

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

«_____» _____ 201__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Б1.Б.18.01

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

08.03.01 Строительство

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Информационно – строительный инжиниринг

Программа прикладного бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

| | |
|--|------------|
| 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ | 3 |
| 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ | 4 |
| 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ | 5 |
| 3.1 Распределение объема дисциплины по формам обучения..... | 5 |
| 3.2 Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости | 5 |
| 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ | 6 |
| 4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий | 6 |
| 4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам | 6 |
| 4.3 Лабораторные работы..... | 90 |
| 4.4 Семинары/ практические занятия | 90 |
| 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат..... | 91 |
| 5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ | 92 |
| 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ | 93 |
| 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ..... | 93 |
| 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ | 94 |
| 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ..... | 94 |
| 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ и практических занятий..... | 95 |
| 10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ | 182 |
| 11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ | 182 |
| Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине..... | 183 |
| Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины | 189 |
| Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе | 190 |
| Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине..... | 191 |

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому и производственно-управленческому видам деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Цель изучения дисциплины является: приобретение у обучающихся теоретических и практических знаний в области электроснабжения и электротехники в такой степени, чтобы они обладали знаниями методов расчета электрических цепей, типовых схемных решений электроснабжения зданий и сооружений и владели навыками расчета элементов этих систем.

Задачи дисциплины

– изучение основных положений теории и практики расчета однофазных и трехфазных электрических цепей, устройств и принципов работы электрических машин и электрооборудования; типовых схем электроснабжения зданий, сооружений и строительных объектов и основных направлений развития этих систем;

– уметь выбирать типовые схемные решения систем электроснабжения зданий и сооружений и электрооборудования, применяемого на строительных объектах.

| Код компетенции | Содержание компетенций | Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине |
|-----------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| ОПК-2 | способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико-математический аппарат | <p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сущность естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выявлять сущность естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; - применять физико-математический аппарат для решения проблем в профессиональной деятельности; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - способами решения естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; - навыками применения физико-математического аппарата для решения |
| ПК-1 | знание нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования, планировки и застройки населенных мест | <p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - нормативную базу в области инженерных изысканий; - основные принципы проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - пользоваться нормативной базой в области инженерных изысканий; - составить план застройки населенного пункта; - размещать оборудование для застройки в населенных пунктах; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования; - способами размещения инженерных систем; |
| ПК-6 | способность | знать: |

| | | |
|------|---|---|
| | осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, обеспечивать надежность, безопасность и эффективность их работы | <ul style="list-style-type: none"> - способы организации технической эксплуатации зданий; - способы безопасной и эффективной эксплуатации зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства; <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства; - обеспечить надежность и эффективность работы зданий; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами организации и технической эксплуатации зданий; - способами безопасной и эффективной эксплуатации зданий. |
| ПК-8 | владение технологией, методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства, эксплуатации, обслуживания зданий, сооружений, инженерных систем, производства строительных материалов, изделий и конструкций, машин и оборудования | <p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - технологию процессов строительного производства; - способы эксплуатации зданий; - способы производства строительных материалов; <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - обслуживать здания, сооружения, инженерные системы; - организовывать производство строительных материалов, изделий и конструкций; - ориентироваться в процессах строительного производства и эксплуатации зданий, сооружений, инженерных систем; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами производства строительных материалов, изделий и конструкций, а также эксплуатацией зданий и сооружений; - методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства. |

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.18.01 Электроснабжение с основами электротехники относится к базовой части.

Дисциплина Электроснабжение с основами электротехники базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: физика, математика. Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Электроснабжение с основами электротехники представляет основу для изучения дисциплин: технология производства вяжущих веществ, технология конструкционных материалов, основы метрологии, стандартизации, сертификации и контроля качества, проектирование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

| Форма обучения | Курс | Семестр | Трудоемкость дисциплины в часах | | | | | | Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР | Вид промежуточной аттестации |
|--------------------------------------|------|---------|---------------------------------|------------------|--------|---------------------|----------------------|------------------------|--|------------------------------|
| | | | Всего часов | Аудиторных часов | Лекции | Лабораторные работы | Практические занятия | Самостоятельная работа | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Очная | 2 | 3 | 72 | 51 | 17 | 17 | 17 | 21 | - | зачет |
| Заочная | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Заочная (ускоренное обучение) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

| Вид учебных занятий | Трудоемкость (час.) | в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час) | Распределение по курсам, час |
|--|---------------------|---|------------------------------|
| | | | 3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего) | 51 | 8 | 50 |
| Лекции (Лк) | 17 | 4 | 17 |
| Лабораторные работы (ЛР) | 17 | 4 | 17 |
| Практические занятия (ПЗ) | 17 | - | 17 |
| Групповые (индивидуальные) консультации | 17 | - | 17 |
| II. Самостоятельная работа обучающихся (СР) | + | + | + |
| Подготовка к лабораторным работам | 21 | - | 21 |
| Подготовка к зачету | 7 | - | 7 |
| III. Промежуточная аттестация зачет | + | - | + |
| Общая трудоемкость дисциплины час зач. ед. | 7 | - | 7 |
| | 36 | - | 36 |

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

| № раздела и темы | Наименование раздела и тема дисциплины | Трудоемкость, (час.) | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.) | | | |
|------------------|--|----------------------|---|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| | | | учебные занятия | | | самостоятельная работа обучающихся |
| | | | лекции | Лабораторные занятия | практические занятия | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1. | Электротехника | 31 | 6 | 7 | 11 | 7 |
| 1.1 | Цепи постоянного тока | 11 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| 1.2 | Цепи однофазного синусоидального тока | 8 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1.3 | Трехфазные цепи | 12 | 2 | 2 | 5 | 3 |
| 2. | Электрические машины | 21 | 4 | 4 | 6 | 7 |
| 2.1. | Трансформаторы | 10 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| 2.2. | Асинхронные машины | 11 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| 3. | Электроснабжение | 20 | 7 | 6 | - | 7 |
| 3.1 | Основные сведения о системах электроснабжения | 7 | 2 | 3 | - | 2 |
| 3.2 | Временные электрические сети строительных площадок | 7 | 2 | 3 | - | 2 |
| 3.3 | Электронагрев в строительном производстве | 6 | 3 | - | - | 3 |
| ИТОГО | | 72 | 17 | 17 | 17 | 21 |

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1. Электротехника

Тема 1.1. Цепи постоянного тока

1.1.1. Общие сведения об электроизмерительных приборах

Электроизмерительные приборы предназначены для измерения различных величин и параметров электрической цепи: напряжения, силы тока, мощности, частоты, сопротивления, индуктивности, емкости и др.

На схемах электроизмерительные приборы изображаются условными графическими обозначениями в соответствии с ГОСТ 2.729-68.

На рис. 1.1.1 приведены общие обозначения показывающих и регистрирующих приборов.

Для указания назначения электроизмерительного прибора в его общее обозначение вписывают конкретизирующее условное обозначение, установленное в стандартах, или буквенное обозначение единиц измерения прибора согласно ГОСТ 23217-78 в соответствии с табл. 1.1.1.

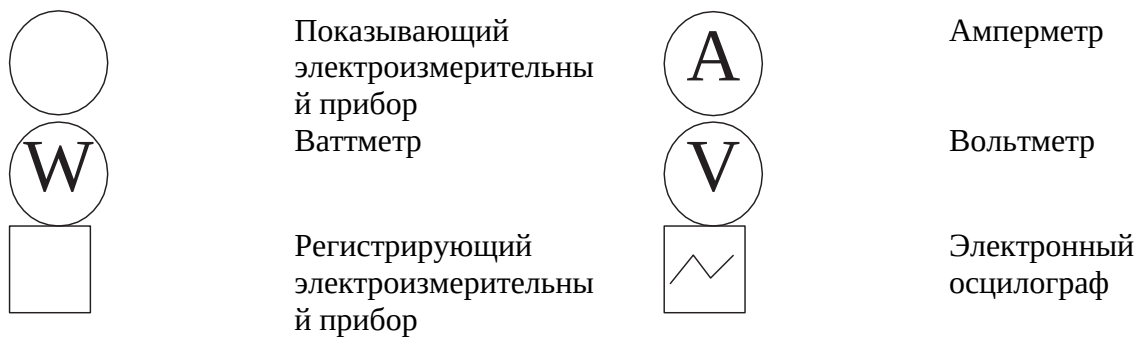


Рис. 1.1.1. Условные графические обозначения электроизмерительных приборов

Таблица 1.1.1

| Наименование единицы измерения | Условное обозначение | Наименование единицы измерения | Условное обозначение |
|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| Ампер | A | Миллиампер | mA |
| Вольт | V | Микроампер | μA |
| Ом | Ω | Милливольт | mV |
| Ватт | W | Киловатт | kW |
| Герц | Hz | Киловар | Kvar |
| Коэффициент мощности | Cosφ | Мегаом | MΩ |

1.1.2. Электромеханические измерительные приборы

По принципу действия электромеханические приборы подразделяются на приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, ферродинамической, индукционной, электростатической систем. Условные обозначения систем приведены в табл. 1.1.2. Наибольшее распространение получили приборы первых трех типов: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические.

Таблица 1.1.2

| Тип прибора | Условное обозначение | Род измеряемого тока | Достоинства | Недостатки |
|----------------------|---|-------------------------|---|---|
| Магнитоэлектрический |  | Постоянный | Высокая точность, равномерность шкалы | Неустойчив к перегрузкам |
| Электромагнитный |  | Переменный и постоянный | Простота устройства, к перегрузкам устойчив | Низкая точность, чувствителен к помехам |
| Электродинамический |  | Переменный и постоянный | Высокая точность | Низкая чувствительность, чувствителен к помехам |
| Индукционный |  | Переменный | Высокая надежность, к перегрузкам устойчив | Низкая точность |

1.1.3. Области применения электромеханических приборов

Магнитоэлектрические приборы: щитовые и лабораторные амперметры и вольтметры; нулевые индикаторы при измерениях в мостовых и компенсационных цепях.

В промышленных установках переменного тока низкой частоты большинство амперметров и вольтметров – приборы электромагнитной системы. Лабораторные приборы класса 0,5 и точнее могут изготавливаться для измерения постоянного и переменного токов и напряжения.

Электродинамические механизмы используются в лабораторных и образцовых приборах для измерения постоянных и переменных токов, напряжений и мощностей.

Индукционные приборы на базе индукционных механизмов используют главным образом в качестве одно – и трехфазных счетчиков энергии переменного тока. По точности счетчики подразделяются на классы 1,0; 2,0; 2,5. Счетчик СО (счетчик однофазный) используют для учета активной энергии (ваттчасов) в однофазных цепях. Для измерения активной энергии в трехфазных цепях применяют двухэлементные индуктивные счетчики, счетный механизм которых учитывает киловаттчасы (кВт·ч). Для учета реактивной энергии служат специальные индуктивные счетчики, имеющие некоторые изменения в устройстве обмоток или в схеме включения.

Активные и реактивные счетчики устанавливают на всех предприятиях для расчета с энергоснабжающими организациями за используемую электроэнергию.

Принцип выбора измерительных приборов

1.1. Определяют расчетом цепи максимальные значения тока, напряжения и мощности в цепи. Часто значения измеряемых величин известны заранее, например напряжение сети или аккумуляторной батареи.

2. В зависимости от рода измеряемой величины, постоянного или переменного тока, выбирают систему прибора. Для технических измерений постоянного и переменного тока выбирают соответственно магнитоэлектрическую и электромагнитную системы. При лабораторных и точных измерениях для определения постоянных токов и напряжений применяют магнитоэлектрическую систему, а для переменного тока и напряжения – электродинамическую систему.

3. Выбирают предел измерения прибора таким образом, чтобы измеряемая величина находилась в последней, третьей части шкалы прибора.

4. В зависимости от требуемой точности измерения выбирают класс точности прибора.

1.1.4. Способы включения приборов в цепь

Амперметры включают в цепь последовательно с нагрузкой, вольтметры – параллельно, ваттметры и счетчики, как имеющие две обмотки (токовую и напряжения), включают последовательно-параллельно (рис. 1.1.2.).

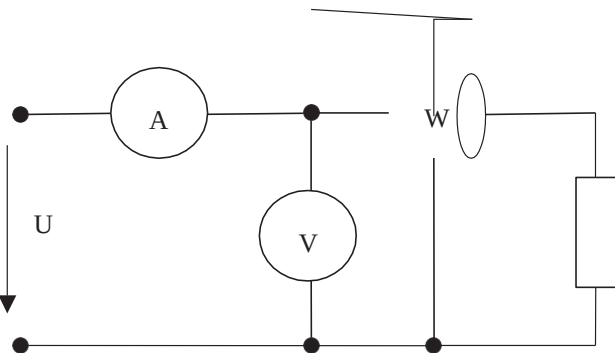


Рис. 1.1.2. Схемы включения электроизмерительных приборов в электрическую цепь
Для расширения пределов измерения приборов применяют:

– в цепи постоянного тока для амперметров – шунты, при этом на шкале амперметра обязательно указывается тип применяемого шунта; для вольтметров – добавочные резисторы (рис. 1.1.3, а);

– в цепи переменного тока для амперметров – трансформаторы тока (ТА), для вольтметров – трансформаторы напряжения (ТВ) (рис. 1.1.3, б).

Цена деления многопредельных амперметров, вольтметров, ваттметров определяется по формуле

$$C_I = \frac{I_H}{N} \left[\frac{A}{\text{дел.}} \right], \quad C_U = \frac{U_H}{N} \left[\frac{B}{\text{дел.}} \right], \quad C_W = \frac{I_H \cdot U_H}{N} \left[\frac{Вт}{\text{дел.}} \right].$$

где I_H , U_H – пределы, на которые установлены переключатели тока и напряжения у многопредельных приборов, или номинальные пределы измерений у однопредельных приборов; N – число делений шкалы прибора.

Измеряемая величина определяется по формулам:

$$I = n \cdot C_I, \text{ А}; \quad U = n \cdot C_U, \text{ В}; \quad P = n \cdot C_W, \text{ Вт},$$

где n – число делений, показываемое стрелкой прибора при измерении.

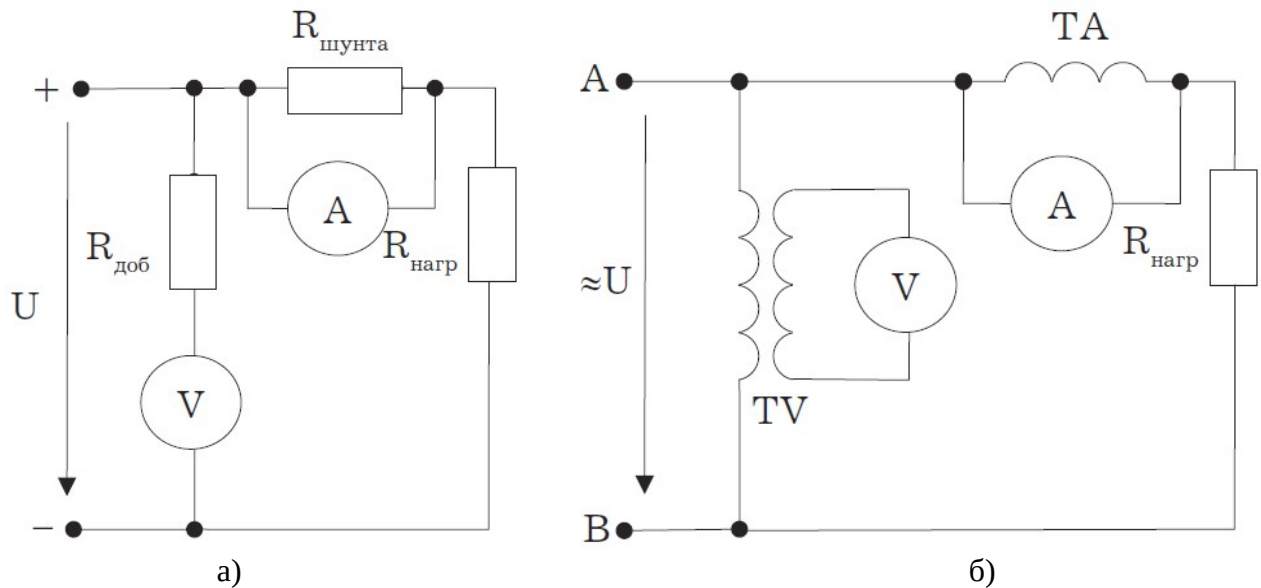


Рис. 1.1.3. Способы расширения пределов измерения приборов:

а – в цепи постоянного тока;

б – в цепи переменного тока

1.1.5. Электротехнические устройства и законы постоянного тока

Электротехнические генерирующие и приемные устройства. Источники питания цепи постоянного тока – это гальванические элементы, электрические аккумуляторы, электромеханические генераторы, термоэлектрические генераторы, фотоэлементы и др. Все источники питания имеют внутреннее сопротивление $R_{вт}$, значение которого невелико по сравнению с сопротивлением других элементов электрической цепи.

Электроприемниками постоянного тока являются электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, нагревательные и осветительные приборы, электролизные установки и др. Все электроприемники характеризуются электрическими параметрами, среди которых основные – напряжение и мощность. Для нормальной работы электроприемника на его зажимах необходимо поддерживать номинальное напряжение $U_{ном}$

(для приемников постоянного тока по ГОСТ 721–77 $U_{\text{ном}} = 27, 110, 220, 440 \text{ В}$, а также 6, 12, 24, 36 В).

