \dots, I_6$ и произвольно выберите независимые контуры, обозначив стрелками направления условных контурных токов в них I_{11}, I_{22}, I_{33} , как показано на рис. 2.3.

4. Для заданной преподавателем полярности подключения ЭДС (направление стрелки) напишите систему уравнений, составленную по методу контурных токов. Подставьте в нее значения рассчитанных вами собственных и взаимных сопротивлений и контурных ЭДС. Покажите систему уравнений преподавателю. В случае правильности написания системы уравнений решите ее относительно неизвестных и определите контурные токи.

5. По величинам условных контурных токов определите истинные токи в ветвях схемы (рис. 2.3). Результаты расчетов занесите в табл. 2.3 под буквой «Р» (расчет).

Таблица 2.3

Расчетные и экспериментальные значения токов
в ветвях электрической цепи (рис. 2.3)

Методы расчета	Расчетные и экспериментальные значения токов											
	I_1		I_2		I_3		I_4		I_5		I_6	
	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э
контурных токов												
наложения, в целом												
– от действия ЭДС E_1												
– от действия ЭДС E_2												

6. По значениям токов ветвей определите падение напряжения на каждом из шести резистивных элементах схемы электрической цепи. Результаты расчетов занесите в табл. 2.4 под буквой «Р».

7. Покажите результаты всех ваших расчетов преподавателю и после их проверки вы допускаетесь к выполнению экспериментальной части работы.

8. Проведите расчет токов схемы рис. 2.3, используя метод наложения, т. е. поочередно исключая одну из ЭДС. Результаты расчетов при действии только одной из ЭДС занесите в табл. 2.3. В этой же таблице покажите истинный (суммарный от действия ЭДС1 и ЭДС2). Результаты расчетов падений напряжений на резисторах от действия каждой ЭДС в отдельности и в целом занесите в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Расчетные и экспериментальные значения падений напряжений
на резистивных элементах электрической цепи (рис. 2.3)

Методы расчета	Падение напряжения U_R, B на участке электрической цепи											
	$U_{R1} - AC$		$U_{R2} - CB$		$U_{R3} - CD$		$U_{R4, R7} - AB$		$U_{R5} - DF$		$U_{R6} - DE$	
	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э
контурных токов												
наложения, в целом												
– от действия ЭДС E_1												
– от действия ЭДС E_2												

9. Результаты выполненного вами баланса мощностей сведите в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Проверка баланса мощности

Мощность, Вт	Участок цепи						Цепь в целом
	<i>A-B</i>	<i>A-C</i>	<i>A-D</i>	<i>B-C</i>	<i>B-D</i>	<i>C-D</i>	
источника	–	–		–		–	
потребителя							

10. Для построения потенциальной диаграммы заполните табл. 2.6.

Таблица 2.6

Потенциалы точек внешнего контура

Показатель	Точка электрической цепи					
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>A</i>
Сопротивление между точками цепи						
Потенциал точки φ , В						

Примечание: п. 8, 9 и 10 можно выполнить в домашних условиях при подготовке отчета о лабораторной работе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с лабораторным стендом и по варианту вашего задания соедините проводами гнезда источников питания (с правой стороны стенда) с гнездами ЭДС лабораторного стенда.

2. Подготовьте измерительный прибор М832 к работе. Установите переключатель в режим измерения напряжения DCU – 20 В и под контролем преподавателя или лаборанта измерьте напряжение на резисторах для трех режимов:

- при действии обеих ЭДС;
- при действии только первой ЭДС при закороченной второй;
- при действии только второй ЭДС при закороченной первой.

3. Результаты измерений падений напряжений занесите в табл. 2.4 под буквой «Э».

4. По закону Ома определите ток в каждой ветви схемы электрической цепи лабораторного стенда. Результаты занесите в табл. 2.3 под с буквой «Э».

Контрольные вопросы

1. По каким правилам производится нанесение токов на схему замещения электрической цепи?

2. Что означает знак «минус», полученный в результате расчета токов?

3. Дайте определение собственного и взаимного сопротивлений, контурного тока и контурной ЭДС.

4. Что такое независимый контур и каким образом можно найти их число для любой схемы электрической цепи?

5. Каким образом определяются истинные токи в ветвях схемы по найденным величинам контурных токов?

6. Перечислите известные вам методы расчета линейных электрических цепей.

7. Поясните, что такое потенциальная диаграмма и для каких целей она строится.

8. Что такое баланс мощности? Напишите выражения баланса мощности для электрической цепи с тремя источниками питания и четырьмя резисторами.

9. В цепи действует несколько источников питания. Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные – в режиме потребителя. По какому признаку определяется режим работы тех и других источников питания?

10. Изложите сущность расчета цепей с помощью применения метода контурных токов. Приведите пример с числом узлов не менее двух.

11. В чем состоит принцип наложения?

12. Изложите сущность расчета цепей с помощью применения метода наложения. Приведите пример.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.
3. Расчетные формулы и подробный процесс определения токов с применением методов:
 - контурных токов;
 - наложения.
4. Таблицы с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных, формы которых приведены в данном описании.
5. Расчет баланса мощности и соответствующую ему таблицу.
6. Таблицу потенциалов и потенциальную диаграмму на миллиметровке.
7. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Методы расчета электрических цепей Метод узловых напряжений (двух узлов) Метод эквивалентного генератора

Цель работы

1. Изучение метода узловых напряжений (метода двух узлов) электрической цепи и его экспериментальная проверка.
2. Изучение метода эквивалентного источника (генератора) для расчета электрической цепи постоянного тока и его экспериментальная проверка.

Краткие теоретические сведения

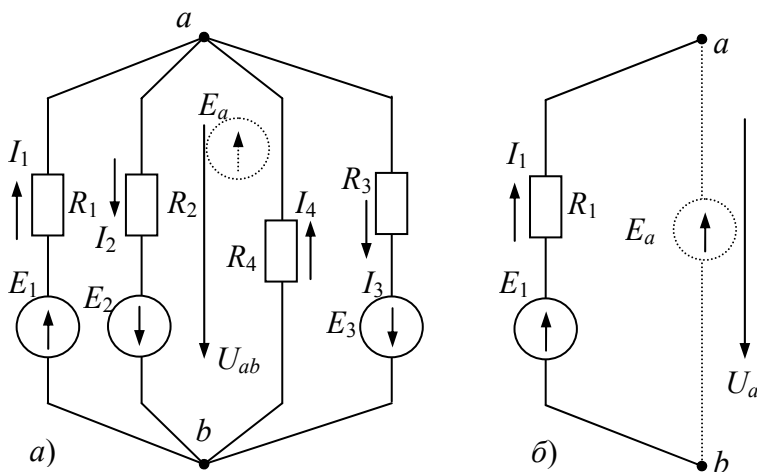


Рис. 3.1. Сложная схема
с несколькими источниками питания

Метод двух узлов применяется для расчета электрических цепей, имеющих два узла, между которыми включены активные и пассивные ветви (рис. 3.1). Идея метода состоит в определении по расчетной формуле напряжения U_{ab} между узлами a и b . Вывод этой формулы приведен ниже. Знание напряжения U_{ab} позволяет по закону Ома (или по второму закону Кирхгофа) для замкнутого контура определить искомые токи в ветвях расчетной схемы электрической цепи. На рис. 3.1б для примера показан один из замкнутых контуров, позволяющий определить ток I_1 . Аналогично определяются и другие токи в контурах:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 - E_{ab}}{R_1} = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = G_1(E_1 - U_{ab}), \\ I_2 &= \frac{E_2 + E_{ab}}{R_2} = \frac{E_2 + U_{ab}}{R_2} = G_2(E_2 + U_{ab}), \\ I_3 &= \frac{E_3 + E_{ab}}{R_3} = \frac{E_3 + U_{ab}}{R_3} = G_3(E_3 + U_{ab}), \\ I_4 &= \frac{0 - E_{ab}}{R_4} = -\frac{U_{ab}}{R_4} = -G_4 U_{ab}, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $G_1 = 1/R_1$; $G_2 = 1/R_2$; $G_3 = 1/R_3$; $G_4 = 1/R_4$ – проводимости ветвей.

Запишем первый закон Кирхгофа для узла «а»:

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 = 0.$$

Подставив в это уравнение токи из уравнений (3.1), получим уравнение

$$G_1 E_1 - G_1 U_{ab} - G_2 E_2 - G_2 U_{ab} - G_3 E_3 - G_3 U_{ab} - G_4 U_{ab} = 0,$$

решив которое, получим искомое напряжение между узлами a и b :

$$U_{ab} = \frac{E_1 G_1 - E_2 G_2 - E_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}.$$

Как видно из этого выражения, числитель представляет собой алгебраическую сумму произведений ЭДС и проводимостей всех ветвей, причем знак «+» у слагаемых берется в случае, когда направление ЭДС от узла b к узлу a , и знак «-» в противном случае. Знак не зависит от выбранных направлений токов. Если в i -й ветви нет ЭДС, то произведение $E_i G_i$ принимается равным нулю. Знаменатель включает в себя арифметическую сумму проводимостей всех ветвей, соединяющих два узла. Токи в ветвях схемы находятся по выражениям (3.1).

Формула определения напряжения для любой схемы электрической цепи, включающей в себя два узла, в общем случае имеет вид:

$$U_{ab} = \frac{E_1 G_1 \pm E_2 G_2 \pm \dots \pm E_n G_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_m} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i E_i)}{\sum_{k=1}^m G_k}. \quad (3.2)$$

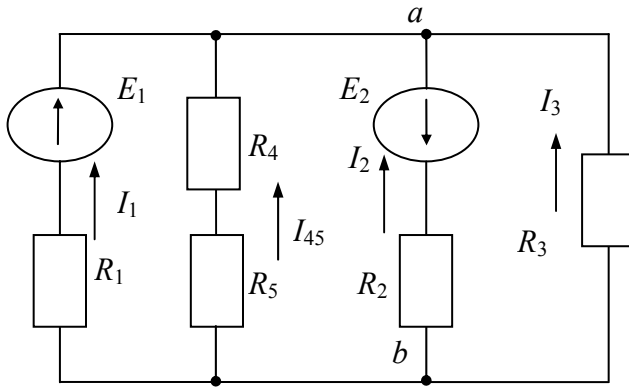


Рис. 3.2. Схема электрической цепи, содержащая несколько источников ЭДС

Пример 3.1. Используя метод узловых уравнений (метод двух узлов), определить токи в ветвях схемы электрической цепи (рис. 3.2).

Решение. Проведем топологический анализ схемы. Схема содержит четыре ветви ($m = 4$) и два узла ($n = 2$). Поэтому возможно прямое применение метода двух узлов. Определим проводимости ветвей: $G_1 = 1/R_1$ См; $G_2 = 1/R_2$ См; $G_3 = 1/R_3$ См; $G_{45} = 1/(R_4 + R_5)$ См.

По выражению (3.2) найдем напряжение между узлами a и b :

$$U_{ab} = \frac{E_1 G_1 - E_2 G_2}{G_1 + G_2 + G_3 + G_{45}}, \text{ В.}$$

Токи в ветвях электрической цепи по закону Ома:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = (E_1 - U_{ab})G_1, \text{ А;}$$

$$I_2 = \frac{-E_2 - U_{ab}}{R_2} = -(E_2 - U_{ab})G_2, \text{ А;}$$

$$I_3 = -\frac{U_{ab}}{R_3} = -U_{ab}G_3, \text{ А;}$$

$$I_{45} = -\frac{U_{ab}}{(R_4 + R_5)} = -U_{ab}G_{45}, \text{ А.}$$

Знак « $-$ » у токов I_2 , I_3 и I_{45} указывает на то, что направление этих токов выбрано не верно, т. е. от узла с меньшим потенциалом (узел b) к узлу с большим потенциалом (узел a).

Метод эквивалентного генератора. Его применение целесообразно для определения тока в какой-либо одной ветви сложной электрической цепи, параметры которой могут часто изменяться (например, переменное сопротивление). Согласно этому методу воздействие всех источников сложной электрической цепи, так называемого активного двухполюсника, на исследуемую ветвь можно заменить воздействием последовательно соединенных с ветвью эквивалентного генератора (источника), имеющего ЭДС E_3 , эквивалентного (внутреннего) сопротивления R_3 . Таким образом, активный двухполюсник A (рис. 3.3а) по отношению к ветви с сопротивлением R заменяется эквивалентным источником с ЭДС E_3 и внутренним сопротивлением R_3 (рис. 3.3з).

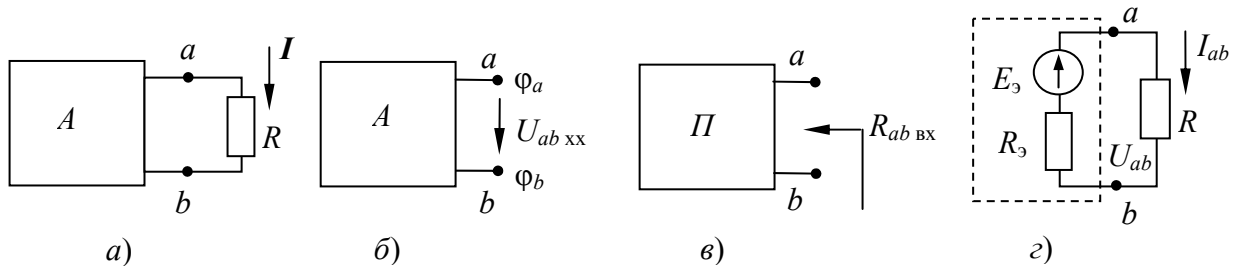


Рис. 3.3. Преобразование схемы в методе эквивалентного источника

Не приводя здесь доказательства правомочности этого метода, определим для себя порядок расчета.

1. Для определения ЭДС E_3 размыкают зажимы ab (рис. 3.3б) и для оставшейся схемы любым известным вам методом определяют напряжение $U_{ab\text{ xx}}$, называемое напряжением холостого хода:

$$U_{ab\text{ xx}} = E_3 = \varphi_a - \varphi_b.$$

2. Для нахождения сопротивления R_3 закорачивают все источники ЭДС в активном двухполюснике. Он становится пассивным двухполюсником Π (рис. 3.3в), и для него определяют входное сопротивление по отношению к зажимам ab : $R_{ab\text{ вх}} = R_3$, т. е. внутреннее сопротивление эквивалентного источника.

3. Ток в искомой ветви схемы (рис. 3.3г), имеющей сопротивление R , определяют по закону Ома для участка цепи:

$$I = E_3 / (R_3 + R).$$

Пример 3.2. Для схемы цепи (рис. 3.4) методом эквивалентного источника ЭДС найти ток в ветви резистора, сопротивление которого R_1 .

Решение. Укажем на схеме положительное направление искомого тока I_1 (рис. 3.4а). Рассмотрим часть схемы, подключенную к исследуемой первой ветви (обведенную пунктирной линией). Определим параметры источника ЭДС E_3 и сопротивления R_3 (рис. 3.4б).

Определим напряжение $U_{ab \text{ xx}}$ (рис. 3.4б). Для этого определим токи для схемы рис. 3.4б методом преобразования (свертывания). Сопротивления R_4 и R_5 соединены последовательно. Эквивалентное сопротивление:

$$R_{45} = R_4 + R_5.$$

Сопротивления R_{45} и R_3 соединены параллельно. Их эквивалентное сопротивление:

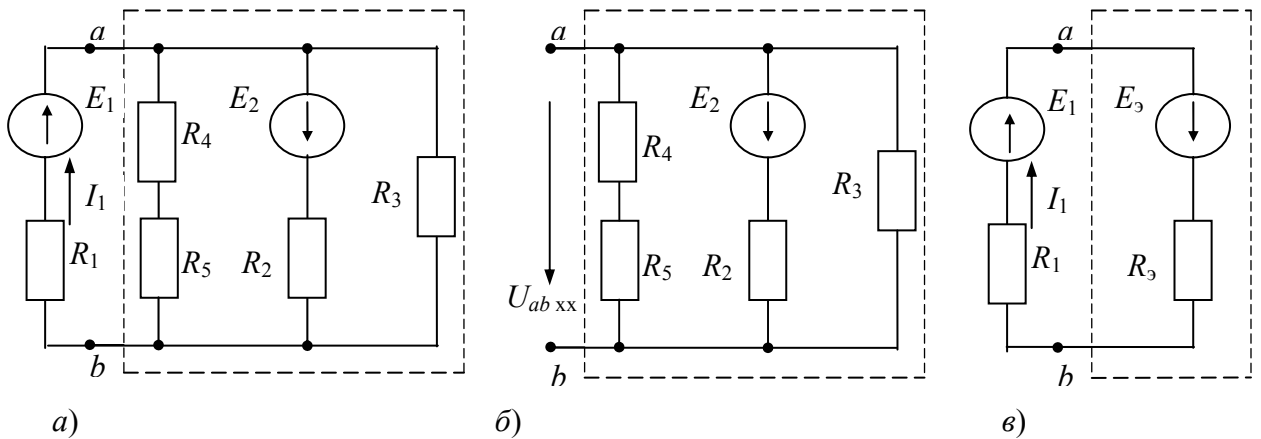


Рис. 3.4. Исходная схема и схемы преобразования при методе эквивалентного источника

$$R_{345} = \frac{R_{45} R_3}{R_{45} + R_3}.$$

Эквивалентное сопротивление всей цепи:

$$R_{2345} = R_2 + R_{345}.$$

Ток в ветви с ЭДС E_2 :

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{2345}}, \text{ A};$$

ЭДС эквивалентного источника:

$$E_3 = U_{ab \text{ xx}} = R_{345} I_2, \text{ B}.$$

Определим входное сопротивление R_3 (рис. 3.4в):

$$R_{\text{вх}} = R_3 = \frac{R_2 R_3 + R_2 (R_4 + R_5) + R_3 (R_4 + R_5)}{R_2 + R_3 + R_4 + R_5}, \text{ Ом}.$$

По закону Ома найдем искомый ток (рис. 3.4в):

$$I_1 = \frac{E_3 + E_1}{R_3 + R_1}, \text{ А.}$$

Оборудование

1. Лабораторный стенд.
2. Цифровые мультиметры М832 – 2 шт.
3. Источники ЭДС – 4 шт.

Выполнение работы

На лабораторном стенде представлена схема электрической цепи (рис. 3.5), включающая в себя четыре источника ЭДС, включение которых можно варьировать, и пять резистивных элементов, номиналы которых можно легко прочесть, т. к. надписи на сопротивлениях обращены к студенту. Буква E в обозначении означает [Ом]. Например, при надписи $51E$ сопротивление резистора равно 51 Ом, при надписи $2K$ сопротивление резистора 2 кОм = 2000 Ом. Выпишите номиналы резисторов в табл. 3.1.

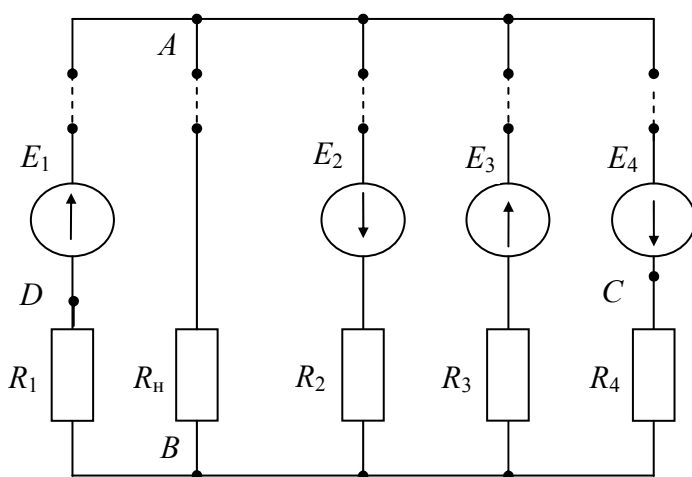


Рис. 3.5. Схема лабораторного стенда

Таблица 3.1

Исходные данные к расчетной схеме (рис. 3.5)

$E_1, \text{ В}$	$E_2, \text{ В}$	$E_3, \text{ В}$	$E_4, \text{ В}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_n, \text{ Ом}$

Стенд включает в себя четыре независимых источника ЭДС постоянного тока (банки аккумулятора), выводы которых представлены на правой стороне стенда и обозначены E_1 , E_2 , E_3 и E_4 . Установите измерительный прибор М832 в режим измерения напряжения DCU – 20 В и под контролем преподавателя или лаборанта измерьте величины всех ЭДС, соответствующих вашему варианту (см. табл. 3.2), или заданных непосредственно преподавателем. Обратите внимание на полярность включения ЭДС. Обратное включение ЭДС означает изменение ее полярности (стрелки на стенде).

Таблица 3.2

Номера вариантов подключения резисторов

№ варианта	E_1	E_2	E_3	E_4	Метод решения	Метод проверки
1	нет	пр.	обр.	пр.	двух узлов	эквивалент источника
2	нет	обр.	пр.	пр.	эквивалент источника	двух узлов
3	нет	пр.	обр.	пр.	эквивалент источника	двух узлов
4	обр.	нет	пр.	пр.	двух узлов	эквивалент источника
5	пр.	нет	пр.	обр.	двух узлов	эквивалент источника
6	обр.	пр.	обр.	нет	эквивалент источника	двух узлов
7	нет	пр.	пр.	обр.	двух узлов	эквивалент источника

Примечание: прямое (пр.) – направление стрелок в обозначении ЭДС схемы замещения и источника питания совпадают, обратное (обр.) – в противном случае.

Теоретическая подготовка и расчеты

1. Изучите теорию методов расчета электрических цепей и порядок выполнения данной работы. Ознакомьтесь с лабораторным стендом и электрической схемой цепи (рис. 3.5). Ответьте на контрольные вопросы и получите допуск у преподавателя на выполнение данной работы.

2. Проведите анализ схемы электрической цепи лабораторного стенда (рис. 3.5). Сколько эта схема содержит ветвей (m), узлов (n)? Задайтесь условно-положительными направлениями токов ветвей.

3. Применяя метод, соответствующий вашему варианту, найдите токи в схеме электрической цепи постоянного тока (если методом является метод эквивалентного источника, то найдите ток в ветви с сопротивлением R_n , рис. 3.5). Результаты расчетов занесите в табл. 3.6 под буквой «Р».

4. Покажите результаты всех ваших расчетов преподавателю и после их проверки вы допускаетесь к выполнению экспериментальной части работы. По значениям токов ветвей определите падения напряжения на каждом из пяти резистивных элементах схемы электрической цепи. Результаты расчетов занесите в табл. 3.5 под буквой «Р».

5. Проведите расчет токов схемы рис. 3.5, используя метод проверки, указанный для вашего варианта.

6. Результаты выполненного вами баланса мощностей сведите в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Проверка баланса мощности

Мощность, Вт	Участок цепи					Цепь в целом
	$A-B (R_1, E_1)$	$A-B (R_2, E_2)$	$A-B (R_3, E_3)$	$A-B (R_4, E_4)$	$A-B (R_n, E_n)$	
источника		—		—		
потребителя						

7. Для построения потенциальной диаграммы заполните табл. 3.4.

Таблица 3.4

Потенциалы точек внешнего контура

Показатель	Точка электрической цепи				
	A	$C(E_4)$	$B(R_4)$	$D(R_1)$	$A(E_1)$
Сопротивление между точками цепи	0				
Потенциал точки ϕ , В	0				

Примечание: п. 5, 6 и 7 можно выполнить в домашних условиях при подготовке отчета о лабораторной работе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с лабораторным стендом и по варианту вашего задания соедините проводами гнезда источников питания (с правой стороны стенда) с гнездами ЭДС лабораторного стенда.

2. Измерительным прибором М832 под контролем преподавателя или лаборанта измерьте напряжения на резисторах и токи в ветвях схемы.

3. Результаты измерений падений напряжений занесите в табл. 3.5 под буквой «Э».

4. По закону Ома определите ток в каждой ветви схемы электрической цепи лабораторного стенда. Полученные результаты занесите в табл. 3.6 под буквой «Э».

Таблица 3.5

Расчетные и экспериментальные значения падений напряжений
на резистивных элементах электрической цепи (рис. 3.5)

Методы расчета	Падение напряжения U_R (В) на участке электрической цепи AB									
	U_{R1}		U_{R2}		U_{R3}		U_{R4}		U_{Rn}	
	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э
двух узлов										
эквивалент источника										

Таблица 3.6

Расчетные и экспериментальные значения токов
в ветвях электрической цепи (рис. 3.5)

Методы расчета	Расчетные и экспериментальные значения токов									
	I_1		I_2		I_3		I_4		I_5	
	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э
двух узлов										
эквивалент источника										

Контрольные вопросы

1. По каким правилам производится нанесение токов на схему замещения электрической цепи?

2. Что означает знак «минус», полученный в результате расчета токов?

3. Сформулируйте и запишите закон Ома для участка цепи и для замкнутого контура.
4. Какие соединения называются последовательными и параллельными? Как определить эквивалентные сопротивления при таких соединениях элементов?
5. В чем заключается суть расчета электрических цепей с применением метода преобразования (свертывания)?
6. Перечислите известные вам методы расчета линейных электрических цепей.
7. Поясните, что такое потенциальная диаграмма и для каких целей она строится.
8. Что такое баланс мощности? Напишите выражения баланса мощности для электрической цепи с тремя источниками питания и четырьмя резисторами.
9. В цепи действует несколько источников питания. Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные – в режиме потребителя. По какому признаку определяется режим работы тех и других источников питания?
10. Изложите сущность расчета цепей с помощью применения метода узловых уравнений (двух узлов).
11. Изложите сущность расчета цепей с помощью применения метода эквивалентного генератора (источника ЭДС). Приведите порядок расчета.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.
3. Расчетные формулы и подробный процесс определения токов с применением методов:
 - узловых уравнений (двух узлов);
 - эквивалентного источника ЭДС.
4. Таблицы с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных, формы которых приведены в данном описании.
5. Расчет баланса мощности и соответствующую ему таблицу.
6. Таблицу потенциалов и потенциальную диаграмму на миллиметровке.
7. Выводы по работе.

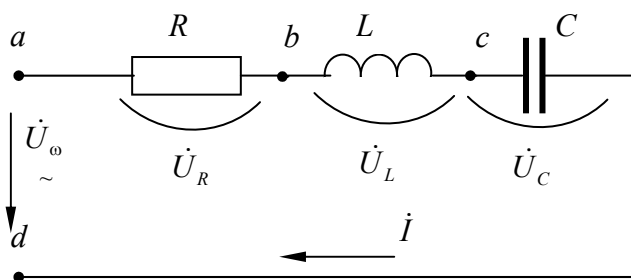
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование однофазных цепей переменного тока Последовательное соединение элементов R, L, C Резонанс напряжений

Цель работы

1. Проверка законов распределения напряжения в однофазных цепях переменного тока.
2. Исследование режимов работы электрической цепи с последовательным соединением R, L и C .
3. Экспериментальная проверка основных соотношений параметров цепи с последовательным соединением R, L и C .
4. Освоение методики построения на комплексной плоскости векторных диаграмм токов и топографических диаграмм напряжения.

Краткие теоретические сведения



При последовательном соединении активного сопротивления R , катушки индуктивности L и емкости C , схема цепи которых представлена на рис. 4.1, через все элементы будет протекать ток, мгновенное значение которого равно

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi),$$

Рис. 4.1. Последовательное соединение R, L, C

где I_m – амплитуда, ω – угловая частота, ψ – начальная фаза. Приложенное напряжение можно найти, составив для этой схемы уравнение по второму закону Кирхгофа. Для мгновенных значений оно принимает вид:

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (4.1)$$

Падение напряжения на активном сопротивлении

$$u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi) = U_m \sin(\omega t + \psi)$$

совпадает по фазе с током ($U_m = RI_m$). Падение напряжения на индуктивном элементе цепи

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t + \psi) = U_m \sin(\omega t + \psi + 90^\circ)$$

изменяется по косинусоидальному закону, или, что то же самое, по синусоидальному, но опережающему ток на угол 90° ($U_m = \omega LI_m$). Падение напряжения на емкостном элементе цепи

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi) = U_m \sin(\omega t + \psi - 90^\circ)$$

изменяется по косинусоидальному закону, или, что то же самое, по синусоидальному, но отстающему от тока на угол 90° $\left(U_m = \frac{1}{\omega C} I_m \right)$.

Анализ приведенных выше математических выражений показывает, что слагаемые u_R , u_L , u_C приложенного напряжения u последовательной цепи представляют собой синусоиды, и, следовательно, напряжение u также синусоидально. Это позволяет использовать способ изображения синусоидальной функции вращающимся вектором, тем самым значительно упрощая процесс сложения синусоидальных функций. На рис. 4.2 а для уравнения $a = A_m \sin(\omega t + \psi)$ построена синусоида, а на рис. 4.2 б – соответствующая векторная диаграмма. Здесь показаны $a = A_m \sin \psi$ – значение при $t = 0$; $\psi > 0$ – начальная фаза (положительная), на векторной диаграмме она откладывается против часовой стрелки и совпадает с положительным направлением ω .

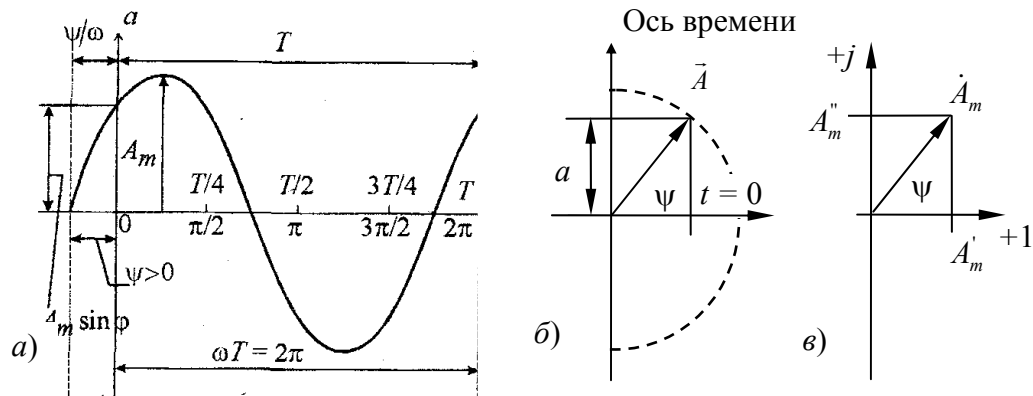


Рис. 4.2. Представление синусоиды тока в векторной форме

Рис.4.2.

Действующие значения синусоидально изменяющихся ЭДС, напряжения и тока:

$$E = E_m / \sqrt{2} = 0,707 E_m;$$

$$U = U_m / \sqrt{2};$$

$$I = I_m / \sqrt{2}.$$

Изображение синусоидальной функции вращающимся вектором. Проекция вращающегося против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω вектора $\vec{A}$ (рис. 4.2б) на вертикальную ось (называемую осью времени) изменяется во времени по синусоидальному закону:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi).$$

Поэтому любая синусоидальная функция (ток, напряжение, ЭДС) может быть изображена вектором.