Источники питания и электроприемники (нагрузка) на электрических схемах отображаются графически в виде символов в соответствии с ГОСТом.

1.1.6. Электрические цепи постоянного тока

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.

В электрической цепи постоянного тока могут действовать как постоянные токи, т.е. такие, значение и направление которых в любой момент времени остаются неизменными, так и токи, направление которых остается постоянным, а значение изменяется во времени произвольно или по какому-либо закону (такие токи нельзя назвать строго постоянными).

Под цепями постоянного тока в современной технике подразумевают цепи, в которых ток не меняет своего направления, т.е. полярность источников э.д.с. в которых постоянна.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств или элементов, которые по назначению можно подразделить на три группы:

1. Элементы, предназначенные для генерирования (выработки) электроэнергии (источники питания или источники э.д.с.).
2. Элементы, преобразующие электроэнергию в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую и т. д.); эти элементы называются приемниками электрической энергии, или нагрузкой.
3. Элементы, предназначенные для передачи электроэнергии от источника питания к электроприемнику (провода, устройства, обеспечивающие уровень и качество напряжения, и др.).

Электрическая цепь, электрическое сопротивление участков которой не зависит от значений и направлений токов и напряжений в цепи, называется линейной электрической цепью. Такая цепь состоит только из линейных элементов, а ее состояние описывается линейными алгебраическими уравнениями. В противном случае цепь называется нелинейной и описывается более сложными математическими уравнениями.

Для расчета и анализа работы электрической цепи, состоящей из любого количества различных элементов, удобно эту цепь представить графически (рис. 1.1.4). Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее соединения этих элементов, называется схемой электрической цепи. Простейшая схема электрической цепи, состоящая из источника э.д.с. (E) и резистора сопротивлением (R), изображена на рис. 1.1.4, а.

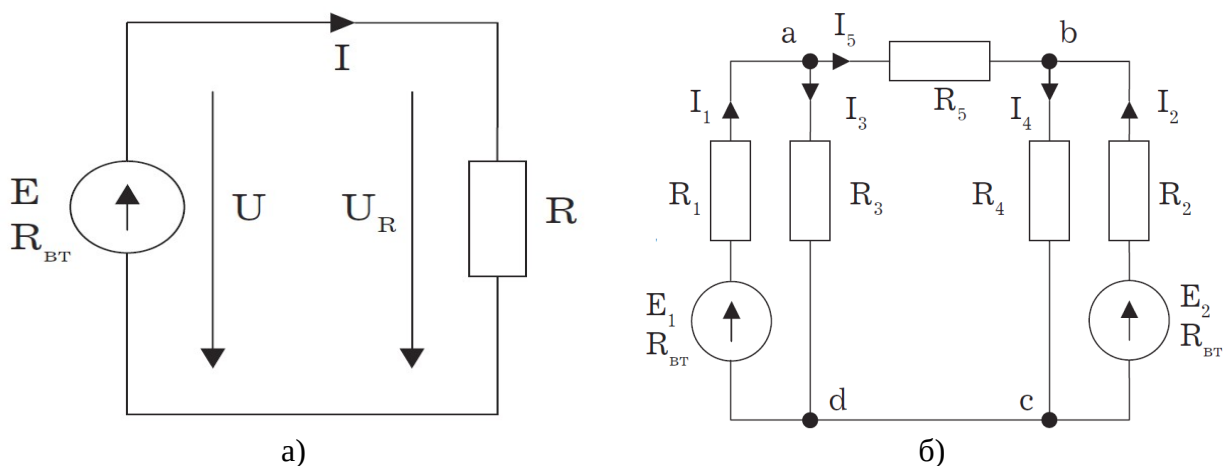


Рис. 1.1.4. Схемы электрических цепей:
а – простейшей одноконтурной, б – многоконтурной ($p = 5, q = 3$)

Участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток, называется ветвью. Место соединения ветвей электрической цепи называется узлом.

На электрических схемах узел обозначают точкой (рис. 1.1.4, б). Иногда несколько геометрических точек, соединенных проводниками, сопротивление которых принимают равным нулю (с – d), образуют один узел (рис. 1.1.4, б), узел с. Таким образом, каждая ветвь соединяет два соседних узла электрической схемы. Число ветвей схемы принято обозначать p , а число узлов – q . Электрическая цепь, изображенная на схеме (рис. 1.1.4, б), имеет число ветвей $p = 5$ и число узлов $q = 3$ (а, б, с).

Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называют контуром электрической цепи. Простейшая электрическая цепь имеет одноконтурную схему (см. рис. 1.1.4, а), сложные электрические цепи – несколько контуров (рис. 1.1.4, б).

1.1.7. Законы Ома и Кирхгофа

Закон Ома. Ток на участке электрической цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален его сопротивлению (рис. 1.1.4, а).

$$I = UR/R, I = E/(R + R_{вт}). \quad (1.1.1)$$

Законы Кирхгофа. Соотношения между токами и э.д.с. в ветвях электрической цепи и напряжениями на элементах цепи, позволяющие произвести расчет электрической цепи, определяются двумя законами Кирхгофа (рис. 1.1.4., 1.1.5).

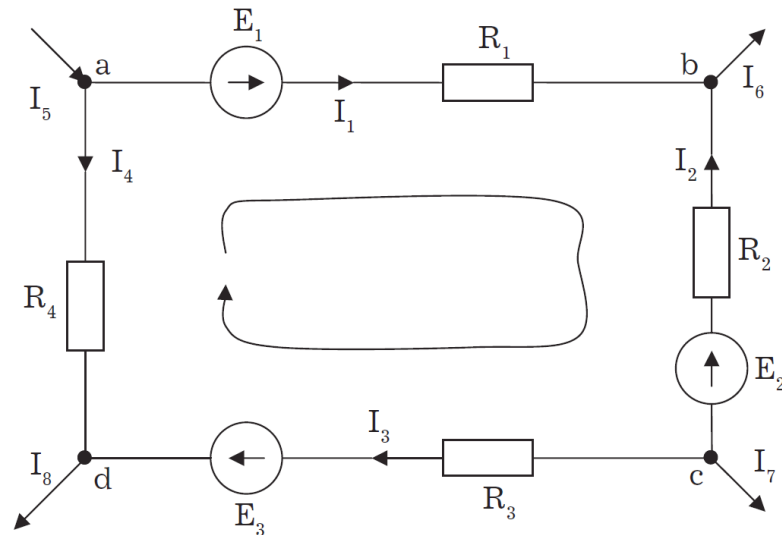


Рис. 1.1.5. Сложная одноконтурная электрическая цепь.

Первый закон Кирхгофа отражает принцип непрерывности движения электрических зарядов, из которого следует, что все заряды, притекающие в любой узел электрической цепи, из него вытекают, т.е. не накапливаются в узле. Поэтому алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю, т.е.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (1.1.2)$$

где n – число ветвей, сходящихся в узле.

До написания уравнения (1.1.2) необходимо задать условные положительные направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками. В уравнении (1.1.2) токи, направленные к узлу, записывают с одним знаком (например, с плюсом), а токи,

направленные от узла, – с противоположным (с минусом). Таким образом, для узла b схемы (рис. 1.2.13.б) уравнение по первому закону Кирхгофа будет иметь вид:

$$I_2 + I_5 - I_4 = 0.$$

Первый закон Кирхгофа может быть сформулирован иначе: сумма токов, притекающих в узел, равна сумме токов, вытекающих из узла.

Тогда уравнение для узла b (рис. 1.1.4, б) будет записано так:

$$I_4 = I_2 + I_5.$$

Второй закон Кирхгофа определяет, что изменение потенциала во всех элементах контура в сумме равно нулю. Это значит, что при обходе контура abcd электрической цепи, показанной на рис. 1.1.5, в силу того, что потенциал точки a один и тот же, общее изменение потенциала в контуре равно нулю. Из этого следует, что алгебраическая сумма э.д.с. в любом контуре электрической цепи постоянного тока равна алгебраической сумме падений напряжений на всех элементах, входящих в этот контур, т.е.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k \cdot I_k \quad (1.1.3)$$

где n – число источников э.д.с. в контуре; m – число элементов (число ветвей) с сопротивлением R_k в контуре.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа предварительно задают условные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи и для каждого контура выбирают направление обхода. Если при этом направление э.д.с. совпадает с направлением обхода контура, то такую э.д.с. берут со знаком плюс, если не совпадает – со знаком минус (левая часть уравнения 1.2.3). Падения напряжений в правой части уравнения (1.1.3) берут со знаком плюс, если положительное направление тока в данном элементе цепи совпадает с направлением обхода контура, и со знаком минус – если такого совпадения нет.

Для контура abcd, сопротивления ветвей которого включают в себя и внутренние сопротивления источников э.д.с., уравнение (1.1.3) принимает вид:

$$E_1 - E_2 + E_3 = R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 - R_4 \cdot I_4.$$

Используя второй закон Кирхгофа, можно определять разность потенциалов (напряжение) между любыми двумя точками электрической цепи.

Для одноконтурной схемы (рис. 1.1.4, а) в соответствии с уравнением (1.1.3) можно записать $E = R \cdot I = U_R$. Но вместо э.д.с. E при обходе контура по направлению тока можно взять напряжение на зажимах источника э.д.с., которое направлено противоположно направлению обхода контура, в результате чего получим $U_R - U = 0$ или $U = U_R$.

Следовательно, второй закон Кирхгофа можно сформулировать в таком виде: сумма падений напряжений на всех элементах контура, включая источники э.д.с., равна нулю, т.е.:

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0.$$

Если в ветви имеется n последовательно соединенных элементов с сопротивлением k-го элемента R_k , то

$$\sum_{k=1}^n U_k = I \cdot \sum_{k=1}^n R_k = U,$$

т.е. падение напряжения на участке цепи или напряжение между зажимами ветви U , состоящей из последовательно соединенных элементов, равно сумме падений напряжений на этих элементах.

1.1.8. Энергетические соотношения в цепях постоянного тока

$$E = U + R_{\text{вт}} \cdot I.$$

После умножения всех членов этого уравнения на I получим $E \cdot I = U \cdot I + R \cdot I^2$, или

$$P_1 = P_2 + P_{\text{п}}, \quad (1.1.4)$$

где P_1 – мощность источника э.д.с. (источника электроэнергии); P_2 – мощность, потребляемая электроприемником; $P_{\text{п}}$ – потеря мощности в источнике электроэнергии.

Уравнение (1.1.4) – это уравнение баланса мощностей электрической цепи.

Записав уравнение для P_2 с учетом (1.3.3)

$$P_2 = U \cdot I = R \cdot I^2 = E^2 \cdot R / (R + R_{\text{вт}})^2, \quad (1.1.5)$$

получаем зависимость мощности приемника от его сопротивления R при $E = \text{const}$ и $R_{\text{вт}} = \text{const}$. Мощность P_2 в режиме холостого хода, когда $I = 0$, и в режиме короткого замыкания, когда $U = 0$, равна нулю. Следовательно, зависимость $P_2(I)$ при изменении тока I от 0 до $I_{\text{к}}$ имеет максимум. Для определения условий, при которых эта мощность будет наибольшей ($P_2 = P_{2\text{max}}$), воспользуемся уравнением (1.1.4):

$$P_2 = P_1 - P_{\text{п}} = E \cdot I - R_{\text{вт}} \cdot I.$$

Приравняв производную ($dP_2/dI = E - 2R_{\text{вт}} \cdot I$) нулю, с учетом (1.3.4) можно записать

$$I = E / (2R_{\text{вт}}) = I_{\text{с}} = 0,5I_{\text{к}}.$$

Таким образом, приемник потребляет максимальную мощность при согласованном режиме, когда $R = R_{\text{вт}}$. С учетом этого равенства из формулы (1.1.5) определим значение мощности $P_{2\text{max}}$ или мощности $P_{2\text{с}}$. В согласованном режиме:

$$P_{2\text{max}} = P_{2\text{с}} = E^2 \cdot R_{\text{вт}} / (2R_{\text{вт}})^2 = E^2 / (4R_{\text{вт}}).$$

Мощность $P_{1\text{с}}$, развиваемая источником электроэнергии в согласованном режиме, если учесть (1.3.4), равна:

$$P_{1\text{с}} = E \cdot I_{\text{с}} = E^2 / (2R_{\text{вт}}).$$

Наибольшую мощность источник электроэнергии развивает при коротком замыкании, когда ток достигает наибольшего значения (рис. 1.1.6).

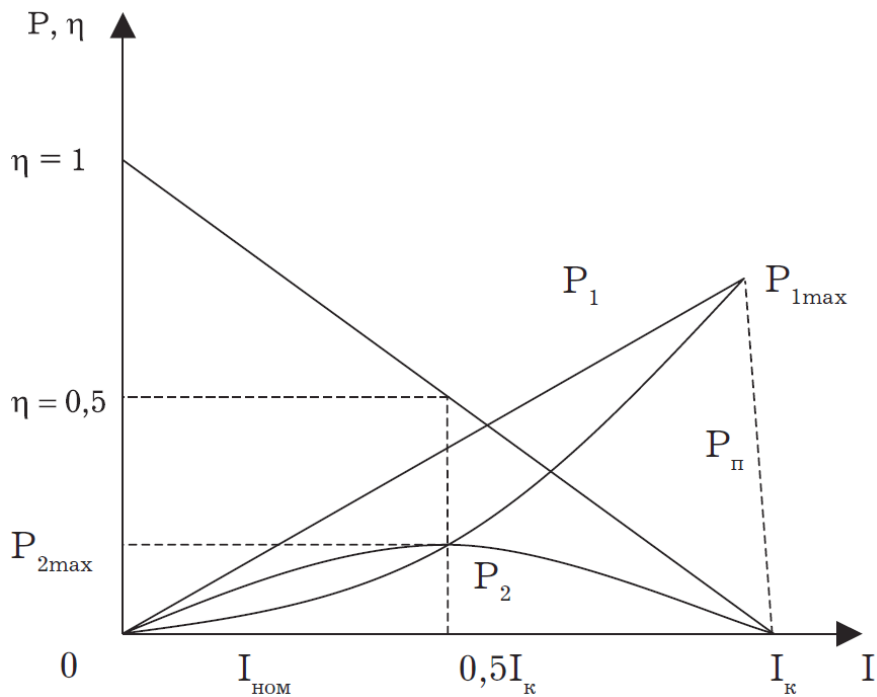


Рис. 1.1.6. Зависимость мощности и КПД в цепи постоянного тока

В этом случае $P_{1\max} = E \cdot I_K = E^2/R_{\text{вт}}$. Мощность источника в согласованном режиме в два раза меньше его максимальной мощности.

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) источника электроэнергии в согласованном режиме

$$\eta = P_{2c}/P_{1c} = 0,5.$$

Из-за такого низкого значения к.п.д., обусловленного большими потерями мощности и энергии в источнике питания и сетях, согласованный режим в промышленных установках не применяют.

Однако этот режим имеет преимущество перед другими режимами, заключающееся в том, что при $E = \text{const}$ мощность приемника достигает наибольшего значения. Поэтому согласованный режим применяют в цепях с малыми токами (схемы автоматики, электрических измерений, связи и т. д.), в которых к.п.д. не имеет решающего значения.

Зависимости P_1 , P_2 , P_{Π} и η от тока в цепи показаны на рис. 1.1.6. При их построении принималось во внимание, что $E = \text{const}$ и $R_{\text{вт}} = \text{const}$. Зависимость $P_1(I) = E \cdot I$ имеет линейный характер. Потери мощности в источнике электроэнергии зависят от тока по параболическому закону, причем при токе короткого замыкания

$$P_{\Pi} = R_{\text{вт}} \cdot I_K^2 = R_{\text{вт}} \cdot E^2/R_{\text{вт}}^2 = E^2/R_{\text{вт}} = P_{1\max}.$$

Наибольшее значение мощность электроприемника $P_{2\max}$ имеет при согласованном режиме, т.е. при $I = 0,5I_K$. Так как к.п.д.

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - P_{\Pi})/P_1 = 1 - R_{\text{вт}} \cdot I/E = 1 - I/I_K,$$

то зависимость $\eta(I)$ линейна. При номинальном режиме КПД много выше, чем при согласованном режиме. Для большинства промышленных источников электроэнергии при номинальном режиме $\eta = 0,8-0,9$. Следовательно, $I_{\text{НОМ}} = (0,1 \div 0,2) \cdot I_K$, т.е. номинальный ток во много раз меньше тока короткого замыкания.

1.1.9. Последовательное соединение элементов цепи

Последовательное соединение элементов – это самое простое соединение. При таком соединении во всех элементах цепи протекает один и тот же ток. По этой схеме могут быть соединены или все пассивные элементы цепи и тогда цепь будет одноконтурной неразветвленной (Рис. 1.1.7.а), или может быть соединена только часть элементов многоконтурной цепи.

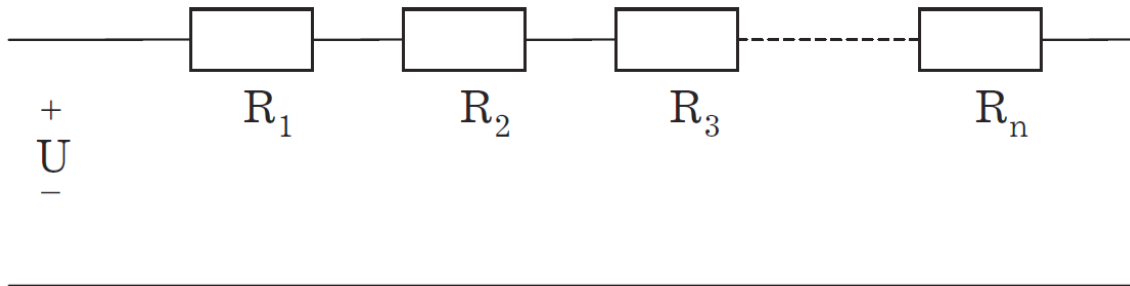


Рис. 1.1.7. Схема последовательного соединения линейных элементов (а) и эквивалентная схема (б)

Если последовательно соединены n элементов, в которых протекает один и тот же ток I , то напряжение на зажимах цепи будет равно сумме падений напряжения на n последовательно включенных элементах, т.е.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n,$$

или

$$U = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I + \dots + R_n \cdot I = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) = R_{\text{экв}} \cdot I \quad (1.1.6)$$

где $R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^n R_k$ – эквивалентное сопротивление цепи.

Таким образом, эквивалентное сопротивление последовательно соединенных пассивных элементов равно сумме сопротивлений этих элементов. Схема электрической цепи (рис. 1.1.7, а) может быть представлена эквивалентной схемой (рис.1.4.1, б), состоящей из одного элемента с эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$. Для такой схемы $U = R_{\text{экв}} \cdot I$, что совпадает с уравнением (1.1.6). При расчете цепи с последовательным соединением элементов при заданных напряжении источника питания и сопротивлениях элементов ток в цепи рассчитывают по закону Ома:

$$I = U/R_{\text{экв}}.$$

Падение напряжения на k -м элементе $U = R_k \cdot I = R_k U/R_{\text{экв}}$ зависит не только от сопротивления этого элемента R_k , но и от эквивалентного сопротивления $R_{\text{экв}}$, т.е. от сопротивления других элементов цепи. В этом заключается существенный недостаток последовательного соединения элементов. В предельном случае, когда сопротивление какого-либо элемента цепи становится равным бесконечности (разрыв цепи), ток во всех элементах цепи становится равным нулю.

Так как при последовательном соединении ток во всех элементах цепи один и тот же, то отношение падений напряжения на элементах равно отношению сопротивлений этих элементов:

$$U_k/U_n = R_k/R_n.$$

1.1.10. Параллельное соединение элементов цепи

Параллельное соединение элементов – это такое соединение, при котором ко всем элементам цепи приложено одно и то же напряжение.

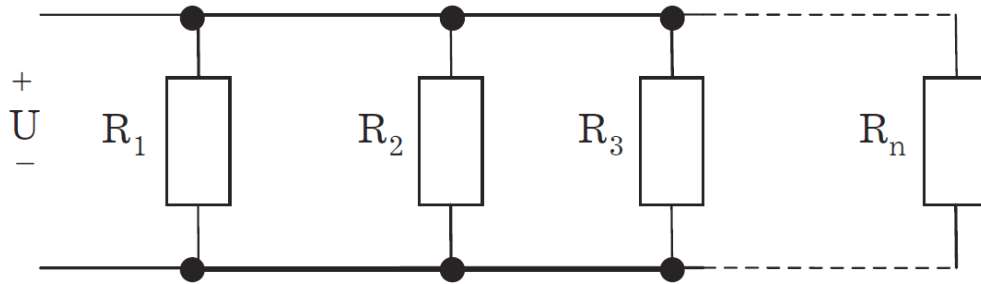


Рис. 1.1.8. Схема параллельного соединения линейных элементов (а) эквивалентная схема (б)

По схеме параллельного соединения могут быть соединены или все пассивные элементы цепи (рис. 1.1.8, а), или только часть их. Каждый параллельно включенный элемент образует отдельную ветвь. Поэтому цепь с параллельным соединением элементов, изображенная на рис. 1.1.8, а, хотя и является простой цепью (так как содержит только два узла), в то же время разветвленная.

В каждой параллельной ветви ток:

$$I_k = U/R_k = G_k \cdot U, \quad (1.1.7)$$

где $G_k = 1/R_k$ – проводимость k -й ветви.

По первому закону Кирхгофа,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n,$$

$$I = G_1 \cdot U + G_2 \cdot U + G_3 \cdot U + \dots + G_n \cdot U = (G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n) \cdot U = G_{\text{эКВ}} \cdot U,$$

где $G_{\text{эКВ}} = \sum_{k=1}^n G_k$ – эквивалентная проводимость цепи.

Таким образом, при параллельном соединении пассивных элементов их эквивалентная проводимость равна сумме проводимостей этих элементов. Эквивалентная проводимость всегда больше проводимости любой части параллельных ветвей. Эквивалентной проводимости $G_{\text{эКВ}}$ соответствует эквивалентное сопротивление $R_{\text{эКВ}} = 1/G_{\text{эКВ}}$.

Тогда эквивалентная схема цепи, изображенная на рис. 1.1.8, а, будет иметь вид, представленный на рис. 1.1.8, б. Ток в неразветвленной части цепи с параллельным соединением элементов может быть определен из этой схемы по закону Ома:

$$I = U/R_{\text{эКВ}} = G_{\text{эКВ}} \cdot U.$$

Следовательно, если напряжение источника питания постоянно, то при увеличении числа параллельно включенных элементов (что приводит к увеличению эквивалентной проводимости) ток в неразветвленной части цепи (ток источника питания) увеличивается.

Из формулы (1.1.7) видно, что ток в каждой ветви зависит только от проводимости данной ветви и не зависит от проводимостей других ветвей. Независимость режимов параллельных ветвей друг от друга – важное преимущество параллельного соединения пассивных элементов. В промышленных установках параллельное соединение электроприемников применяют в большинстве случаев. Самым наглядным примером является включение электрических осветительных ламп.

Так как при параллельном соединении ко всем элементам приложено одно и то же напряжение, а ток в каждой ветви пропорционален проводимости этой ветви, то отношение токов в параллельных ветвях равно отношению проводимостей этих ветвей или обратно пропорционально отношению их сопротивлений:

$$I_k/I_n = G_k/G_n = R_n/R_k.$$

1.1.11. Смешанное соединение элементов цепи

Смешанное соединение элементов представляет собой сочетание последовательного и параллельного соединений. Такая цепь может иметь различное число узлов и ветвей. Пример смешанного соединения приведен на схеме (рис. 1.1.9, а).

Для расчета такой цепи необходимо последовательно определять эквивалентные сопротивления для тех частей схемы, которые представляют собой только последовательное или только параллельное соединение. В рассматриваемой схеме имеется последовательное соединение элементов сопротивлениями R_1 и R_2 и параллельное соединение элементов сопротивлениями R_3 и R_4 . Используя полученные ранее соотношения между параметрами элементов цепи при последовательном и параллельном их соединении, реальную схему цепи можно последовательно заменить эквивалентными схемами.

Эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов $R_{12} = R_1 + R_2$.
Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных элементов R_3, R_4

$$R_{34} = 1/G_{34} = 1/(G_3 + G_4) = R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4).$$

Эквивалентная схема с сопротивлениями элементов R_{12} и R_{34} изображена на рис. 1.1.9, б. Для этой схемы последовательного соединения R_{12} и R_{34} эквивалентное сопротивление $R_{\text{ЭКВ}} = R_{12} + R_{34}$, а соответствующая эквивалентная схема представлена на рис. 1.1.9, в. Найдем ток в этой цепи:

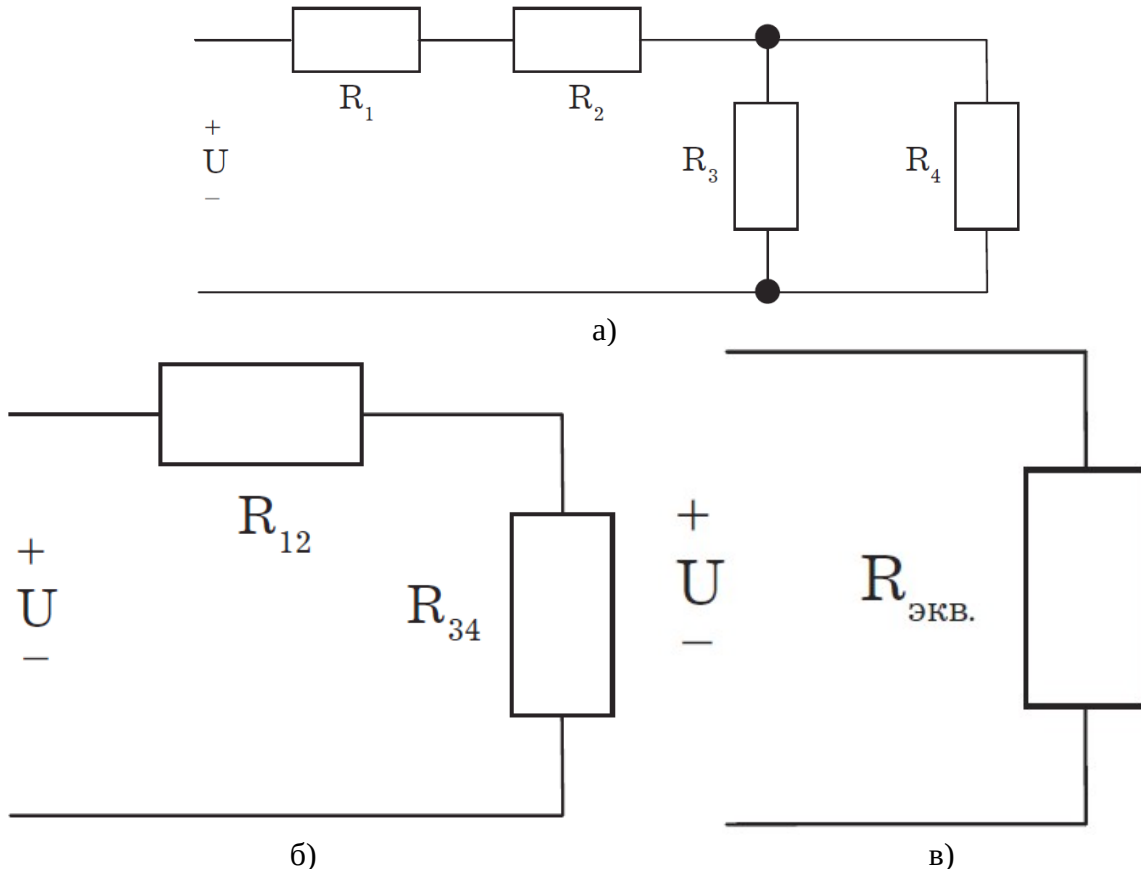


Рис. 1.1.9. Схема смешанного соединения линейных элементов (а) и ее эквивалентные схемы (б, в)

$$I = U/R_{\text{экв.}}$$

Это ток источника питания и ток в элементах R_1 и R_2 реальной цепи. Для расчета токов I_3 и I_4 определяют напряжение на участке цепи сопротивлением R_{34} (рис. 1.1.9, б):

$$U_{34} = R_{34} \cdot I = R_{34} \cdot U/R_{\text{экв.}}$$

Тогда токи I_3 и I_4 можно найти по закону Ома:

$$I_3 = U_{34}/R_3;$$

$$I_4 = U_{34}/R_{1,4}.$$

Подобным образом можно рассчитать и ряд других схем электрических цепей со смешанным соединением пассивных элементов,

Для сложных схем с большим количеством контуров и источников э.д.с. не всегда может быть проведено такое эквивалентное преобразование. Их расчет ведется с использованием других методов.

Тема 1.2. Цепи однофазного синусоидального тока

1.2.1. Основные понятия и определения переменного тока

Широкое применение в электрических цепях электро-, радио и других установок находят периодические э.д.с., напряжения и токи. Периодические величины изменяются во времени по значению и направлению, причем эти изменения повторяются через некоторые равные промежутки времени T (рис. 1.2.1), называемые периодом.

На практике все источники энергии переменного тока (генераторы электростанций) создают э.д.с., изменяющуюся по синусоидальному закону (рис. 1.2.1, д).

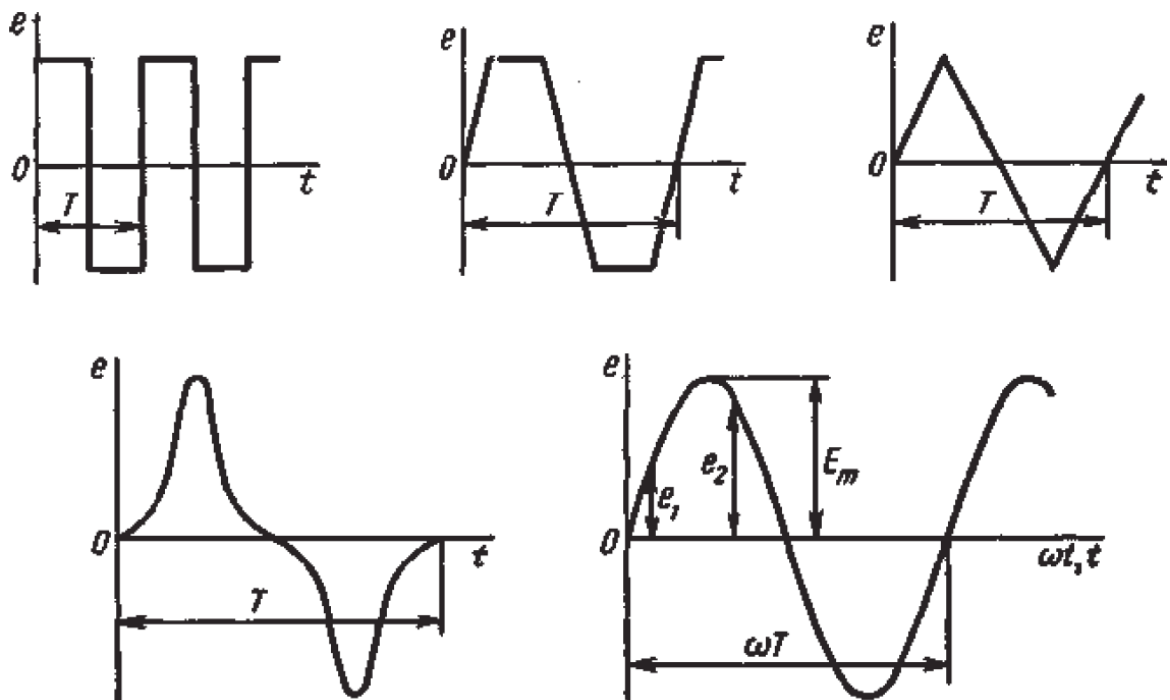


Рис. 1.2.1. Переменные периодические э.д.с. различной формы: а – прямоугольный; б – трапецидальной; в – треугольной; г – произвольной; д – синусоидальной

Основное преимущество такого закона изменения э.д.с. и напряжения заключается в том, что в процессе передачи электроэнергии на большие расстояния (сотни и тысячи

километров) от источника до потребителя при многократной трансформации (изменении) напряжения временная зависимость напряжения остается неизменной, т.е. синусоидальной.

Синусоидальные э.д.с., напряжения и токи начали широко применять в электротехнике во второй половине XX века. В настоящее время практически вся вырабатываемая электроэнергия является энергией синусоидального тока. Лишь некоторую долю этой электроэнергии при использовании преобразуют в энергию постоянного тока.

Любая периодическая величина имеет ряд характерных значений. Максимальное значение, или амплитуду, э.д.с., напряжения и тока обозначают соответственно E_m , U_m , I_m . Значение периодически изменяющейся величины в рассматриваемый момент времени называют мгновенным ее значением и обозначают e , u , i – э.д.с., напряжение и ток соответственно. Максимальное значение – частный случай мгновенного значения.

Величина, обратная периоду, т.е. число полных изменений периодической величины за 1 с, называется частотой:

$$f = 1/T. \quad (1.2.1)$$

Частоту выражают в герцах (Гц). Во всех энергосистемах России и других европейских стран в качестве стандартной промышленной частоты принята $f = 50$ Гц, в США и Японии $f = 60$ Гц. Это обеспечивает получение оптимальных частот вращения электродвигателей переменного тока и отсутствие заметного для глаза мигания осветительных ламп накаливания.

Некоторые электротехнические устройства работают при более высокой частоте. Повышенная частота (обычно 175–200, 400 Гц) позволяет снизить вес электродвигателей, применяемых для привода электроинструмента и средств автоматики. В установках сквозного нагрева металлов для горячей штамповки иковки применяют частоту от 500 до 10 000 Гц, а в установках поверхностного нагрева металлов – от 2000 до 106 Гц. В радиотехнических устройствах применяют частоты от 105 до 3×10^{10} Гц.

Находят применение также синусоидальные токи пониженной частоты. Частоту $f = 5 \div 10$ Гц применяют в металлургической промышленности.

Электрические цепи, в которых действуют синусоидальные э.д.с. и токи, называются электрическими цепями синусоидального тока. К ним относятся понятия схемы цепи, контура, ветви и узла, которые были даны ранее для цепей постоянного тока.

1.2.2. Получение синусоидальной э.д.с., источники э.д.с.

Рассмотрим вращение с угловой скоростью ω прямоугольного витка проводника, помещенного в однородное магнитное поле с потоком Φ (рис. 1.2.2). Перпендикулярную направлению магнитного потока линию обозначим N – n (рис. 1.2.2, б).