В электротехнике векторы изображают не вращающимися, а неподвижными для момента времени $t = 0$ и их масштабы выбирают так, чтобы длина вектора соответствовала не амплитуде, а действующему значению, т. е.

$$\vec{A} = A_m / \sqrt{2}.$$

Таким образом, неподвижные векторы определяют два параметра синусоидальной функции: действующее значение и начальную фазу (угол вектора к оси абсцисс – ψ). Третий параметр – угловая частота ω – известен заранее.

Если оси координат векторной диаграммы считать осями комплексной плоскости (рис. 4.2в), то вектор $\vec{A}$ можно рассматривать как комплексную амплитуду:

$$\dot{A} = A_m / \sqrt{2}.$$

Представление синусоидальной функции подобным образом принято называть изображением на комплексной плоскости, т. е. в системе координат действительной (+1) и

мнимой единицы $\left(j = \sqrt{-1} = e^{j\frac{\pi}{2}} \right)$. Напомним, что мнимую единицу часто называют

оператором поворота на угол $\pi/2 = 90^\circ$. Умножение на j равносильно повороту вектора на комплексной плоскости против часовой стрелки на прямой угол, а умножение на $(-j) = e^{-j\pi/2}$ – повороту вектора на прямой угол по часовой стрелке.

Синусоидальную величину $I_m(\omega t + \psi)$ изображают комплексным числом $\dot{I} = (I_m / \sqrt{2}) e^{j(\omega t + \psi)}$, аргумент которого равен аргументу синуса (ψ), а модуль – действующему значению тока ($I_m / \sqrt{2}$). Очевидно, что изображение введенной величины на комплексной плоскости тождественно изображению синусоидального тока на векторной диаграмме с помощью вектора I_m , вращающегося с частотой ω . При определении взаимной ориентации векторов гармонических колебаний одной частоты всю необходимую информацию несет комплексная величина $\dot{I} = I e^{j\psi_i}$ – комплексное значение действующего тока, равная комплексному изображению тока при $t = 0$. Аналогично вводят комплексные действующие значения для напряжений и ЭДС:

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u},$$

$$\dot{E} = E e^{j\psi_e}.$$

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме для электрической цепи (рис. 4.1) принимает вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (4.2)$$

При расчете цепей синусоидального тока с использованием комплексных действующих изображений возникает необходимость в построении векторных диаграмм на плоскости комплексных чисел. При этом должны выполняться определенные условия и правила.

Построение векторной диаграммы для последовательного соединения элементов электрической цепи начинается с построения на комплексной плоскости в выбранном масштабе вектора тока $\dot{I}$ (рис. 4.3), неизменного для всех элементов цепи. Для упрощения

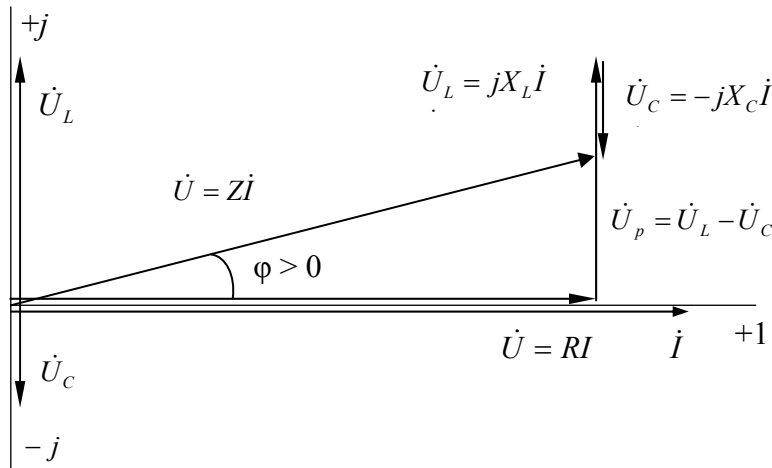


Рис. 4.3. Векторная диаграмма для активно-индуктивного характера нагрузки

примем направление этого тока, совпадающим на комплексной плоскости с действительной осью (+1). Это соответствует нулевому значению начальной фазы ($\psi = 0$). Затем относительно направления этого тока, откладываются вектора слагаемых падений напряжений $\dot{U}_R$, $\dot{U}_L$, $\dot{U}_C$, входящие в уравнение второго закона Кирхгофа (4.2). Вектор напряжения на активном сопротивлении $\dot{U}_R = R\dot{I}$ совпадает по фазе с вектором тока $\dot{I}$. Вектор напряжения на катушке индуктивности $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$ опережает вектор тока на угол 90° . Вектор же емкостного напряжения $\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C}\dot{I}$ находится в противофазе к вектору $\dot{U}_L$ и отстает на угол 90° от вектора тока $\dot{I}$.

Подставив выражения $\dot{U}_R$, $\dot{U}_L$, $\dot{U}_C$ в уравнение второго закона Кирхгофа (4.2), получим выражение закона Ома для участка цепи в комплексной форме

$$\begin{aligned}\dot{U} &= R\dot{I} + j\omega L\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = R\dot{I} + j\omega L\dot{I} + (-j)\frac{1}{\omega C}\dot{I} = (R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C})\dot{I} = \\ &= (R + jX_L - jX_C)\dot{I} = (R + jX_p)\dot{I} = \dot{Z}\dot{I}.\end{aligned}$$

В этих соотношениях:

X_L – сопротивление катушки индуктивности:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL; \quad (4.3)$$

X_C – сопротивление емкости:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}; \quad (4.4)$$

X_p – реактивное сопротивление:

$$X_p = X_L - X_C; \quad (4.5)$$

$\dot{Z} = Z e^{j\varphi}$ – комплекс полного сопротивления электрической цепи; Z – модуль полного сопротивления:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_p^2}; \quad (4.6)$$

φ – угол сдвига фаз между вектором тока и вектором напряжения, который определяется из векторной диаграммы (рис. 4.3), или из треугольника напряжений (рис. 4.4а), или из треугольника сопротивлений (рис. 4.4б):

$$\varphi = \arctg(U_p / U_R) = \arctg[(X_p I) / (RI)] = \arctg[(X_L - X_C) / R] = \arctg(X_p / R); \quad (4.7)$$

$f = 1/T$ – циклическая частота, величина, обратная периоду T .

Единица измерения всех перечисленных выше сопротивлений – ом.
Выражение

$$\dot{U} = \dot{Z} \dot{I} \quad (4.8)$$

носит название **закона Ома для электрической цепи переменного синусоидального тока в комплексной форме**.

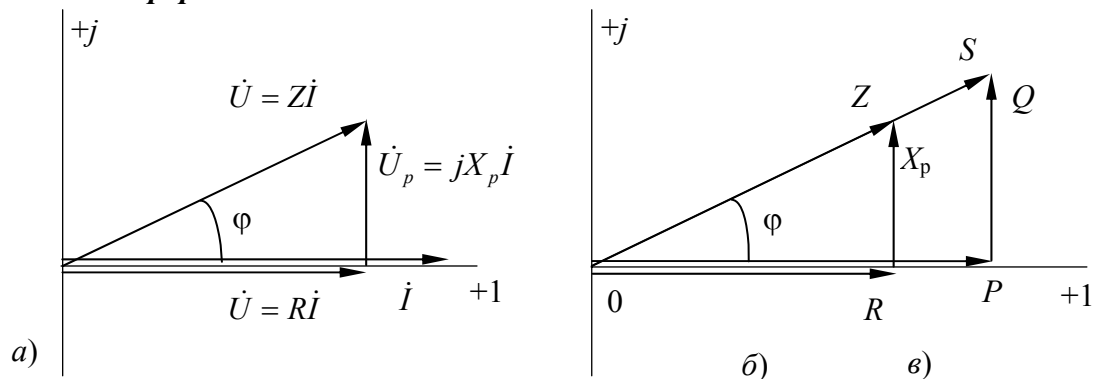


Рис. 4.4. Треугольники напряжений (а), сопротивлений (б) и мощностей (в) с активно-индуктивной нагрузкой

Анализируя полученную диаграмму, можно сказать, что построен прямоугольный треугольник с гипотенузой, равной приложенному напряжению $\dot{U}$, и катетами, равными падениям напряжения на активном $\dot{U}_R$ и реактивных $\dot{U}_p$ сопротивлениях. Реактивная составляющая напряжения по величине равна разности падения напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях:

$$\dot{U}_p = \dot{U}_L - \dot{U}_C.$$

Для треугольника напряжений справедливы соотношения

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_p^2};$$

$$U_R = U \cos \varphi;$$

$$U_p = U \sin \varphi.$$

Если все стороны треугольника напряжений (рис. 4.4а) разделить на общий множитель I , то получим треугольник сопротивлений (рис. 4.4б), подобный треугольнику напряжений. Из него следует, что

$$R = \sqrt{R^2 + X_p^2};$$

$$R = Z \cos \varphi;$$

$$X_p = Z \sin \varphi.$$

При умножении всех сторон треугольника сопротивлений на общий множитель I^2 получится подобный ему треугольник мощностей (рис. 4.4в). Причем,

$$\left. \begin{aligned} P &= RI^2 = UI \cos \varphi, \\ Q &= X_p I^2 = UI \sin \varphi, \\ S &= ZI^2 = UI, \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Из треугольника сопротивлений следует, что в зависимости от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями при их последовательном соединении величина угла φ и его знак зависят от соотношений X_L и X_C в электрической цепи и, как следствие, можно выделить три характера нагрузки. Следует заметить, что угол φ отсчитывают от вектора тока к вектору напряжения. Причем, углы, отсчитываемые против хода часовой стрелки, считаются положительными, а по ходу – отрицательными.

1. Активно-индуктивный характер нагрузки имеет место при наличии в схеме электрической цепи резистивного и реактивного сопротивлений, причем $X_L > X_C$, т. е. реактивное сопротивление X_p является индуктивным. В этом случае $\dot{U}_L > \dot{U}_C$, и вектор входного напряжения $\dot{U}$ опережает по фазе вектор тока $\dot{I}$, угол φ имеет положительное значение, а реактивная составляющая напряжения $\dot{U}_p > 0$ имеет индуктивный характер (см. рис. 4.3).

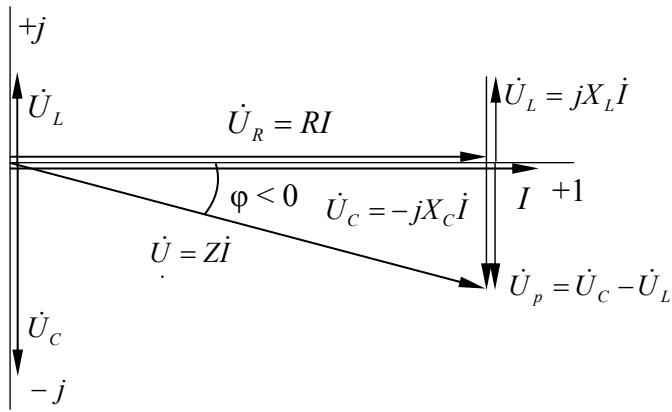


Рис. 4.5. Векторная диаграмма для активно-емкостного характера нагрузки

достигается при наличии в схеме электрической цепи резистивного элемента и при обеспечении условия $X_L = X_C$. Это особый режим работы последовательного соединения R, L и C .

Индуктивное и емкостное сопротивления компенсируют друг друга:

$$X_p = X_L - X_C = 0.$$

Полное сопротивление цепи Z будет минимальным и равно активной составляющей R , т. е.

$$Z = \sqrt{R^2 + 0^2} = R.$$

При этом $\dot{U}_C = \dot{U}_L$. Напряжение на входе цепи $\dot{U}$ равно составляющей падения

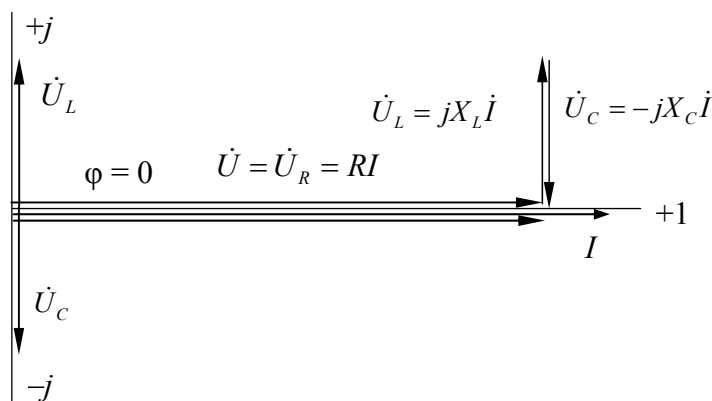


Рис. 4.6. Векторная диаграмма резонанса напряжений

напряжения на активном сопротивлении $\dot{U}_R$, т. е. $\dot{U}_R = \dot{U}$ и совпадает по фазе с током $\dot{I}$ (рис. 4.6), который достигает максимальной величины, угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi = 0$. В этом случае говорят, что цепь с последовательным соединением R, L и C потребляет только активную энергию и имеет место резонанс напряжений.

Таким образом, **резонансом в электрических цепях**

переменного тока называют режим участка электрической цепи, содержащей катушку индуктивности L и емкость C , при котором разность фаз φ между напряжением U и током I равна нулю. Резонанс напряжений возможен на участке цепи с последовательным соединением L и C . При их параллельном соединении возможен резонанс токов.

Так как условием резонанса является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений $X_L = X_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то для получения резонанса напряжений

достаточно подобрать необходимые параметры одной из трех величин: ω ; L ; C . При постоянных значениях L и C обеспечить равенство $X_L = X_C$ возможно путем изменения частоты источника напряжения, т. е. если $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ или } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4.10)$$

Эти выражения служат для определения резонансной частоты и носят названия формул Томсона.

Характерными особенностями резонанса напряжений являются:

1. Угол сдвига фаз φ между U и I равен нулю, т. е. $\varphi = 0$, следовательно, $\cos \varphi = 1$, полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R.$$

2. Ток при резонансе напряжений $I_{\text{рез}} = U/Z = U/R$ максимален.

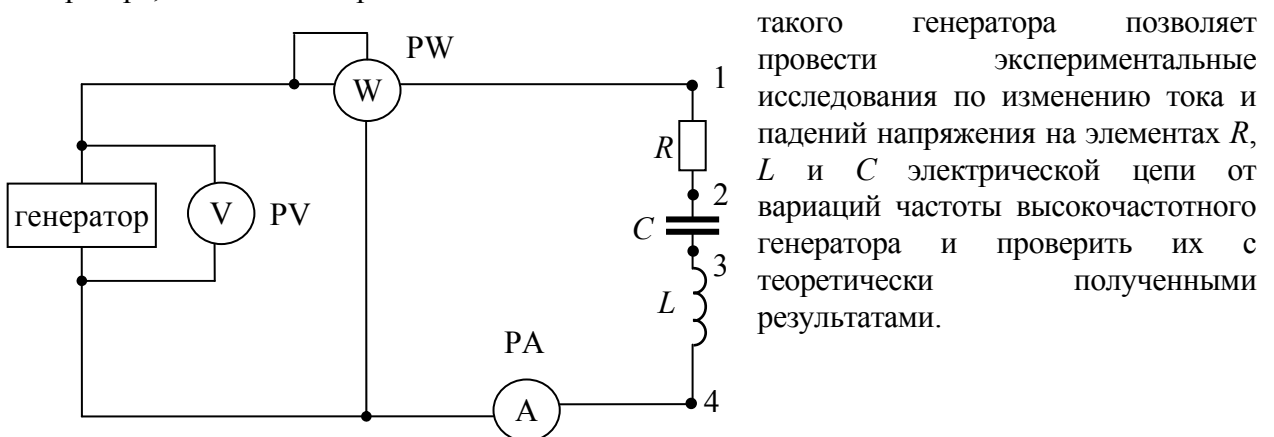
3. Активная мощность при резонансе напряжений также максимальна, т. к. $P = I_{\text{рез}}^2 R$, реактивная мощность на катушке индуктивности $Q_C^{\text{рез}} = I_{\text{рез}}^2 X_L$ равна реактивной мощности на конденсаторе $Q_C^{\text{рез}} = I_{\text{рез}}^2 X_C$, но противоположна по знаку, т. е. они компенсируют друг друга.

Оборудование

1. Универсальный лабораторный блок 17Л-03.
2. Стенд для исследований однофазных цепей переменного тока с последовательным включением RLC .

Выполнение работы

На универсальном лабораторном блоке смонтирован стенд, содержащий электрическую цепь с последовательно включенными элементами R , L и C (рис. 4.7). Переменное синусоидальное напряжение на элементы электрической цепи подается от высокочастотного генератора, имеющего широкий диапазон изменения частот от 0 до 100 кГц. Наличие именно



такого генератора позволяет провести экспериментальные исследования по изменению тока и падений напряжения на элементах R , L и C электрической цепи от вариаций частоты высокочастотного генератора и проверить их с теоретически полученными результатами.

Рис. 4.7. Схема лабораторного стенда

Теоретическая подготовка и расчеты

1. Изучите теоретические положения цепей синусоидального тока, порядок выполнения данной работы, ознакомьтесь с лабораторным стендом и электрической схемой цепи (рис. 4.7). Получите у преподавателя допуск к выполнению работы.

2. Для заданных преподавателем параметров резистивного элемента R , катушки индуктивности L и емкости C по выражениям (4.3), (4.4), (4.6) произведите теоретический расчет значений реактивных сопротивлений катушки индуктивности X_L , конденсатора X_C и полного сопротивления электрической цепи Z для частот f , изменяющихся в диапазоне от 0 до 100 кГц и кратных четырем. Номиналы конденсатора и катушки индуктивности указаны на корпусах элементов. Обратите внимание на размерность изменения частоты (кГц), индуктивности (мГн) и емкости (мкФ).

3. По заданному преподавателем значению приложенного напряжения генератора U и рассчитанным для различных частот значениям полного сопротивления Z определите ток в цепи (см. выражение 4.8). По величине полученного тока определите падение

напряжения на резистивном $U_R = RI$, индуктивном $U_L = 2\pi fLI$ и емкостном $U_C = \frac{1}{2\pi fC}I$

элементах цепи.

4. Используя известные соотношения между активным и реактивным сопротивлениями или подобные соотношения между соответствующими напряжениями, по выражению (4.7) определите угол сдвига фаз между током и напряжением φ .

5. Результаты проведенных в пунктах 2–4 расчетов занесите в табл. 4.1. Покажите ее преподавателю и получите допуск на проведение экспериментальной части работы.

Таблица 4.1

Результаты теоретических расчетов и эксперимента при $U_{\text{вх}} = \underline{\hspace{2cm}}$ В

$f, \text{кГц}$	Теоретические расчеты									Эксперимент			
	R	X_L	X_C	Z	I	U_R	U_L	U_C	φ	I	U_R	U_L	U_C
4													
8													
12													
16													
...													
...													
...													
92													
96													
100													

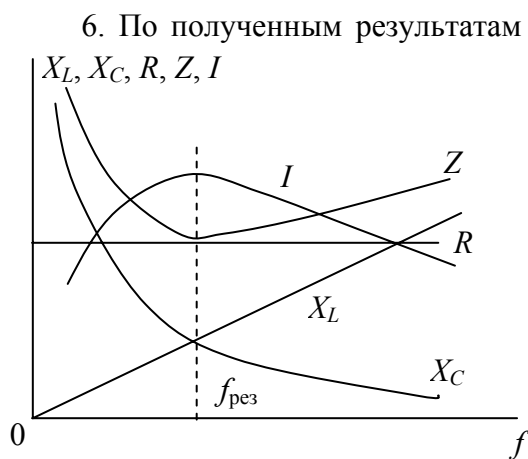


Рис. 4.8. Частотные характеристики

6. По полученным результатам теоретических расчетов постройте так называемые частотные характеристики – зависимости изменения параметров X_L , X_C , Z , R и I от частоты f . Примерный вид этих зависимостей приведен на рис. 4.8.

7. ПОСТРОЙТЕ НА КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ТРЕУГОЛЬНИКИ СОПРОТИВЛЕНИЙ И МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ТРЕХ ПРОИЗВОЛЬНО ВЫБРАННЫХ ВАМИ ЧАСТОТ: НИЖЕ РЕЗОНАНСНОЙ, РЕЗОНАНСНОЙ И ВЫШЕ РЕЗОНАНСНОЙ. МОЩНОСТИ ОПРЕДЕЛИТЕ ПО ВЫРАЖЕНИЯМ (4.9).

8. После построения кривых следует сделать анализ о совпадении теоретически полученной резонансной частоты с экспериментальной резонансной частотой, полученной по измерениям токов, и нанести график изменения последней на полученный теоретически.

Примечание: п. 6, 7 и 8 могут быть выполнены в домашних условиях при подготовке отчета по данной лабораторной работе.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Ознакомьтесь с лабораторным блоком 17Л-03, найдите необходимые для выполнения работы блоки, регуляторы, гнезда, проведите подготовку электрической цепи к выполнению экспериментов.

1.1. Соедините проводами гнезда генератора напряжения (ГН) и « $\perp$ » модуля генератора сигналов (ГС) с гнездами ГС стенда.

1.2. Переведите тумблер АВ2/МВА в нижнее положение и включите тумблер МВА модуля миллиамперметра.

1.3. Переведите переключатель РОД РАБОТЫ в положение ГН 1:10 (11).

1.4. Подключите миллиамперметр к гнездам РА (рис. 4.7), соединив « $\perp$ » с « $\perp$ » – корпусом сменной панели.

1.5. Вставьте в гнезда электрической цепи стенда элементы R , L и C .

1.6. Покажите схему преподавателю.

2. Занесите заданное преподавателем значение генератора напряжения в название табл. 4.1 и установите его значение на генераторе напряжения. Для этого переключатель пределов измерения переводят в нижнее положение ГН с пределом измерения 25 В. Измерение напряжения осуществляют между точками 1 и 4 расчетной схемы (рис. 4.7). Регулировка напряжения осуществляется соответствующим регулятором амплитуды генератора сигналов. Установку напряжения и измерение производят только под контролем преподавателя или лаборанта. После установки напряжения ручку регулятора амплитуды трогать запрещается, т. к. это в значительной степени влияет на точность проведения эксперимента.

3. Убедитесь в правильности сборки схемы, для этого регулятором частоты произвольно изменяйте частоту ГС и проследите, изменяется ли ток миллиамперметра. Имейте в виду, что измерение частоты генератора ГС производится автоматически путем включения измерительного прибора в режим $Ч, f_2$.

4. Определите, используя формулу Томсона (4.10), резонансную частоту и установите ее на генераторе сигналов ГС. Убедитесь в том, что ток на этой частоте максимальный.

5. Произведите измерения экспериментальных параметров и занесите результаты в табл. 4.1. Для этого предварительно определите цену деления используемых приборов – миллиамперметра и частотомера.

5.1. Измерение тока. Плавным изменением ручки регулятора частоты добейтесь требуемого значения частоты (кратного четырем) и для этой частоты занесите параметр измеренного миллиамперметром тока в табл. 4.1.

5.2. Измерение падения напряжения на элементах R , L и C производится только для трех характерных режимов цепи – до возникновения резонанса, в момент резонанса и после резонанса. Установите ручкой регулятора частоты один из этих режимов и произведите измерение напряжения на элементах электрической цепи. Для этого элемент, на котором необходимо произвести измерение напряжений, следует установить в гнездо с номерами 3–4 расчетной схемы (рис. 4.7), переставив его местами с другими элементами схемы. Результаты измерений запишите в табл. 4.1 для трех выбранных вами частот, кратных 4.

Контрольные вопросы

1. Приведите формулы определения индуктивного, емкостного и полного сопротивлений электрической цепи. От каких параметров электрической цепи синусоидального тока они зависят?

2. Какие элементы электрической цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные R , L и C , и каким образом влияют на сдвиг фаз между током и напряжением?

3. Почему сдвиг фаз между напряжением U и током I положителен при активно-индуктивном характере и отрицателен при активно-емкостном?

4. Что такое векторная (топографическая) диаграмма напряжений? Приведите процесс ее построения для электрической цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные R , L и C .

5. Как по векторной диаграмме, треугольникам сопротивлений и мощностей определить характер изменения нагрузки?

6. Приведите формулы определения активной, реактивной и полной мощности. Какое влияние на мощность оказывает сдвиг фаз между током и напряжением?

7. Приведите векторные (топографические) диаграммы напряжений для схем последовательного соединения: а) резистора и катушки индуктивности; б) резистора и емкости; в) катушки индуктивности и емкости.

8. Приведите формулу Томсона, объясните ее физический смысл.

9. Объясните явление резонанса напряжений, чем он характеризуется.

10. Нарисуйте частотные характеристики и объясните их.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.

2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.

3. Расчетные формулы и результаты вычислений.

4. Таблицу с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных.

5. Векторные (топографические) диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений и мощностей для трех значений частоты – до резонансной, резонансной и

после резонансной. Диаграммы строятся в выбранном масштабе, на миллиметровке формата не менее А5.

6. Графики зависимостей сопротивлений элементов электрической цепи X_L , X_C , Z , а также теоретически и экспериментально полученных значений тока I от частоты f для всего диапазона изменения частоты от 4 до 100 кГц с интервалом 4 кГц.

7. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование однофазных цепей переменного тока

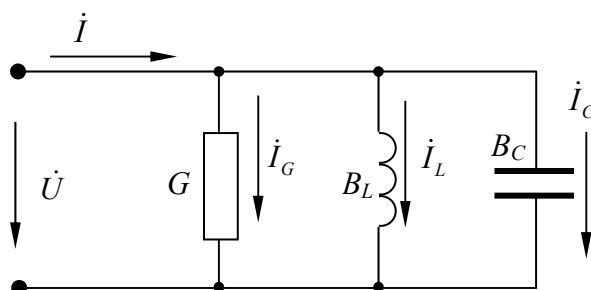
Параллельное соединение элементов R , L , C

Резонанс токов

Цель работы

1. Проверка законов распределения токов в однофазных цепях переменного тока.
2. Исследование режимов работы электрической цепи с параллельным соединением ветвей, содержащих R -, L - и C -элементы.
3. Экспериментальная проверка основных соотношений параметров цепи с параллельным соединением R , L и C .
4. Освоение методики построения на комплексной плоскости векторных диаграмм токов и топографических диаграмм напряжения.

Краткие теоретические сведения



При параллельном соединении ветвей, содержащих активные R -, индуктивные L - и емкостные C -элементы, схема электрической цепи которой представлена на рис. 5.1, ко всем элементам цепи приложено одно и тоже синусоидальное напряжение:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi),$$

Рис. 5.1. Параллельное соединение R , L , C

где U_m – амплитуда, ω – угловая частота, ψ – начальная фаза.

Мгновенное значение тока i всей цепи, согласно первому закону Кирхгофа, принимает вид:

$$i = i_R + i_L + i_C. \quad (5.1)$$

Составными частями баланса тока (5.1) для параллельной цепи являются:

– ток на активном сопротивлении R , совпадающий по фазе с напряжением, т. к.

$$i_R = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi)}{R} = I_m \sin(\omega t + \psi),$$

где $I_m = U_m/R$;

– ток на катушке индуктивности L , изменяющийся по косинусоидальному закону или, что тоже самое, по синусоидальному, но с отставанием на 90° , т. к.

$$i_L = \frac{1}{L} \int u dt = \frac{U_m \cos(\omega t + \psi)}{L\omega} = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi - 90^\circ)}{L\omega} = I_m \sin(\omega t + \psi - 90^\circ),$$

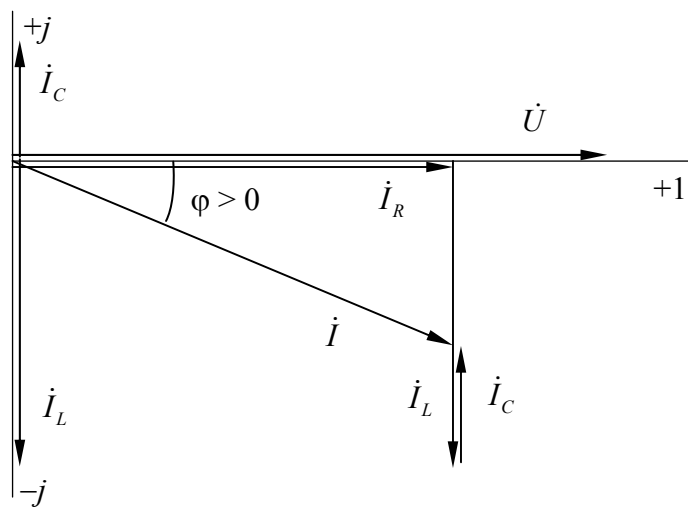
где $I_m = U_m/\omega L$;

– ток на емкостном элементе C , изменяющийся по косинусоидальному закону, или, что то же самое, по синусоидальному, но с опережением напряжения на угол 90° , т. к.

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_m \cos(\omega t + \psi) = I_m \sin(\omega t + \psi + 90^\circ),$$

где $I_m = U_m / \frac{1}{\omega C} = U_m \omega C$.

Анализ приведенных выше математических выражений показывает, что слагаемые i_R , i_L , i_C общего тока в цепи i (5.1) представляют собой синусоиды. Следовательно, ток всей цепи I также будет изменяться по синусоидальному закону. Это позволяет использовать способ изображения синусоидальной функции вращающимся вектором, тем самым значительно упрощая процесс сложения синусоидальных функций (см. лабораторную работу № 4). Используя эту теорию, можно определить вектор общего тока в виде геометрической суммы векторов слагаемых токов на резисторе R , катушке индуктивности L и емкости C , построенных на комплексной плоскости. Это построение показано на рис. 5.2 для векторов, равных по величине действующим значениям токов.



Вектор тока на активном сопротивлении $\dot{I}_R = \dot{U} / R$ совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}$. Вектор тока на катушке индуктивности

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{j\omega L} = -j \frac{\dot{U}}{\omega L}$$

Рис. 5.2. Векторная диаграмма цепи с параллельным соединением R , L и C

отстает от вектора напряжения $\dot{U}$ на угол 90° .

Вектор же тока на емкостном элементе

$$\dot{I}_C = \dot{U} / \frac{1}{j\omega C} = j\omega C \dot{U}$$

находится в противофазе к вектору $\dot{I}_L$ и опережает вектор напряжения $\dot{U}$ на угол 90° .

Анализируя полученную диаграмму, можно сказать, что построен прямоугольный треугольник токов с гипотенузой, равной общему току цепи $\dot{I}$ и катетами, равными активному току $\dot{I}_R$ и реактивному току $\dot{I}_p = \dot{I}_C - \dot{I}_L$. Из треугольника токов легко находятся величины модуля общего тока электрической цепи I и угла сдвига фаз φ этого тока от вектора приложенного напряжения:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\omega CU - \frac{U}{\omega L}\right)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{I_C - I_L}{I_R} = \arctg \frac{\omega CU - U/(\omega L)}{U/R} = \arctg \frac{\omega C - 1/(\omega L)}{1/R}.$$

Схему параллельного соединения ветвей, содержащих R , L и C элементы, удобно характеризовать не сопротивлениями, а проводимостями. Проводимость ветвей, содержащих последовательно соединенные активное и реактивное сопротивления в комплексной форме, в общем случае определяется выражением:

$$\dot{Y} = 1/\dot{Z} = \frac{1}{R \pm jX_p} = \frac{R \mp jX_p}{(R + jX_p)(R - jX_p)} = \frac{R \mp jX_p}{R^2 + X_p^2} = \frac{R}{Z^2} \mp j \frac{X_p}{Z^2}.$$

Первое слагаемое полученного выражения носит название активной проводимости:

$$G = R/Z^2,$$

а второе – реактивной проводимости:

$$B = X_p/Z^2.$$

Для схемы электрической цепи, в которой ветви содержат только активной или реактивное сопротивление, как в нашем случае, проводимости будут равны:

$$\text{– активная: } G = 1/R; \quad (5.2)$$

$$\text{– реактивная: } B_p = 1/X_p; \quad (5.3)$$

$$\text{– индуктивная: } B_L = 1/X_L = 1/(\omega L) = 1/(2\pi fL); \quad (5.4)$$

$$\text{– емкостная: } B_C = 1/X_C = 1/(1/\omega C) = \omega C = 2\pi fC; \quad (5.5)$$

$$\text{– полная: } Y = 1/Z = \sqrt{G^2 + B_p^2} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}. \quad (5.6)$$

Полная проводимость Y и полная мощность приемника S могут быть определены выражениями:

$$Y = I/U;$$

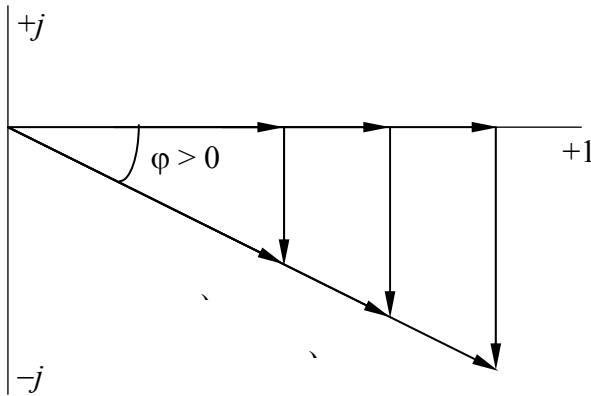
$$S = UI = YU^2.$$

Токи ветвей через их проводимости находятся по выражениям:

– ток неразветвленной части электрической цепи: $I = YU$; (5.7)

– для ветви, имеющей активное сопротивление: $I_R = GU$; (5.8)

– для ветви, имеющей реактивное сопротивление: $I_p = B_p U$. (5.9)



Приведенные выше соотношения можно представить в виде совмещенных треугольников токов, проводимостей и мощностей (рис. 5.3). Причем в треугольнике мощностей гипотенуза равна полной мощности S , катеты – активной $P = UI_R = GU^2$ и реактивной $Q = UI_p = B_p U^2$ мощностям.

Таким образом, все треугольники проводимостей, токов и мощностей являются подобными и имеют у вершины угол φ , который можно определить как:

Рис. 5.3. Треугольники проводимостей (а), токов (б), мощностей (в)

$$\varphi = \arctg(I_S/I_R) = \arctg(B_S/G). \quad (5.10)$$

Из треугольника проводимостей (рис. 5.3а) следует, что величина угла φ и его знак зависят от соотношений между параметрами проводимостей B_L и B_C параллельно соединенных ветвей, содержащих индуктивные и емкостные элементы. В зависимости от этих соотношений можно выделить три возможных характера нагрузки электрической цепи. Следует заметить, что угол φ принято отсчитывать от вектора тока к вектору напряжения. Причем углы, отсчитываемые против хода часовой стрелки, считаются положительными, а по ходу – отрицательными.

1. Активно-индуктивный характер нагрузки имеет место при $X_L < X_C$ или при $B_L > B_C$, т. е. реактивная проводимость $B_p = B_L - B_C$ является индуктивной. В этом случае $\dot{I}_L > \dot{I}_C$, вектор общего тока $\dot{I}$ отстает по фазе от вектора входного напряжения цепи $\dot{U}$, угол φ имеет положительное значение, а реактивная составляющая тока $\dot{I}_p = \dot{I}_C - \dot{I}_L$ имеет индуктивный характер (рис. 5.2).

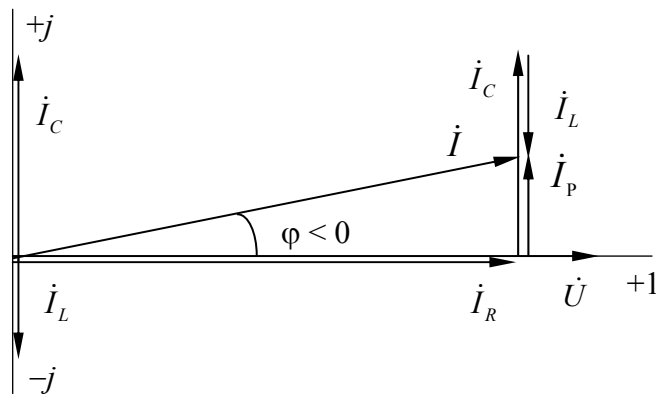


Рис. 5.4. Векторная диаграмма активно-емкостной нагрузки

2. Активно-емкостной характер нагрузки имеет место при $X_C < X_L$ или при $B_C > B_L$, т. е. реактивная проводимость $B_p = B_C - B_L$ является емкостной. В этом случае $\dot{I}_C > \dot{I}_L$.

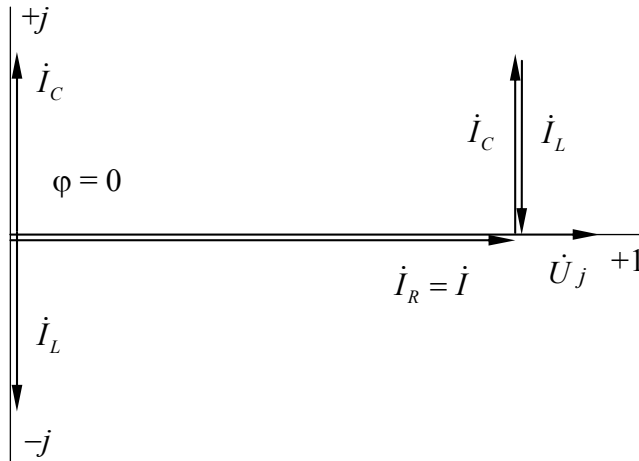
Вектор общего тока $\dot{I}$ опережает по фазе вектор входного напряжения цепи $\dot{U}$, угол φ имеет отрицательное значение, а реактивная составляющая тока $\dot{I}_p = \dot{I}_C - \dot{I}_L$ имеет емкостной характер (рис. 5.4).

3. Активный характер нагрузки достигается при параллельном

соединении ветвей, содержащих R , L и C элементы, при обеспечении условия $B_L = B_C$. Это

особый режим работы параллельного соединения R , L и C . При этом реактивные токи в ветвях с индуктивностью $I_L = B_L U$ и емкостью $I_C = B_C U$ равны и противоположены по фазе, т. е. компенсируют друг друга. Разветвленная цепь превращается в цепь с активной проводимостью

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} = G.$$



Ток в неразветвленной части электрической цепи равен активному току $\dot{I} = \dot{I}_R = GU$ и совпадает по фазе с напряжением цепи, угол $\varphi = \arctg(B/G) = 0$ (рис. 5.5).

Таким образом, **резонансом в электрических цепях переменного тока называют режим участка электрической цепи, содержащий катушку индуктивности L и емкость C , при котором разность фаз φ между напряжением U и током I равна нулю.**

Рис. 5.5. Векторная диаграмма резонанса токов

Резонанс токов возможен на участке цепи с параллельным соединением ветвей, содержащих L - и C -элементы. При их последовательном соединении возможен резонанс напряжений.

Условием резонанса токов при наличии в параллельных ветвях только емкостного элемента и только катушки индуктивности (без активного сопротивления) является выполнение равенства индуктивной и емкостной проводимостей параллельных ветвей:

$$B_L = B_C \text{ или } \frac{1}{\omega L} = \omega C.$$

Для получения резонанса токов достаточно подобрать необходимые параметры одной из трех величин: ω ; L ; C . При постоянных значениях L и C обеспечить равенство $B_L = B_C$ возможно путем изменения частоты источника напряжения, т. е. если $\frac{1}{\omega L} = \omega C$, то резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ или } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.11)$$

Эти выражения служат для определения резонансной частоты и носят названия формул Томсона.

При резонансе токов цепь с параллельным соединением ветвей, содержащих R -, L - и C -элементы, будет представлять собой чисто активное сопротивление, причем токи ветвей цепи (рис. 5.1) в этом случае определяются как:

$$I_R = U/R = I;$$

$$I_L = \frac{U}{\omega L};$$

$$I_C = \omega C U.$$

Характерными особенностями резонанса токов являются:

4. Угол сдвига фаз φ между U и I равен нулю, т. е. $\varphi = 0$, следовательно, $\cos\varphi = 1$, полная проводимость

$$G = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G,$$

т. е. сопротивление контура $R = 1/G$ активное и максимальное.

5. Ток в неразветвленной части цепи при резонансе токов минимален.

6. Реактивные мощности на конденсаторе и катушке индуктивности равны между собой: $Q_L = Q_C$; $Q_L = B_L U^2$; $Q_C = B_C U^2$. В резонансном контуре в разные полупериоды синусоиды происходит обмен между электрической мощностью конденсатора и магнитной мощностью катушки.

В электроэнергетике часто используют явление резонанса токов для повышения коэффициента мощности. Обычно приемники электроэнергии имеют активно-индуктивный характер нагрузки, т. е. работают со сдвигом фаз между током и напряжением $\varphi > 0$. Для увеличения коэффициента мощности от $\cos\varphi_1$ до $\cos\varphi_2$ параллельно к активно-индуктивной нагрузке подключают батарею конденсаторов. Тогда активная составляющая тока и мощности не изменяются, т. е. $I_2 \cos\varphi_1 = I_2 \cos\varphi_2$.

Для увеличения $\cos\varphi_2$ ток конденсатора I_C должен быть:

$$I_C = I_1 \sin\varphi_1 - I_2 \sin\varphi_2;$$

$$I_1 = P/(U \cos\varphi_1);$$

$$I_2 = P/(U \cos\varphi_2).$$

Тогда

$$I_C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Емкость конденсатора C находится из выражения

$$C = \frac{I_C}{\omega U}.$$

Мощность конденсатора определяется как

$$Q_C = UI_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Тогда емкость конденсаторной батареи определяется выражением

$$C = \frac{Q_C}{\omega U^2}.$$

Оборудование

3. Универсальный лабораторный блок 17Л-03.
4. Стенд для исследований однофазных цепей переменного тока с последовательным включением RLC .

Выполнение работы

На универсальном лабораторном модуле смонтирован стенд, содержащий электрическую цепь со сменными активно-реактивными элементами, соединенными параллельно (рис. 5.6). Переменное синусоидальное напряжение на элементы электрической цепи подается от высокочастотного генератора сигналов (ГС), имеющего широкий диапазон изменения частот от 0 до 100 кГц. Наличие именно такого генератора позволяет провести экспериментальные исследования по изменению общего тока и тока на элементах R , L и C электрической цепи от вариаций частоты высокочастотного генератора и проверить их с теоретически полученными результатами.

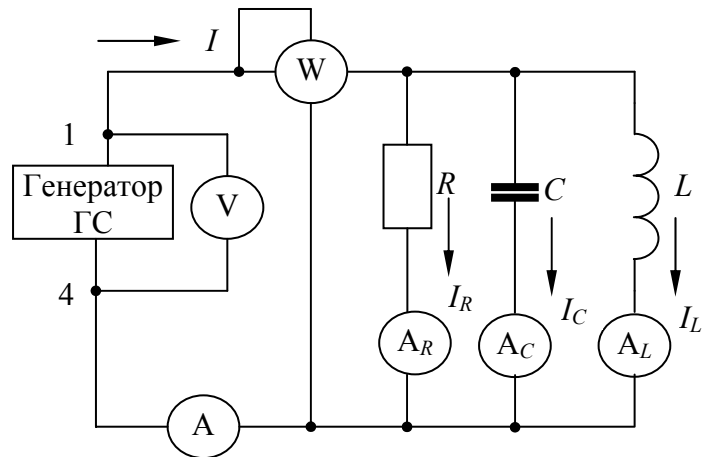


Рис. 5.6. Электрическая цепь лабораторного стенда

Теоретическая подготовка и расчеты

1. Изучите теоретические положения цепей синусоидального тока, порядок выполнения данной работы, ознакомьтесь с лабораторным стендом и электрической схемой цепи (рис. 5.6). Получите у преподавателя допуск к выполнению работы.
2. Для заданных преподавателем параметров резистивного элемента R , катушки индуктивности L и емкости C по выражениям (5.2)–(5.6) произведите теоретический расчет значений реактивных проводимостей катушки индуктивности B_L , конденсатора B_C и полной проводимости электрической цепи Y для частот f , изменяющихся в диапазоне от 0 до 100 кГц и кратных четырем. Номиналы конденсатора и катушки индуктивности указаны на корпусах элементов. Обратите внимание на размерность изменения частоты (кГц), индуктивности (мГн) и емкости (мкФ).
3. Для заданного преподавателем значения приложенного напряжения генератора U и рассчитанному для различных частот значению полной проводимости Y определите токи в неразветвленной и параллельных ветвях цепи (см. выражения (5.7)–(5.9)). Проверьте правильность своих расчетов применением первого закона Кирхгофа.
4. Используя известные соотношения между активной и реактивной проводимостями или подобные соотношения между соответствующими токами, по выражению (5.10) определите угол сдвига фаз φ между током неразветвленного участка цепи и приложенным напряжением.
5. Результаты проведенных в пунктах 2–4 расчетов занесите в табл. 5.1. Покажите ее преподавателю и получите допуск на проведение экспериментальной части работы.

Таблица 5.1.

Результаты теоретических расчетов и эксперимента при $U_{\text{вх}} = \underline{\hspace{2cm}}$ В

$f, \text{кГц}$	Теоретические расчеты									Эксперимент			
	G	B_L	B_C	Y	I	I_R	I_L	I_C	φ	I	I_R	I_L	I_C
4													
8													
12													
16													
...													
...													
...													
92													
96													
100													

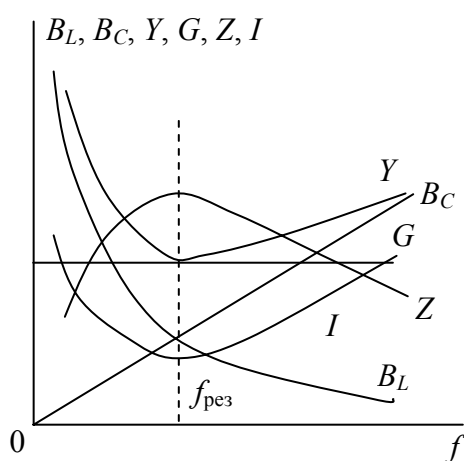


Рис. 5.7. Частотные характеристики

6. По полученным результатам теоретических расчетов постройте так называемые частотные характеристики – зависимости изменения параметров B_L , B_C , G , Y , Z и I от частоты f . Примерный вид этих зависимостей приведен на рис. 5.7.

7. Постройте на комплексной плоскости векторные диаграммы напряжений и треугольники проводимостей, токов и мощностей для трех произвольно выбранных вами частот: ниже резонансной, резонансной и выше резонансной. Мощности определите по выражениям, приведенным в теоретической части работы.

8. После построения кривых следует сделать анализ о совпадении теоретически полученной резонансной частоты с экспериментальной резонансной частотой, полученной по измерениям токов, и нанести график изменения последней на полученный теоретическими расчетами.

Примечание: п. 6, 7 и 8 могут быть выполнены в домашних условиях при подготовке отчета по данной лабораторной работе.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Ознакомьтесь с лабораторным блоком 17Л-03, найдите необходимые для выполнения работы блоки, регуляторы, гнезда, проведите подготовку электрической цепи к выполнению экспериментов.

1.1. Соедините проводами гнезда генератора напряжения (ГН) и «⊥» модуля генератора сигналов (ГС) с гнездами ГС стенда.

1.2. Подготовьте прибор МВА к работе. Имейте ввиду, что это единственный прибор на стенде, который позволяет измерить переменный ток и напряжение. Переведите тумблер АВ2/МВА в нижнее положение и включите тумблер МВА модуля миллиамперметра.

1.3. Переведите переключатель *РОД РАБОТЫ* в положение ГН 1:10 или 1:11.

1.4. Подключите миллиамперметр к гнездам рабочего амперметра (рис. 5.6), соединив « $\perp$ » с « $\perp$ » – корпусом сменной панели.

1.5. Вставьте в гнезда электрической цепи стенда элементы R , L и C .

1.6. Покажите схему преподавателю.

2. Занесите заданное преподавателем значение напряжения в название табл. 5.1 и установите его значение на генераторе напряжения. Для этого переключатель пределов измерения переводят в нижнее положение ГН с пределом измерения 10 В. Измерение напряжения осуществляют между точками 1 и 4 расчетной схемы (рис. 5.6). Регулировка напряжения осуществляется соответствующим регулятором амплитуды генератора сигналов. Установку напряжения и измерение производят только под контролем преподавателя или лаборанта. После установки напряжения ручку регулятора амплитуды трогать запрещается, т. к. это в значительной степени влияет на точность проведения эксперимента.

3. Убедитесь в правильности сборки схемы. Для этого выключите стенд и переведите измерительный прибор в режим измерения тока неразветвленного участка цепи. Включите стенд и, произвольно изменяя частоту ГС регулятором частоты, проследите, изменяется ли ток миллиамперметра в неразветвленной части цепи. Имейте в виду, что измерение частоты генератора ГС производится автоматически путем включения измерительного прибора в режим *Изм Ч*, f_z .

4. Определите, используя формулу Томсона (5.11), резонансную частоту и установите ее на генераторе сигналов ГС. Убедитесь в том, что ток на этой частоте минимальный.

5. Определите цену деления используемых приборов – миллиамперметра и частотомера и произведите измерения экспериментальных параметров I , I_R , I_L , I_C . Результаты занесите в табл. 5.1.

5.1. Измерение тока в неразветвленной части цепи. Установите переключки на миллиамперметрах параллельных ветвей исследуемой электрической цепи A_R , A_L , A_C , а миллиамперметр A подключите к гнездам миллиамперметра правой панели измерительного комплекса лабораторного стенда. Плавным изменением ручки регулятора частоты добейтесь требуемого значения частоты (кратного четырем) и для этой частоты занесите параметр измеренного миллиамперметром тока в табл. 5.1.

5.2. Измерение тока в параллельно соединенных ветвях на элементах R , L и C производится только для трех характерных режимов цепи – до возникновения резонанса, в момент резонанса и после резонанса. Установите ручкой регулятора частоты один из этих режимов и произведите измерение тока во всех параллельных ветвях электрической цепи. Для этого устанавливается переключка в неразветвленной части цепи и, поочередно переставляя переключки на приборах A_R , A_L , A_C , снимаются показания миллиамперметра для одного из токов параллельных ветвей. Результаты измерений запишите в табл. 5.1.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: переключатель частоты генератора сигналов ГС должен находиться в положении 100 кГц и в таком же положении должен находиться переключатель пределов измерения частоты в блоке *Изм Ч*.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение резонанса в электрических цепях. Какие бывают виды резонанса, в чем их отличие?
2. Приведите формулы определения индуктивной, емкостной и полной проводимости электрической цепи. От каких параметров электрической цепи синусоидального тока они зависят?

3. При каких величинах проводимостей параллельно соединенных ветвей имеет место резонанс токов?
4. Что такое векторная (топографическая) диаграмма напряжений? Приведите процесс ее построения для электрической цепи переменного тока, содержащей параллельно включенные ветви, содержащие R , L и R , C элементы.
5. Как по векторной диаграмме, треугольникам проводимостей, токов и мощностей определить характер изменения нагрузки?
6. Приведите формулы определения активной, реактивной и полной мощности. Какое влияние на мощность оказывает сдвиг фаз между током и напряжением?
7. Приведите формулу Томсона для параллельно соединенных ветвей, объясните ее физический смысл.
8. Нарисуйте частотные характеристики для параллельного соединения ветвей и объясните их.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи
3. Расчетные формулы и результаты вычислений.
4. Таблицу 5.1 с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных.
5. Векторные (топографические) диаграммы напряжений и треугольники проводимостей, токов и мощностей для трех значений частоты – до резонансной, резонансной и после резонансной. Диаграммы строятся в выбранном масштабе, на миллиметровке формата не менее А5.
6. Графики зависимостей проводимостей ветвей электрической цепи Y_L , Y_C , Y , содержащих индуктивные и емкостные элементы, а также теоретически и экспериментально полученных значений тока I от частоты f для всего диапазона изменения частоты от 4 до 100 кГц с интервалом 4 кГц.
7. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование электрической цепи, содержащей нелинейные элементы

Цель работы

1. Изучение теории и методов расчета сложных электрических цепей, содержащих нелинейные элементы.
2. Экспериментальная проверка справедливости выполнения основных законов электротехники для последовательно и параллельно включенных нелинейных элементов.

Краткие теоретические сведения

Нелинейными электрическими и магнитными называют такие элементы, у которых основные параметры R , L и C зависят от напряжений, токов, магнитных потоков и т. п. **Нелинейные элементы** (НЭ) получили широкое распространение, т. к. их использование позволяет решать задачи, которые при использовании линейных элементов принципиально неразрешимы. Так, при помощи НЭ возможно выпрямить переменный ток, стабилизировать напряжение и ток, преобразовать форму сигналов и т. д. Эти вопросы будут рассмотрены в специальной дисциплине «Промышленная электроника».

Параметры линейных элементов – $R = U/I$; $L = \psi/I$; $C = q/u$ – постоянные величины. У нелинейных элементов эти параметры не постоянны и часто задаются в виде графиков и таблиц. Нелинейные резистивные элементы R характеризуются вольт-амперными характеристиками (ВАХ) $u(i)$, индуктивные L – вебер-амперными характеристиками $\psi(i)$ и емкостные C – кулон-вольтными характеристиками $q(u)$. В лабораторной работе рассматривается поведение токов и напряжений на нелинейных резистивных элементах.

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов могут быть *симметричными* (рис. 6.1а) и *несимметричными* (рис. 6.1б) по отношению к началу координат. Значение тока в нелинейных элементах с симметричной характеристикой не зависит от полярности приложенного напряжения, и сопротивление этого элемента не

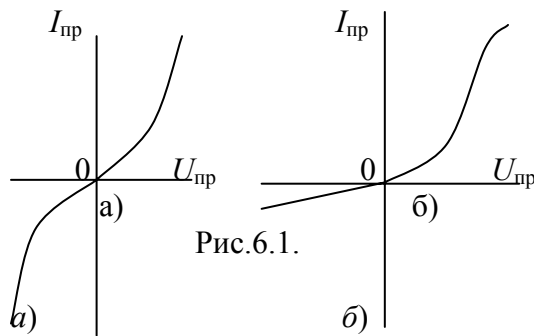


Рис.6.1.

Рис. 6.1. ВАХ нелинейных элементов

зависит от направления тока в нем. В нелинейном элементе с несимметричной ВАХ значение тока зависит от полярности приложенного напряжения (рис. 6.1б). Сопротивление этого элемента зависит от направления тока в нем.

К нелинейным элементам с симметричной ВАХ относятся лампы накаливания, терморезисторы, тиритовые и вилитовые элементы, лампы тлеющего разряда, электрическая дуга и др. Нелинейность характеристик ламп накаливания (рис. 6.2, линия а)

обусловлена тем, что вольфрамовая нить имеет положительный температурный коэффициент сопротивления α и, соответственно, при повышении тока (с ростом температуры Δt) ее сопротивление R_t увеличивается, при этом возрастание тока замедляется:

$$R_t = R_0(1 - \alpha \Delta t),$$

где R_0 – сопротивление при $t = 20^\circ \text{C}$.

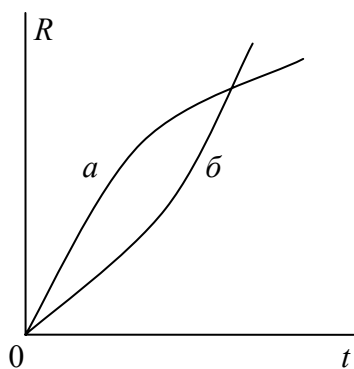


Рис. 6.2. Зависимость $R = f(t)$

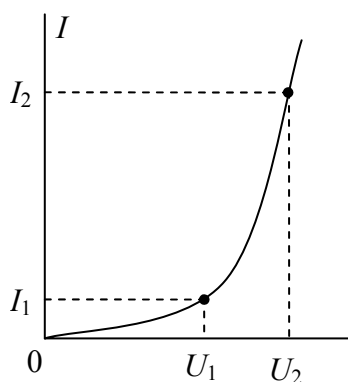


Рис. 6.3. ВАХ тиритовых и вилитовых элементов

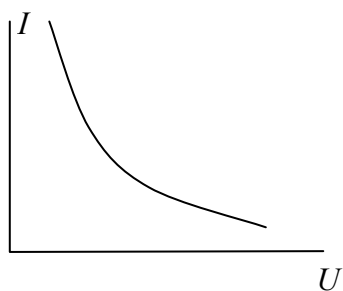


Рис. 6.4. ВАХ электрической дуги

Угольная нить (рис. 6.2, линия δ), в отличие от вольфрамовой, имеет отрицательный температурный коэффициент, и рост тока при росте температуры возрастает. Обе выше изложенные зависимости имеют графическую интерпретацию, предложенную на рис. 6.2.

Вольт-амперная характеристика терморезистора аналогична характеристике угольной нити. С увеличением тока его сопротивление уменьшается. Термосопротивления применяются для компенсации изменения сопротивления элементов, изготовленных из металлических проводников, сопротивление которых увеличивается с увеличением тока в цепи. При последовательном включении такого элемента с проволочным сопротивлением сопротивление такой цепи не меняется при любом значении тока.

Тиритовые и вилитовые элементы изготавливаются из карборунда. Они имеют вольт-амперную характеристику, приведенную на рис. 6.3. Из нее видно, что с увеличением напряжения проводимость элемента увеличивается. Из тиритовых дисков выполняют

разрядники, предназначенные для защиты высоковольтных аппаратов от перенапряжения. При возрастании напряжения в два раза проводимость тиритовых элементов возрастает примерно в десять раз.

К нелинейным элементам с симметричной характеристикой относится также электрическая дуга (рис. 6.4), возникающая между одинаковыми электродами и являющаяся элементом цепи электросварочной установки, электропечи, прожектора, проекционного аппарата и т. п. С увеличением тока дуги падение напряжения на ней уменьшается, что обусловлено резким увеличением ее проводимости.

Теория расчета нелинейной цепи постоянного тока
графическим методом

Нелинейные элементы, подобно линейным, могут быть соединены между собой по схемам последовательного, параллельного и смешанного соединения. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов должны быть заданы в графическом виде в общей системе координат. Графический метод расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы, является наиболее простым методом расчета.

Последовательное соединение элементов. На рис. 6.5 изображены последовательное соединение двух нелинейных элементов R_1 и R_2 и их вольт-амперные характеристики. При последовательном соединении нелинейных элементов ток всех элементов одинаков, т. е. $I_1 = I_2 = I$, а напряжение источника питания – $U_{\text{и}} = U_1 + U_2$.

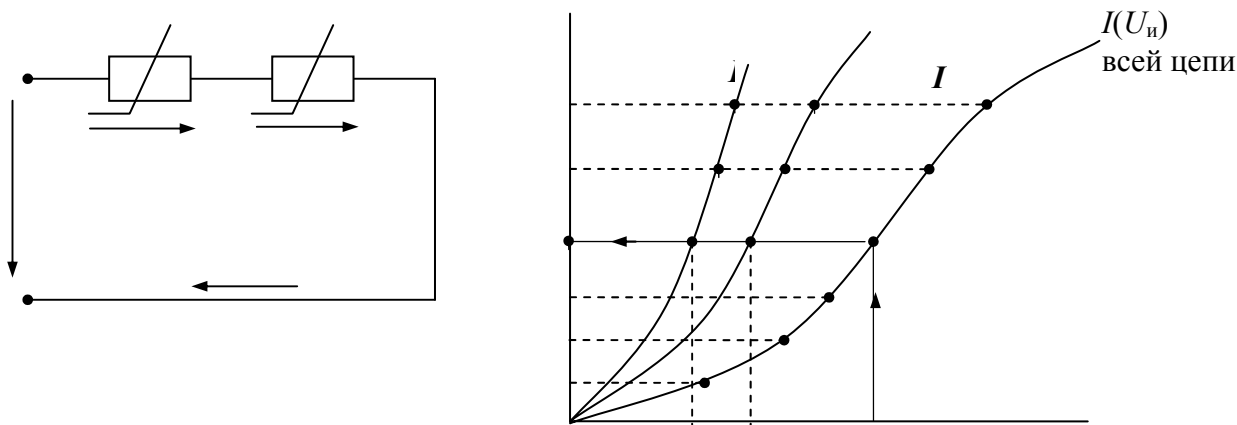


Рис. 6.5. Последовательное соединение нелинейных элементов и их ВАХ

Для построения вольт-амперной характеристики всей цепи проведем горизонтальные линии неизменных токов (пунктирные линии на рис. 6.5). Суммирование падений напряжений на нелинейных элементах U_1 и U_2 при условно заданных неизменных значениях тока позволяет получить ВАХ всей последовательной цепи. Например, задаваясь током I , проведем через точку a горизонтальную линию, пересечение которой с характеристиками $I(U_1)$ и $I(U_2)$ в точках b и c дает значения напряжения $U_1 = |ab|$ и $U_2 = |ac|$. Складывая абсциссы точек пересечения, получаем абсциссу точки d , принадлежащей характеристике $I(U_{\text{и}})$ для всей цепи.