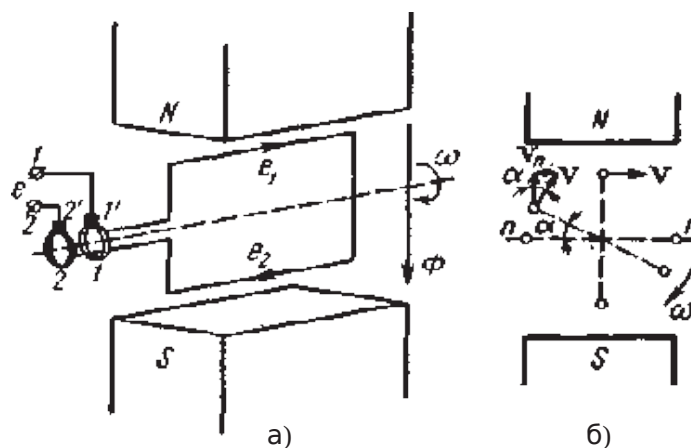


Рис. 1.2.2. Определение направления (а) и значения (б) синусоидальной э.д.с.

Проводник движется с постоянной линейной скоростью v . Когда он пересекает линии магнитного потока, в нем индуцируется э.д.с.

$$e_{np} = B \cdot l \cdot v_n, \quad (1.2.2)$$

где B – магнитная индукция; l – активная длина проводника, т.е. та его часть, которая пересекает магнитный поток; v_n – составляющая линейной скорости, нормальная к магнитному потоку.

При повороте витка на угол $\alpha = \omega t$ по отношению к первоначальному положению, совпадающему с линией $n - n$,

$$v_n = v \sin \alpha = v \sin \omega t.$$

Тогда на основании (1.2.2) получается, что $e_{np} = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega t$ изменяется по синусоидальному закону во времени. Коэффициент

$$B \cdot l \cdot v = E_{np \text{ м}}$$

представляет собой постоянную величину и является амплитудой, э.д.с.

Направление э.д.с. в проводниках определяется по правилу правой руки и указано на рис. 1.2.2, а (e_1 и e_2). Так как два проводника, образующих виток, соединены между собой последовательно и э.д.с. в них складываются, то,

$$e = e_1 + e_2 = E_m \sin \omega t \quad (1.2.3)$$

и также изменяется во времени по синусоидальному закону.

В простейшем генераторе концы витка присоединяют к вращающимся вместе с ним кольцам 1 и 2, по которым скользят неподвижные щетки 1' и 2' (рис. 1.2.2, а). От щеток отходят проводники к зажимам щитка генератора. Время одного оборота витка соответствует периоду T , а угол поворота равен ωT .

При числе пар полюсов $p = 1$ угловая частота ω изменения синусоидальной э.д.с. равна угловой скорости вращения витка. При большем числе пар полюсов за один оборот витка синусоидальная э.д.с. сделает большее число полных изменений, т.е. период T будет меньше времени, необходимого для одного оборота витка.

На рис. 1.2.3 показаны две пары полюсов ($p = 2$). В этом случае угловая частота в два раза больше угловой скорости.

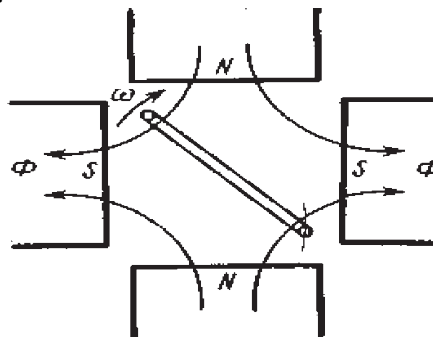


Рис. 1.2.3. Схема простейшего генератора синусоидальной э.д.с. с двумя парами полюсов

В общем случае

$$\omega = 2\pi p / 60,$$

где $2\pi / 60$ – угловая скорость вращения; p – угловая частота вращения, об/мин.

На основании равенства $\omega T = 2\pi$ с учетом формулы (1.2.1) можно получить соотношение между угловой скоростью ω и частотой f :

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f, \quad (1.2.4)$$

причем $f = n\omega/60$.

У современных генераторов синусоидального тока обмотка состоит из большого числа последовательно соединенных витков. В каждом из них индуцируются синусоидальные э.д.с., которые, складываясь, образуют также синусоидальную э.д.с., определяемую выражением (1.2.3). Обычно обмотка расположена на неподвижной части генератора – статоре, а вращающиеся магнитные полюсы вместе с обмоткой возбуждения, питаемой от источника постоянного тока, являются ротором (рис. 1.2.4).

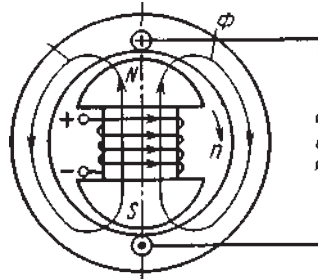


Рис. 1.2.4. Схема простейшего генератора синусоидальной э.д.с. с вращающимися полюсами

Постоянный по отношению к ротору магнитный поток вращается вместе с ним. Магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором неодинакова; она максимальна по оси полюсов, а к их краям уменьшается по закону косинуса $B = B_m \cdot \cos \alpha = B_m \cdot \cos \omega t$. По этому же закону изменяется магнитный поток в зазоре $\Phi = \Phi_m \cdot \cos \alpha = \Phi_m \cdot \cos \omega t$ и потокосцепление с любым витком, расположенным на статоре.

Индукцируемая в витке э.д.с.

$$e = -d\Phi/dt = \omega \Phi_m \cdot \sin \omega t = E_m \cdot \sin \omega t,$$

где $E_m = \omega \cdot \Phi_m$.

Таким образом, э.д.с. генератора также синусоидальна.

1.2.3. Действующие и средние значения синусоидальных э.д.с., напряжения и тока

Как постоянный, так и синусоидальный токи используются для совершения какой-либо работы, в процессе которой электроэнергия преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую и т. д.). Для количественной оценки синусоидального тока (э.д.с. и напряжения), который в течение времени непрерывно периодически изменяется, используют значение постоянного тока, эквивалентное значению синусоидального тока по совершаемой работе. Такое значение будет действующим для синусоидального тока.

Исходя из этого условия, действующим значением синусоидального тока называется такое значение постоянного тока, при прохождении которого в одном и том же резисторе сопротивлением R за время одного периода T выделяется столько же теплоты, сколько и при прохождении синусоидального тока.

При синусоидальном токе $i = I_m \cdot \sin \omega t$ количество теплоты $Q_{пер}$ выделяемое в резисторе R за время T ,

$$Q_{пер} = \int i^2 R dt,$$

а при постоянном токе

$$Q_{пост} = R \cdot I^2 \cdot T.$$

Согласно определению, $Q_{пост} = Q_{пер}$, тогда

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 dt} \quad (1.2.5)$$

Таким образом, действующее значение синусоидального тока является его среднеквадратичным значением.

Чтобы найти соотношение между максимальным и действующим значениями синусоидального тока, надо вычислить интеграл в формуле (1.2.5):

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt = I_m^2 \int_0^T \frac{dt}{2} - I_m^2 \int_0^T \frac{1}{2} \cos 2\omega t \cdot dt$$

Так как $\int_0^T \cos 2\omega t \cdot dt = 0$, получаем

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 / 2 \int_0^T dt = I_m^2 \cdot T / 2$$

Подставляя это выражение в формулу (1.2.5), получим

$$I = I_m \cdot \sqrt{2} = 0,707 \cdot I_m \quad (1.2.6)$$

Аналогично, действующие значения э.д.с. и напряжений равны соответственно

$$E = E_m \cdot \sqrt{2} = 0,707 \cdot E_m \quad (1.2.7)$$

$$U = U_m \cdot \sqrt{2} = 0,707 \cdot U_m \quad (1.2.8)$$

Действующие значения синусоидальных величин в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитудных значений. Для периодических величин, изменяющихся по другому закону, это соотношение будет другим. Действующие значения синусоидального тока, э.д.с. и напряжения обозначают прописной буквой без индексов, как постоянные ток, э.д.с. и напряжение.

В большинстве электроизмерительных приборов, измеряющих ток и напряжение, используется принцип теплового, или электродинамического, эффекта. Поэтому они всегда показывают действующее значение, зная которое можно вычислить амплитуду по формулам (1.2.6)–(1.2.8). Так, например, если вольтметр показывает 220 В напряжения синусоидального тока, то амплитуда этого напряжения равна $\sqrt{2} \cdot 220 = 311$ В.

1.2.4 Законы Кирхгофа для электрической цепи синусоидального тока

Для цепей синусоидального тока также справедливы законы Кирхгофа, сформулированные ранее для цепей постоянного тока. Но так как синусоидальные величины (э.д.с., напряжение, ток) характеризуются мгновенными, максимальными и действующими значениями, то для каждого из них существуют свои формулировки законов Кирхгофа.

Для мгновенных значений законы Кирхгофа справедливы в алгебраической форме.

Первый закон состоит в том, что алгебраическая сумма мгновенных значений токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

По второму закону алгебраическая сумма э.д.с. в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^n u_k.$$

Для максимальных и действующих значений законы Кирхгофа справедливы только в векторной или комплексной форме.

Согласно первому закону, сумма комплексных токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0 \quad (1.2.9)$$

По второму закону сумма комплексных э.д.с. в контуре равна сумме комплексных падений напряжения в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n \dot{E}_k = \sum_{k=1}^n \dot{U}_k \quad (1.2.10)$$

Второй закон Кирхгофа может быть сформулирован иначе: сумма мгновенных или комплексных значений падений напряжений на всех элементах контура, включая источники э.д.с., равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad \text{или} \quad \sum_{k=1}^n \dot{U}_k = 0 \quad (1.2.11)$$

При составлении уравнений законов Кирхгофа в цепях синусоидального тока необходимо указать условное положительное направление э.д.с., задать условное положительное направление токов в ветвях и положительное направление падений напряжений на участках цепи, совпадающее с положительным направлением тока. Знак слагаемых в уравнениях определяется так же, как в цепях постоянного тока. Это относится как к мгновенным значениям синусоидальных величин, так и к комплексным.

1.2.5 Электрическая цепь с активным сопротивлением

Электрический ток проводимости в металлах представляет собой направленное движение свободных электронов, скорость и направление которого определяются значением и полярностью приложенного к проводнику напряжения. При движении электроны сталкиваются с атомами проводящего вещества, и кинетическая энергия электронов, запасенная ими при ускорении, превращается в тепловую энергию, затрачиваемую на нагрев проводника и рассеиваемую в окружающую среду. Это необратимый активный процесс преобразования электрической энергии, который количественно определяется сопротивлением R . Потому его называют активным сопротивлением.

Активным сопротивлением обладают практически все материалы, проводящие электрический ток (металлы, уголь, электролиты). Таким образом, все провода, обмотки, реостаты и другие элементы цепи обладают активным сопротивлением. Элементы

электрической цепи, обладающие только активным сопротивлением R , называют резисторами.

При рассмотрении электрических цепей постоянного тока сопротивление R называли просто сопротивлением. В теории цепей синусоидального тока его называют активным сопротивлением. С одной стороны, это вызвано тем, что необходимо привести название этого сопротивления в соответствие с названиями других по характеру сопротивлений (индуктивное, емкостное, реактивное, полное), характеризующих цепь синусоидального тока, с другой – тем, что один и тот же проводник оказывает большее сопротивление движению электронов при синусоидальном токе, чем при постоянном (это будет показано далее), т.е. активное сопротивление больше сопротивления постоянному току.

Пусть к зажимам цепи с активным сопротивлением R (рис. 1.2.5, а) приложено напряжение источника питания $u = U_m \cdot \sin \omega t$.

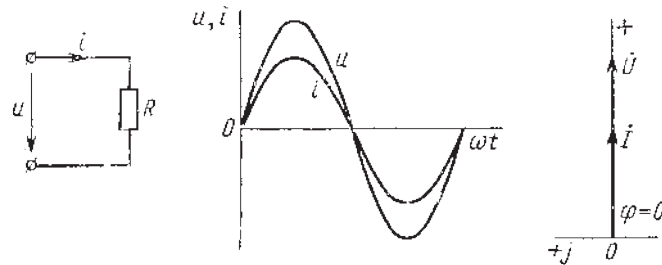


Рис. 1.2.5. Электрическая цепь с активным сопротивлением R :

а – схема; б – изменение мгновенных значений тока и напряжения; в – векторная диаграмма

Для простоты принимается, что начальная фаза напряжения равна нулю, так как для установившегося режима начальная фаза не имеет никакого значения.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для мгновенных значений напряжения имеем $u = R \cdot i$. Решая это уравнение относительно тока i и заменяя u на $U_m \cdot \sin \omega t$, получаем:

$$i = (U_m/R) \cdot \sin \omega t = I_m \cdot \sin \omega t \quad (1.2.12)$$

причем амплитуда тока в цепи

$$I_m = U_m/R. \quad (1.2.13)$$

Из уравнения (1.2.12) видно, что ток в элементе с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряжением на этом элементе (рис. 1.2.5, б).

Так как действующие значения напряжения и тока в $\sqrt{2}$ раз меньше их максимальных значений, то аналогично (1.2.13) можно записать $I = U/R$, т.е. действующие значения синусоидальных напряжений и тока связаны между собой законом Ома так же, как постоянные напряжение и ток.

На векторной диаграмме (рис. 1.2.5, в) комплексные значения напряжения U и тока I в цепи представлены векторами на комплексной плоскости. Начала векторов совмещены с началом координат, длины векторов в соответствующем масштабе равны действующим значениям напряжения и тока. Вещественная ось направлена вертикально, а мнимая – горизонтально. Начальный вектор совмещаем с положительным направлением вещественной оси. Для цепи с активным сопротивлением векторы напряжения и тока совпадают по направлению.

1.2.6 Электрическая цепь с индуктивностью

Индуктивностью L теоретически обладают все проводники с током. Но в некоторых случаях эта индуктивность так мала, что ею вполне можно пренебречь. Значительна

индуктивность у обмоток или катушек, состоящих из большого числа витков провода. Индуктивность возрастает, если созданный током обмотки магнитный поток замыкается по пути с малым магнитным сопротивлением (например, по стальному сердечнику), вследствие чего магнитный поток увеличивается.

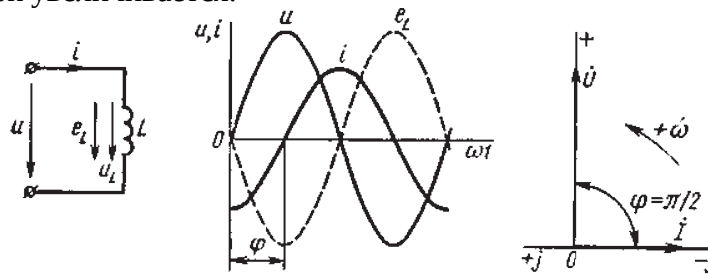


Рис. 1.2.6. Электрическая цепь с индуктивностью L : а – схема; б – изменение э.д.с. самоиндукции, напряжения и тока; в – векторная диаграмма

Рассмотрим идеальную катушку постоянной индуктивностью L , т.е. такую катушку, активное сопротивление которой равно нулю.

Пусть к цепи индуктивностью L (рис. 1.2.6, а) приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \cdot \sin \omega t$. Под действием этого напряжения в цепи индуктивной катушки возникает ток i . Этот ток создает магнитный поток Φ , который согласно закону электромагнитной индукции индуцирует в катушке э.д.с. самоиндукции

$$e_L = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (1.2.14)$$

где w – число витков катушки.

Знак минус согласно принципу электромагнитной инерции, сформулированному Ленцем, указывает на то, что э.д.с. самоиндукции e_L всегда имеет такое направление, при котором она препятствует изменению магнитного потока или тока в цепи.

На рис. 1.2.6, а показаны условные положительные направления тока i в цепи и падения напряжения u_L на элементе индуктивностью L . Условное положительное направление э.д.с. e_L выбирают из условия, что ее действительное направление в любой момент времени противоположно направлению u_L ($u_L = -e_L$).

По второму закону Кирхгофа имеем $u - u_L = 0$, а с учетом того, что $u_L = -e_L$, получается:

$$u + e_L = 0. \quad (1.2.15)$$

Чтобы получить это уравнение, условное положительное направление e_L следует всегда принимать совпадающим с положительным направлением тока.

Так как $u = U_m \cdot \sin \omega t$, а e_L определяется из формулы (1.2.14), уравнение (1.2.15) принимает вид

$$U_m \cdot \sin \omega t - L \frac{di}{dt} = 0 \text{ или } \frac{di}{dt} = \frac{U_m}{L} \cdot \sin \omega t.$$

Решая это уравнение, получим выражение для тока в цепи, учитывая, что постоянная интегрирования равна нулю, так как при $t = 0$, т.е. до включения цепи, ток в цепи не протекал.

$$i = \frac{U_m}{L} \cdot \int \sin \omega t dt = \frac{-U_m}{\omega \cdot L} \cdot \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Так как амплитуда тока

$$I_m = U_m / (\omega L), \quad (1.2.16)$$

то окончательное выражение для тока имеет вид

$$i = I_m \sin (\omega t - \pi/2). \quad (1.2.17)$$

Видно, что в цепи с индуктивностью ток также изменяется по синусоидальному закону и отстает по фазе от напряжения на угол $\pi/2$ (рис.1.6.2, б).