Параллельное соединение нелинейных элементов. Напряжение на элементах (рис. 6.6):

$$U_1 = U_2 = U_{\text{и}}.$$

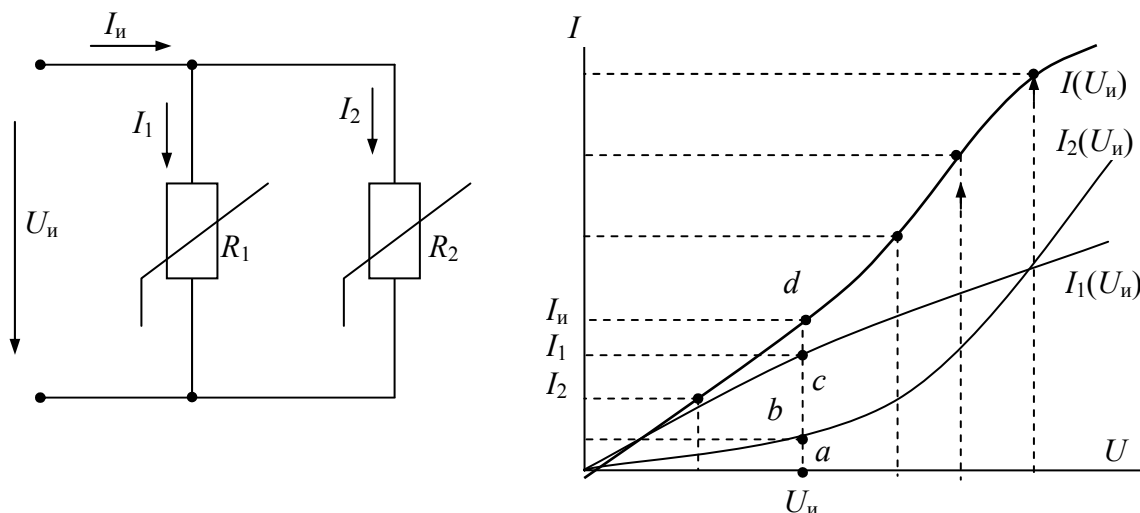


Рис. 6.6. Графический метод расчета при параллельном соединении нелинейных элементов

Ток в неразветвленной части цепи:

$$I = I_1 + I_2.$$

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов должны строиться в общей системе координат. Для нахождения ВАХ всей цепи зададимся несколькими значениями напряжения (пунктирные вертикальные линии) и сложим ординаты, соответствующие токам на нелинейных элементах. Точки сложения и будут соответствовать ВАХ всей цепи. Например, $|ab| + |ac| = |ad|$. По нескольким таким точкам проведем искомую характеристику всей цепи.

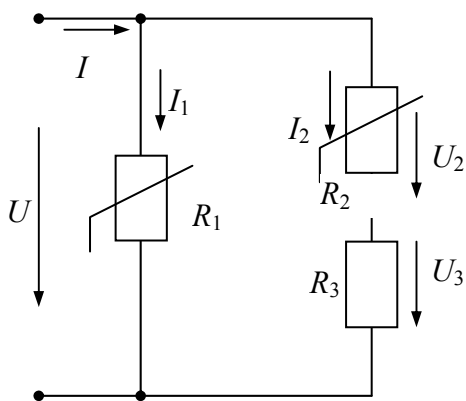


Рис. 6.7. Схема смешанного соединения элементов

Смешанное соединение элементов. В этом случае задача решается последовательно. В зависимости от схемы соединения находится ВАХ той части цепи, которая легче преобразуется. Например, для схемы рис. 6.7 сначала находится ВАХ последовательно соединенных элементов – нелинейного R_2 и линейного R_3 . Затем находят характеристику всей цепи, рассматривая параллельное соединение двух элементов с их вольт-амперными характеристиками.

Если последовательно с нелинейным элементом в цепи действует источник ЭДС (E) (рис. 6.8а), то ВАХ электрической цепи несколько изменится. Известными являются ВАХ нелинейного элемента $I(U_{ab})$, а также значение и направление ЭДС.

Необходимо найти вольт-амперную характеристику всей цепи $I(U_{ac})$.

По второму закону Кирхгофа имеем

$$U_{ac} + E - U_{ab} = 0 \text{ или } U_{ac} = U_{ab} - E.$$

Из формулы следует, что для построения характеристики $I(U_{ac})$ необходимо при всех значениях тока характеристики $I(U_{ab})$ из напряжения U_{ab} вычесть ЭДС E . Это равносильно сдвигу характеристики нелинейного элемента влево на значение ЭДС (рис. 6.8б). Если направление ЭДС навстречу току, то получим, что

$$U_{ac} = U_{ab} + E.$$

Следовательно, в этом случае, вся характеристика будет смещена вправо на величину значения ЭДС (рис. 6.8в).

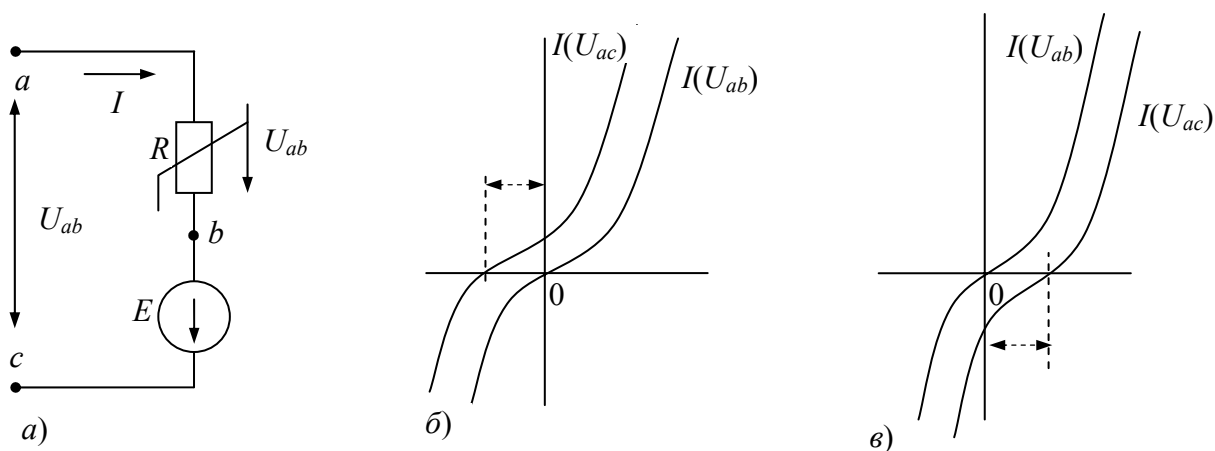


Рис. 6.8. Графический метод расчета схем, содержащих нелинейные элементы и источники питания

Оборудование

1. Лабораторный промышленный модуль 17Л-03.
2. Лабораторный стенд – схема электрической цепи для исследования нелинейных элементов.
3. Нелинейные элементы – варистор и термистор.

Выполнение работы

На универсальном лабораторном модуле смонтирован стенд, содержащий электрическую цепь со сменными резистивными линейными и нелинейными элементами (рис. 6.9). Постоянное напряжение на элементы электрической цепи подается от генератора напряжения (ГН2), имеющего два режима работы 0–12 В и 12–24 В, определяемые переключателем. Наличие такого генератора позволяет провести экспериментальные исследования по распределению токов в сложной электрической цепи и проверить их с теоретически полученными результатами. Напряжение генератора задается преподавателем после получения допуска к выполнению данной работы. Схема лабораторного стенда позволяет проведение эксперимента для последовательно (левая часть) и параллельно (правая часть) включенных нелинейных элементов.

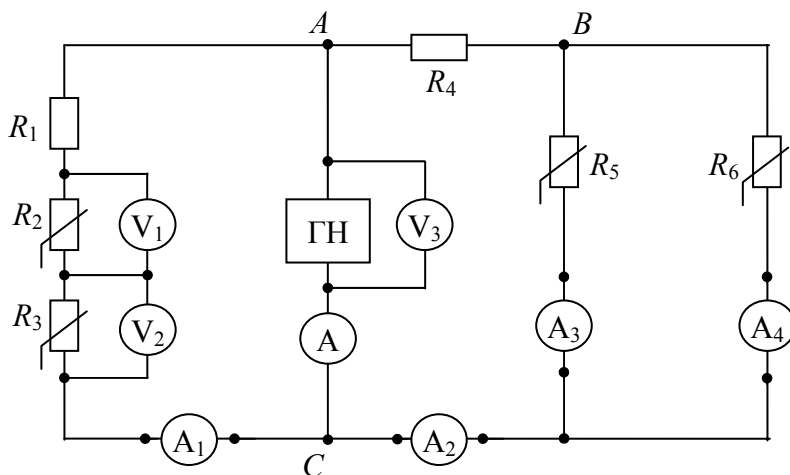


Рис. 6.9. Электрическая цепь лабораторного стенда

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Ознакомьтесь с лабораторным блоком 17Л-03, найдите необходимые для выполнения работы блоки, регуляторы, гнезда, проведите подготовку электрической цепи к выполнению экспериментов.

2. Исследование последовательно включенных трех элементов (левая часть схемы, рис. 6.9), два из которых имеют нелинейную характеристику (R_2 и R_3) и один – линейную (R_1). Так как число измерительных приборов (вольтметров и амперметров) на стенде ограничено, то измерение напряжения источника питания осуществляют по прибору контроля напряжения генератора ГН2 на нижнем приборе в режиме ГН2. Переключатель прибора должен находиться в положении ГН2 – 25 В. Остальные приборы используются поочередно путем их подключения к исследуемым точкам схемы.

При измерениях особое внимание следует уделить безопасности измерительных приборов, не допуская их перегрузок при разных режимах работы, поэтому запрещается переключение приборов без контроля со стороны преподавателя или лаборанта. Нелинейные элементы расположены в пластмассовой коробочке с обозначением RU . Установите эти элементы (их параметры непосредственно задаются преподавателем) в разъемы стенда. Контроль напряжения питания ГН2 производите по прибору *Изм Ч*, установленный в режим ГН2 на 25 В. Подключите проводами гнезда источника питания, схемы стенда к гнездам питания ГН2 (нижняя центральная часть модуля 17Л-03). Соблюдая полярность источника питания, подсоедините миллиамперметр (верхний правый) к гнездам A_1 схемы стенда (рис. 6.9).

Покажите собранную схему преподавателю или лаборанту. Плавно изменяя напряжение источника питания $U_{\text{ист}}$, установите значения напряжения согласно табл. 6.1. При этом проведите измерения параметров напряжения и тока на нелинейных элементах R_2 и R_3 и результаты эксперимента занесите в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Экспериментальные и теоретические данные
для последовательно соединенных элементов

$U_{\text{ист}}, \text{В}$	4	8	12	16	20	24
$U_1 (\text{В}_1)$						
$U_2 (\text{В}_2)$						
$I_1 (\text{А}_1)$						
$U_{\text{ист}}, \text{В}$ (теоретич.)						
R_1 (теоретич.)						
R_2 (теоретич.)						
R_3 (теоретич.)						

По полученным данным постройте зависимости изменения тока от напряжения на элементах электрической цепи, т. е. графики $I_1(U_1)$, $I_1(U_2)$ и $I_1(U_{\text{ист}})$. Изучите графический метод расчета схем с нелинейными элементами и постройте теоретическую кривую $I_1(U_3)$. Для каждого экспериментально полученного значения напряжения на элементах электрической цепи по закону Ома найдите сопротивления линейного и нелинейных элементов и постройте их зависимости от напряжения, т. е. $R = f(U_{\text{ист}})$ (рис. 6.10).

Отключите питание стенда. Сделайте выводы по этой части работы.

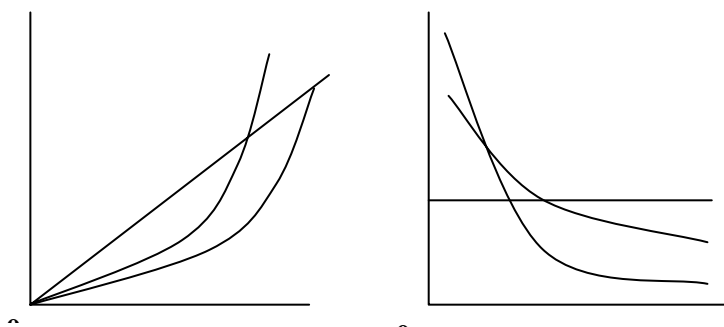


Рис. 6.10. ВАХ линейного и нелинейных элементов и зависимость $R = f(U)$

3. Исследование параллельно включенных двух нелинейных элементов (R_5 и R_6) (правая часть схемы, рис. 6.9). Извлеките из правой части стенда линейные и нелинейные элементы и перекоммутируйте их в левую часть схемы (рис. 6.9), соблюдая расположение элементов на стенде. Включите элементы, которые вы исследовали при

последовательном соединении, так, как показано на схеме. Нелинейные элементы в данной схеме оказываются включенными параллельно. Обратите внимание на то, что имеются три прибора контроля тока и один прибор контроля напряжения. Производить контроль тока следует поэтапно. Для этого необходимо использовать перемычку из короткого провода, которой следует замыкать прибор, ток которого пока измерить не представляется возможным. Произведите сначала измерение тока прибора A_3 , закоротив прибор A_4 , а затем сделайте наоборот. Результаты измерений занесите в табл. 6.2. По полученным экспериментальным данным определите значения сопротивлений R_4 , R_5 , R_6 и постройте графики зависимости $R_i = f(U_{\text{зист}})$, а также ВАХ $I_2(U_{\text{зист}})$, $I_3(U_{\text{зист}})$ и $I_4(U_{\text{зист}})$.

Таблица 6.2

Экспериментальные и теоретические данные
для параллельно соединенных нелинейных элементов

$U_{\text{зист}}, \text{В}$	4	8	12	16	20	24
$I_2 (A_2)$						
$I_3 (A_3)$						
$I_4 (A_4)$						
$U_{\text{зист}}, \text{В}$ (теоретич.)						
R_1 (теоретич.)						
R_2 (теоретич.)						
R_3 (теоретич.)						

Сравните экспериментальные кривые, полученные из графиков выше предложенных зависимостей, с кривой зависимости $I_2(U_{\text{зист}})$. Теоретическая кривая строится по двум кривым зависимостей $I_3(U_{\text{зист}})$ и $I_4(U_{\text{зист}})$. Желательно теоретическую и экспериментальную кривые нарисовать пастами разного цвета.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие ВАХ линейного элемента от нелинейного?
2. Назовите нелинейные элементы и объясните их характеристики.
3. Назовите способы анализа цепей, содержащих нелинейные элементы.
4. Как графически построить график ВАХ схемы, содержащей последовательно включенные нелинейные элементы?

5. Как графически построить график ВАХ схемы, содержащей параллельно включенные нелинейные элементы?

6. Назовите последовательность построения ВАХ схемы, содержащей последовательные и параллельно включенные нелинейные и линейные элементы.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.
3. Таблицы 6.1 и 6.2 с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных, формы которых приведены в данном описании.
4. ВАХ нелинейных элементов и графики изменения сопротивления от напряжения, сделанные на миллиметровке.
5. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование трехфазной системы при соединении потребителей по схеме «звезда»

Цель работы

1. Ознакомиться опытным путем с особенностями соединения приемников электрической энергии в цепи трехфазного тока по схеме «звезда».
2. Исследовать режимы симметричной (равномерной) и несимметричной нагрузок, а также работу системы при обрыве одной из фаз.
3. Приобрести навыки в измерении мощности трехфазного тока при соединении «звездой».
4. Изучить особенности построения топографических диаграмм напряжений и векторных диаграмм токов по результатам теоретических расчетов и эксперимента.

Краткие теоретические сведения

Трехфазным током называется совокупность трех однофазных переменных токов одинаковой частоты, сдвинутых друг относительно друга на $1/3$ периода (120°). Если в трехфазной системе действуют электродвижущие силы, равные по величине и сдвинутые по фазе на угол 120° , а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз, как по величине, так и по характеру (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то режим в такой системе называется *симметричным*. Невыполнение одного из этих условий или обоих вместе является причиной *несимметричного режима*.

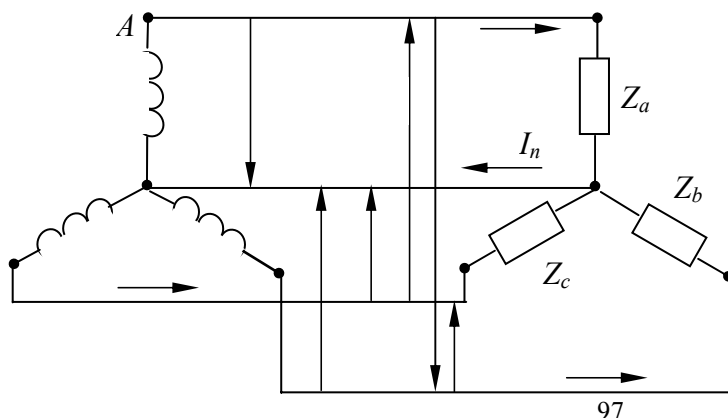
Трехфазные генераторы, как правило, создают симметричную систему электродвижущих сил, поэтому несимметричный режим системы может быть обусловлен только неравномерной нагрузкой фаз и, в общем случае, еще и разным сопротивлением линейных проводов.

В цепях трехфазного тока обмотки генератора и потребители электрической энергии могут соединяться «звездой» или «треугольником», создавая четырех- или трехпроводные системы. Если все концы обмоток генератора соединить в одной точке, а к началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии, то мы получим соединение «звездой» (рис. 7.1).

Точка соединения концов обмоток называется *нулевой*, а провод, соединяющий эту точку с нулевой точкой потребителя, называется *нулевым проводом*. *Линейными* называются провода, соединяющие начала обмоток генератора с приемниками электроэнергии. Система трехфазного тока с нулевым проводом называется *четырёхпроводной*.

Фазные напряжения генератора обычно обозначаются U_A , U_B и U_C .

В цепях трехфазного тока вне зависимости от соединения различают напряжения – линейное U_L и фазное U_ϕ , а также токи – линейные I_L и фазные I_ϕ . Напряжение между линейными проводами называется *линейным*, а между



97

Рис. 7.1. Соединение по схеме «звезда»

линейным и нулевым проводом – *фазным*. Токи, протекающие в линейных проводах, называются *линейными*, а в фазах нагрузки – *фазными*. Обычно в литературе для обозначения линейных напряжений используют двойной буквенный или цифровой индекс, а фазных – одинарный (см. рис. 7.1).

При соединении потребителей «звездой» линейный ток одновременно является и фазным, т. е. $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. Соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении «звездой» могут быть представлены следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b, \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c, \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

При равномерной нагрузке эти выражения объединяются в общее соотношение:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (7.2)$$

На практике это соотношение обозначается дробью, числителем которой является линейное напряжение, а знаменателем – фазное. Например, 220/127 В или 380/220 В.

Следует отметить, что при соединении потребителей «звездой» с нулевым проводом даже при неравномерной (несимметричной) нагрузке соотношение (7.2) практически не изменяется. Надо помнить, что при равномерной нагрузке ток в нулевом проводе отсутствует, а при неравномерной нагрузке в нулевом проводе появляется ток, величина которого определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c, \quad (7.3)$$

где $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$ – токи в линиях (фазах).

Наличие тока в нулевом проводе вызывает незначительное падение напряжения на нем, величиной которого практически можно пренебречь. Поэтому можно считать, что между нулевой точкой генератора и нулевой точкой приемника разность потенциалов равна нулю, т. е. отсутствует. Это позволяет сказать, что вне зависимости от нагрузки электроприемников фазные напряжения на них всегда одинаковы по величине и отличаются только по фазе.

На рис. 7.2 и 7.3 построены векторные диаграммы напряжений и токов при соединении потребителей по схеме «звезда» с нейтральным проводом при равномерной (рис. 7.2) и неравномерной (рис. 7.3) нагрузке фаз. На рис. 7.4 приведена векторная диаграмма напряжений и совмещенная с ней токов при неравномерной (различный характер $Z_a = X_L$; $Z_b = X_C$; $Z_c = R$) нагрузке фаз приемника. Предельным случаем неравномерной нагрузки фаз в четырехпроводной системе трехфазного приемника, включенного «звездой», можно считать обрыв одной из фаз ($R_{\text{ф}} = \infty$).

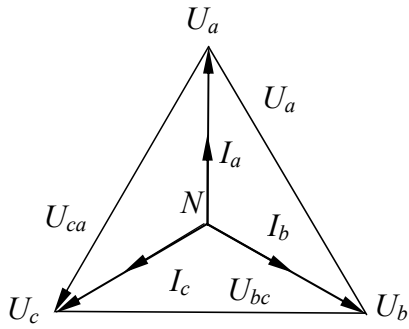


Рис. 7.2

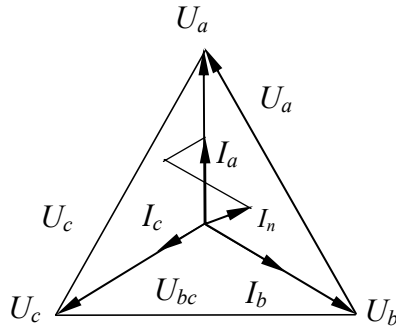


Рис. 7.3

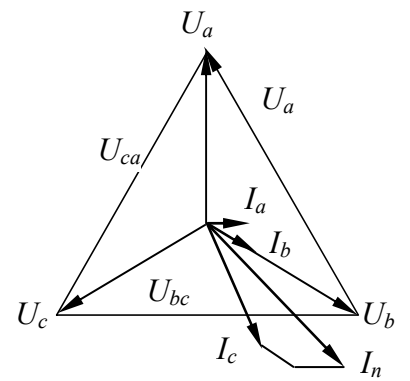


Рис. 7.4

Действительно, если одна из фаз оборвана (например, фаза a), то не будет напряжения и тока на потребителе, включенном в эту фазу, а в оставшихся под напряжением фазах режим работы не изменится. Причем, если до обрыва линейного провода при несимметричной нагрузке фаз ток в нулевом проводе имел одно значение и мог быть определен из соотношения (7.3), то теперь он будет также определяться на основе первого закона Кирхгофа, но выражением:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (7.4)$$

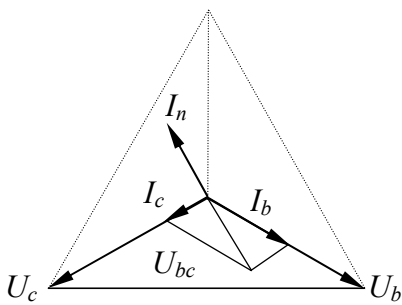


Рис. 7.5

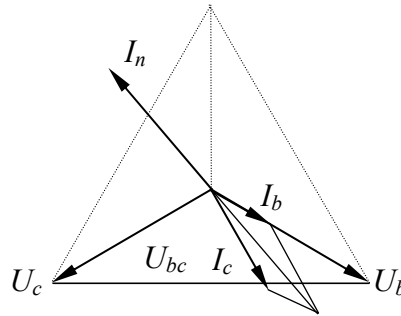


Рис. 7.6

Векторная диаграмма для случая активной нагрузки в фазах приемника изображена на рис. 7.5. На рис. 7.6 приведена векторная диаграмма для случая различного характера нагрузки в фазах приемника ($Z_a = X_L$, $Z_b = X_C$, $Z_c = R$). Рассмотренные случаи характеризуют

различные режимы работы в цепи трехфазного тока при четырехпроводной системе.

При разрыве нулевого провода энергетические соотношения в цепи значительно изменятся, кроме случая равномерной нагрузки фаз. Последнее обусловлено тем, что режим равномерной нагрузки в фазах не вызывает появления тока в нулевом проводе. В случае же неравномерной нагрузки обрыв нулевого провода может сопровождаться значительным перераспределением фазных напряжений. В этом случае схема соединения потребителей носит название «звезда без нейтрального провода».

При соединении потребителей по такой схеме и при различной нагрузке приемников фаз токи в них будут разными. Отсутствие нулевого провода приводит к тому, что падения напряжений на фазах будут прямо пропорциональны сопротивлениям фаз, т. е. на фазе с большим сопротивлением напряжение будет больше и наоборот. Между нулевой точкой генератора N и нулевой точкой потребителя n в этом случае появится узловое напряжение U_{Nn} , пропорциональное величине существовавшего нулевого тока и определяемое выражением, вытекающим из метода узловых напряжений (двух узлов):

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A \dot{Y}_a + \dot{U}_B \dot{Y}_b + \dot{U}_C \dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c}, \quad (7.5)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазные напряжения трехфазного генератора; $\dot{Y}_a = 1/\dot{Z}_a$, $\dot{Y}_b = 1/\dot{Z}_b$, $\dot{Y}_c = 1/\dot{Z}_c$ – проводимости нагрузки фаз.

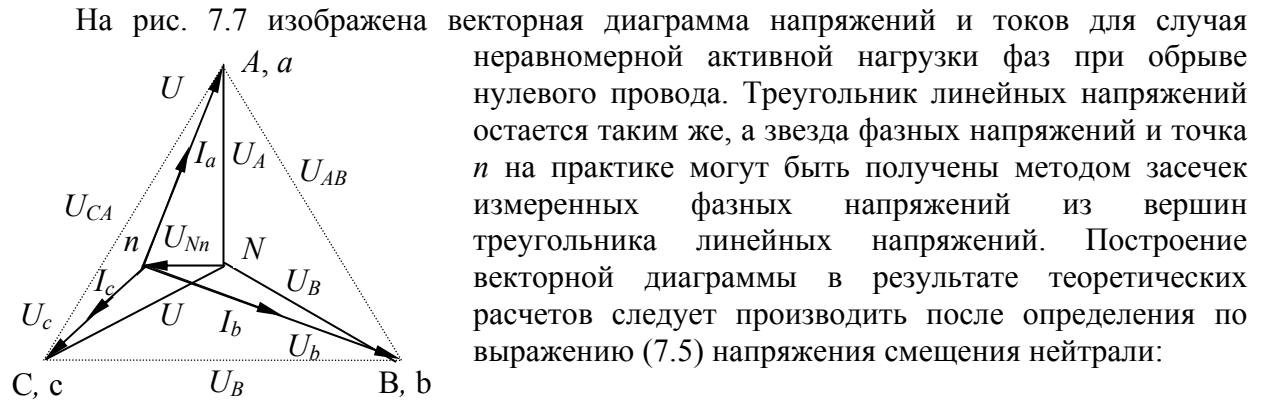


Рис. 7.7

$$\dot{U}_{Nn} = U_{Nn} e^{j\psi}.$$

Модуль вектора U_{Nn} поворачивается относительно оси действительных величин (на рис. 7.7 вертикаль, совпадающая с вектором U_A) от точки N на угол ψ (на рис. 7.7 примерно 90°), тем самым определяется место расположения точки n приемника.

При обрыве фазы «a» и при отсутствии нулевого провода оставшиеся под напряжением фазы «b» и «c» окажутся соединенными последовательно. Фазные токи I_b и I_c , протекающие через последовательно соединенные сопротивления приемника, в этом случае будут одинаковыми, а фазные напряжения будут прямо пропорциональны величинам сопротивлений фаз. Поэтому на векторной диаграмме (рис. 7.8) точка «n» переместится на вектор линейного напряжения U_{bc} и будет делить его на части, равные фазным напряжениям U_b и U_c . В данном случае, если сопротивление одной из фаз будет близко к нулю, то величина узлового напряжения будет приближаться к значению фазного напряжения.

Таким образом, при несимметричной нагрузке фаз и обрыве нулевого провода величина узлового напряжения U_{Nn} зависит от соотношений сопротивлений фаз и может приближаться к значению фазного напряжения генератора. Распределение напряжений на фазах будет также зависеть от их сопротивлений, что, естественно, недопустимо при эксплуатации. Поэтому в четырехпроводных цепях трехфазного тока на нулевой провод не ставится предохранитель, перегорание которого изменило бы распределение напряжений на фазах. В цепи трехфазного тока активная мощность равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

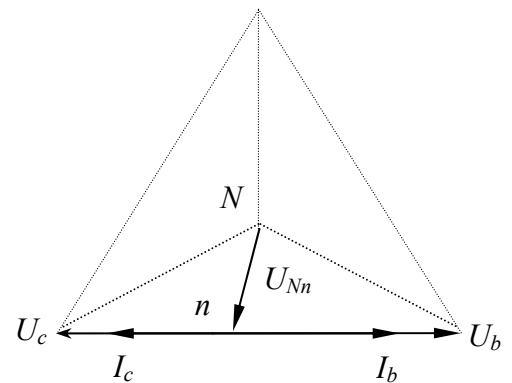


Рис. 7.8

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c. \quad (7.6)$$

Для измерения мощности в четырехпроводной цепи можно применить три однофазных ваттметра, суммируя их показания, или использовать поочередное переключение одного ваттметра в различные фазы. Этот метод получил название *метода трех ваттметров*. Он используется при соединении «звездой» как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

Оборудование

1. Амперметры Э8021 – 4 шт.
2. Вольтметр Э8030 – 1 шт.
3. Цифровые мультиметры М-838 – 2 шт.
4. Провода для соединения – 3 шт.
5. Дополнительные резисторы – 4 шт.

Выполнение работы

Лабораторный стенд представляет собой две электрических схемы соединения трех однофазных потребителей энергии. Первая – с активными сопротивлениями в фазах $R_A = R_1$, $R_B = R_2$ и $R_C = R_3$ по схеме «звезда» (на стенде схема 3, рис. 7.9), вторая – с активными (R_1) и реактивными (X_L , X_C) сопротивлениями в фазах (на стенде схема 4, рис. 7.10).

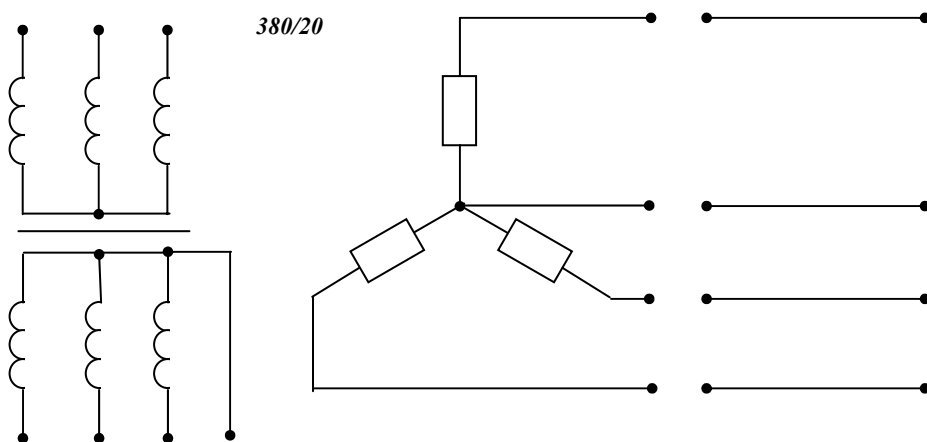


Рис. 7.9. Схема № 3 лабораторного стенда

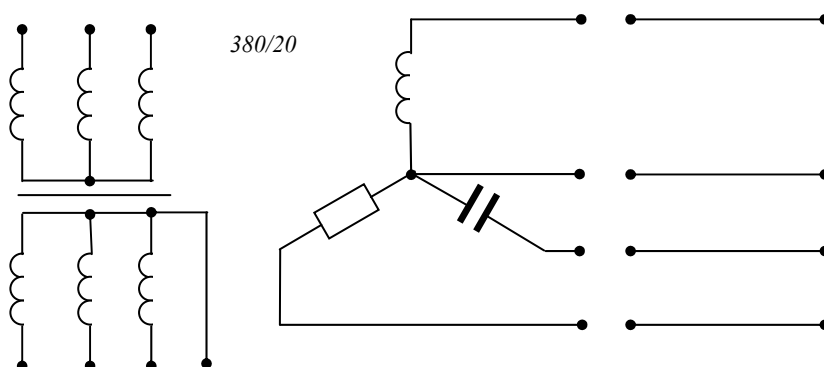


Рис. 7.10. Схема № 4 лабораторного стенда

Номиналы резисторов (сопротивлений) можно прочесть на них. На стенде имеются клеммы-разъемы (1–2, 3–4, 5–6, 7–8), позволяющие имитировать обрывы линейных проводов, а также нейтрального провода. Они же позволяют для изменения нагрузки фаз подключать параллельно имеющимся сопротивлениям дополнительные и тем самым изменять нагрузку в фазах потребителей электрической энергии. Клеммы-разъемы 3–4 позволяют за счет включать и отключать нулевой провод и тем самым формировать схемы «звезда с нейтральным проводом» и «звезда без нейтрали».