В формуле (1.2.16) знаменатель ωL в правой части имеет размерность сопротивления. Это индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (1.2.18)$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте и индуктивности. С учетом формулы (1.2.18) получаем

$$I_m = U_m / X_L.$$

Для действующих значений напряжения и тока

$$I = U / X_L. \quad (1.2.19)$$

Так как согласно (1.2.15) э.д.с. самоиндукции численно равна напряжению на элементе с индуктивностью, то, используя формулу (1.2.19), имеем

$$X_L \cdot I = U = E_L. \quad (1.2.20)$$

Можно показать, что комплексный ток

$$\dot{I} = I \cdot e^{-j\pi/2} = -j \cdot I.$$

Видно, что индуктивное сопротивление является коэффициентом пропорциональности между током и э.д.с. самоиндукции.

На векторной диаграмме (рис. 1.2.6, в) вектор напряжения, имеющий начальную фазу, равную нулю, отложен по вещественной оси, а вектор тока, имеющий начальную фазу $\psi_1 = -\pi/2$, – в отрицательном направлении мнимой оси. Угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи с индуктивностью $\varphi = \pi/2$.

1.2.7 Электрическая цепь с емкостью

Элементом электрической цепи, обладающим значительной емкостью, является конденсатор. Конструктивно конденсатор представляет собой две пластины с большой поверхностью, выполненные из проводящего материала и разделенные диэлектриком. Емкость C конденсатора определяет тот электрический заряд, который накапливается на пластинах при разности потенциалов между ними в 1 В.

Хотя пластины конденсатора и разделены диэлектриком, при переменном напряжении ток в цепи с конденсатором существует. Это связано с тем, что синусоидальное напряжение непрерывно меняется по значению и направлению, а следовательно, и заряд на пластинах конденсатора непрерывно меняется. Это изменение заряда и связанное с ним движение электронов и есть электрический ток в цепи.

Емкостью обладают любые два проводника, расположенные недалеко друг от друга. Но при малой поверхности их емкость невелика и ею обычно пренебрегают.

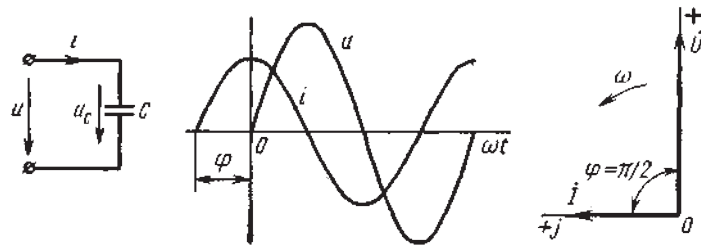


Рис. 1.2.7. Электрическая цепь с емкостью C :
а – схема; б – изменение напряжения и тока; в – векторная диаграмма

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника питания и конденсатора емкостью C (рис. 1.2.7, а). Будем считать, что конденсатор имеет идеальный диэлектрик, т.е. его активное сопротивление равно пулю. К цепи с конденсатором подведено синусоидальное напряжение $u = u_m \cdot \sin \omega t$, под действием которого в цепи возникает ток i и на каждой пластине конденсатора скапливается заряд $Q = C \cdot u_c$, где u_c – падение напряжения на конденсаторе.

По второму закону Кирхгофа для данной цепи имеем $u = u_c$. Тогда заряд на конденсаторе

$$Q = C \cdot u = C \cdot U_m \cdot \sin \omega t.$$

Ток в цепи, представляющий собой изменение заряда во времени,

$$i = \frac{d}{dt} \cdot Q = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos \omega t = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2),$$

или

$$I = I_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2), \quad (1.2.21)$$

где амплитуда тока

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_m = \frac{U_m}{1/(\omega \cdot C)}. \quad (1.2.22)$$

Из формулы (1.2.21) видно, что ток в цепи с емкостью является синусоидальным и опережает напряжение по фазе на угол $\pi/2$ (рис. 1.2.7, б).

Рассмотрим процесс протекания тока в цепи с емкостью подробнее. Под действием приложенного к конденсатору напряжения происходит поляризация диэлектрика, т.е. смещение заряженных частиц, входящих в состав молекул его вещества, в противоположных направлениях. Электрически нейтральные при отсутствии внешнего электрического поля молекулы диэлектрика превращаются в электрические диполи, т.е. системы двух противоположных по знаку точечных зарядов. В процессе поляризации в диэлектрике происходит движение элементарных частиц в пределах молекулы, образующее ток поляризации или ток смещения.

На рис. 1.2.8, б, в показаны действительные мгновенные значения потенциалов точек а и d. В первую четверть периода ($0 < t < T/4$) потенциал точки а (рис. 1.2.8, б) положительный и увеличивается от 0 до $+U_m$. Поляризация диэлектрика и ток в цепи пропорциональны скорости изменения потенциала точки а.

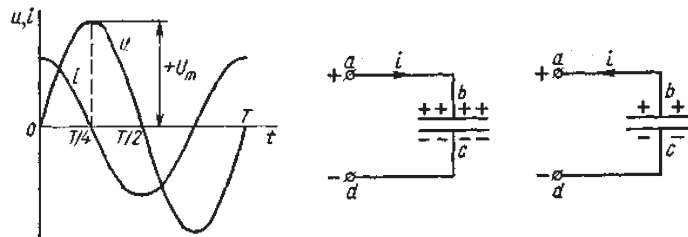


Рис. 1.2.8. Определение фазы тока в цепи с емкостью:

а – изменение напряжения и тока; б – направление тока в первую четверть периода;

в – направление тока во вторую четверть периода

Ток в цепи направлен от точки а, имеющей в данный промежуток времени больший потенциал, и совпадает по направлению с напряжением. В момент времени $t = T/4$ потенциал точки а достигает значения $+U_m$ и в течение $\Delta t \rightarrow 0$ не изменяется, вследствие чего ток $i = 0$ (рис. 1.2.8, а).

Во вторую четверть периода ($T/4 < t < T/2$) потенциал точки а остается положительным, но уменьшается от $+U_m$ до нуля. Пластина b конденсатора, заряженная до потенциала $+U_m$, оказывается в таких условиях, когда ее потенциал больше потенциала точки а. Направление тока изменяется на противоположное (рис. 1.2.8, в), т.е. ток становится отрицательным. Наибольшая разность потенциалов имеет место при $T = T/2$. В этот момент времени ток достигает отрицательного максимума. Далее процесс повторяется.

Величина $1/(\omega C)$ в знаменателе правой части (1.2.22) имеет размерность сопротивления, обозначается X_C и называется емкостным сопротивлением:

$$X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC).$$

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте и емкости конденсатора. Таким образом, $I_m = U_m/X_C$.

Поделив обе части этого уравнения на $\sqrt{2}$, получим выражение закона Ома для действующих значений тока и напряжения:

$$I = U/X_C.$$

Комплексный ток на основании (1.2.21)

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_m = \frac{U_m}{1/(\omega \cdot C)}. \quad (1.2.23)$$

С учетом выражения (1.2.23) можно найти соотношение между комплексным напряжением и током в цепи с емкостью.

Рассмотренные выше простые цепи синусоидального тока в зависимости от включенных в цепь электрических элементов по-разному реагируют на приложенное синусоидальное напряжение. В дальнейшем будут рассмотрены более сложные электрические схемы, анализ которых основан на математическом аппарате простых цепей.

1.2.8 Электрическая цепь с последовательным соединением элементов R, L и C

На рис. 1.2.9, а, изображена электрическая цепь последовательно соединенных катушки индуктивности активным сопротивлением R и индуктивностью L и конденсатора емкостью C . Активное сопротивление может также соответствовать сопротивлению какого-либо резистора. R , L и C – это параметры электрической цепи, причем активное сопротивление R характеризует активный (необратимый) процесс преобразования электрической энергии в другие виды энергии, а индуктивность L и емкость C – обратимый процесс преобразования энергии электромагнитного поля.

Под действием напряжения $u = U_m \cdot \sin \omega t$ источника питания в цепи возникает ток i . Ток создает падения напряжения на элементах цепи: $u_R = R \cdot i$ – на элементе с активным сопротивлением; $u_L = -e_L = L \cdot di/dt$ – на элементе с индуктивностью; $u_C = \frac{Q}{C} = \int i dt$ – на элементе с емкостью.

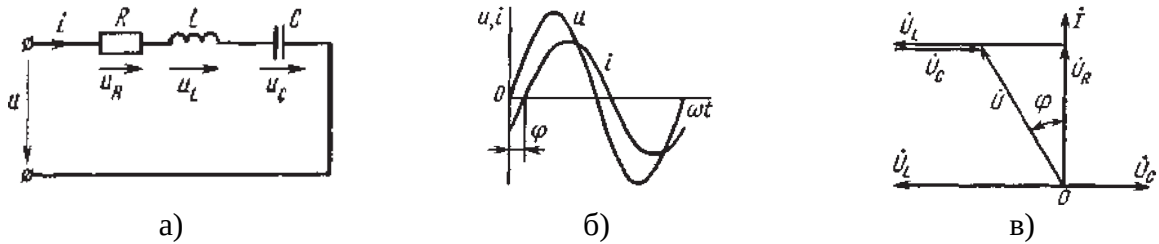


Рис. 1.2.9. Электрическая цепь при последовательном соединении элементов с R , L и C :
а – схема; б – изменение напряжения и тока;
в – векторная диаграмма напряжений и тока

По второму закону Кирхгофа для данной цепи можно записать:

$$u = u_R + u_L + u_C \text{ или } i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i dt = U_m \cdot \sin \omega t. \quad (1.2.24)$$

В результате решения уравнения (1.2.24) находится $i(t)$.

Полным решением линейного дифференциального уравнения (1.2.24) с постоянными коэффициентами является сумма частного решения этого уравнения и общего решения однородного дифференциального уравнения

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i dt = 0. \quad (1.2.25)$$

Уравнение (1.2.25) записано по второму закону Кирхгофа для цепи с последовательным соединением элементов R , L и C , когда напряжение источника питания равно нулю, т.е. когда электрическая цепь замкнута накоротко и электрическая энергия извне в цепь не поступает. В этих условиях ток в цепи может существовать только за счет запасов энергии в магнитном поле катушки или в электрическом поле конденсатора. При протекании тока через элемент сопротивлением R происходит преобразование электроэнергии в тепловую и рассеяние ее в окружающую среду. Поэтому через некоторое время запасы электроэнергии будут израсходованы. Иными словами, ток, найденный в результате решения уравнения (1.2.25), через некоторое время будет равен нулю.

Время, в течение которого существует этот ток, является временем переходного процесса в цепи и обычно исчисляется долями секунды.

1.2.9 Решение дифференциального уравнения цепи

Так как на данном этапе интерес представляет только установившийся, стабильный режим цепи, существующий сколь угодно долго, то общего решения уравнения (1.2.24) искать нет необходимости.

Отыскивается частное решение уравнения (1.2.24), т.е. ток установившегося режима. Так как правая часть этого уравнения – синусоидальная функция, то и частное решение следует искать в виде синусоидальной функции

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi). \quad (1.2.26)$$

Функция $i(t)$ полностью определена, если известны амплитуда тока I_m и угол сдвига фаз φ между напряжением и током. Найдем эти величины.

Как было показано ранее, напряжение $u = U_m \cdot \sin \omega t$ изображается комплексным числом

$$U_m \cdot e^{j(\omega t + \psi_u)} = \dot{U}_m \cdot e^{j\omega t};$$

ток $i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ – комплексным числом – $I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi_i)} = \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t}$; производная di/dt – комплексным числом – $j\omega \cdot I_m \cdot e^{j\omega t}$; интеграл $\int idt$ – комплексным числом $I_m \cdot e^{j\omega t} / (j\omega)$.

Перейдем от дифференциального уравнения (1.2.24) к алгебраическому уравнению в комплексной форме

$$R \cdot \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t} + j\omega * L \cdot \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t} + \dot{I}_m \cdot \frac{e^{j\omega t}}{(j\omega \cdot C)} = \dot{U}_m \cdot e^{j\omega t}.$$

После преобразований получится

$$[R + j\omega L - j/\omega \cdot C] \cdot \dot{I}_m = \dot{U}_m \quad (1.2.27)$$

Разделив обе части уравнения (1.2.27) на $\sqrt{2}$, получим аналогичное линейное алгебраическое уравнение для комплексных действующих значений:

$$[R + j\omega * L - j/\omega \cdot C] \cdot \dot{I} = \dot{U}. \quad (1.2.28)$$

Коэффициент

$$R + j \cdot [\omega L - 1/(\omega C)] = R + j(X_L - X_C) = R + jX = \dot{Z}. \quad (1.2.29)$$

является полным сопротивлением цепи в комплексной форме. Вещественная составляющая R полного сопротивления равна активному сопротивлению цепи, а мнимая составляющая X называется ее реактивным сопротивлением. Реактивное сопротивление цепи равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений:

$$X = X_L - X_C.$$

С учетом (1.2.29) уравнения (1.2.27) и (1.2.28) принимают вид

$$\dot{Z} \cdot \dot{I}_m = \dot{U}_m, \quad \dot{Z} \cdot \dot{I} = \dot{U},$$

откуда комплексное полное сопротивление

$$\dot{Z} = \frac{U_m}{(I_m \cdot e^{j\varphi})} = Z \cdot e^{j\varphi}, \quad (1.2.30)$$

где модуль полного сопротивления

$$Z = U_m/I_m = U/I. \quad (1.2.31)$$

Таким образом, из (1.2.31) и (1.2.30) следует, что модуль полного сопротивления цепи равен отношению модулей действующих значений напряжения и тока, а аргумент комплексного сопротивления – сдвигу фаз φ между векторами напряжения и тока.

Модуль полного сопротивления цепи на основании (1.2.29)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (1.2.32)$$

т.е. полное сопротивление цепи равно корню квадратному из суммы квадратов активного и реактивного сопротивлений.

Из формулы (1.2.31) можно найти амплитуду тока, определяющую функцию $i(t)$ в уравнении (1.2.26):

$$\dot{I}_m = \dot{U}_m / \dot{Z}.$$

Если воспользоваться равенством

$$\dot{Z} = Z \cdot e^{j\varphi} = R + jX$$

можно определить угол сдвига фаз в выражении (1.2.26);

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}. \quad (1.2.33)$$

Таким образом, значение угла φ зависит от соотношения между реактивным X и активным R сопротивлениями. Чем больше реактивное сопротивление, тем больше угол φ . Знак угла φ зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями. Если $X_L > X_C$, то угол φ положительный и ток можно определять по формуле (1.2.26), откуда видно, что ток отстает по фазе от напряжения на угол φ . На рис. 1.2.9, б показано, как изменяются напряжение и ток в цепи, представленной на рис. 1.2.9, а, при условии $X_L > X_C$.

Если $X_L < X_C$, то угол φ отрицательный и ток $I = i \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, т.е. опережает по фазе напряжение на угол φ .

1.2.10 Построение векторной диаграммы напряжений и тока

При построении векторной диаграммы (рис. 1.2.10, 1.7.3) в качестве начального удобно выбрать вектор тока, так как при последовательном соединении ток во всех элементах один и тот же. Как было условлено, начальный вектор совмещаем с положительным направлением вещественной оси.

Падения напряжения в комплексной форме на участке цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями соответственно равны

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}; \dot{U}_L = j X_L \cdot \dot{I}; \dot{U}_C = j X_C \cdot \dot{I}.$$

Вектор \dot{U}_R на участке с активным сопротивлением совпадает по фазе с вектором \dot{I} , и на векторной диаграмме его проводим в направлении вектора тока. Падение напряжения на участке с индуктивностью (рис. 1.2.10) \dot{U}_L опережает ток по фазе на угол $\pi/2$, причем поворачивать вектор надо против направления вращения часовой стрелки по отношению к вектору \dot{I} . Падение напряжения \dot{U}_C на участке с емкостью (рис. 1.2.11) отстает от тока на угол $\pi/2$, причем \dot{U}_C следует повернуть на угол 90° по направлению вращения часовой стрелки по отношению к вектору \dot{I} .

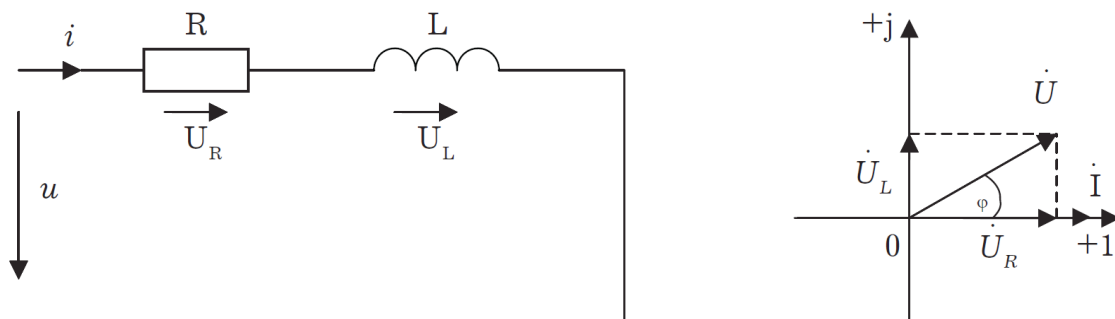


Рис. 1.2.10. Цепь с последовательным соединением R и L

Для электрических цепей с последовательным соединением элементов с R и L формулы анализа имеют вид:

$$X_C = 0; X = X_L; Z = \sqrt{R^2 + X_L^2};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}; \varphi = \arctg \frac{X_L}{R}.$$

На рис. 1.2.10 представлена векторная диаграмма, соответствующая этому случаю. Ток в цепи отстает по фазе от напряжения на угол φ .