Трехфазная система напряжений подается на стенд соединением клемм A , B и C линейных проводов схемы «звезда» с клеммам питания понижающего трансформатора 380/20 В, зажимы вторичной обмотки которого приведены в средней части стенда.

Контроль токов каждого потребителя осуществляется приборами РА1, РА2 и РА3 и РА4, установленных в центральной части стенда. Стенд снабжен миллиамперметром, вольтметром и трехфазным ваттметром, позволяющим контролировать мощность потребителей.

ВНИМАНИЕ! Включение стенда, как и всех измерительных приборов, производится строго под контролем преподавателя.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Для проведения измерений соберите электрическую цепь по схеме «звезда с нейтральным проводом» (рис. 7.9). Для этого соедините перемычками клеммы 1–2, 3–4, 5–6, 7–8 между собой. Номиналы резисторов R_1 , R_2 и R_3 одинаковы, поэтому нагрузка фаз симметричная или равномерная. Подайте питание на стенд, подключив линейные провода A , B и C стенда к клеммам питания, выведенных в средней части стенда. Под контролем преподавателя подключите измерительные приборы переменного тока и измерьте линейные и фазные напряжения и токи. Данные измерений занесите в табл. 7.1 (табл. 7.1, эксперимент, режим *а*). Отключите питание стенда.

2. Разъедините перемычку между клеммами 1 и 2. Тем самым имитируется обрыв первой фазы – фазы A при тех же равномерных нагрузках фаз B и C . Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1, и занесите данные в табл. 7.1 (эксперимент, режим *б*). Отключите питание стенда.

3. Установите неравномерную нагрузку во всех фазах. Для этого необходимо либо параллельно сопротивлениям R_1 , R_2 и R_3 , установленным на стенде (рис. 7.9) стационарно, подключить дополнительные резисторы, предложенные лаборантом или преподавателем, либо переключиться на работу со схемой с активными (R_1) и реактивными (X_L , X_C) сопротивлениями в фазах (на стенде схема № 4, рис. 7.10). Соединив перемычками клеммы 1–2, 3–4, 5–6, 7–8 между собой, образуйте схему «звезда с нейтральным проводом». Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1, и занесите данные в табл. 7.1 (табл. 7.1, эксперимент, режим *в*). Отключите питание стенда.

4. Разъедините перемычку между клеммами 1 и 2. Тем самым имитируется обрыв первой фазы – фазы A . При этом нагрузки фаз A и B останутся теми же. Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1, и занесите данные в табл. 7.1 (табл. 7.1, эксперимент, режим *г*). Отключите питание стенда.

5. Соедините перемычкой клеммы 1 и 2 и разъедините перемычку между клеммами 3 и 4. Тем самым имитируется схема «звезда без нейтрали» при неравномерных нагрузках фаз A , B и C . Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1, и занесите данные в табл. 7.1 (эксперимент, режим *д*). Отключите питание стенда.

6. Оставив разъединенной перемычку между клеммами 3 и 4, разъедините перемычку между клеммами 1 и 2. Тем самым имитируется схема «звезда без нейтрали» и при обрыве фазы A . Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1, и занесите данные в табл. 7.1 (эксперимент, режим *е*). Отключите питание стенда.

Экспериментальные и теоретические результаты

Режим работы	Параметр	Режим					
		<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>
1. Эксперимент	I_a, A						
	$P_a, B\Gamma$						
	I_b, A						
	$P_b, B\Gamma$						
	I_c, A						
	$P_c, B\Gamma$						
	I_n, A						
	U_a, B						
	U_b, B						
	U_c, B						
	U_{ab}, B						
	U_{bc}, B						
	U_{ca}, B						
	U_{Nn}, B						
2. Вычислено из векторной диаграммы	I_n, A	—					
	U_{Nn}, B	—	—	—	—		
3. Получено теоретическими расчетами	I_a, A						
	$P_a, B\Gamma$						
	I_b, A						
	$P_b, B\Gamma$						
	I_c, A						
	$P_c, B\Gamma$						
	I_n, A						
	U_a, B						
	U_b, B						
	U_c, B						
	U_{ab}, B						
	U_{bc}, B						
	U_{ca}, B						
	I_n, A	—					
	U_{Nn}, B	—	—	—	—		

7. По данным экспериментальных измерений построить в масштабе векторные диаграммы для всех рассмотренных случаев (четырёхпроводная система: равномерная нагрузка, обрыв фазы A , неравномерная нагрузка; трехпроводная система: неравномерная нагрузка, обрыв фазы A). Построение векторной диаграммы напряжений и токов для случая неравномерной нагрузки фаз (при обрыве нулевого провода) осуществляется в следующей последовательности. Изображается треугольник линейных напряжений генератора A, B, C , который остается неизменным, как и для случае равномерной нагрузки фаз. Смещение нейтральной точки n у потребителя на практике может быть получено методом засечек измеренных величин фазных напряжений U_a, U_b, U_c из вершин треугольника линейных напряжений A, B, C генератора. Полученные в результате построения векторной диаграммы расчетные данные I_n, U_{Nn} занесите в табл. 7.1 (позиция 2).

Теоретические расчеты

1. Проведите аналитический расчет токов при равномерной нагрузке фаз потребителя ($R_1 = R_2 = R_3$) для четырехпроводной трехфазной сети (режим *а*) и для этой же сети, но при отключении фазы *А* (режим *б*). По выражению (7.3) определите ток в нейтральном проводе.

2. Проведите аналитический расчет токов при неравномерной нагрузке фаз потребителя (либо $R_1 \neq R_2 \neq R_3$, либо R_3, X_L, X_C) для четырехпроводной трехфазной сети (режим *в*) и для этой же сети, но при отключении фазы *А* (режим *г*). По выражению (7.3) определите ток в нейтральном проводе.

3. Проведите аналитический расчет токов при неравномерной нагрузке фаз потребителя (либо $R_1 \neq R_2 \neq R_3$, либо R_3, X_L, X_C) для трехпроводной трехфазной цепи (режим *д*). Для этого, используя выражение (7.5), определите напряжение смещения нейтрали в комплексной форме $\dot{U}_{Nn} = U_{Nn} e^{j\phi}$.

4. По выражению (7.6), зная, что при чисто активной нагрузке фаз $\cos\phi_a = \cos\phi_b = \cos\phi_c = 1$, определите активную мощность и сравните ее с показаниями ваттметра.

5. Результаты теоретических вычислений занесите в столбцы табл. 7.1, соответствующие схеме электрической цепи, т. е. ее режиму (*а–д*).

6. По данным теоретических расчетов построить в масштабе векторные диаграммы для всех рассмотренных случаев (четырёхпроводная система: равномерная нагрузка, обрыв фазы *А*, неравномерная нагрузка; трехпроводная система: неравномерная нагрузка, обрыв фазы *А*).

Контрольные вопросы

1. Какое соединение называется соединением «звездой»?
2. Приведите порядок построения векторной диаграммы для случая соединения потребителей с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз по схеме звезда с нейтральным проводом (четырёхпроводная система).
3. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе и почему?
4. Почему на нулевой провод не ставится предохранитель?
5. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных «звездой», при несимметричной нагрузке фаз с нулевым проводом и без него?
6. Как определить расчетным путем напряжения на фазах приемника электрической энергии при их соединении «звездой» без нейтрального провода? Как сделать это же путем экспериментальных замеров?
7. Приведите порядок построения векторной диаграммы для случая соединения потребителей с неравномерной нагрузкой фаз по схеме «звезда» без нейтрального провода (трехпроводная система).
8. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных «звездой», при обрыве фазы с нулевым проводом и без него?
9. Как измеряется мощность в цепи трехфазного тока при четырехпроводной системе?
10. Как вычисляется активная, реактивная и полная мощности трехфазного тока при соединении потребителей «звездой» с симметричной и несимметричной нагрузкой фаз приемника?

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.
3. Таблицу 7.1 с результатами экспериментально полученных данных и теоретических расчетов (форма таблицы приведена в данном описании).
4. Топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов, выполненные аккуратно и в масштабе, желательно на миллиметровке.
5. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование трехфазной системы при соединении потребителей по схеме «треугольник»

Цель работы

1. Ознакомиться на практике с особенностями соединения «треугольником» активных приемников электрической энергии в цепи трехфазного тока.
2. Исследовать режимы симметричной (равномерной) и неравномерной нагрузок фаз, а также режим обрыва фазы и обрыва одного линейного провода.
3. Приобрести навыки в построении топографических диаграмм напряжений и векторных диаграмм токов
4. Изучить особенности измерения мощности трехфазного тока при соединении потребителей «треугольником».

Краткие теоретические сведения

Если обмотки генератора трехфазного тока соединить таким образом, что конец первой обмотки (X) соединяется с началом второй (B), конец второй (Y) – с началом третьей (C), а конец третьей (Z) – с началом первой (A) и к точкам соединения подключить линейные провода, то получим соединение обмоток «**треугольником**» (рис. 8.1). В отличие от соединения «звездой», где в большинстве случаев применяется четырехпроводная система, при соединении «треугольником» используется только трехпроводная система.

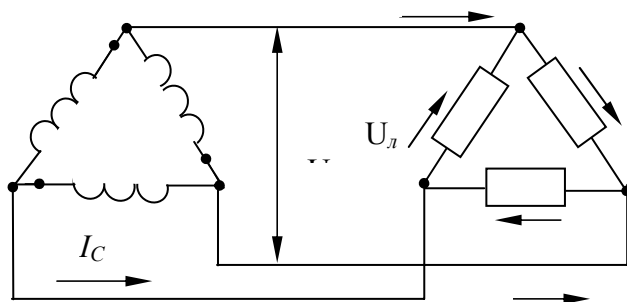


Рис. 8.1. Схема соединения «треугольником»

При соединении «треугольником» линейные напряжения (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}) будут также фазными (U_A , U_B , U_C), т. к. напряжение между линейными проводами является напряжением между началом и концом каждой фазы, т. е. $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$.

Соотношения между линейными и фазными токами могут быть легко получены, если для каждой узловой точки потребителя применить первый закон Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

Если при соединении потребителей «треугольником» нагрузка будет равномерной, то все фазные токи будут равны между собой, соответственно, будут равны и линейные токи. Тогда соотношение между линейными и фазными токами будет выражаться формулой:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}. \quad (8.2)$$

На рис. 8.2 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при соединении активных потребителей «треугольником» в случае равномерной нагрузки. Мы видим, что векторы линейных (они же фазных) напряжений образуют равносторонний «треугольник». В силу того, что сопротивлениями линейных проводов можно пренебречь, получим $U_{AB} = U_{ab}$, $U_{BC} = U_{bc}$, $U_{CA} = U_{ca}$. Поскольку нагрузка имеет чисто активный характер, то фазные токи совпадают по фазе с напряжениями. Линейные токи определяются как геометрическая разность соответствующих фазных токов по выражениям (8.1).

На рис. 8.3 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при соединении активных потребителей «треугольником» в случае неравномерной нагрузки. Здесь векторы линейных напряжений также образуют равносторонний «треугольник», а фазные токи совпадают по фазе с напряжениями, но имеют различную величину.

На рис. 8.4 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при соединении потребителей «треугольником» в случае разной по характеру нагрузки фаз ($Z_{ab} = X_L$, $Z_{bc} = R$, $Z_{ca} = X_C$). Здесь векторы линейных напряжений также образуют равносторонний треугольник, фазный ток I_{bc} совпадает по фазе с напряжением U_{bc} , ток I_{ab} отстает на угол 90° от вектора напряжения U_{ab} , а ток I_{ca} , наоборот, опережает на угол 90° вектор напряжения U_{ca} .

Значения фазных токов для случая неравномерной нагрузки определяются величиной сопротивления и могут быть найдены по закону Ома:

$$\left. \begin{aligned} I_{ab} &= U_{ab} / R_{ab}, \\ I_{bc} &= U_{bc} / R_{bc}, \\ I_{ca} &= U_{ca} / R_{ca}. \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

Линейные токи также различны и определяются как геометрическая разность соответствующих фазных токов по выражениям (8.1).

Режим работы трехфазной системы, включенной «треугольником», при обрыве фазного провода аналогичен отсутствию нагрузки в фазе $I_{ab} = 0$. В этом случае фазные токи в «уцелевших» фазах не изменяются. Линейный ток I_C в этом случае остается без изменения, а линейные токи I_A и I_B уменьшаются и становятся равными соответствующим фазным токам: $I_A = I_{ca}$, $I_B = I_{bc}$. Этот режим иллюстрируется векторной диаграммой, представленной на рис. 8.5, а аналитические соотношения легко получаются из соотношений (8.1), подставив в них условие $I_{ab} = 0$.

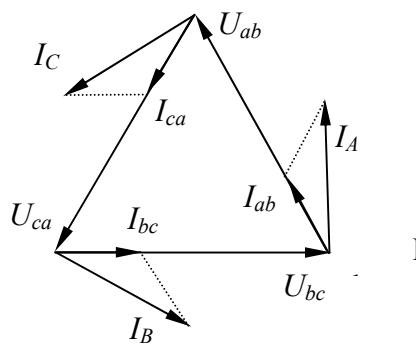


Рис. 8.2

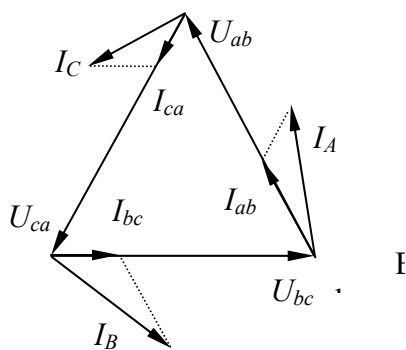


Рис. 8.3

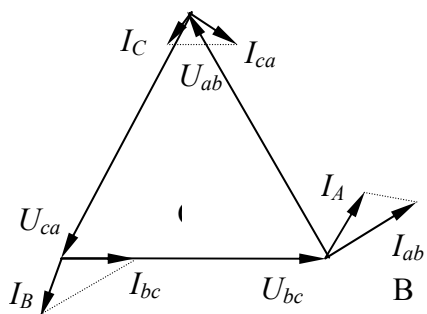


Рис. 8.4

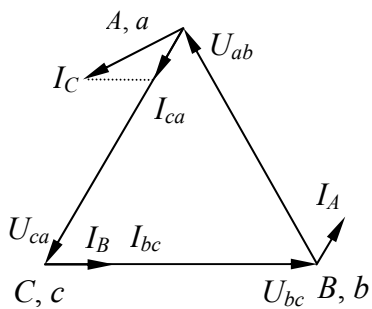


Рис. 8.5

Если нагрузка будет отсутствовать на двух фазах (например, на фазах $a-b$ и $b-c$), то система превратится в однофазную, и ток будет только в фазе $c-a$, а линейные токи I_A и I_B будут равны по величине и противоположны по направлению, что можно также определить из уравнений (8.1), подставив в них значения $I_{ab} = I_{bc} = 0$. Векторная диаграмма для этого случая изображена на рис. 8.6.

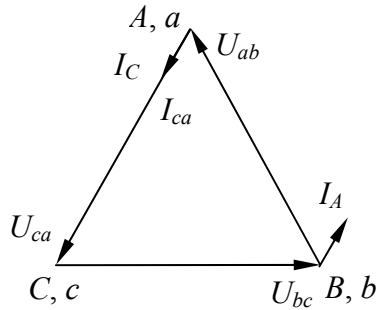


Рис. 8.6

При обрыве одного линейного провода в трехфазной цепи с включением нагрузки «треугольником» нормально будет работать только одна фаза. Две другие будут работать как последовательно соединенные сопротивления, к концам которых подводится полное линейное напряжение. Поэтому падения напряжения на них распределятся пропорционально сопротивлениям фаз. На рис. 8.7 изображена векторная диаграмма для случая, когда оборван линейный провод фазы A , т. е. $I_A = 0$, а сопротивления трех фаз активны и различны по величине. В этом случае будут справедливы соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ca} + \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_{bc}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

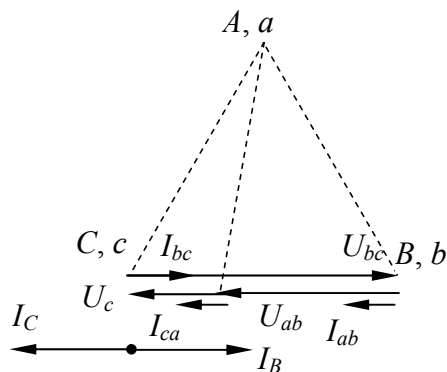


Рис. 8.7

В настоящей лабораторной работе для измерения мощности трехфазной цепи, соединенной «треугольником», используется метод двух ваттметров.

При использовании этого метода токовые обмотки ваттметров включают в какие-либо две фазы, а обмотки напряжения между третьей (незанятой) фазой и той фазой, в которую включена токовая обмотка данного ваттметра. Общая мощность при этом равна сумме показаний обоих ваттметров. Докажем это.

Мощность трехфазной цепи при соединении «треугольником» равна сумме мощностей отдельных фаз:

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = I_{ab}U_{ab} + I_{bc}U_{bc} + I_{ca}U_{ca}. \quad (8.5)$$

Известно, что алгебраическая сумма значений линейных напряжений (в векторной или комплексной формах) как при соединении «звездой», так и при соединении «треугольником», равна нулю, т. е.

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0.$$

Выразим из этого уравнения $U_{ab} = -U_{bc} - U_{ca}$ и подставим его в уравнение (8.5). Получим:

$$P = I_{ab}(-U_{bc} - U_{ca}) + I_{bc}U_{bc} + I_{ca}U_{ca} = U_{ca}(I_{ca} - I_{ab}) + U_{bc}(I_{bc} - I_{ab}) \quad (8.6)$$

и, поскольку,

$$I_{ca} - I_{ab} = -I_A,$$

$$I_{bc} - I_{ab} = I_B,$$

$$U_{ca} = -U_{ac},$$

то

$$P = I_A U_{ac} + I_B U_{bc}. \quad (8.7)$$

Таким образом, мощность трехфазной цепи можно измерить двумя ваттметрами, включив их описанным выше способом.

Оборудование

1. Амперметры Э8021 – 4 шт.
2. Вольтметр Э8030 – 1 шт.
3. Цифровые мультиметры М-838 – 2 шт.
4. Провода для соединения – 3 шт.
5. Дополнительные резисторы – 4 шт.

Выполнение работы

Лабораторный стенд представляет собой две электрических схемы соединения трех однофазных потребителей энергии. Первая – с активными сопротивлениями в фазах R_1 , R_2 и R_3 по схеме «треугольник» (на стенде, схема 1, рис. 8.8а), вторая – с активными (R) и реактивными (X_L , X_C) сопротивлениями в фазах (на стенде, схема 2, рис. 8.8б). Номиналы резисторов (сопротивлений) можно прочесть на них. На стенде имеются клеммы-разъемы (1–2, 3–4, 5–6, 7–8, 9–10), позволяющие имитировать обрывы линейных и фазных проводов. Они же позволяют для изменения нагрузки фаз подключать параллельно имеющимся сопротивлениям дополнительные и тем самым изменять нагрузку в фазах потребителей электрической энергии.

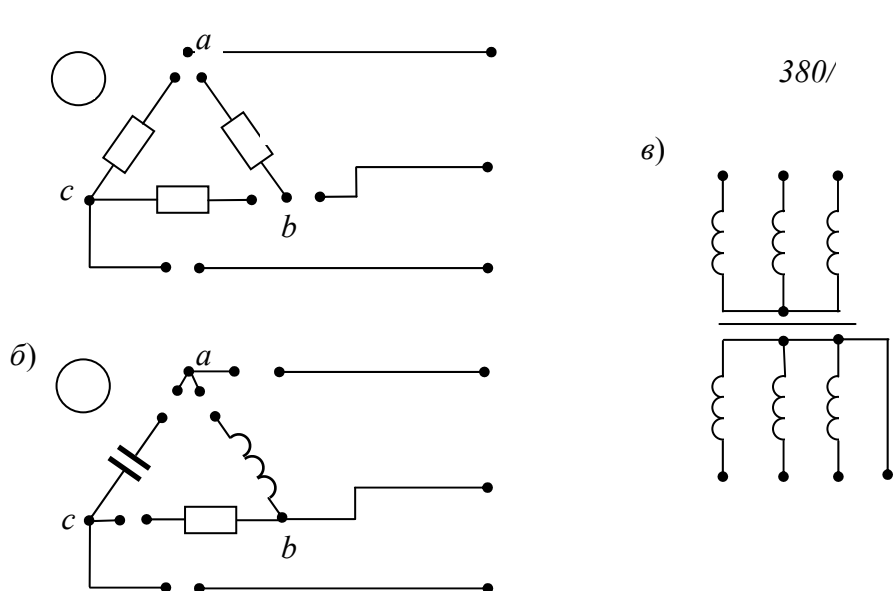


Рис. 8.8. Схемы № 1 и 2 лабораторного стенда

Трехфазная система напряжений подается на стенд соединением клемм A , B и C линейных проводов схемы «треугольник» с клеммам питания понижающего трансформатора 380/20 В (рис. 8.8в), зажимы вторичной обмотки которого приведены в средней части стенда.

Контроль токов каждого потребителя осуществляется приборами $PA1$, $PA2$, $PA3$ и $PA4$,

установленных в центральной части стенда. Стенд снабжен миллиамперметром, вольтметром pV и трехфазным ваттметром, позволяющим контролировать мощность потребителей.

ВНИМАНИЕ! Включение стенда, как и всех измерительных приборов, производится строго под контролем преподавателя.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Для проведения измерений соберите электрическую цепь по схеме «треугольник» (на стенде схема № 1, рис. 8.8а). Для этого соедините перемычками клеммы 1–2, 1–3, 4–5, 5–6, 7–8 между собой. Номиналы резисторов R в фазах приемника одинаковы, поэтому нагрузка фаз симметричная (равномерная). Подайте питание на стенд, подключив линейные провода A , B и C стенда к клеммам питания, выведенных в средней части стенда (рис. 8.8в). Под контролем преподавателя подключите измерительные приборы переменного тока и измерьте линейные и фазные токи, линейные напряжения и мощность методом двух ваттметров. Данные измерений занесите в табл. 8.1 (режим а). Отключите питание стенда.

2. Разъедините перемычку между клеммами 1 и 3. Тем самым имитируется обрыв первой фазы – фазы ab , при тех же равномерных нагрузках – второй фазы bc и третьей – ca . Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1 и занесите данные в табл. 8.1 (режим б). Отключите питание стенда.

3. Установите неравномерную нагрузку во всех фазах. Для этого необходимо либо параллельно фазным сопротивлениям R (на стенде схема № 1, рис. 8.8а), установленным на стенде стационарно, подключить дополнительные резисторы, предложенные лаборантом или преподавателем, либо переключиться на работу со схемой с активными ($R = R_{bc}$) и реактивными ($X_L = Z_{ab}$, $X_C = Z_{ca}$) сопротивлениями в фазах (на стенде схема № 2, рис. 8.8б). Вновь соедините перемычкой все клеммы и образуйте схему «треугольник». Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1, и занесите данные в табл. 8.1 (режим в). Отключите питание стенда.

4. Разъедините перемычку между клеммами 1 и 3 (схема № 1) или 5 и 6 (схема № 2). Тем самым имитируется обрыв первой фазы – фазы ab , при тех же неравномерных нагрузках – фаз bc и ca . Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1 и занесите данные в табл. 8.1 (режим $г$). Отключите питание стенда.

5. Дополнительно к разъединенным перемычкам 1 и 3 (схема № 1) или 5 и 6 (схема № 2) разъедините перемычки между клеммами 1 и 2 (схема № 1) или 3 и 4 (схема № 2). Тем самым имитируется обрыв двух фаз ab и bc при той же нагрузке фазы ca . Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1 и занесите данные в табл. 8.1 (режим $д$). Отключите питание стенда.

6. При неравномерной нагрузке исследовать работу трехфазной системы с обрывом одного линейного провода. Для этого разъедините перемычку между клеммами 7 и 8 (схема № 1) или 9–10 (схема № 2). Подайте питание, проведите измерения, как в п. 1 и занесите данные в табл. 8.1 (режим $е$). Отключите питание стенда.

Таблица 8.1

Экспериментальные данные измерений

Режим работы	Измерено										
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_{ab}, A	I_{bc}, A	I_{ca}, A	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ca}, B	$P', Вт$	$P'', Вт$
a											
b											
$в$											
$г$											
$д$											
$е$											

Теоретические расчеты

1. Проведите аналитический расчет токов при равномерной нагрузке фаз потребителя R для трехфазной сети при соединении потребителей по схеме треугольника (режим a) и для этой же сети, но при отключении фазы ab (режим b). По выражению (8.1) определите линейные токи.

2. Проведите аналитический расчет токов при неравномерной нагрузке фаз потребителя для трехфазной сети (режим $в$) и для этой же сети, но при отключении фазы ab (режим $г$). По выражению (8.1) определите линейные токи.

3. Проведите аналитический расчет токов при отключении потребителей на двух фазах ab и bc для трехфазной цепи (режим $д$).

4. Проведите аналитический расчет токов при отключении линейного провода A для трехфазной цепи (режим $е$).

5. По выражению (8.6) определите активную мощность и сравните ее с показаниями ваттметра.

6. Результаты теоретических вычислений занесите в табл. 8.2, соответствующие схеме электрической цепи, т. е. ее режиму ($a-d$).

7. По данным теоретических расчетов (или экспериментальных измерений) построить в масштабе векторные диаграммы для всех рассмотренных случаев (равномерная нагрузка, обрыв фазы ab , неравномерная нагрузка, обрыв фазы ab и обрыв двух фаз ab и bc , а также обрыв линейного провода A).

Данные теоретических расчетов

Режим	Вычислено теоретически												
	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$P_{ab},$ Вт	$P_{bc},$ Вт	$P_{ca},$ Вт	$P_{\Sigma},$ Вт
<i>a</i>													
<i>б</i>													
<i>в</i>													
<i>г</i>													
<i>д</i>													
<i>е</i>													

Контрольные вопросы

1. Какое соединение называется соединением «треугольником»?
2. Как строится векторная диаграмма напряжений и совмещенная с ней векторная диаграмма токов для случая соединения потребителей по схеме треугольник? Покажите процесс их построения при равномерной и неравномерной нагрузках в фазах.
3. Каковы особенности режима при обрыве одной из фаз приемника при соединении потребителей «треугольником»? Покажите порядок построения векторной диаграммы для этого случая.
4. Каковы особенности режима при обрыве двух фаз приемника при соединении потребителей «треугольником»? Покажите порядок построения векторной диаграммы для этого случая.
5. Каковы особенности режима при обрыве одного линейного провода при соединении потребителей «треугольником»? Как строится векторная диаграмма для этого случая? Почему, несмотря на обрыв одного линейного провода, имеется мощность во всех трех фазах?
6. Как вычисляется активная, реактивная и полная мощности трехфазного тока при соединении потребителей «треугольником» с симметричной и несимметричной нагрузкой фаз приемника?
7. Почему в методе двух ваттметров сумма показаний двух однофазных ваттметров равна полной мощности трехфазной системы?

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальную расчетную схему электрических соединений элементов электрической цепи.
3. Таблицы 8.1 и 8.2 с результатами теоретических расчетов и экспериментально полученных данных (форма таблицы приведена в данном описании).
4. Расчет активной мощности.
5. Топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов, выполненные аккуратно и в масштабе, желательно на миллиметровке.
6. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Испытание однофазного трансформатора

Цель работы

1. Изучить устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
2. Провести испытание в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.
3. Научиться определять потери мощности по результатам испытаний.

Краткие теоретические сведения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения. Простейший однофазный трансформатор состоит из ферромагнитного сердечника и двух обмоток (рис. 9.1). Обмотка, соединенная с источником электроэнергии, называется первичной. Соответственно, первичными именуются все величины, относящиеся к этой обмотке: w_1 – количество витков; u_1 – напряжение, В; i_1 – ток, А.

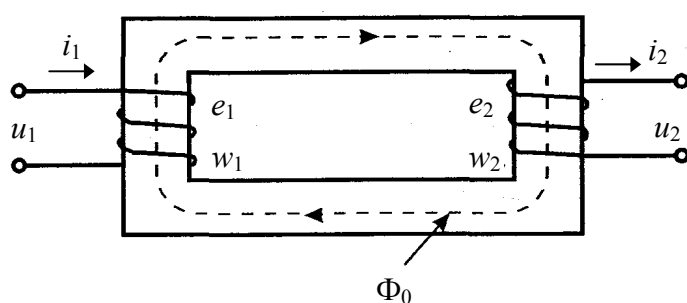


Рис. 9.1 Схема трансформатора

Обмотка, к которой подключается потребитель электроэнергии, называется вторичной, и, соответственно, относящиеся к ней величины: w_2 – количество витков; u_2 – напряжение, В; i_2 – ток, А.

На паспортном щите трансформатора указывается его номинальное напряжение: высокое $U_{В1}$ и низкое $U_{Н2}$. В связи с этим различают обмотки высшего и

низшего напряжения. Если первичное напряжение U_1 трансформатора меньше вторичного U_2 , то он работает в режиме повышающего трансформатора; если наоборот, то трансформатор будет понижающим. Кроме того, указывается номинальная полная мощность $S_{ном}$ (кВА), частота f (Гц), режим работы, способ охлаждения, линейные токи при номинальной мощности, число фаз, схема и группа соединений, а также напряжение короткого замыкания.

Если к первичной обмотке трансформатора подвести переменное напряжение u_1 , то в ней появится некоторый ток i_1 , который создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ_0 . Этот поток, пересекая витки обмоток трансформатора по закону электромагнитной индукции, возбуждает в первичной и вторичной обмотках электродвижущие силы (ЭДС индукции) e_1 и e_2 :

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}. \quad (9.1)$$

Если приложенное напряжение подчинено синусоидальному закону $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$, $u_1 = U$, то в идеальном трансформаторе (без потерь) его первичная обмотка будет

представлять собой чистую индуктивность, и ток будет отставать по фазе от напряжения на угол $\pi/2$:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t - \pi/2),$$

а магнитный поток будет совпадать по фазе с током, его создающим:

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2) = -\Phi_m \cos \omega t, \quad (9.2)$$

ЭДС e_1 и e_2 будут равны:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m1} \sin \omega t;$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_2 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m2} \sin \omega t.$$

Поскольку для идеального трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа $u_1 = e_1$ и $u_2 = e_2$, то

$$\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \left| \frac{e_2}{e_1} \right|, \text{ или } \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} = k,$$

где k – коэффициент трансформации.

Таким образом, трансформатор преобразует подведенное к нему напряжение в соответствии с отношением числа витков его обмоток. Векторная диаграмма идеального трансформатора показана на рис. 9.2.

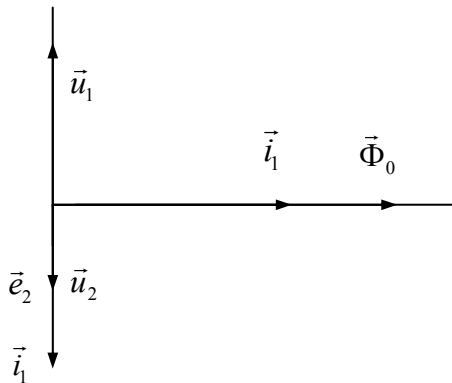


Рис. 9.2. Векторная диаграмма идеального трансформатора

Основным для трансформатора является опыт холостого хода при номинальном первичном напряжении $U_{ном}$. Часто необходимо знать, каким образом изменится режим работы трансформатора при изменении первичного напряжения. Зависимости $I_{10} = f(U_1)$ и $P_{10} = f(U_1)$ называются характеристиками холостого хода трансформатора (рис. 9.3). Если повышать напряжение U_1 , начиная от нуля, то до насыщения сердечника ток I_{10} будет возрастать пропорционально напряжению. Затем, когда начнет оказывать влияние насыщение магнитопровода ($U_1 > 0,8U_{ном}$), ток I_{10} начнет быстро увеличиваться.

Работа трансформатора сопровождается потерей некоторой части потребляемой мощности и выделением энергии в виде тепла внутри трансформатора. При этом потери мощности в трансформаторе делятся на потери мощности в стали $\Delta P_{\text{ст}}$ и на потери мощности в меди $\Delta P_{\text{м}}$. Для их определения **на** практике применяется специальный метод, основанный на опытах холостого хода и короткого замыкания.

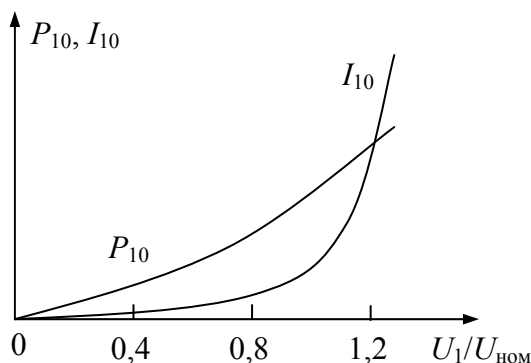


Рис. 9.3. Характеристика холостого хода трансформатора

В режиме холостого хода трансформатор испытывают при разомкнутой вторичной цепи и номинальном первичном напряжении $U_{\text{ном}}$. На основании этого опыта определяют коэффициент трансформации k и потери мощности в стали $\Delta P_{\text{ст}}$. Потери мощности при холостом ходе складываются из потерь мощности в магнитопроводе и потерь мощности в проводах первичной $I_{10}^2 R_1$ и вторичной $I_{20}^2 R_2$ обмоток. Потери в проводниках обмоток полностью нагруженного трансформатора составляют $0,5 \div 3 \%$ номинальной мощности трансформатора (тем меньше, чем мощнее трансформатор), а при холостом ходе вследствие относительной малости тока I_{10} они ничтожны по сравнению с потерями в стали. Следовательно, вся мощность холостого хода трансформатора затрачивается лишь на потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$. На этом основании опыт холостого хода служит для определения потерь мощности в стали трансформатора. Их можно определить по показаниям ваттметра, включенного в цепь первичной обмотки трансформатора, работающего в режиме холостого хода при номинальном первичном напряжении $U_{\text{ном}}$.

Для проведения опыта короткого замыкания вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, подключая к ней амперметр. Режим короткого замыкания опасен для работы трансформатора, т. к. ведет к перегреву из-за большой величины тока короткого замыкания. В связи с этим, напряжение подводимое к первичной обмотке $U_{1\text{к}}$ повышают от нуля до такой величины, при которой в обмотках трансформатора устанавливаются номинальные токи $I_{1\text{ном}}$ и $I_{2\text{ном}}$. Установившееся при этом напряжение называется напряжением короткого замыкания $u_{1\text{к}}$. Его выражают в процентах от номинального напряжения первичной обмотки, и оно обычно составляет величину $(5 \div 10)\% U_{\text{ном}}$. При таком напряжении ток в первичной обмотке $I_{1\text{к}}$ будет равен номинальному $I_{1\text{ном}}$. С помощью вольтметра, амперметра и ваттметра измеряются напряжение $U_{1\text{к}}$ ток $I_{1\text{к}}$ и мощность $P_{1\text{к}}$, потребляемые трансформатором.

Электродвижущая сила $E_{2\text{к}}$ вторичной обмотки при опыте короткого замыкания равна падению напряжения вторичной обмотки

$$E_{2\text{к}} = I_2 Z_2,$$

в то время как в рабочих условиях

$$E_2 = I_2 Z_2 + U_2.$$

Причем при опыте короткого замыкания $E_{2к}$ составляет $(2 \div 5)\%$ от E_2 . Прямо пропорционально ЭДС уменьшается поток в сердечнике, а вместе с ним и намагничивающий ток, возбуждающий его. В то же время при опыте короткого замыкания потери в проводах обмоток такие же, как и при нагрузке, а потери в сердечнике незначительны, т. к. они пропорциональны квадрату магнитного потока Φ_m .

В опыте короткого замыкания подводимое напряжение мало (по сравнению с номинальным) и это позволяет считать, что потери мощности происходят только в проводах обмоток трансформатора. Таким образом, мощность потерь в этом опыте

$$P_{1к} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

Намагничивающим током ввиду его относительной малости в этом опыте можно пренебречь, тогда $I_1 = I_2'$ (штрих означает, что ток I_2 приведен к току I_1). Тогда

$P_{1к} = I_1^2 R$. Поэтому можно считать, что при опыте короткого замыкания вся мощность $P_{1к}$, подводимая к трансформатору, равна мощности потерь ΔP_m в проводах первичной и вторичной обмоток, т. е. $P_{1к} = \Delta P_m$.

Зная величину $P_{1к}$, можно рассчитать потери мощности в меди для любой нагрузки трансформатора:

$$\Delta P_m = P_{1к} \beta^2,$$

где β – степень загрузки трансформатора, которая равна отношению тока нагрузки I_2 к номинальному току вторичной обмотки $I_{2ном}$, т. е. $\beta = I_2/I_{2ном}$.

Полные потери мощности в трансформаторе будут равны

$$\Delta P = P_{1к} \beta^2 + \Delta P_{ст}.$$

С увеличением тока I_2 увеличивается падение напряжения во вторичной обмотке трансформатора $I_2 Z_2$, а напряжение U_2 , в соответствии с уравнением $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2$, уменьшается. Величина $\dot{Z}_2 = R_2 + jX_2$ носит название комплексного сопротивления вторичной обмотки трансформатора. Зависимость вторичного напряжения $U_{2ном}$ от тока вторичной обмотки I_2 при $U_1 = U_{1ном}$ называется внешней характеристикой (рис. 9.4).

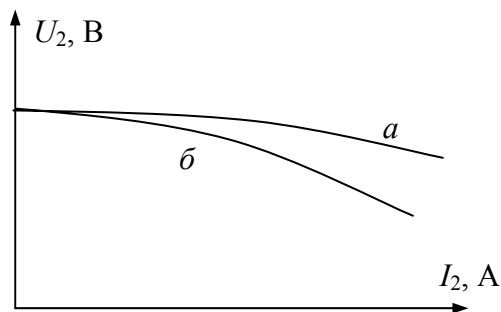


Рис. 9.4. Внешняя характеристика трансформатора: а) $\cos\varphi = 1$; б) $\cos\varphi = 0,8$ (индукт.)

На основании опытных данных короткого замыкания можно определить потери напряжения в трансформаторе. Если на первичную обмотку подать номинальное напряжение $U_{1ном}$, а ток вторичной обмотки изменять от нуля до номинального значения, то вторичное напряжение U_2 трансформатора будет тем меньше, чем больше нагрузочный ток. Алгебраическая разность между вторичным напряжением холостого хода U_{20} и вторичным напряжением при полной нагрузке $U_{2нагр}$ характеризует изменение вторичного напряжения при переходе от холостого хода к режиму при полной нагрузке трансформатора.

Первичное напряжение при этом должно поддерживаться неизменным, т. е. $U_{1\text{ном}} = \text{const}$. Данное изменение обычно выражают в процентах и называют процентным изменением напряжения трансформатора:

$$\Delta U_2 (\%) = \frac{U_{20} - U_{2\text{нагр}}}{U_{20}} 100 \%$$

Метод определения потерь мощности в трансформаторе по опытам холостого хода и короткого замыкания удобен тем, что им можно определить КПД мощных трансформаторов при отсутствии необходимой мощности источника энергии и соответствующей нагрузки.

При испытании трансформатора в рабочем режиме определяется коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P},$$

где $\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}}$.

Определить величину η трансформатора можно двумя способами: а) прямым, измеряя P_1 и P_2 , и б) косвенным, зная P_1 или P_2 и ΔP . В общем случае подводимая мощность P_1 превышает отдаваемую P_2 на величину потерь в самом трансформаторе:

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}}).$$

Выражая активную мощность через полную $P_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi$ и учитывая степень загрузки β , получим формулу:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{лк}} + \Delta P_{\text{ст}}},$$

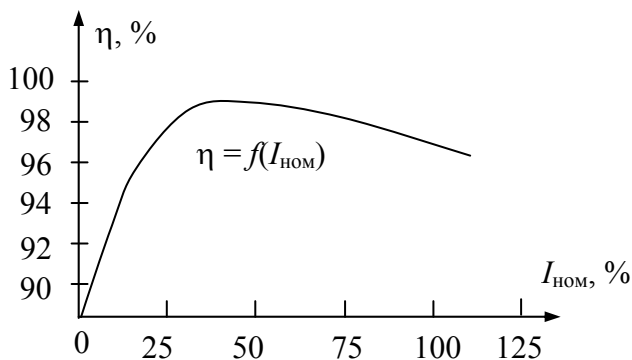


Рис. 9.5. Зависимость КПД от нагрузки

где $S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \approx U_{2\text{ном}} I_{1\text{ном}}$ – полная номинальная мощность. Коэффициент полезного действия современных трансформаторов приближается к величинам $\eta = 0,98 \div 0,995$. Причем при проектировании трансформаторов, учитывая, что значительную часть времени он будет загружен не полностью, максимальный КПД стремятся достичь при средней нагрузке (рис. 9.5).

В данной лабораторной работе исследуется трансформатор, в котором потери мощности можно определить как методом холостого хода и короткого замыкания, так и более точным способом в виде разности подводимой мощности P_1 и отдаваемой трансформатором мощности P_2 . Во втором случае трансформатор испытывается под нагрузкой при номинальном первичном напряжении $U_{1\text{ном}}$. Мощность нагрузки подсчитывается по формуле

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Коэффициент мощности $\cos\varphi_2$ зависит от характера нагрузки. Для активной нагрузки, применяемой в данной работе, $\cos\varphi_2$ равен единице.

Оборудование

1. Исследуемый трансформатор.
2. Амперметры, вольтметры, ваттметры.
3. Нагрузочный реостат.
4. Автотрансформатор ЛАТР.

Программа выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
2. Провести испытание однофазного трансформатора в режиме холостого хода.
3. Провести испытание однофазного трансформатора в режиме короткого замыкания.
4. Провести испытание однофазного трансформатора под нагрузкой.
5. Научиться определять потери мощности по результатам испытаний и построить графики зависимостей, характеризующих работу трансформатора.
6. Привести данные используемых электроизмерительных приборов (табл. 9.1) и паспортные данные электрооборудования.

Таблица 9.1

Данные измерений и вычислений полученные при исследовании
однофазного трансформатора

№ п/п	Режим работы		Измерено					Вычислено				
			U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	I_2 , А	U_2 , В	P_2 , Вт	ΔP , Вт	η , %	ΔU_2 , %	$\cos\varphi$
I.	Холостой ход											
II.	Короткое замыкание											
III.	Под нагрузкой	1.										
		2.										
		3.										
		4.										
		5.										
		6.										

Порядок выполнения экспериментальной части работы

- I. Испытание трансформатора в режиме холостого хода для определения потерь мощности в стали $\Delta P_{ст}$ и коэффициента трансформации k .
 - 1) Ознакомиться с устройством однофазного трансформатора, его паспортными данными: тип, мощность, число фаз, частота сети, u_k %, $U_{1ном}$, $U_{2ном}$, $I_{1ном}$, $I_{2ном}$.

2) Собрать схему испытания трансформатора согласно рис. 9.6.

3) После проверки схемы преподавателем подать номинальное напряжение $U_{1ном}$ на первичную обмотку трансформатора.

4) При измерении потерь мощности холостого хода $\Delta P_{ст}$ выключатель В1 должен быть разомкнут для того, чтобы ваттметр PW1 не учитывал мощность, потребляемую вольтметром PV2. Для измерения напряжения вторичной обмотки U_2 выключатель В1

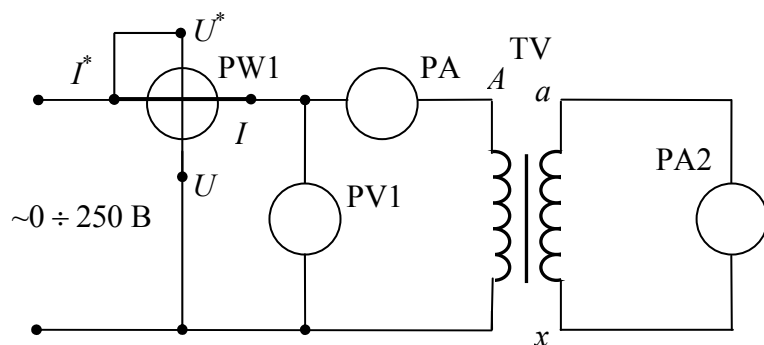


Рис. 9.7. Схема испытания однофазного трансформатора в режиме короткого замыкания

замкнуть. Записать показания приборов в табл. 9.1.

5) По показаниям приборов определить потери мощности $\Delta P_{ст}$, вычислить коэффициент трансформации.

II. Испытание трансформатора в режиме короткого замыкания для определения потерь мощности в меди ΔP_m и коэффициента трансформации k .

1) По паспортным данным однофазного трансформатора определить номинальные значения токов первичной и вторичной обмоток $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$.

2) Собрать схему испытания трансформатора согласно рис. 9.7, используя для этого ваттметр PW1, вольтметр PV1, амперметры PA1 и PA2.

3) После проверки схемы преподавателем подать на первичную обмотку трансформатора напряжение короткого замыкания $u_{1к}$ (5 % от номинального напряжения $U_{1ном}$), тем самым установить номинальный ток вторичной обмотки $I_{1ном}$ и измерить его амперметром PA2.

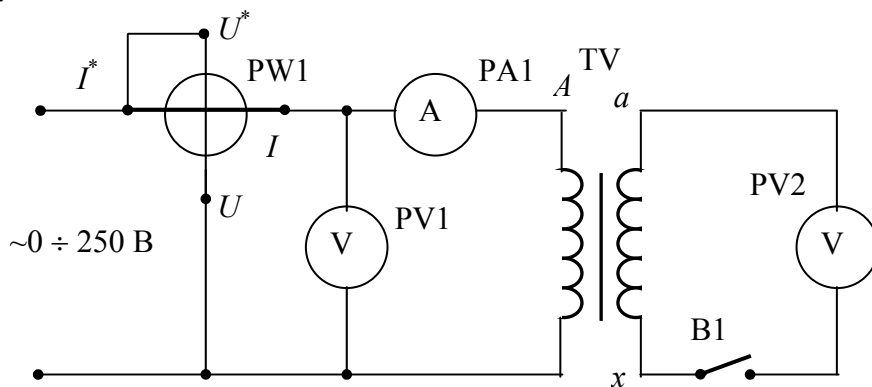


Рис. 9.6. Схема испытания однофазного трансформатора в режиме холостого хода

4) По показаниям ваттметра определить мощность $P_{1к}$, равную потерям мощности трансформатора в меди ΔP_m , по вольтметру PV1 определить напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ и, разделив его на 100, сравнить его с паспортными данными напряжения короткого замыкания. Данные замеров занести в табл. 9.1.

5) Определить коэффициент трансформации k по значениям токов первичной и вторичной обмоток.

Расчетные формулы:

$$k = I_2/I_1;$$

$$\cos\varphi = P_{1к}/(U_{1к} I_{1к}).$$

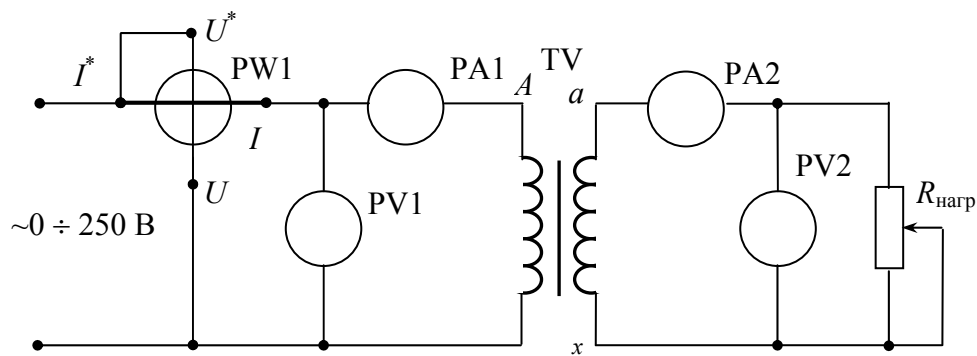


Рис. 9.8. Схема испытания однофазного трансформатора под нагрузкой

III. Испытание трансформатора под нагрузкой.

1) Собрать схему испытания трансформатора согласно рис. 9.8, включив в его вторичную обмотку в качестве нагрузки реостат. При сборке схемы использовать следующие приборы: ваттметр PW1, амперметры PA1 и PA2, вольтметры PV1 и PV2.

2) Поддерживая в первичной обмотке трансформатора номинальное напряжение $U_{1\text{ном}} = \text{const}$ и, изменяя ток I_2 во вторичной обмотке реостатом $R_{\text{нагр}}$ от величины тока холостого хода до номинального тока вторичной обмотки $I_{2\text{ном}}$, записать в табл. 9.1 показания приборов для шести опытов.

3) Вычислить P_2 , ΔU_2 , (%), КПД η .

4) Построить графики зависимостей U_2 , $\Delta U_2(\%)$, η , $\cos\varphi$ от тока нагрузки $I_{2\text{нагр}}$ вторичной обмотки трансформатора:

$$U_2 = f(I_{2\text{нагр}});$$

$$\Delta U_2(\%) = f(I_{2\text{нагр}});$$

$$\eta = f(I_{2\text{нагр}});$$

$$\cos\varphi = f(I_{2\text{нагр}}).$$

Расчетные формулы:

$$\cos\varphi = P_1 / (U_1 I_1);$$

$$\eta = P_2 / P_1;$$

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{20} - U_{2\text{нагр}}}{U_{20}} 100 \%;$$

$$P_2 = U_2 I_2.$$

Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
2. Можно ли включать трансформатор в цепь постоянного тока с напряжением, равным номинальному?

3. Перечислите потери в трансформаторе и объясните их физическую природу.
4. Какие потери мощности не зависят от нагрузки трансформатора и как их определяют?
5. Для чего нужен сердечник в трансформаторе? Будет ли работать трансформатор с деревянным сердечником?
6. Характеристики трансформатора. Объясните причины, вызывающие их изменение в зависимости от нагрузки.
7. Почему нельзя получить коэффициент трансформации k по показаниям вольтметров в первичной и вторичной обмотках при нагруженном трансформаторе?
8. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора, какой величины напряжение подводится к первичной обмотке и какие потери определяют этим опытом?
9. Укажите способы определения коэффициента полезного действия трансформатора.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Название и цель работы.
2. Экспериментальные расчетные схемы испытаний трансформатора.
3. Расчетные формулы и подробный процесс определения параметров трансформатора для всех трех опытов.
4. Таблицу с результатами экспериментально полученных и расчетных данных, форма которой приведена в данном описании.
5. Графики зависимостей:

$$U_2 = f(I_{2\text{нагр}});$$

$$\Delta U_2(\%) = f(I_{2\text{нагр}});$$

$$\eta = f(I_{2\text{нагр}});$$

$$\cos\varphi = f(I_{2\text{нагр}}).$$

6. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Изучение устройства и схем включения асинхронных двигателей

Цель работы

1. Изучить устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым и фазным роторами.
2. Освоить метод маркировки начал и концов статорной обмотки.
3. Изучить схемы включения статорной обмотки и научиться пускать двигатель в ход.

Краткие теоретические сведения

Перед выполнением лабораторной работы самостоятельно изучить теоретические вопросы, посвященные устройству и принципу действия асинхронных двигателей (АД). При этом следует обратить внимание на основные части статора и ротора, а также конструкцию статорных и роторных обмоток.

Асинхронный двигатель состоит из неподвижной части, называемой *статором*, и вращающейся части – *ротора* (рис. 10.1). Основой статора служит его внешняя часть – *станина*, в которой закрепляется *сердечник*. В машинах относительно малых размеров станину изготавливают литой. В больших по мощности машинах оказывается более дешевой в производстве и более легкой по весу сварная конструкция.

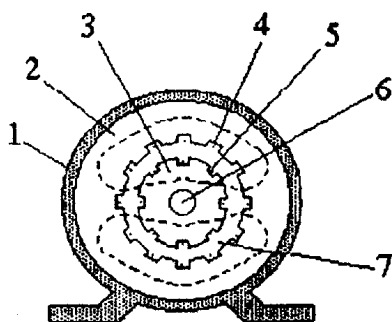


Рис. 10.1. Упрощенная конструктивная схема асинхронного двигателя:

- 1 – станина (корпус);
- 2 – сердечник статора;
- 3 – сердечник ротора;
- 4 – обмотка статора; 5 – обмотка ротора; 6 – вал;
- 7 – воздушный зазор

Сердечник статора, укрепленный внутри станины для уменьшения потерь на вихревые токи, набирается из листов электротехнической стали и скрепляется в продольном направлении скобами или сварными швами. Сердечник имеет форму пустотелого цилиндра с продольными пазами, в которые укладывается трехфазная обмотка статора. В двигателях с напряжением до 660 В обмотка выполняется из круглого обмоточного провода с эмалированной изоляцией, в более крупных двигателях – прямоугольного провода, который позволяет без пустот уложить обмотку и увеличить удельную мощность. С торцов к корпусу крепятся подшипниковые щиты с подшипниками, в которых вращается ротор.

Выводы от фаз обмоток статора выполняют гибкими многожильными изолированными проводами, которые подсоединяют к колодке зажимов, расположенной в коробке с крышкой. Коробка выводов находится сверху двигателя и при установке может быть повернута в удобное для питающего кабеля положение.

Ротор двигателя имеет вал, на котором укреплен цилиндрический сердечник. В пазах сердечника размещают *обмотку*. По типу роторной обмотки асинхронные двигатели делятся на два вида: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором.

Первый тип двигателя имеет сердечник, выполненный из той же стали, что и сердечник статора. В спрессованном состоянии в пазы заливают расплавленный

алюминий. Одновременно с заливкой пазов, отливают замыкающие кольца, которые замыкают обмотку ротора в виде стержней. Такая форма обмотки получила название обмотки «беличьей клетки».

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют в пазах ротора изолированную от сердечника обмотку, число фаз которой равно числу фаз обмотки статора. Обычно обмотка выполняется медным проводом и соединяется «звездой», а начала ее фаз присоединяются к контактным кольцам. Кольца располагаются на консольном конце вала за подшипниковым щитом. При помощи щеток, прилегающих к контактным кольцам, обмотку ротора обычно соединяют с пусковыми реостатами (рис. 10.2). После пуска двигателя реостаты выводят, и обмотка становится короткозамкнутой.

Принцип действия асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с током в обмотке ротора. Ротор и магнитное поле асинхронного двигателя вращаются в одном направлении, но с разными частотами. Частота вращения ротора n_2 всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 . Отношение разности частот вращения магнитного поля n_1 и ротора n_2 к частоте вращения поля получило название *скольжения* s :

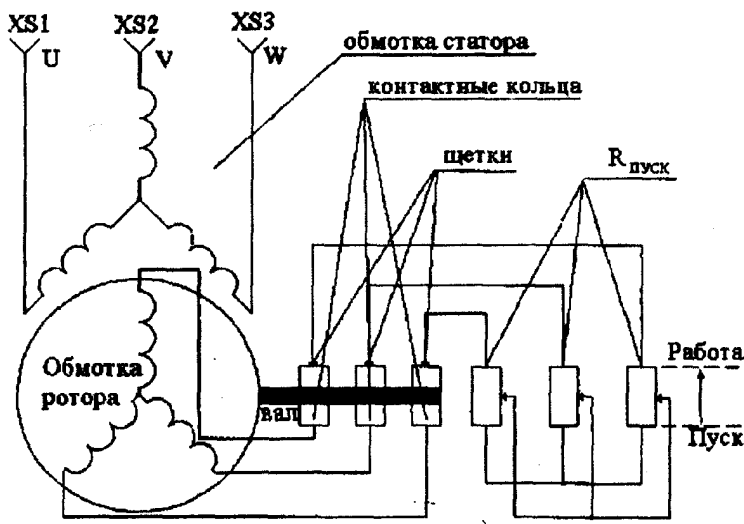


Рис. 10.2. Схема асинхронного двигателя с фазным ротором

$$s = (n_1 - n_2)/n_1.$$

Анализ формулы показывает, что в момент пуска двигателя, когда ротор неподвижен ($n_2 = 0$), скольжение $s = 1$. При идеальном холостом ходе, когда $n_2 = n_1$, скольжение $s = 0$. В рабочем режиме скольжение изменяется в пределах от 3 до 7 %.

Статорная обмотка двигателя питается трехфазным током и создает вращающееся магнитное поле n_1 , скорость которого зависит от частоты тока в сети f и числа пар полюсов АД p :

$$n_1 = 60f/p, \text{ об/мин.}$$

Число пар полюсов вращающегося магнитного поля, в свою очередь, зависит от конструкции обмотки статора и выражается всегда целым числом: $p = 1, 2, 3$ и так далее. При стандартной частоте $f = 50$ Гц магнитное поле, в зависимости от исполнения обмотки и числа пар полюсов, вращается с частотой, как показано в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Соотношение числа пар полюсов p и скорости вращения магнитного поля статора n_1 при промышленной частоте $f = 50$ Гц

p	1	2	3	4	5
$n_1, \text{ об/мин}$	3000	1500	1000	750	600

В паспорте двигателя указывается скорость вращения ротора n_2 (об/мин), соответствующая номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$ (В) и номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ (кВт). По величине этой скорости можно определить число полюсов магнитного поля, если учесть, что магнитное поле вследствие скольжения вращается немного быстрее ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s);$$

$$n_1 = 60f/p;$$

$$p = 60f/n_1.$$

Пусковой ток $I_{\text{пуск}}$, потребляемый двигателем с короткозамкнутым ротором в момент включения, превышает номинальное значение $I_{\text{ном}}$ от 4 до 7 раз. При этом происходит недопустимое понижение напряжения сети при питании АД от источника соизмеримой мощности. Для устранения этих недостатков применяют следующие методы:

1. Включение в цепь статора индуктивного сопротивления – реактора (рис. 10.3). После разгона двигателя реактор выключают. Пусковой ток $I_{\text{пуск}}$ уменьшается пропорционально напряжению, а пусковой момент $M_{\text{пуск}}$ – пропорционально квадрату напряжения на статоре.
2. Пуск через автотрансформатор (рис. 10.4). Пусковой момент уменьшается пропорционально линейному пусковому току.
3. Переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник» (рис. 10.5).

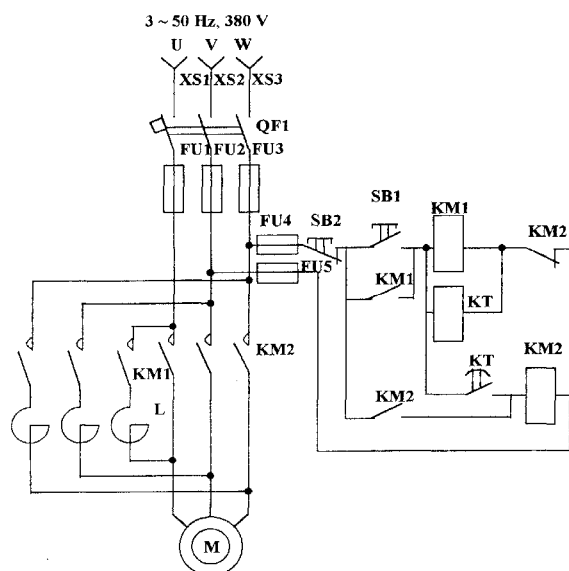


Рис. 10.3. Схема управления АД при реакторном пуске

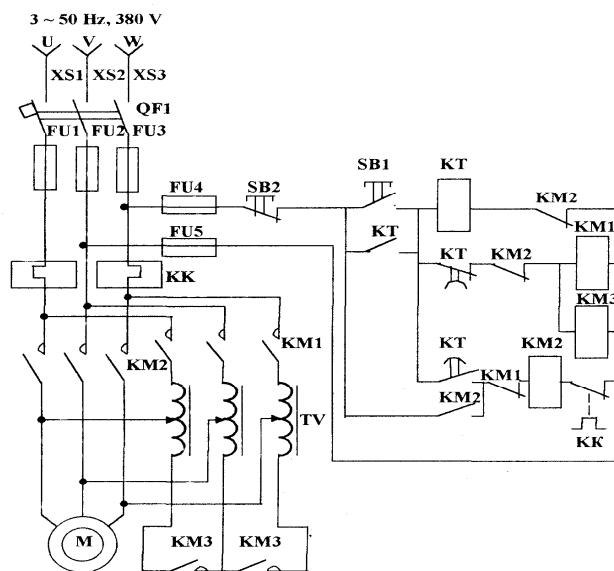


Рис. 10.4. Схема управления АД при автотрансформаторном пуске

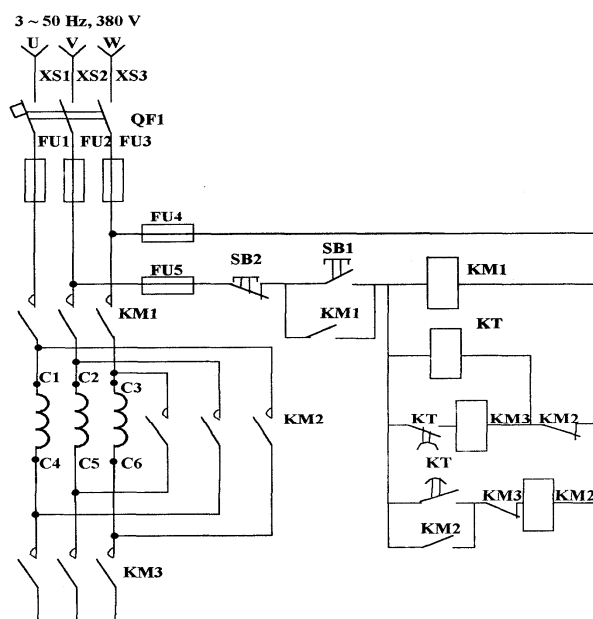


Рис. 10.5. Схема управления АД с переключением обмоток статора со «звезды» на «треугольник»

Этот способ применяют для АД, обмотки которого соединены «треугольником». Все приведенные примеры снижения пусковых токов пригодны только для случаев, когда двигатели запускают без нагрузки на валу, т. к. со снижением пусковых токов происходит снижение пусковых моментов. Номинальный ток $I_{\text{ном}}$, потребляемый АД из сети, можно определить по формуле:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{лин}} \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}},$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, Вт; $U_{\text{лин}}$ – линейное напряжение сети, В.