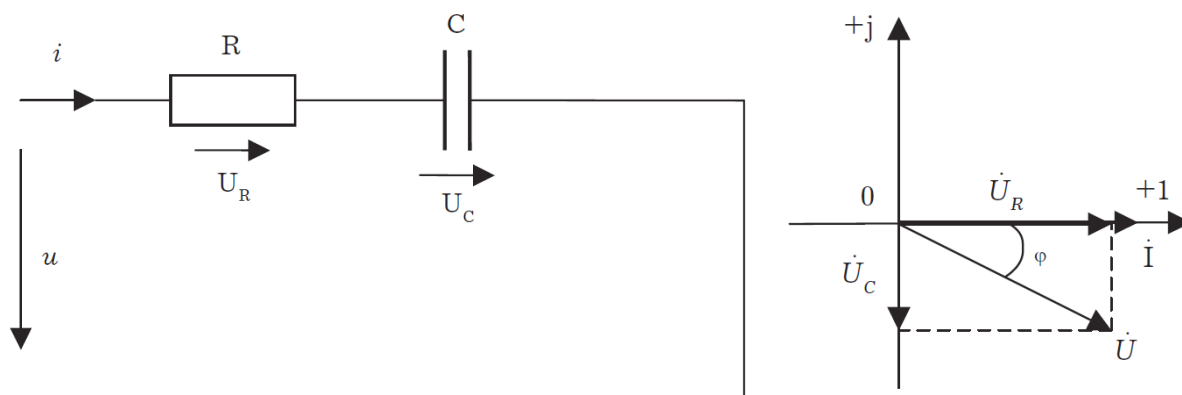


Рис. 1.2.11. Цепь с последовательным соединением R и C

Аналогично для электрических цепей с последовательным соединением элементов с R и C формулы анализа имеют вид:

$$X_L = 0; X = X_C; Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}; \varphi = \arctg \frac{X_C}{R}.$$

На рис. 1.2.11 представлена векторная диаграмма, соответствующая этому случаю. Ток в цепи опережает по фазе напряжение на угол φ .

Оценив схемы (рис. 1.2.10, 1.2.11), можно провести анализ цепи с последовательным соединением R, L и C (рис. 1.2.12).

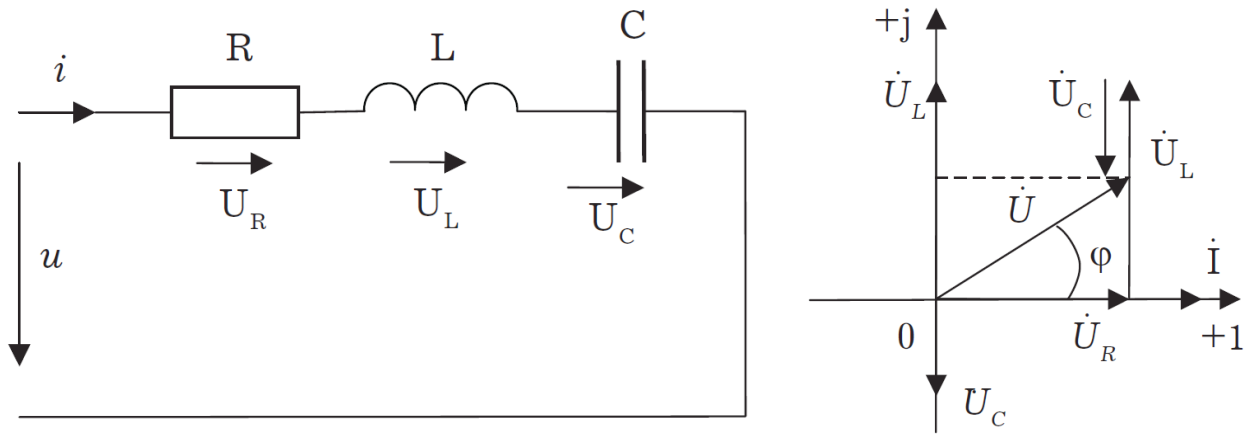


Рис. 1.2.12. Цепь с последовательным соединением R , L и C

По второму закону Кирхгофа (см. рис. 1.2.12) можно написать уравнение:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Для нахождения вектора \dot{U} полного напряжения цепи к концу вектора \dot{U}_R пристраиваем вектор \dot{U}_L путем параллельного переноса, а к концу вектора \dot{U}_L пристраиваем вектор \dot{U}_C . Вектор полного напряжения \dot{U} соединяет начало координат с концом вектора \dot{U}_C (последнего слагаемого вектора).

Поскольку векторная диаграмма построена для случая, когда $X_L > X_C$ (следовательно, и $U_L > U_C$), ток в цепи отстает по фазе на угол φ от полного напряжения, комплексное значение которого

$$\dot{U} = \dot{Z} \cdot \dot{I}.$$

Таким образом, на лекции рассмотрены вопросы анализа и расчета сложной цепи переменного тока, расчет параметров цепи и построение векторных диаграмм.

1.2.11. Мощность в однофазных цепях синусоидального тока

Мгновенное значение мощности цепи синусоидального тока равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui.$$

Если к цепи приложено напряжение $u = U_m \cdot \sin \omega t$, то в общем случае ток в цепи $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ (рис. 1.2.13).

Следовательно,

$$p = U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = 2UI (\sin^2 \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi).$$

После преобразований получим

$$p = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]. \quad (1.2.34)$$

Таким образом, мгновенное значение мощности имеет две составляющие: постоянную $UI \cdot \cos \varphi$, не изменяющуюся во времени, и переменную $UI \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$, изменяющуюся периодически с частотой 2ω .

Вследствие этого мгновенное значение мощности также изменяется с двойной частотой (рис. 1.2.13). При этом мощность положительна, если напряжение и ток совпадают по направлению, и отрицательна, если напряжение и ток имеют разные знаки. Когда мощность положительна, тогда электрическая энергия передается от источника к приемнику, и наоборот.

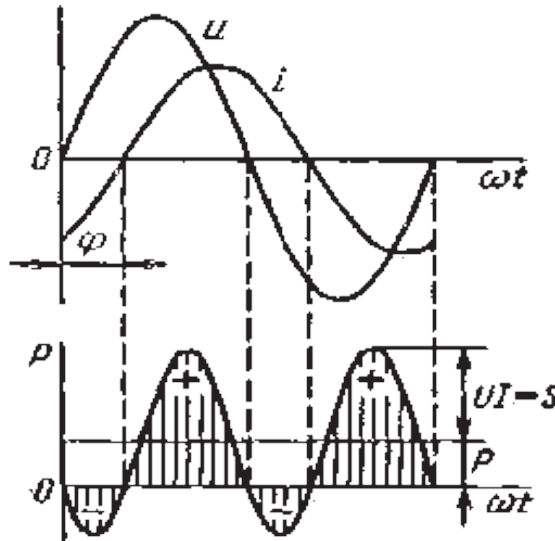


Рис. 1.2.13. Изменение напряжения, тока и мощности в цепи при последовательном соединении элементов с активным и реактивным сопротивлениями

Для количественной оценки электроэнергетических процессов удобнее использовать среднее значение мощности P_{cp} , которое можно найти, вычислив работу, совершаемую за один период:

$$\int_0^T p dt = P_{cp} T,$$

откуда

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt.$$

Подставив вместо p выражение (1.2.34), получим

$$P_{cp} = \frac{UI}{T} \cos \varphi \int_0^T dt - \frac{UI}{T} \int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt.$$

Так как $\int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt = 0$, то

$$P_{cp} = U \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

т. е. среднее значение мощности равно постоянной составляющей мгновенного значения мощности.

Средняя мощность характеризует интенсивность передачи электроэнергии от источника к приемнику и ее преобразования в другие виды энергии, т. е. активный необратимый процесс.

Поэтому среднюю мощность называют активной мощностью

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (1.2.35)$$

и выражают в ваттах, киловаттах и мегаваттах.

Активная мощность цепи синусоидального тока равна произведению действующих значений напряжения и тока и косинуса угла между их векторами.

Для цепи, состоящей из элемента только с активным сопротивлением R ($\varphi = 0$)

$$p = U \cdot I(1 - \cos 2\omega t).$$

Напряжение и ток (рис. 1.2.14, а) совпадают по фазе, и мгновенное значение мощности всегда положительно (рис. 1.2.14, б).

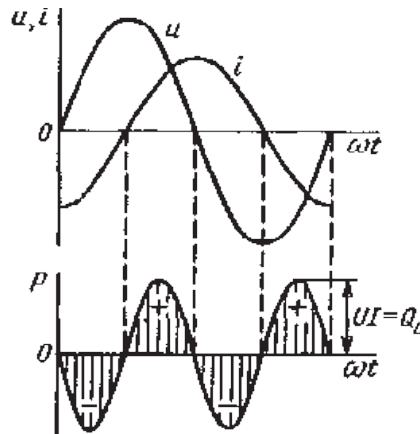


Рис. 1.2.14. Изменение напряжения и тока (а) и мощности (б) в цепи с активным сопротивлением

Это указывает на то, что при наличии в цепи только элемента с активным сопротивлением вся электроэнергия преобразуется в тепловую или другие виды энергии. Среднее значение мощности или активная мощность $P = U \cdot I$, так как $\cos \varphi = 1$.

Поскольку напряжение U_a на элементе R совпадает по фазе с током ($\varphi = 0$), то активная мощность P цепи может быть определена как

$$P = U_a \cdot I = R \cdot I^2 + \frac{U_a^2}{R} = G \cdot U_a^2.$$

В цепи с индуктивностью L угол $\varphi = \pi/2$ (рис. 1.2.15, а) и формула (1.2.34) принимает вид

$$p = -U \cdot I \sin 2\omega t, \quad (1.2.36)$$

т. е. мгновенное значение мощности имеет только переменную составляющую (рис. 1.2.15, б).

Первую четверть периода ток совпадает по направлению с э.д.с. самоиндукции e_L индуктивной катушки, мощность отрицательна и энергия передается от катушки к источнику питания. Вторую четверть периода ток совпадает по направлению с напряжением источника питания, мощность положительна, а энергия поступает от источника к приемнику (индуктивной катушке) и запасается в его магнитном поле. В течение третьей четверти периода ток опять совпадает по направлению с e_L и запасенная в магнитном поле катушки энергия передается источнику питания (мощность отрицательна).

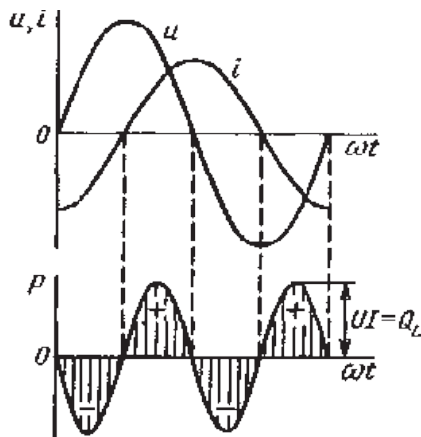


Рис. 1.2.15. Изменение напряжения и тока (а) и мощности (б) в цепи с индуктивностью

Таким образом, в течение одного периода электроэнергия дважды поступает от источника в катушку и обратно. При этом вся передаваемая энергия запасается в магнитном поле катушки и затем вся возвращается источнику. Такая энергия обмена между источником и приемником, которая не преобразуется в другие виды энергии, называется реактивной. Интенсивность обмена электроэнергией характеризуется реактивной мощностью Q_L , равной амплитуде мгновенного значения мощности (1.2.36), т. е.

$$Q_L = U \cdot I.$$

Реактивную мощность выражают в вольт-амперах реактивных (ВАр), киловольт-амперах реактивных (кВ·Ар) и т. д.

Напряжение на элементе с индуктивностью $U = U_L = X_L \cdot I$, поэтому реактивную мощность можно также определить по формулам

$$Q_L = U_L \cdot I = X_L \cdot I^2 = \frac{U_L^2}{X_L} = B_L \cdot U_L^2,$$

где $B_L = 1/X_L$ – индуктивная проводимость.

Если в цепь включен конденсатор емкостью C , то $\varphi = -\pi/2$ (рис. 1.2.16, а) и мгновенное значение мощности

$$P = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t,$$

которое отличается от (1.2.36) только знаком. Изменение мощности для этой цепи показано на рис. 1.2.16, б.

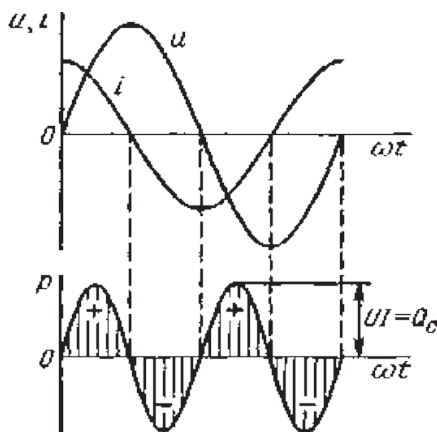


Рис. 1.2.16. Изменение напряжения и тока (а) и мощности (б) в цепи с емкостью

В цепи с емкостью также происходит обмен электроэнергией между источником питания и конденсатором. При передаче энергии от источника питания в течение четверти периода энергия запасается в электрическом поле конденсатора, а в течение следующей четверти периода энергия электрического поля освобождается и возвращается источнику. Электроэнергетический процесс в цепи характеризуется только реактивной мощностью

$$Q_C = U_C \cdot I = X_C \cdot I^2 = \frac{U_C^2}{X_C} = B_C \cdot U_C^2,$$

где $B_C = 1/X_C$ – емкостная проводимость.

В общем случае, когда электрическая цепь состоит из элементов с активным R и реактивным X сопротивлениями, угол сдвига по фазе между напряжением и током в цепи $\varphi = 0 - \pi/2$ (рис. 1.2.13, а), а мгновенное значение мощности (рис. 1.2.13, б) описывается уравнением (1.2.34). Заштрихованная площадь, ограниченная положительным значением мощности и осью абсцисс, больше площади, ограниченной отрицательным значением мощности и осью абсцисс. Это означает, что в итоге часть электроэнергии передается от источника приемнику и преобразуется в нем в другие виды энергии. Количественно процесс преобразования электроэнергии оценивается активной мощностью (1.2.35).

Составляющая мощности $U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$ изменяется с двойной частотой относительно линии, параллельной оси абсцисс и расположенной выше нее на значение активной мощности P . Амплитуда $U \cdot I$ переменной составляющей мощности называется полной мощностью и обозначается S .

Полную мощность выражают в вольт-амперах ($V \cdot A$), киловольт-амперах ($kV \cdot A$) и т. д. Ее можно вычислять по формулам

$$S = U \cdot I = Z \cdot I^2 = U^2 / Z = Y \cdot U^2, \quad (1.2.37)$$

где $Y = 1/Z$ – полная проводимость цепи.

То, что мгновенные значения мощности в некоторые промежутки времени принимают отрицательные значения, свидетельствует об обмене электроэнергией между источником питания и приемником электроэнергии. Обмен количественно оценивается реактивной мощностью $Q = U_P \cdot I$. Так как в общем случае реактивная составляющая напряжения $U_P = U \cdot \sin\varphi$, то реактивная мощность цепи

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi. \quad (1.2.38)$$

Реактивная мощность цепи может быть вычислена как

$$Q = X \cdot I^2 = \frac{U_P^2}{X} = B \cdot U_P^2,$$

где $B = 1/X$ – реактивная проводимость цепи.

Если цепь включает элементы и с индуктивным, и с емкостным сопротивлениями, то ее реактивное сопротивление $X = X_L - X_C$, а

$$Q = (X_L - X_C) \cdot I^2 = X_L \cdot I^2 - X_C \cdot I^2 = Q_L - Q_C.$$

Таким образом, реактивная мощность цепи равна разности реактивной индуктивной и реактивной емкостной мощностей. Реактивная мощность положительна, если $Q_L > Q_C$, и отрицательна, если $Q_C > Q_L$.

Соотношение между полной, активной и реактивной мощностями можно получить, воспользовавшись формулами (1.2.35), (1.2.37) и (1.2.38):

$$P^2 + Q^2 = (UI)^2 \cdot (\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) = (UI)^2 = S^2.$$

Следовательно, полная мощность равна корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной мощностей. Кроме того,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$
$$P = S \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi = U_a \cdot I, \quad (1.2.39)$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U_p \cdot I. \quad (1.2.40)$$

Рассматривая выражения (1.2.39) и (1.2.40) и треугольник напряжений, можно сделать вывод, что активная мощность определяется произведением составляющих напряжения и тока, совпадающих по фазе, а реактивная мощность – произведением составляющих напряжения и тока, находящихся в квадратуре (сдвинутых по фазе на угол $\pi/2$).

Косинус угла сдвига фаз в формуле (1.2.35) называют коэффициентом мощности:

$$\cos\varphi = P/(U \cdot I) = P/S.$$

Он показывает, какая доля полной мощности составляет активную мощность или какая доля всей электроэнергии преобразуется в другие виды энергии.

Когда $\cos\varphi = 1$, т. е. когда $Z = R$, активная мощность равна полной мощности.

Коэффициент мощности – важный эксплуатационный параметр электроприемников. Так как $I = P/(U \cdot \cos\varphi)$, то чем выше $\cos\varphi$, тем при меньшем значении тока в цепи может быть произведено преобразование электроэнергии в другие виды энергии. Это приводит к уменьшению потерь электроэнергии, ее экономии и удешевлению устройств электропередачи.

Тема 1.3. Трехфазные цепи

1.3.1. Области применения трехфазных устройств, структура трехфазной цепи

Трехфазная система была разработана в конце прошлого века известным русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским. Она получила широкое распространение во всех странах мира. В настоящее время вся электроэнергия вырабатывается на электростанциях трехфазными генераторами, передается к местам потребления по трехфазным линиям передачи и основная ее доля используется в трехфазных приемниках.