Выводы обмоток электрических машин обозначают следующим образом. Начало

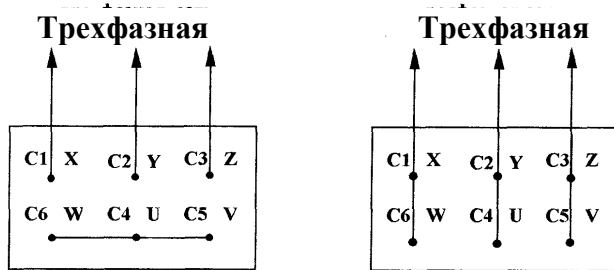


Рис. 10.6. Схема соединения обмоток статора асинхронного двигателя
а) «звездой»; б) «треугольником»

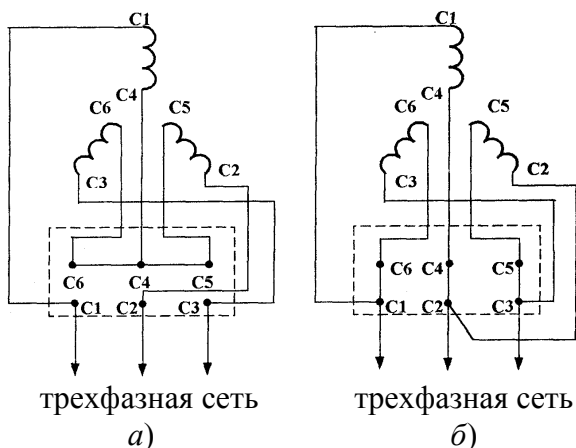


Рис. 10.7. Зажимы статорных трехфазных обмоток: а) соединение «звездой»; б) соединение «треугольником»

соединяют «треугольником». Тогда на каждую фазу обмотки будет подано напряжение 220 В. Если линейное напряжение сети $U_{\text{лин}} = 380$ В, то обмотки двигателя надо соединять «звездой». Тогда каждая фаза обмотки будет находиться под одним и тем же напряжением:

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}.$$

Ротор АД вращается в ту же сторону, что и вращающийся магнитный поток статора. Направление вращения зависит от порядка чередования фаз C1, C2, C3. Обычно для прямого пуска асинхронного двигателя применяют схему с использованием нереверсивного магнитного пускателя (рис. 10.8). Чтобы изменить направление вращения двигателя, т. е. произвести «реверс», достаточно поменять местами две любые фазы. Обычно реверсируют асинхронные двигатели, нажимая кнопки «вперед» и «назад» реверсивных магнитных пускателей. Схема управления асинхронным двигателем при прямом пуске реверсивным магнитным пускателем приведена на рис. 10.9.

фаз трехфазной обмотки (1, 2, 3) обозначают, соответственно C1, C2, C3. Концы фаз имеют маркировку C4, C5, C6. Буква «С» обозначает, что выводы обмоток расположены на статоре. При этом фазы маркируют так: начало первой фазы C1 – конец C4; начало второй фазы C2 – конец C5; начало третьей фазы C3 – конец C6. Расположение выводов обмоток на клеммной колодке показано на рис. 10.6.

В зависимости от выбранной схемы включения обмоток соединение производят по схемам рис. 10.7а и 10.7б. В трехфазных асинхронных машинах начало 1, 2, 3 фаз обозначают, соответственно, желтым, зеленым и красным цветом. Концы фаз обозначаются теми же цветами, что и начала, но с добавлением черного цвета. Для запуска двигателя необходимо произвести выбор схемы соединения обмоток статора – «треугольником» или «звездой».

Трехфазный АД можно использовать при двух линейных напряжениях сети. Обычно они указаны на паспортной табличке двигателя. Например, $U_{\text{ном}} = 220/380$ В. Если линейное напряжение сети $U_{\text{лин}} = 220$ В, то обмотки двигателя

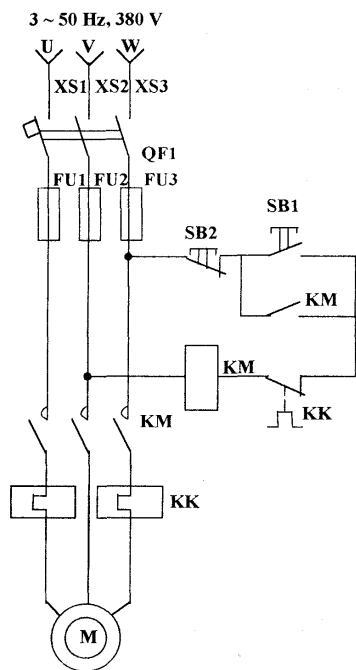


Рис. 10.8. Схема прямого пуска АД нереверсивным магнитным пускателем

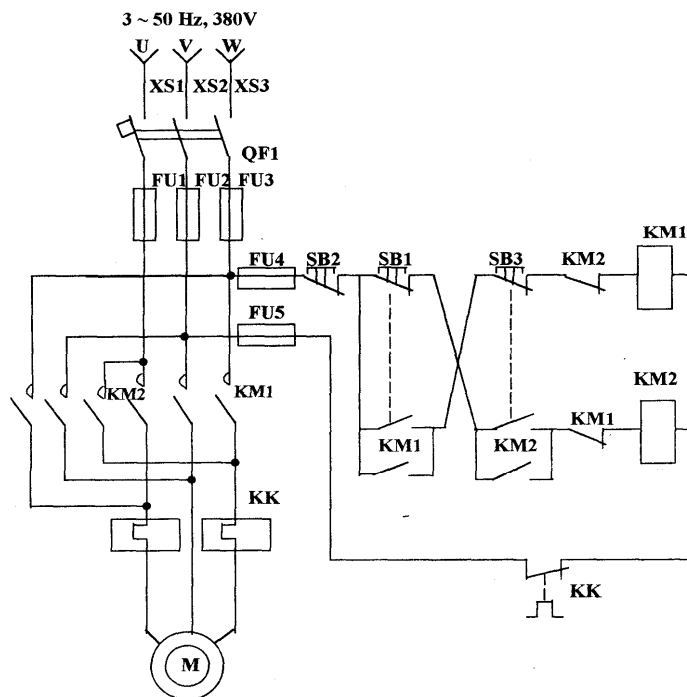


Рис. 10.9. Схема прямого пуска АД реверсивным магнитным пускателем

Случай, когда АД плохо набирает обороты и при этом издает сильный гул, соответствует тому, что токи во всех фазах, даже при холостом ходе, различны и превышают номинальные значения. Это является следствием неправильного соединения фаз обмотки статора, когда одна из фаз обмотки «перевернута», т. е. конец и начало одной из фаз поменялись местами. Обычно это случается у АД с шестью выводами обмотки статора при неправильной маркировке фаз или их отсутствии по тем или иным причинам.

В данной лабораторной работе для нахождения выводов обмоток статора исследуемого асинхронного двигателя, а также определения начал и концов обмоток применяют метод «трансформации», который заключается в следующем. Используя мегомметр, отыскивают парные выводы трех фаз обмоток статора. Произвольно обозначают начала и концы каждой фазы соответственно: первая, начало – С1, конец – С4; вторая, начало – С2, конец – С5; третья, начало – С3, конец – С6. Затем первую и вторую фазу соединяют в последовательную цепь, т. е. С1 – С4 – С2 – С5 и включают в сеть переменного тока согласно рис. 10.10а.

При такой схеме две последовательно соединенные фазы статора выполняют роль первичной обмотки трансформатора, а третья фаза имитирует вторичную обмотку. Если в последовательной цепи конец одной фазы окажется соединенным с началом другой, то магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 этих фаз в АД будут направлены в одну сторону и в сумме образуется результирующий поток Φ_c , который, пересекая витки третьей фазы, будет индуцировать в ней переменную ЭДС. Эту ЭДС можно обнаружить вольтметром PV1, если его соединить с выводами третьей фазы. Вместо вольтметра можно использовать лампу накаливания или амперметр.

Если в третьей фазе ЭДС не обнаружена, то это означает, что магнитные потоки первой и второй фаз в двигателе направлены встречно и взаимно уравнивают друг

друга, т. е. эти фазы соединены между собой одноименными выводами, например, концами фаз (рис. 10.10б).

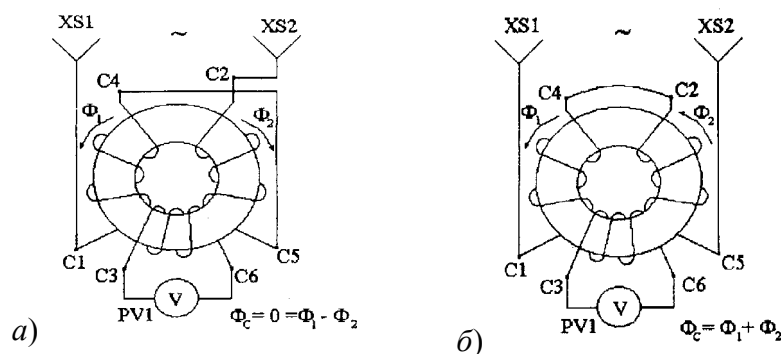


Рис. 10.10. Маркировка выводов трехфазных обмоток АД методом «трансформации» а) при согласном включении двух обмоток; б) при встречном включении двух обмоток

Таким же образом находятся C2 и C5 второй фазы по предварительно выполненной произвольной маркировке выводов первой фазы C1, C4. Третью фазу можно промаркировать, включив ее последовательно с первой фазой и питать переменным током, а вольтметр, амперметр или лампу накаливания соединить с выводами второй фазы.

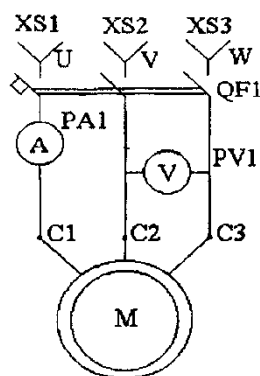


Рис. 10.11. Схема включения АД для измерения пускового и номинального токов

Программа выполнения работы

1. Изучить устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Освоить метод «трансформации» для отыскания начал и концов статорных обмоток асинхронного двигателя.
3. Изучить схемы включения обмоток статора асинхронного двигателя в трехфазную сеть, пустить двигатель в ход, затем произвести реверс.
4. Привести данные используемых электроизмерительных приборов и паспортные данные электрооборудования. Уметь пояснить паспортные значения исследуемого асинхронного двигателя

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться и изучить устройство асинхронного двигателя и его основные части на макете.
2. Записать паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя и определить число пар полюсов p .
3. Отыскать выводы фаз статорных обмоток исследуемого АД на макете клеммного щитка, расположенного на стенде при помощи мегомметра. Изобразить эскиз щитка с обозначением парных выводов обмоток статора, при этом начала и концы каждой фазы маркируются произвольно.
4. Собрать схему рис. 10.10а для согласования начал и концов обмоток статора АД и произвести маркировку начал и концов трех фаз.
5. Выбрать схему соединения обмоток статора «звездой» или «треугольником» соответственно его паспортным данным и напряжением сети. Затем собрать схему согласно рис. 10.11, используя для этого приборы: амперметр РА1 на 10 А; вольтметр РВ1 на 500 В. Включить двигатель в сеть для пробного пуска и зафиксировать по амперметру пусковой ток $I_{\text{пуск}}$ и номинальный ток $I_{\text{ном}}$.
6. Изменить направление вращения ротора, поменяв местами на клеммном щитке двигателя два любых линейных провода, идущих от сети. Проверить двигатель в работе.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основана работа асинхронного двигателя?
2. Чему равна частота тока f в роторной обмотке асинхронного двигателя?
3. По какой схеме следует соединять обмотку статора, если в его паспорте указано напряжение 127/220 В, а линейное напряжение сети $U_{\text{л}} = 220$ В?
4. Перечислите возможные способы определения выводов обмоток статора асинхронного двигателя.
5. Объясните устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым и фазным ротором.
6. Объяснить принцип действия схем прямого пуска асинхронного двигателя (рис. 10.3; 10.4; 10.5; 10.8; 10.9) по выбору преподавателя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы

1. Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя.
2. Освоить методику испытания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
3. Получить опытным путем рабочие характеристики исследуемого двигателя.

Краткие теоретические сведения

Асинхронной машиной называется машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора n_2 зависит от нагрузки. Магнитное поле статора создается переменным током на его обмотках. При этом скорость вращения ротора n_2 отличается от скорости вращения магнитного поля статора n_1 на величину скольжения s . Эти величины (n_2 , n_1 и s) связаны выражением:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (11.1)$$

Асинхронные машины по типу делятся на бесколлекторные машины, которые используются чаще всего в двигательном режиме и имеют большое распространение, и коллекторные, имеющие более разнообразные характеристики, но ограниченное применение.

Основной тип бесколлекторной машины – трехфазный асинхронный двигатель. Обмотки статора, выполненные в виде трех катушек, уложенные в пазы сердечника статора и смещенные в пространстве на 120° относительно друг друга, при питании трехфазной системой токов создают вращающееся магнитное поле. Для простоты изобразим каждую из катушек $A-X$; $B-Y$; $C-Z$ одним витком (рис. 11.1).

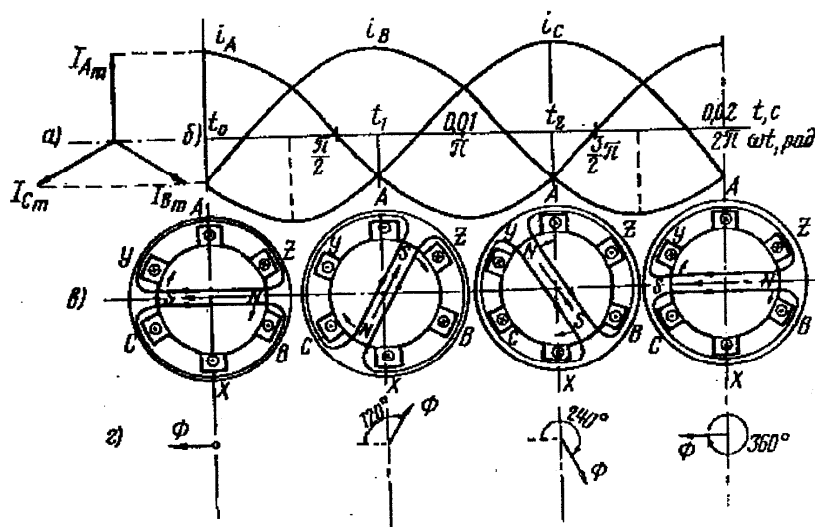


Рис. 11.1. Векторная диаграмма (а) и графики (б) токов в обмотках $A-X$, $B-Y$, $C-Z$; упрощенная картина возбуждаемого этими токами магнитного поля (в) и векторные диаграммы вращения магнитного потока (г)

Направление тока будем считать положительным, когда он направлен от начала катушки к ее концу. Направление токов соответствует моментам времени t_0 ; t_1 ; t_2 и $t_3 = 0,02$ с. Период равен $T = 0,02$ с. Например, в момент времени t_0 ток в фазе $A-X$ положительный и направлен от начала катушки A к ее концу X . В фазах $B-Y$ и $C-Z$ токи в этот момент времени имеют отрицательное значение и направлены от концов катушек Y, Z к их началам B и C . Токи в катушках создают магнитное поле. Направление магнитных силовых линий определяют по правилу «буравчика». В момент времени t_0 северный магнитный полюс N находится справа, южный S – слева. К следующему моменту времени t_1 , соответствующему фазовому углу $\omega t = 120^\circ$, токи в фазах изменили направления. В фазе $B-Y$ – ток положительный, в фазах $A-X, C-Z$ – отрицательный, и магнитный поток Φ повернулся на 120° . Моментам времени t_2 и $t_3 = 0,02$ с соответствуют новые направления магнитного потока.

Таким образом, за время одного периода $T = 0,02$ с магнитный поток Φ повернулся на один оборот. Тогда за одну секунду он сделает f_1 оборотов, а за минуту

$$n_1 = 60f_1,$$

где f_1 – частота тока, Гц.

Катушки индуктивности, смещенные на 120° , при включении в трехфазную цепь создают двухполюсное магнитное поле. Направление вращения будет зависеть от чередования фаз, что легко доказать, поменяв местами две фазы. Если каждую фазу обмотки статора выполнить из нескольких последовательно соединенных катушек, то мы получим многополюсное магнитное поле, скорость вращения которого определяется по формуле

$$n_1 = 60f_1/p,$$

где p – число пар полюсов.

Принцип работы асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с индуктированным им током в замкнутой обмотке ротора. Ротор и магнитное поле асинхронного двигателя вращаются в одном направлении, но с разными частотами. Частота вращения ротора n_2 всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 . Отношение разности частот вращения магнитного поля n_1 и ротора n_2 к частоте вращения поля получило название скольжения s :

$$s = [(n_1 - n_2)/n_1]100 \text{ \%}.$$

В зависимости от соотношения скоростей вращения n_2 , n_1 и их взаимного направления различают несколько режимов работы асинхронной машины:

1) двигательный:

$$n_2 < n_1 \text{ и } 0 < s = (n_1 - n_2)/n_1 < 1;$$

2) генераторный:

$$n_1 > n_2 \text{ и } s = (n_1 - n_2)/n_1 < 0;$$

3) режим электромагнитного тормоза. Вращение ротора n_2 направлено в противоположную сторону от вращения магнитного поля статора:

$$n_1, s = (n_1 + n_2)/n_1 > 1.$$

Режимы работы асинхронной машины можно представить в виде шкалы скольжений (рис. 11.2). Режим тормоза применяют для быстрой остановки асинхронного двигателя путем противовключения, т. е. переключения двух проводов, питающих статорную обмотку, или для торможения приводного механизма, например, в крановых или подъемных устройствах при спуске грузов.

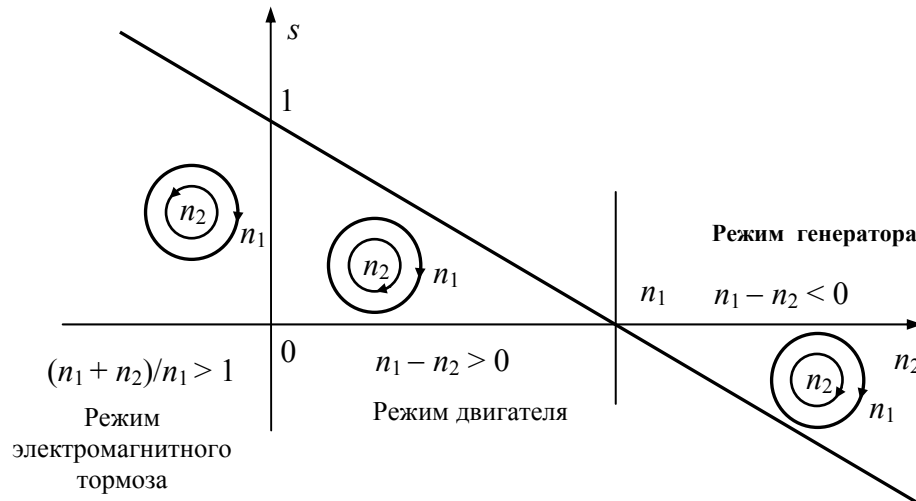


Рис. 11.2. Режимы работы асинхронной машины в зависимости от скольжения s

Кроме того, применяют динамическое торможение, схема которого приведена на рис. 11.3. Продолжительность процесса торможения определяется временем срабатывания реле времени КТ.

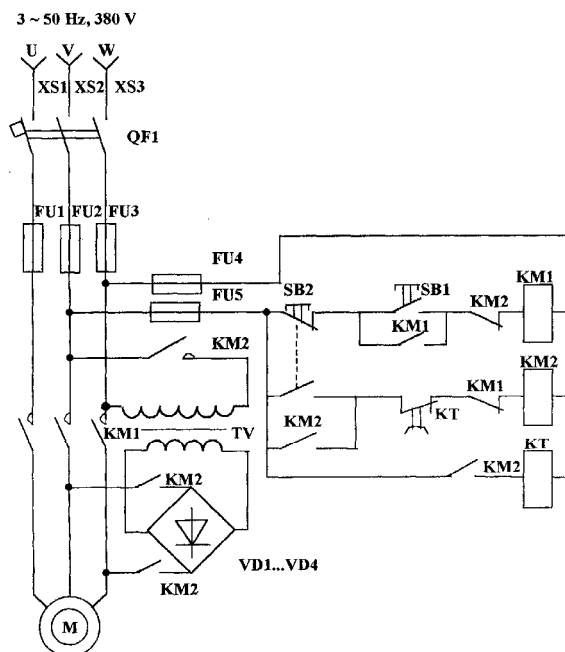


Рис. 11.3. Схема управления асинхронным двигателем в режиме динамического торможения

Электрическую мощность P_1 , потребляемую из сети асинхронным двигателем, можно определить по формуле

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi,$$

где U_1 – фазное напряжение, В; I_1 – фазный ток, А.

Часть этой мощности теряется в обмотке статора на электрические потери $\Delta P_{\Sigma 1}$ и в сердечнике статора на магнитные потери – ΔP_{M1} . Оставшаяся электромагнитная мощность вращающегося магнитного поля $\Delta P_{\Sigma ЛМ}$ будет равна:

$$\Delta P_{\Sigma ЛМ} = P_1 - \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{M1}.$$

В свою очередь через воздушный зазор ротор получает эту мощность, где она преобразуется в механическую мощность $P_{МХ}$ вращения, которая находится по формуле:

$$P_{МХ} = \Delta P_{\Sigma ЛМ} - \Delta P_{\Sigma 2}.$$

где $\Delta P_{\Sigma 2}$ – мощность электрических потерь в обмотке ротора.

Вместе с тем, полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше $P_{МХ}$ на величину $\Delta P_{МХ}$ от трения в подшипниках, сопротивления воздуха и на величину добавочных потерь $\Delta P_{Д}$, вызванных пульсациями магнитного потока. Таким образом,

$$P_2 = P_{МХ} - \Delta P_{МХ} - \Delta P_{Д}.$$

Отношение механической мощности на валу двигателя P_2 к мощности P_1 , потребляемой из сети, определяет величину коэффициента полезного действия:

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Механическая мощность ротора $P_{МХ}$ асинхронного двигателя, вращающегося с угловой скоростью Ω_2 , связана с моментом M известной формулой:

$$P_{МХ} = M \Omega_2,$$

где $\Omega_2 = 2\pi n_2 / 60$ – угловая скорость ротора, 1/с; n_2 – частота вращения ротора, об/мин.

Вращающий момент асинхронного двигателя M пропорционален активной составляющей тока ротора I_2 и находится по формуле

$$M = C_M \Phi_M I_2.$$

где C_M – конструктивная постоянная асинхронного двигателя.

Момент, развиваемый на валу асинхронного двигателя, зависит от величины скольжения. При условии $U_1 = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$ появляется возможность построить данную зависимость $M = f(s)$, называемую механической характеристикой (рис. 11.4). В нормальных условиях эксплуатации напряжение $U = \text{const}$ и, следовательно, момент является функцией скольжения.

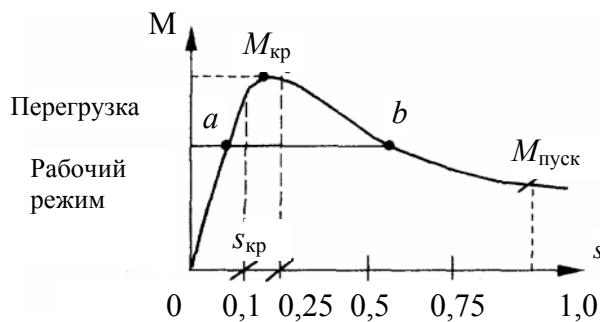


Рис. 11.4. Зависимость момента M на валу АД от скольжения s

Начальная точка характеристики соответствует идеальному холостому ходу ($s = 0$; $n_2 = n_1$; $M = 0$). При увеличении скольжения момент увеличивается. Определенному скольжению $s_{кр}$, называемому *критическим*, соответствует наибольший вращающий момент $M_{кр}$ – *критический момент*. Значение критического скольжения лежит в пределах $s_{кр} = 10 \div 25 \%$. При значениях скольжения больше $s_{кр}$ величина момента начинает уменьшаться. В момент пуска $s = 1$ ($n_2 = 0$) двигатель обладает пусковым моментом. Рабочая часть характеристики двигателя, то есть зона устойчивой работы, соответствует скольжению $s < s_{кр}$.

Скольжение s связано с частотой вращения ротора n_2 зависимостью (11.1):

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Поэтому график функции $M = f(s)$ можно построить в виде $n_2 = f(M)$ (рис. 11.5).

Данная зависимость нашла применение в электроприводах и получила название *механической характеристики*. Устойчивая часть механической характеристики обозначена сплошной линией. Ее можно рассчитать по упрощенной формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_{кр}}{s_{кр} / s + s / s_{кр}}.$$

Зная для данного двигателя $M_{кр}$ и $s_{кр}$, которые рассчитываются по справочным данным, можно найти момент, соответствующий любому значению скольжения в пределах от $0 \leq s \leq s_{кр}$.

Для расчета применяют следующие зависимости:

$$M_{кр} = \mu_k M_{ном}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\mu_k = M_{кр}/M_{ном}$ – кратность максимального момента; $M_{ном} = 9555P_{ном}/n_2$ – вращающий момент на валу двигателя, Н · м.

$$s_{кр} = s_{ном} \left(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right),$$

где $s_{ном}$ – номинальное скольжение асинхронного двигателя приводится в справочниках, или $s_{ном} = (n_1 - n_{ном})/n_1$.

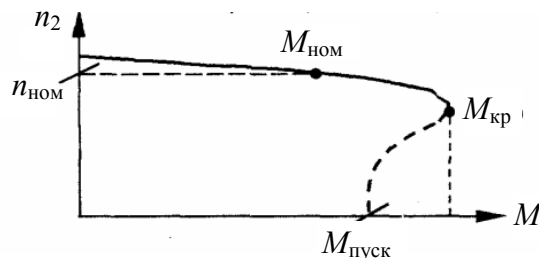


Рис. 11.5. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель работает устойчиво лишь при скольжении меньше критического. При скольжении $s > s_{кр}$, что соответствует неустойчивой части характеристики (рис. 11.4), двигатель работать не может. Например, из точки b он либо разгоняется, переходя на устойчивую часть характеристики (точка a), либо останавливается, если тормозной момент превышает вращающий момент двигателя.

Номинальный вращающий момент $M_{ном}$ должен быть меньше критического $M_{кр}$, чтобы при случайном увеличении тормозного момента не произошло перехода двигателя на неустойчивую часть, характеристики с дальнейшей остановкой. Обычно его принимают $M_{ном} = (0,4 \div 0,6)M_{кр}$. Таким образом, двигатель допускает кратковременную перегрузку до $M_{max} = 1,65M_{ном}$. При этом отношение критического момента $M_{кр}$ к номинальному моменту $M_{ном}$ называется перегрузочной способностью двигателя.

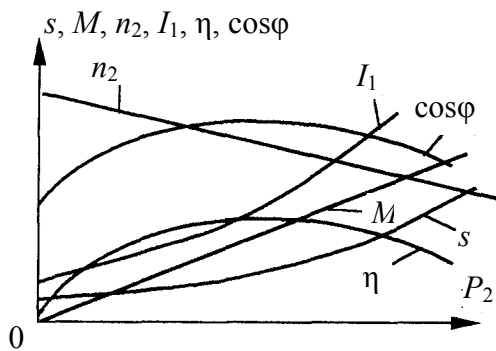


Рис. 11.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Наиболее полную картину о работе асинхронного двигателя, в зависимости от развиваемой мощности на валу двигателя P_2 , можно получить из рабочих характеристик (рис. 11.6).

1. Скоростная рабочая характеристика $n_2 = f(P_2)$. Зависимость представляет устойчивую часть механической характеристики и носит «жесткий» характер.

2. $M = f(P_2)$. Характеристика близка к линейной зависимости. Начало графика при $M_0 = M_{xx}$.

3. $I_1 = f(P_2)$. Величина тока холостого хода I_0 составляет $(20 \div 40 \%)I_{ном}$.

4. $\cos\varphi = f(P_2)$. При холостом ходе $\cos\varphi <$

0,2. Так как магнитный поток в двигателе постоянный, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается увеличением только активной составляющей тока статора и, следовательно, увеличением $\cos\varphi$ до значения $0,8 \div 0,9$. Отсюда ясно значение нагрузки двигателя для улучшения $\cos\varphi$ питающей сети.

5. $\eta = f(P_2)$. Коэффициент полезного действия при холостом ходе равен нулю. При номинальной нагрузке он имеет максимальное значение $\eta = (0,7 \div 0,9)\eta_{max}$. При этом η_{max} соответствует $P_2 = 3/4P_{2ном}$ и почти не изменяется при $P_2 = (0,5 \div 1,5)P_{2ном}$.

6. $s = f(P_2)$. Скольжение при холостом ходе $s_{xx} = (0,4 \div 0,5)\%$.

Асинхронные машины применяются в приводах, не требующих регулирования частоты вращения, обладая надежностью, экономичностью, простотой конструкции, высоким коэффициентом полезного действия, относительно малой массой. Поэтому объяснимо стремление использовать эти машины в приводах, требующих регулирования частоты вращения. Известны следующие способы регулирования.

1. Включение активного сопротивления в цепь фазного ротора. В цепь обмотки фазного ротора включается трехфазный реостат, рассчитанный на длительную нагрузку током ротора. Увеличение активного сопротивления ротора меняет механическую характеристику согласно рис. 11.7 и делает ее более «мягкой». Недостатками такого способа является увеличение потерь мощности и возможность при незначительных изменениях нагрузки на валу ротора значительно изменять частоту вращения ротора.

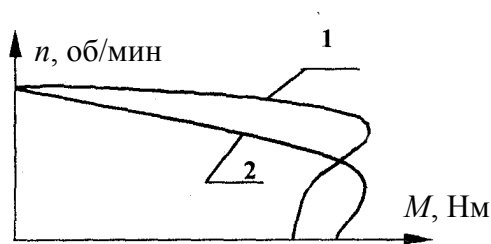


Рис. 11.7. Механическая характеристика асинхронной машины:
1 – с фазным ротором (естественная);
2 – при включении трехфазного реостата в цепь ротора

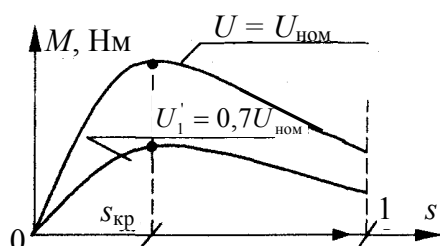


Рис. 11.8. Механическая характеристика асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения на статоре

2. Плавное регулирование частоты вращения ротора возможно при изменении напряжения на обмотках статора. Такая регулировка применяется в асинхронных машинах с короткозамкнутым ротором. Так как вращающий момент M асинхронной машины пропорционален квадрату напряжения U^2 , то ординаты механической характеристики изменяются в отношении $(U_1/U_{\text{ном}})^2$, как показано на рис. 11.8. Недостатком этого способа является то, что из-за «жесткости» механической характеристики понижение напряжения на 30 % уменьшает частоту вращения ротора только на 15 % при одновременном снижении перегрузочной способности и пускового момента.

3. Ступенчатое изменение скорости вращения ротора в широких пределах осуществляют путем изменения числа пар полюсов в многоскоростных машинах, что приводит к значительному удорожанию машины, усложнению конструкции, и, как следствие, снижению надежности в эксплуатации. Промышленностью выпускаются 2-, 3-, 4-скоростные асинхронные двигатели.

4. Наиболее перспективным способом регулирования частоты вращения ротора асинхронной машины является изменение частоты переменного тока f , питающего двигатель.

Однако при таком способе необходимо одновременно регулировать напряжение. Способ осуществим при использовании тиристорных схем управления частотой вращения ротора асинхронной машины путем изменения частоты тока.

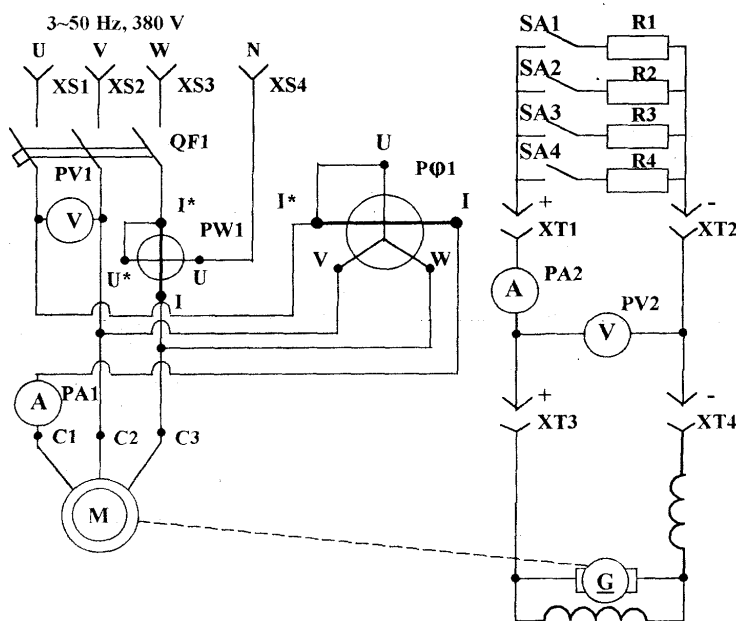


Рис. 11.9. Схема для построения рабочих характеристик при испытании асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки

Программа выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Провести испытание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором методом непосредственной нагрузки. Осуществить реверсирование.
3. Получить опытным путем и построить рабочие характеристики исследуемого двигателя.
4. Привести данные используемых электроизмерительных приборов и паспортные данные электрооборудования.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 11.9, используя для этого приборы: вольтметры PV1 на 500 В, PV2 на 250 В, амперметры PA1, PA2 на 10 А, ваттметр PW1 на 2500 Вт; фазометр Pφ1. Испытываемый асинхронный двигатель ТИП АО 42-4: Δ/Y ; $U_{\text{ном}}$ [220/380] В; $I_{\text{ном}}$ [28/18] А; $P_{\text{ном}} = 2,8$ кВт; $n = 1420$ об/мин; $\cos\varphi = 0,85$; $\eta = 83,5$ %.
2. После проверки схемы в присутствии преподавателя произвести автоматическим выключателем QF1 пуск асинхронного двигателя на холостом ходу, обратив при этом внимание на направление вращения ротора исследуемого двигателя (SA1 ÷ SA4 выключены).
3. Осуществить реверс асинхронного двигателя. Для этого необходимо автоматическим выключателем QF1 отключить двигатель от сети и произвести смену питающих проводов электрической схемы, поменяв чередование фаз любых двух проводов. Произвести пуск асинхронного двигателя, обратив внимание на направление вращения ротора исследуемого двигателя.
4. Пользуясь собранной схемой, произвести пуск асинхронного двигателя на холостом ходу (SA1 ÷ SA4 выключены).
5. Поочередно подключая тумблерами SA1 ÷ SA4 и присоединенные к цепи генератора постоянного тока дополнительные сопротивления R1 ÷ R4, осуществить

испытание исследуемого двигателя методом непосредственной нагрузки. Произвести пять измерений, начиная от нагрузки, равной нулю (все выключатели отключены), т. е. холостого хода, до максимальной нагрузки, поочередно подключая дополнительные сопротивления $R1 \div R4$ выключателями $SA1 \div SA4$, фиксируя при этом следующие параметры: Δn – разность скоростей вращения магнитного поля статора и ротора, об/мин (методика определения Δn изложена ниже); U_1 – напряжение сети, В (PV1); I_1 – ток сети, А (PA1); P_1 – потребляемая двигателем из сети активная мощность, Вт (PW1); U_2 – напряжение нагрузки, В (PV2); $\cos \varphi$ – коэффициент мощности Рф1. Данные опытных измерений занести в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Данные измерений и вычислений испытания асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки для построения рабочих характеристик

№ п/п	Измерено						Вычислено					
	I_1 , А	U_1 , В	I_2 , А	U_2 , В	P_1 , Вт	$\cos \varphi$	Δn , об/мин	P_2 , Вт	η	M	n_2 , об/мин	s
1												
2												
3												
4												
5												

6. Используя приведенные ниже расчетные формулы, произвести вычисления и результаты занести в табл. 11.1.

а) $n_2 = n_1 - \Delta n$ [об/мин]; n_2 – скорость вращения ротора, об/мин; n_1 – скорость вращения магнитного поля статора, об/мин ($n_1 = 1500$ об/мин);

б) $s = [(n_1 - n_2)/n_1]100\%$ – скольжение;

в) $P_2 = U_2 I_2$ – полезная механическая мощность на валу ротора, Вт;

г) $M = 9550 P_2 / n_2$ – вращающий момент на валу двигателя, Н · м;

д) $\eta = P_2 / P_1$ – коэффициент полезного действия.

7. По данным табл. 11.1 построить рабочие характеристики исследуемого двигателя:

$$I_1 = f(P_2);$$

$$M = f(P_2);$$

$$\cos \varphi = f(P_2);$$

$$\eta = f(P_2);$$

$$n_2 = f(P_2);$$

$$s = f(P_2).$$

Методика определения скорости вращения ротора при помощи стробоскопа

Для определения Δn – разности скоростей вращения магнитного поля статора и ротора используется стробоскоп. Стробоскопический метод измерения скорости вращения n вала двигателя основан на инерции зрительного ощущения человеческого глаза. На

конце вала прибора укреплен диск, разделенный на равные сектора, число которых равно числу полюсов вращающегося магнитного поля статора. Одна часть секторов, чередуясь, окрашивается в черный цвет, другая – в белый. Ориентируясь по черным секторам, можно сказать, что число черных секторов равняется числу пар полюсов вращающегося магнитного поля. Диск освещается световыми импульсами неоновой лампы, число которых равно частоте питающего тока $f = 50$ Гц. Если число оборотов диска стробоскопа (ротора двигателя) за единицу времени равно числу световых импульсов лампы, то диск кажется неподвижным. При меньшей или большей скорости оборотов диска, чем количество световых импульсов неоновой лампы, по одному из черных секторов диска можно за единицу времени подсчитать разность скоростей вращения магнитного поля статора и скорости вращения ротора. Для этого по известной синхронной скорости вращения магнитного поля статора n_1 и измеренной разности скоростей Δn можно определить скорость вращения ротора:

$$n_2 = n_1 - \Delta n.$$

Для определения Δn необходимо вал стробоскопа приставить к валу ротора и подсчитать разность вращения скорости магнитного поля статора n_1 и вала ротора n_2 как число оборотов одного из четырех световых пятен неоновой лампы на диске стробоскопа за одну минуту.

Контрольные вопросы

1. Чему равняется скольжение s при номинальной скорости $n_{\text{ном}}$ вращения двигателя и при пуске?
2. Назовите характерные точки зависимости момента от скольжения?
3. Почему с увеличением нагрузки двигателя растет ток статора?
4. Как изменяется частота тока f в роторе от скольжения s ?
5. Как изменить направление вращения ротора асинхронного двигателя?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Испытание генератора постоянного тока со смешанным возбуждением

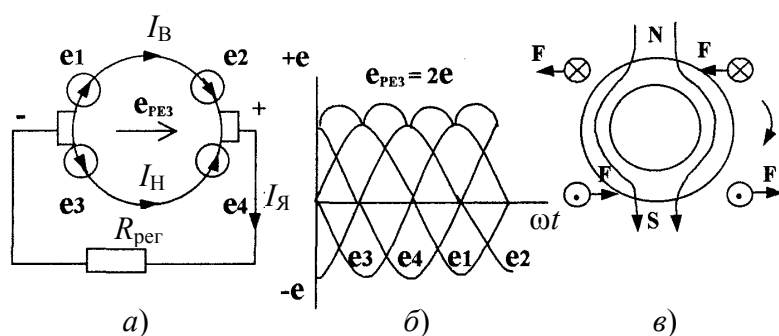
Цель работы

1. Изучить устройство и принцип действия генератора постоянного тока со смешанным возбуждением.
2. Освоить методику испытания исследуемого генератора.
3. Получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого генератора.

Краткие теоретические сведения

Машина постоянного тока состоит из неподвижного электромагнита, создающего основное магнитное поле машины, статора и ротора, вращающейся части, в обмотках которой возникает электродвижущая сила. Статор, в свою очередь, состоит из станины и главных полюсов с размещенной на ней обмоткой возбуждения. На обмотку возбуждения подают постоянное напряжение, при этом возникает магнитный поток. Под действием постоянного тока, протекающего по обмоткам, главные полюсы намагничиваются. Полюс заканчивается полюсным наконечником, который распределяет магнитный поток в воздушном зазоре. Ротор, называемый якорем в машинах постоянного тока, состоит из сердечника, обмотки якоря и коллектора. Якорная обмотка через коллекторные пластины и прилегающие к ним контактные щетки соединяется с внешней цепью.

Принцип действия машины постоянного тока основан на явлениях электромагнитной индукции и электромагнитной силы. Рассмотрим его на примере машины постоянного тока с кольцевым якорем (рис. 12.1). На сердечнике якоря находится обмотка, состоящая из четырех витков. Все витки соединены последовательно, образуя замкнутый контур. Начало одного и конец следующего витка подсоединены к одной и той же пластине коллектора. Щетки коллектора делят обмотку на две равные части – две параллельные ветви (рис. 12.1а).



При движении проводника в магнитном поле в нем возникает ЭДС согласно закону электромагнитной индукции:

$$E = C_E n \Phi,$$

где $C_E = pN/(2a \cdot 60)$ – конструктивная постоянная машины: p – число пар полюсов; N – число активных ветвей; $2a$ –

Рис. 12.1: а) схема замещения обмотки; б) графики ЭДС; в) направление электромагнитных сил

количество параллельных ветвей.

Электромагнитный момент, развиваемый машиной постоянного тока, определяется как

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}},$$

где $C_M = pN/(2a\pi)$ – конструктивная постоянная машины по вращающему моменту.

Таким образом, электромагнитный момент машин постоянного тока пропорционален произведению магнитного потока и тока якоря, имеющий тормозной характер в генераторах. При вращении якоря наружные (активные) стороны витков пересекают магнитные силовые линии и в витках наводится ЭДС. Направление ЭДС определяют по правилу «правой руки», а изменение ЭДС в витках за один оборот показано на рис. 12.1б. Причем ЭДС в витках изменяется по синусоидальному закону. Для пояснения изменения напряжения на щетках нужно рассмотреть рис. 12.1а. Так как витки сдвинуты по окружности якоря на 90° , то ЭДС в них сдвинуты на четверть периода. Результирующая ЭДС ветви при вращении якоря равна сумме мгновенных значений ЭДС двух витков, которые окажутся в этот момент времени в одной ветви. Заметим, что в одной ветви находятся витки только с одинаковым направлением ЭДС. Результирующая ЭДС ветви $e_{рез}$ постоянна по направлению. Коллектор в этом случае играет роль механического переключателя. Он переключает витки обмотки при изменении знака ЭДС в витке из одной параллельной ветви в другую и превращает переменные ЭДС отдельных витков в постоянное напряжение на щетках. Токи нижней I_H и верхней I_B ветвей складываясь, образуют ток якоря I_A :

$$I_A = I_H + I_B.$$

В общем случае, если число ветвей $2a$ (где a – число пар ветвей), ток якоря находим как

$$I_A = 2a(I_H + I_B).$$

Если к щеткам, скользящим по коллектору вращающегося якоря, подключить сопротивление, то электродвижущая сила создает ток I_A в цепи якоря. Машина будет работать в качестве генератора. Напряжение U на его зажимах меньше ЭДС E на величину падения напряжения в сопротивлении R_A обмотки якоря:

$$U = E - R_A I_A.$$

На проводник с током в магнитном поле будет действовать сила. Применив правило «левой руки» (рис. 12.1в), найдем, что электромагнитные силы создают тормозной момент. Направление сил противоположно направлению вращения якоря. Первичный двигатель, приводящий во вращение якорь, преодолевает это противодействие.

В зависимости от того, откуда подводится напряжение к обмотке возбуждения – от постороннего источника электрической энергии или от самого генератора, различают генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

В генераторах с независимым возбуждением, когда обмотка возбуждения имеет питание от постороннего выпрямительного устройства, ток возбуждения I_B не зависит от тока в якоре I_A . В генераторах с самовозбуждением обмотку возбуждения подключают к обмотке якоря. В зависимости от способа подключения обмоток – параллельно или последовательно – различают генераторы с параллельным возбуждением и генераторы с последовательным возбуждением. Иногда применяется смешанное возбуждение – все обмотки возбуждения разделены на две части: одна включена параллельно якору, а другая – последовательно с ним. В этом случае характеристики генератора зависят от способа самовозбуждения.

Для пояснения принципа самовозбуждения необходимо в одних координатных осях построить две характеристики:

а) холостого хода E_0 :

$$E_0 = f(I_B);$$

б) зависимости напряжения обмотки возбуждения U_B от тока возбуждения I_B :

$$U_B = I_B R_B.$$

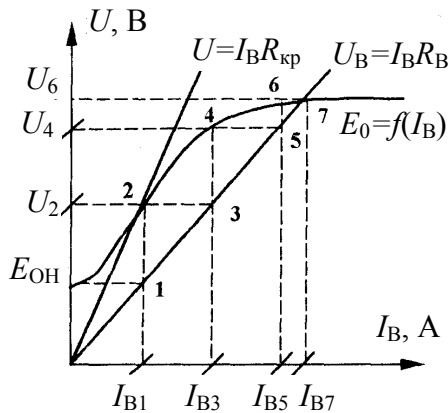


Рис. 12.2. Самовозбуждение генератора постоянного тока

Последняя зависимость имеет вид прямой линии (рис. 12.2).

Подключим обмотку возбуждения Ш1–Ш2 параллельно обмотке якоря Я1–Я2. Тогда напряжение генератора, определяемое характеристикой холостого хода, равно напряжению на обмотке возбуждения: $U_B = U_A$ (рис. 12.3).

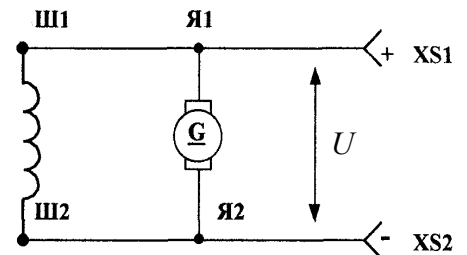


Рис. 12.3. Схема замещения обмоток возбуждения Ш1–Ш2 и якорной Я1–Я2

При вращении якоря невозбужденного генератора в якорной обмотке, вследствие остаточной индукции полюсов индуцируется ЭДС остаточного намагничивания $E_{ОН}$.

В обмотке возбуждения, согласно характеристике $U_B = I_B R_B$, возникает ток возбуждения I_{B1} , который создает магнитный поток. Если этот поток направлен встречно по отношению к остаточному потоку, то машина размагничивается, и самовозбуждение не происходит. В том случае, когда потоки направлены одинаково, то суммарный поток машины усиливается, и току возбуждения I_{B1} по характеристике холостого хода соответствует напряжение, равное ординате точки 2 (рис. 12.2). При напряжении U_2 ток возбуждения I_B увеличивается до значения I_{B3} (точка 3 на характеристике цепи возбуждения, рис. 12.2). В свою очередь, при токе возбуждения I_{B3} напряжение на якоре увеличивается до U_4 и так далее. В точке, где характеристики якорной цепи и цепи обмотки возбуждения пересекаются, самовозбуждение заканчивается. Процесс самовозбуждения в генераторах происходит плавно. Причем, изменяя сопротивление в цепи возбуждения R_B , мы можем изменять наклон характеристики $U_B = I_B R_B$ и, как следствие, напряжение холостого хода. Сопротивление R_B , при котором характеристика

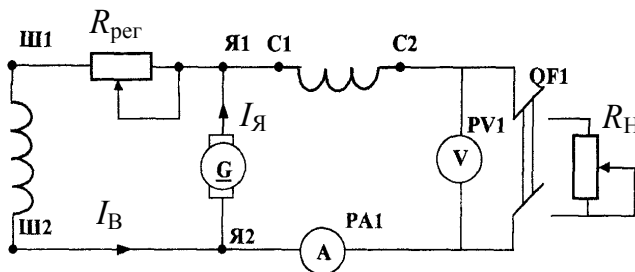


Рис. 12.4. Схема генератора постоянного тока со смешанным соединением обмоток возбуждения

зависимости U_B от тока возбуждения I_B направлена по касательной к характеристике холостого хода, называется критическим $R_{кр}$. В случае, когда R_B больше $R_{кр}$, процесс самовозбуждения не начинается.

При любом способе самовозбуждения необходимо соблюдать выполнение трех условий:

1) полюсы машины постоянного тока должны сохранять остаточный магнитный

поток;

2) магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения, должен совпадать по направлению с направлением остаточного магнитного потока полюсов;

3) сопротивление электрической цепи обмотки возбуждения должно быть меньше критического.

У генератора постоянного тока со смешанным возбуждением на полюсах размещаются две обмотки возбуждения: одна, параллельная Ш1–Ш2, включаемая в цепь параллельно обмотке якоря Я1–Я2, и вторая, последовательная С1–С2, включаемая последовательно с обмоткой якоря (рис. 12.4). На клеммной колодке такого генератора имеются три пары клемм, принадлежащие якорной обмотке Я1, Я2 (белый цвет); параллельной обмотке Ш1, Ш2 (зеленый цвет); последовательной обмотке С1, С2 (красный цвет).

Если маркировка клемм на колодке отсутствует, то отыскать клеммы той или иной обмотки можно при помощи контрольной лампы и внешнего источника тока, а также при помощи мегаомметра или прибора выпрямительной системы. При этом нужно иметь в виду, что клеммы якорной обмотки Я1–Я2 через щеточный контакт соединены с коллектором. Параллельная обмотка Ш1–Ш2, в отличие от последовательной обмотки возбуждения С1–С2, имеет большее число витков, изготовлена из провода малого сечения и поэтому обладает большим сопротивлением.

Наиболее полное представление о работе исследуемого генератора постоянного тока со смешанным возбуждением могут дать его характеристики:

1) характеристика холостого хода: $E_0 = f(I_B)$, $n = \text{const}$, $I_{\text{нагр}} = 0$;

2) внешняя характеристика $U = f(I_{\text{нагр}})$, $I_B = \text{const}$;

3) регулировочная характеристика $I_B = f(I_{\text{нагр}})$, $U = \text{const}$.

Характеристика холостого хода (рис. 12.5.) зависимость $E_0 = f(I_B)$, $n = \text{const}$, $I_{\text{нагр}} = 0$. При работе генератора его якорь обычно вращается с постоянной скоростью. Поэтому ЭДС генератора регулируют за счет величины магнитного потока, изменяя ток I_B в шунтовой обмотке возбуждения. Величина магнитного потока определяется по характеристике холостого хода генератора, которая снимается опытным путем при отсутствии нагрузки, и при постоянной скорости вращения якоря. При холостом ходе последовательная обмотка возбуждения не оказывает влияния на работу генератора. Магнитный поток наводит ЭДС остаточного магнитного потока $E_{\text{ОН}} = (2 \div 3 \%) U_{\text{ном}}$.

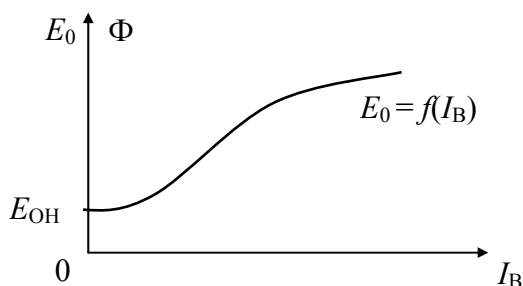


Рис. 12.5. Характеристика холостого хода генератора постоянного тока со смешанным возбуждением

Внешняя характеристика – зависимость $U = f(I_{\text{нагр}})$, $I_B = \text{const}$ (рис. 12.6.) строится на основании опытов, проводимых при постоянной скорости вращения якоря n и неизменном токе обмотки возбуждения. Внешняя характеристика при согласном включении обмоток, т. е. таком, когда магнитные потоки обмоток возбуждения имеют одинаковое направление (рис. 12.6, кривая 1), показывает, что снижение напряжения, наблюдавшееся у генератора с параллельным возбуждением, здесь компенсируется подмагничивающим действием серийной обмотки. Напряжение генератора практически неизменно в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки. Чтобы получить крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 12.6, кривая 2), последовательную и параллельную обмотки возбуждения включают встречно. С ростом нагрузки уменьшается результирующий магнитный поток и, как следствие, уменьшаются электродвижущая сила и напряжение:

$$E = C_E n \Phi;$$

$$U = E - (R_{\text{я}} + R_{\text{с}} I_{\text{я}}).$$

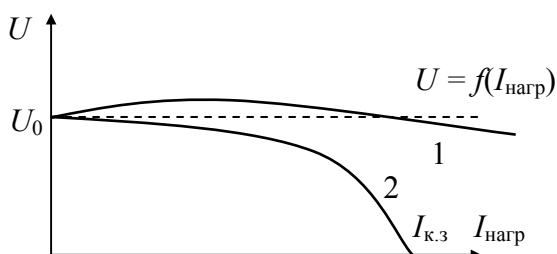


Рис. 12.6. Внешняя характеристика генератора постоянного тока со смешанным возбуждением

Встречное включение обмоток возбуждения применяется в сварочных генераторах и других специальных машинах, где нужно ограничить ток короткого замыкания.

Чтобы поддерживать напряжение постоянной величиной $U = \text{const}$, при любой нагрузке необходимо регулировать ток возбуждения I_B (рис. 12.7). Зависимость $I_B = f(I_{\text{нагр}})$ показывает, на сколько надо изменять ток возбуждения, чтобы напряжение генератора при новом значении тока нагрузки не изменилось. Ток возбуждения необходимо увеличивать незначительно, если ток нагрузки изменяется от нуля до номинального. При перегрузках, когда ток нагрузки $I_{\text{нагр}}$ больше номинального $I_{\text{ном}}$, магнитопровод генератора насыщается и поэтому требуется большее увеличение тока возбуждения.

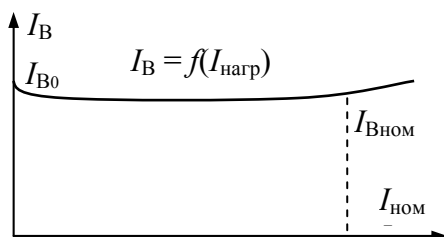


Рис. 12.7. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока

Программа выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия генератора постоянного тока со смешанным возбуждением.
2. Освоить методику испытания исследуемого генератора.

5. По данным табл. 12.1 для генератора постоянного тока со смешанным возбуждением построить характеристику холостого хода $E_0 = f(I_B)$, при $n = \text{const}$, $I_{\text{нагр}} = 0$.

6. Снять внешнюю характеристику исследуемого генератора, собрав соответствующую схему в следующих режимах работы:

а) при отключении сериесной обмотки возбуждения C1–C2 (рис. 12.9);

б) при согласном включении обмоток возбуждения, шунтовой и сериесной, то есть Ш1–Ш2–C1–C2 (рис. 12.10);

в) при встречном включении обмоток возбуждения, шунтовой и сериесной, то есть Ш1–Ш2–C2–C1 (рис. 12.11).

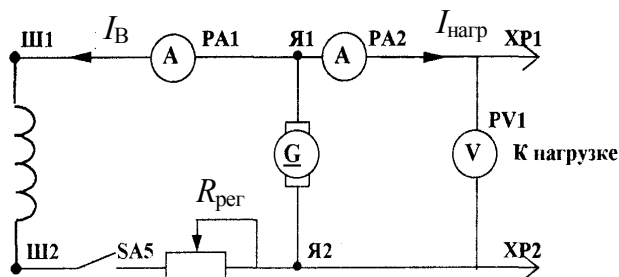


Рис. 12.9. Схема для снятия внешней характеристики исследуемого генератора при отключении сериесной обмотки C1–C2

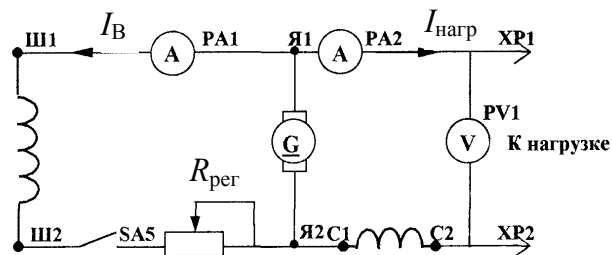


Рис. 12.10. Схема для снятия внешней характеристики исследуемого генератора при согласном включении обмоток Ш1–Ш2–C1–C2

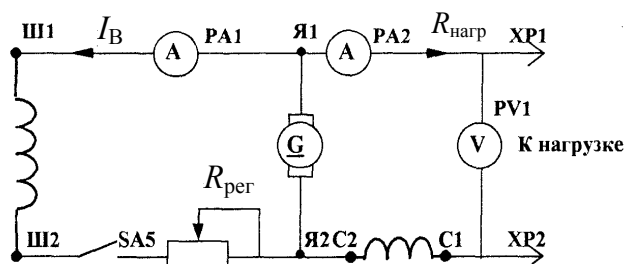


Рис. 12.11. Схема для снятия внешней характеристики исследуемого генератора при встречном включении обмоток Ш1–Ш2–C2–C1

Для этого необходимо собрать соответствующую исследуемому режиму работы схему. Выключатель SA5 включить. Включением автоматического выключателя QF1 пустить в ход первичный двигатель. Установить по вольтметру PV1 номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ генератора постоянного тока регулировочным реостатом $R_{\text{пер}}$ при выключенной нагрузке (SA1 ÷ SA4 выключены). Затем, поочередно включая нагрузку выключателями SA1 ÷ SA4, снять показания тока нагрузки $I_{\text{нагр}}$ (PA2) и напряжения U (PV1). Результаты измерений занести в табл. 12.2. Произвести не менее пяти измерений в разных режимах работы.

Таблица 12.2

Данные измерений испытания генератора постоянного тока со смешанным возбуждением для построения внешней характеристики

№ опыта	C1–C2 отключена		Согласное включение Ш1–Ш2–C1–C2		Встречное включение Ш1–Ш2–C1–C2	
	$I_{\text{нагр}}, \text{ A}$	$U, \text{ В}$	$I_{\text{нагр}}, \text{ A}$	$U, \text{ В}$	$I_{\text{нагр}}, \text{ A}$	$U, \text{ В}$
1						
2						
3						
4						
5						

7. По данным табл. 12.2 построить внешние характеристики $U = f(I_{\text{нагр}})$, $I_B = \text{const}$ для трех случаев работы исследуемого генератора в одних координатных осях: а) C1–C2 отключена; б) согласное включение Ш1–Ш2–C1–C2; в) встречное включение Ш1–Ш2–C2–C1.

8. На основе анализа данных пункта 6 для построения внешних характеристик исследуемого генератора в трех режимах дать заключение о правильности определения начал и концов выводов серийной C1–C2 и шунтовой Ш1–Ш2 обмоток при выполнении п. 2.

9. Снять регулировочную характеристику (рис. 12.8). Для этого выключатели SA1 ÷ SA4 выключить, SA5 включить. Включить автоматический выключатель QF1, тем самым пустить в ход первичный двигатель. Ток нагрузки $I_{\text{нагр}}$ (PA2) равен нулю. Регулировочным реостатом $R_{\text{рег}}$ установить по вольтметру PV1 номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ генератора, зафиксировав при этом ток возбуждения I_B (PA1).

Затем включить выключателем SA1 нагрузку, при этом происходит изменение параметров U (PV1); $I_{\text{нагр}}$ (PA2); I_B (PA1). Регулировочным реостатом $R_{\text{рег}}$ установить первоначальное номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ (PV1), зафиксировав при этом значение $I_{\text{нагр}}$ (PA2); I_B (PA1). Далее, поочередно подключая нагрузки выключателями SA2...SA4, снять показания приборов PA1, PA2 измеряющих токи I_B , $I_{\text{нагр}}$, поддерживая регулировочным реостатом $R_{\text{рег}}$ ранее установленное напряжение $U_{\text{ном}}$ по вольтметру PV1. Данные измерений занести в табл. 12.3.

Таблица 12.3

Данные измерений испытания генератора постоянного тока со смешанным возбуждением для построения регулировочной характеристики

$I_B, \text{ A}$						
$I_{\text{нагр}}, \text{ A}$						

10. По данным табл. 12.3 построить регулировочную характеристику генератора постоянного тока со смешанным возбуждением $I_B = f(I_{\text{нагр}})$, $U_{\text{ном}} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

Контрольные вопросы

1. Каким образом происходит самовозбуждение генератора?
2. Как можно возбудить генератор, если индуктор окажется размагниченным?
3. Чем отличаются по своей форме внешние характеристики генератора параллельного возбуждения и генератора последовательного возбуждения?
4. Почему ток короткого замыкания у генератора параллельного возбуждения относительно велик?

5. Какие переключения нужно сделать в цепи генератора смешанного возбуждения, если в результате замены первичного двигателя, направление вращения якоря изменяется на противоположное?