Преимущества трехфазной системы основываются, по мнению М.О. Доливо-Добровольского, главным образом на двух ее свойствах, которые используются при эксплуатации не только в совокупности, но и порознь. Это экономичная и на большие расстояния передача электроэнергии и превосходное качество двигателей.

В устройствах выпрямления применяют шести- и двенадцатифазные системы, в устройствах автоматики и телемеханики двухфазные системы.

Трехфазная система представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные з. д. с. одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.

Если все три э.д.с. равны по значению и сдвинуты по фазе на 120° по отношению друг к другу, то такая система э.д.с. называется симметричной. Если э.д.с. не равны по значению или сдвинуты друг относительно друга на угол, не равный 120° , то такая система э.д.с. называется несимметричной. Аналогично определяются трехфазные системы напряжений и токов.

Часть трехфазной системы электрических цепей, в которой может протекать один из токов трехфазной системы, называется фазой. Таким образом, фазой являются обмотка генератора, в которой индуцируется э.д.с., и приемник, присоединенный к этой обмотке. Это значение термина «фаза» широко используется в практической электротехнике.

1.3.2. Трехфазный генератор, получение трехфазной системы э.д.с.

Трехфазная система э.д.с. создается трехфазными генераторами. В неподвижной части генератора (статоре) размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° (рис. 1.3.1, а). Это фазные обмотки, или фазы, которые обозначают А, В и С. Этими же буквами обозначают начало обмоток фаз генератора. Концы обмоток обозначают соответственно X, Y и Z. На рис. 1.3.1, б показано, как изображают на схемах обмотки генератора с условными положительными направлениями э.д.с.

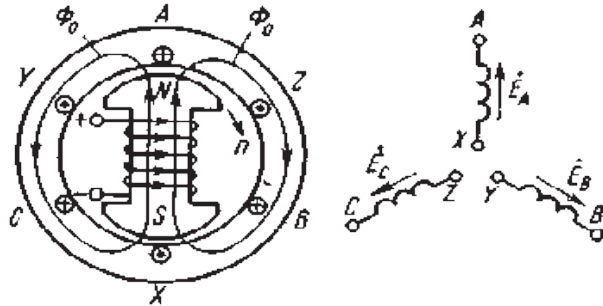


Рис. 1.3.1. Схема трехфазного генератора (а) и изображение фазных обмоток генератора на схемах (б)

Каждая фазная обмотка генератора изображена на рис. 1.3.1, а одним витком (у реальных генераторов каждая обмотка имеет множество витков, расположенных в нескольких соседних пазах, занимающих некоторую дугу внутренней окружности статора). На вращающейся части генератора (роторе) располагают обмотку возбуждения, которая питается от источника постоянного тока. Ток обмотки возбуждения создает магнитный поток Φ_0 , постоянный (неподвижный) относительно ротора, но вращающийся вместе с ним с частотой n . Вращение ротора осуществляется каким-либо двигателем.

Благодаря конструктивным приемам магнитный поток Φ_0 в воздушном зазоре между статором и ротором распределяется по синусоидальному закону по окружности. Поэтому при вращении ротора вращающийся вместе с ним магнитный поток пересекает проводники обмоток статора (А X, В Y и С Z) и индуцирует в них синусоидальные э.д.с. В момент времени, которому соответствует изображенное на рисунке взаимное положение статора и ротора, в обмотке фазы А индуцируется максимальная э.д.с. E_m , так как плоскость этой обмотки совпадает с осевой линией полюсов ротора и проводники обмотки пересекаются магнитным потоком максимальной плотности. Через промежуток времени $T/3$, соответствующий $1/3$ оборота ротора, осевая линия его полюсов совпадает с плоскостью обмотки фазы В и максимальная э.д.с. E_m индуцируется в фазе В. Еще через $1/3$ оборота ротора максимальная э.д.с. индуцируется в фазе С. При следующих оборотах ротора процесс повторяется.

Таким образом, э.д.с. в каждой последующей фазе будет отставать от э.д.с. в предыдущей фазе на $1/3$ периода, т.е. на угол $2\pi/3$. Если принять, что для фазы А начальная фаза равна нулю, то э.д.с. фазы А

$$e_a = E_m \cdot \sin \omega t,$$

а э.д.с. фаз В и С соответственно

$$e_b = E_m \cdot \sin (\omega t - 2\pi/3); e_c = E_m \cdot \sin (\omega t - 4\pi/3).$$

Максимальные (амплитудные) значения всех э.д.с. и их частоты будут одинаковыми, так как число витков фазных обмоток одинаково и э.д.с. индуцируются одним потоком Φ_0 . Изменение фазных э.д.с. e_a , e_b и e_c показано на рис. 1.3.2.

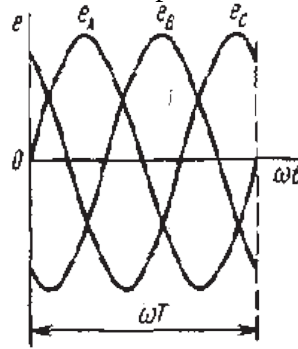


Рис. 1.3.2. Изменение мгновенных значений трехфазной системы э.д.с.

Действующее значение фазной э.д.с. трехфазной системы определяется по формуле

$$E = E_m \cdot \sqrt{2} = 0,707 \cdot E_m.$$

При равных амплитудах действующие значения э.д.с. всех фаз равны. При сдвиге по фазе на $2\pi/3$ они образуют симметричную систему. Если при условном положительном направлении вращения векторов (против часовой стрелки) вектор э.д.с. E_b отстает по фазе от вектора э.д.с. E_a , а вектор э.д.с. E_c отстает по фазе от вектора э.д.с. E_b , то такая система векторов э.д.с. образует прямое чередование фаз (рис. 1.3.3, а). Если за вектором э.д.с. E_a следует сначала вектор э.д.с. E_c , а затем вектор э.д.с. E_b , то такая система векторов э.д.с. образует обратное чередование фаз (рис. 1.3.3,б).

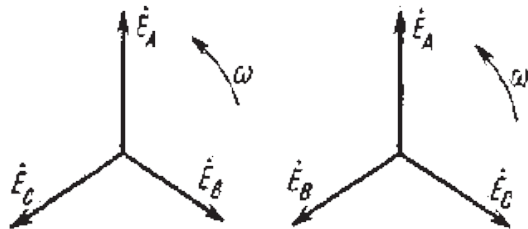


Рис. 1.3.3. Векторы трехфазной системы э.д.с. при прямом (а) и обратном (б) чередовании фаз

При представлении трехфазной системы э.д.с. комплексными числами принято э.д.с. фазы А совмещать с положительным направлением вещественной оси (рис. 1.3.4).

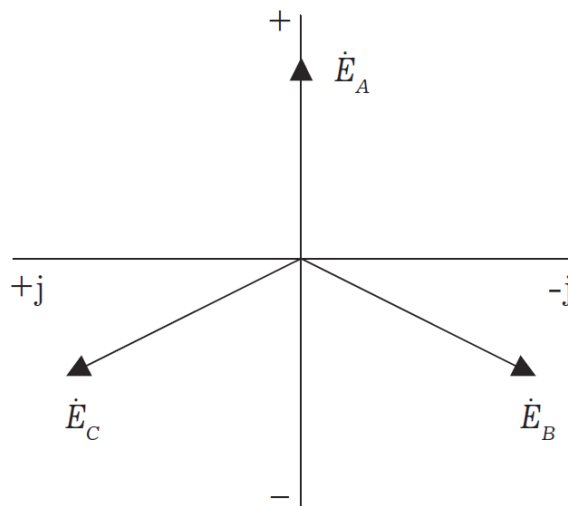


Рис. 1.3.4. Изображение трехфазной системы э.д.с. в комплексной плоскости.

Тогда при прямом чередовании фаз

$$\dot{E}_A = E_A, \quad (1.3.1)$$

$$\dot{E}_B = E_B \cdot e^{-j2\pi/3} = (-0,5 - j\sqrt{3}/2) \cdot E_B, \quad (1.3.2)$$

$$\dot{E}_C = E_C \cdot e^{-j4\pi/3} = (-0,5 - j\sqrt{3}/2) \cdot E_C, \quad (1.3.3)$$

где E действующее значение э.д.с.

При симметричной системе э.д.с., как это видно из рис. 1.3.5 и формул (1.3.1), (1.3.2), (1.3.3), векторная сумма э.д.с. равна нулю:

$$\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0 \text{ или } \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

1.3.3. Соединение обмоток генератора и фаз приемника звездой

Каждая фаза трехфазного генератора может являться источником питания для однофазного приемника. В этом случае схема электрической цепи имеет вид, изображенный на рис. 1.3.5, т. е. каждая фаза работает отдельно от других, хотя в целом цепь является трехфазной. Это трехфазная несвязанная система.

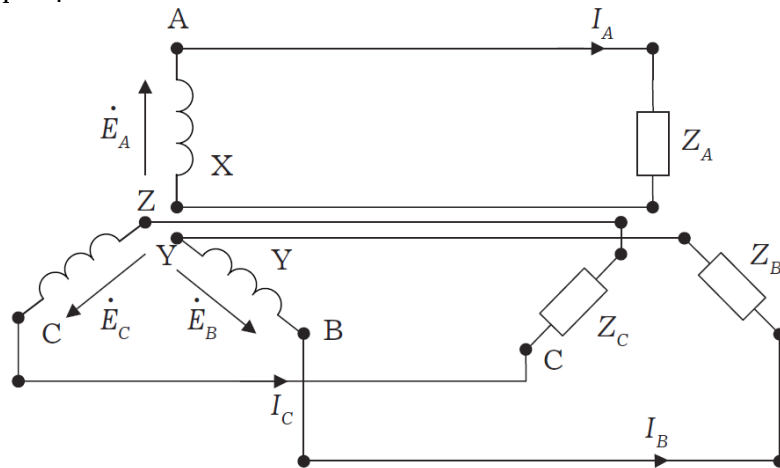


Рис. 1.3.5. Схема трехфазной несвязанной электрической цепи

Э.д.с. любой обмотки генератора представляет собой разность потенциалов начала и конца этой обмотки. При этом потенциал одной какой-либо точки (или начала, или конца обмотки) можно считать равным нулю. Тогда комплексный потенциал другой точки будет иметь точно определенное значение.

Принимая равными потенциалы точек, соответствующих концам X , Y и Z обмоток фаз генератора, можно объединить их в одну точку N (рис. 1.3.6).

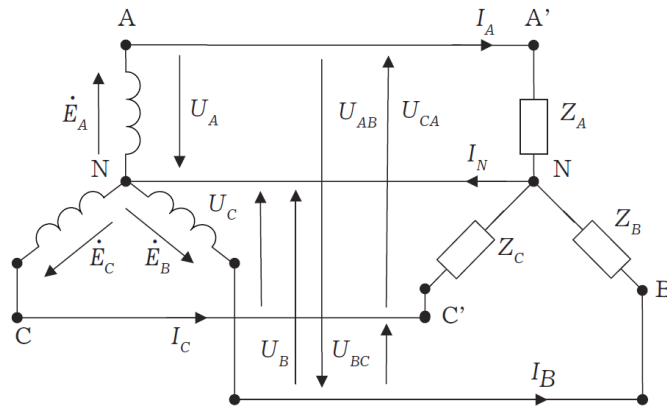


Рис. 1.3.6. Схема связанной четырех проводной трехфазной цепи.

Концы фаз приемников (Z_A , Z_B и Z_C) также соединяем в одну точку n . Такое соединение обмоток генератора называется соединением «звездой». Звездой можно соединять также фазы приемника. Точки N и n называется нейтральными, а провод, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, нейтральным. Провода $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными.

Напряжение между началом и концом фазы фазное напряжение U_ϕ .

Напряжение между линейными проводами – линейное напряжение U_L .

При соединении в звезду фазные и линейные токи равны

$$I_\phi = I_L.$$

Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают I_N .

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n (N) имеем в комплексной форме

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

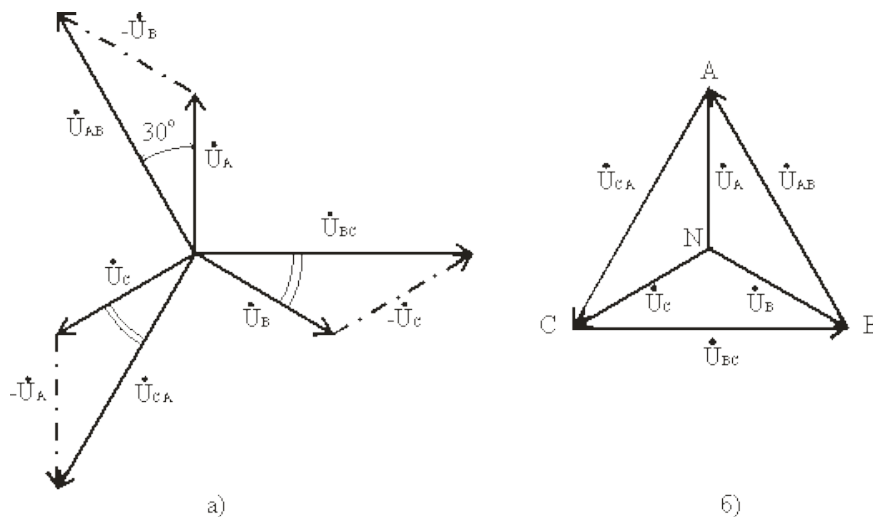


Рис. 1.3.7. Векторная диаграмма напряжений и токов для трехпроводной электрической цепи по схеме звезда

В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений можно записать уравнения по второму закону Кирхгофа.

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

Согласно этим выражениям на рис. 1.3.7, а построена векторная диаграмма, из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных

напряжений тоже симметрична: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° (общее обозначение U_L), и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений U_A, U_B, U_C , (U_ϕ) на угол 30° .

Действующие значения линейных напряжений можно определить графически по векторной диаграмме или по формуле (1.3.4), которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного напряжений:

$$U_L = 2U_\phi \cos 30^\circ$$

или

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi \quad (1.3.4)$$

Векторную диаграмму удобно выполнить топографической (рис. 1.3.8б), тогда каждой точке цепи соответствует определенная точка на диаграмме. Вектор, проведенный между двумя точками топографической диаграммы, выражает по величине и фазе напряжения между одноименными точками цепи.

Для определения напряжения смещения нейтрали можно воспользоваться формулой межузлового напряжения, так как схема рис 1.9.7 представляет собой схему с двумя узлами,

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{Y_a \cdot \dot{U}_A + Y_b \cdot \dot{U}_B + Y_c \cdot \dot{U}_C}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (1.3.5)$$

где: $Y_a = 1/Z_a$; $Y_b = 1/Z_b$; $Y_c = 1/Z_c$ – комплексы проводимостей фаз нагрузки.

Теперь напряжения на фазах приемника будут отличаться друг от друга. Из второго закона Кирхгофа следует, что

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}, \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}, \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}, \quad (1.3.6)$$

Зная фазные напряжения приемника, можно определить фазные токи:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = Y_a \cdot \dot{U}_a, \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = Y_b \cdot \dot{U}_b, \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = Y_c \cdot \dot{U}_c. \quad (1.3.7)$$

Векторы фазных напряжений можно определить графически, построив векторную (топографическую) диаграмму фазных напряжений источника питания и U_{nN} .

При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений напряжение смещений нейтрали U_{nN} может изменяться в широких пределах. При этом нейтральная точка приемника n на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приемника \dot{U}_a, \dot{U}_b и \dot{U}_c могут отличаться друг от друга весьма существенно.

Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки.

Поэтому нейтральный провод необходим для того, чтобы:

выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;

подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети.

Следует иметь в виду, что в цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

1.3.4. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником

Соединение обмоток генератора или фаз приемника, при котором начало одной фазы соединяется с концом другой, образуя замкнутый контур, называется соединением «треугольником». Начало фазы А источника питания соединяют с концом фазы В (Y) и точку соединения обозначают А (рис. 1.3.8). Далее соединяют точки В и Z (точка В) и точки С и X (точка С). Положительные направления э.д.с. в обмотках те же, что и на рис. 1.3.5. Подобным образом соединяют треугольником и фазы приемника, сопротивления которых обозначены двумя индексами, соответствующими началу и концу фазы.

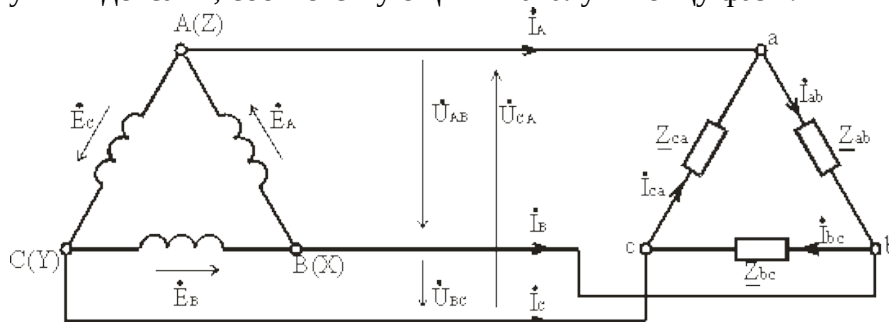


Рис. 1.3.8. Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз треугольником

Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (1.3.8)$$

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания, и поэтому недопустим.

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.

$$U_L = U_\Phi.$$

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания: $U_{ab} = U_{AB}$, $U_{bc} = U_{BC}$, $U_{ca} = U_{CA}$. По фазам Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} приемника протекают фазные токи \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} и \dot{I}_{ca} . Условное положительное направление фазных напряжений \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} и \dot{U}_{ca} совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C принято от источников питания к приемнику.

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником фазные токи не равны линейным. Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}, \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}, \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (1.3.9)$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов а, b и c (рис. 1.3.8)

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (1.3.10)$$

Сложив левые и правые части системы уравнений, (1.3.9), получим

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

т.е. сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

При соединении треугольником действующее значение линейного тока при симметричной нагрузке в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного тока и $U_L = U_\phi$; $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi$.

При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

Фазное напряжение $U_\phi = U_L$. Фазный ток $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$, линейный ток $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi$, угол сдвига по фазе $\varphi = \text{arctg}(X_\phi / R_\phi)$.

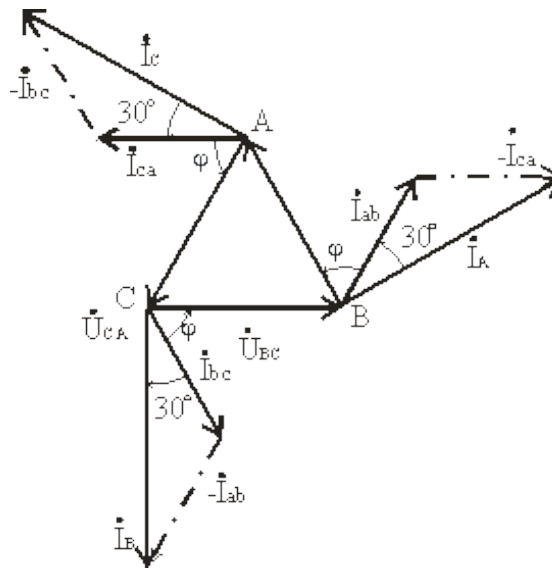


Рис. 1.3.9. Векторная диаграмма напряжений и токов для трехпроводной электрической цепи по схеме треугольник

1.3.5. Мощность трехфазной системы

Мгновенное значение мощности отдельной фазы или, фазной мощности, определяется так же, как мощность однофазной цепи, произведением мгновенных значений фазных напряжений и тока:

$$p_A = u_A \cdot i_A; p_B = u_B \cdot i_B; p_C = u_C \cdot i_C; \quad (1.3.11)$$

При симметричной системе фазных напряжений

$$u_A = U_{\phi m} \cdot \sin \omega t; u_B = U_{\phi m} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3); u_C = U_{\phi m} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3);$$

В общем случае несимметричной нагрузки фазные токи равны соответственно

$$\begin{aligned} i_A &= I_{Am} \cdot \sin(\omega t - \varphi_A); \\ i_B &= I_{Bm} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi_B); \\ i_C &= I_{Cm} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3 - \varphi_C); \end{aligned}$$

Подставляя в формулы (1.3.11) выражения для фазных напряжений и токов, получим значения фазной мощности для каждой фазы:

$$p_A = U_A I_A [\cos \varphi_A - \cos(2\omega t - \varphi_A)];$$

$$\begin{aligned} p_B &= U_B I_B [\cos \varphi_B - \cos(2\omega t - 2\pi/3 - \varphi_B)]; \\ p_C &= U_C I_C [\cos \varphi_C - \cos(2\omega t - 4\pi/3 - \varphi_C)]; \end{aligned} \quad (1.3.12)$$

Постоянные составляющие мгновенных значений фазных мощностей, т. е. активные фазные мощности соответственно равны:

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A; \quad P_B = U_B I_B \cos \varphi_B; \quad P_C = U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

При симметричной системе напряжений ($U_A = U_B = U_C = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_A = I_B = I_C = I_\phi$; $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi$) фазные мощности равны ($P_A = P_B = P_C = P_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cos \varphi$). Активная мощность трехфазного приемника в этом случае

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi$$

Мощность трехфазного приемника всегда удобнее вычислять через линейные напряжение и ток, так как линейные величины всегда легче измерять. Принимая во внимание, что при соединении фаз приемника звездой $U_\phi = U_\ell / \sqrt{3}$, $I_\phi = I_\ell$, а при соединении треугольником ($U_\phi = U_\ell$, $I_\phi = I_\ell / \sqrt{3}$), формула примет вид

$$P = \sqrt{3} U_\ell \cdot I_\ell \cdot \cos \varphi. \quad (1.3.13)$$

Эта формула справедлива как для соединения звездой, так и для соединения треугольником, но только если приемник симметричен. При этом надо помнить, что угол φ является углом сдвига фаз между фазным напряжением и током.

При симметричном приемнике его полная трехфазная мощность

$$S = \sqrt{3} U_\ell \cdot I_\ell,$$

а реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} U_\ell \cdot I_\ell \cdot \sin \varphi.$$

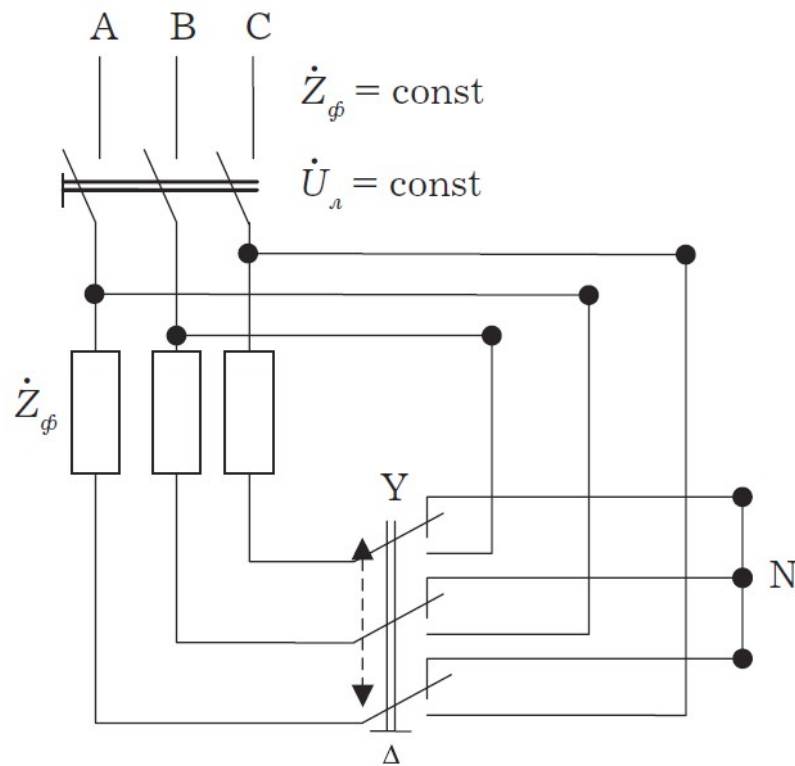


Рис. 1.3.10. Схема переключения трехфазного приемника со звезды в треугольник

При соединении фаз приемника треугольником

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta} = \frac{\sqrt{3} U_{\phi\Delta}}{Z_{\phi}} = \frac{\sqrt{3} U_{л}}{Z_{\phi}},$$

а при соединении фаз приемника звездой

$$I_{лY} = \sqrt{3} I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi Y}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} Z_{\phi}}.$$

Тогда отношение линейных токов $I_{л\Delta}/I_{лY} = 3$.

Таким образом, при неизменном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник, его мощность увеличивают в три раза:

$$P_{\Delta} = P_Y.$$

Действительно, при соединении фаз приемника треугольником фазное напряжение становится равным линейному, т.е. увеличивается в $\sqrt{3}$ раза по сравнению с фазным напряжением при соединении фаз приемника звездой. Следствием этого является увеличение фазного тока $I_{\phi} = U_{\phi}/Z_{\phi}$ также в три раза. Фазная мощность увеличится в три раза, во столько же раз увеличится мощность трехфазного приемника. Этим свойством можно воспользоваться, если приемник допускает увеличение напряжения на его зажимах в $\sqrt{3}$ раза.

Таким образом, изучив однофазные и трех фазные цепи, можно отметить преимущества трехфазных.

Раздел 2. Электрические машины

Тема 2.1. Трансформаторы

Лекция проводится в виде беседы

2.1.1. Назначение, общие сведения о трансформаторах

Трансформатором называется статический индуктивный преобразователь, имеющий две или больше индуктивно связанных взаимно неподвижных обмоток и предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции параметров электрической энергии переменного тока (напряжения, тока, частоты, числа фаз).

Электрическая энергия переменного тока подводится к первичной обмотке трансформатора от сети с числом фаз m_1 , фазным напряжением U_1 и частотой f_1 и передается во вторичную обмотку с числом фаз m_2 , фазным напряжением U_2 и частотой f_1 посредством магнитного поля. В большинстве случаев с помощью трансформатора преобразуется только напряжение $U_2 \neq U_1$ и токи $I_2 \neq I_1$ без изменения частоты и числа фаз.

Обычно электрическое соединение между первичной и вторичной обмотками в трансформаторе отсутствует, и энергия из одной обмотки в другую передается только за счет магнитной связи между ними.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы наряду с воздушными и кабельными линиями электропередачи являются основным оборудованием систем электроснабжения. В дальнейшем под термином «трансформатор» без специальной оговорки будет подразумеваться и автотрансформатор.

Основными конструктивными элементами трансформатора являются магнитный сердечник и обмотки, наматываемые на этот сердечник. Магнитный сердечник набирается из листов электротехнической стали, изолированных между собой. Обмотки изготавливаются из медных или алюминиевых изолированных проводников.

Магнитопровод и обмотки составляют активную часть трансформатора.

У трансформаторов с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещается в стальной корпус, заливаемый трансформаторным маслом. В верхней части корпуса устанавливаются проходные изоляторы для вывода обмоток. Расширитель, связанный трубопроводом с корпусом, служит для уменьшения площади соприкосновения масла с воздухом и воспринимает колебания уровня масла при изменении температуры. Радиаторы, установленные на корпусе, увеличивают поверхность охлаждения трансформатора.

Обмотка трансформатора со стороны питания называется первичной, со стороны потребителя – вторичной.

Изменение напряжения в трансформаторе происходит в соответствии с коэффициентом его трансформации. Этот коэффициент равен отношению числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток или отношению напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора без нагрузки (при холостом ходе):

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

2.1.2. Принцип действия трансформатора

Принцип действия трансформатора основан на физическом явлении электромагнитной индукции.

Если на замкнутом стальном сердечнике разместить две электрически не связанные между собой обмотки (рис. 2.1.1) и одну из них присоединить к сети переменного тока с напряжением U_1 , то при прохождении переменного тока I_1 по первичной обмотке в стальном сердечнике возникает переменный магнитный поток Φ .

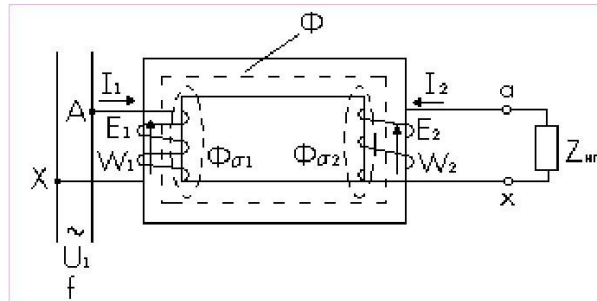


Рис. 2.1.1. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

Переменное магнитное поле Φ наводит в обеих обмотках ЭДС (E_1 и E_2).

Если вторичную обмотку включить на нагрузку ($Z_{н.г}$), то возникает ток I_2 .

Основной магнитный поток Φ создается суммарным действием токов I_1 и I_2 (рис. 2.1.2).

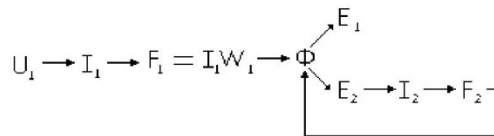


Рис. 2.1.2. Принцип создания магнитного потока в трансформаторе

2.1.3. Основные уравнения

2.1.3.1. ЭДС обмоток

По закону Максвелла ЭДС, индуцируемая в контуре с числом витков w переменным магнитным потоком Φ , равна

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1.1)$$

Примем, что $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где ω – круговая частота $\omega = 2\pi f$; f – частота питающей сети.

Тогда

$$e = -W \omega \Phi_m \cos \omega t = -W \omega \Phi_m \sin(90^\circ - \omega t) = W \omega \Phi_m \sin(90^\circ - \omega t). \quad (2.1.2)$$

Амплитуда ЭДС

$$E_m = W \omega \Phi_m.$$

Действующее значение ЭДС

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi \Phi_m W \approx 4,44 f \Phi_m W. \quad (2.1.3)$$

Индекс « m » у потока Φ обычно опускают.

По фазе ЭДС E отстает от потока Φ на 90° , что следует из сравнения формул (2.1.1) и (2.1.2).

На векторной диаграмме (рис. 2.6) показано расположение векторов E и Φ . Согласно (2.1.3) ЭДС первичной и вторичной обмотки имеют

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_1;$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_2.$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.1.4)$$

Обмотки трехфазного трансформатора могут быть соединены в «звезду» (Y) или в «треугольник» (Δ).

Соотношение линейных и фазных напряжений и токов:

$$\text{для Y: } U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}, I_{\text{л}} = I_{\text{ф}};$$

$$\text{для } \Delta: U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}, I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}.$$

Полная мощность:

$$\text{однофазного трансформатора } S = U \cdot I$$

$$\text{трехфазного трансформатора } S = 3 \cdot U_{\text{ф}} \cdot I_{\text{ф}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}.$$

$$\text{Активная мощность нагрузки } P = S \cdot \cos\varphi,$$

$$\text{реактивная мощность } Q = S \cdot \sin\varphi,$$

где φ – угол нагрузки.

2.1.3.2. Уравнения напряжений

Магнитный поток трансформатора (рис. 2.1) можно представить в виде основного магнитного потока Φ , созданного совместным действием токов I_1 и I_2 , и сцепляющегося с обеими обмотками, и потоков рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, каждый из которых создается только своим током ($I_1 \rightarrow \Phi_{\sigma 1}$ и $I_2 \rightarrow \Phi_{\sigma 2}$) и сцепляющихся только со своей обмоткой. Основной магнитный поток Φ наводит основные ЭДС E_1 и E_2 . Потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ наводят соответственно ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ и $E_{\sigma 2}$ (каждый поток – в своей обмотке).

Потокосцепление рассеяния

$$\psi_{\sigma} = Li,$$

где $i = I_m \sin\omega t$; L – коэффициент самоиндукции обмотки.

ЭДС рассеяния

$$e_{\sigma} = \frac{d\psi_{\sigma}}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos\omega t = \omega L I_m \sin(\omega t - 90^{\circ}).$$

Действующее значение ЭДС в комплексном виде

$$\dot{E}_{\sigma} = -j\chi \dot{I} = -j\omega L \dot{I} \quad (2.1.5)$$

где $\chi = \omega L$ – индуктивное сопротивление рассеяния (самоиндукции).

Наличие $(-j)$ в формуле (2.1.5) означает, что вектор ЭДС E стает по фазе от вектора тока I на 90° .

Согласно (2.1.5) можно записать

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\chi_1 \dot{I}_1, \dot{E}_{\sigma 2} = -j\chi_2 \dot{I}_2. \quad (2.1.6)$$

Применим закон Кирхгофа к первичной и вторичной обмоткам:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = r_1 \dot{I}_1,$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{U}_2 + r_2 \dot{I}_2.$$

С учетом (2.1.6) можно записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + j x_1 \dot{I}_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - r_2 \dot{I}_2 - j x_2 \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

где r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток.

Полные сопротивления обмоток

$$z_1 = r_1 + j x_1; \quad z_2 = r_2 + j x_2.$$

Тогда

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + z_1 \dot{I}_1,$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - z_2 \dot{I}_2.$$

2.1.3.3. Уравнения токов

Рассмотрим уравнение напряжения

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + z_1 \dot{I}_1.$$

Величина $z_1 \dot{I}_1$ для трансформаторов средней мощности составляет 5...10 % U_1 , поэтому можно принять, что $U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi W_1$. Так как напряжение сети $U_1 = \text{const}$, то отсюда следует, что поток, определяемый напряжением сети, $\Phi = \text{const}$. Следовательно для всех режимов работы постоянна МДС, создающая этот поток.

МДС при нагрузке

$$\dot{F}_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2.$$

МДС при холостом ходе (х.х.)

$$F = \dot{I}_{10} W_1,$$

где \dot{I}_{10} – ток х.х., $\dot{I}_2 = 0$.

Приравнявая эти МДС, получаем уравнение

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{10} W_1.$$

Разделим на W_1 и, с учетом $k = W_1 / W_2$, получим уравнение токов

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{1}{k} = \dot{I}_{10}. \quad (2.1.8)$$

2.1.3.4. Схема замещения. Приведенный трансформатор

Уравнения напряжений (2.1.7) и токов (2.1.8) позволяют определить все режимы работы трансформатора. Однако неудобство этих расчетов заключается в значительном отличии параметров, и следовательно, токов и напряжений первичной и вторичной обмоток, что затрудняет построение векторной диаграммы и т. д. Кроме того, в данном случае между обмотками существует не только электрическая, но и магнитная связь.

Для того чтобы можно было связать первичную и вторичную обмотки электрически, устранить их магнитную связь и воспользоваться схемой замещения, принимают, что $E_1 = E_2$ и $W_1 = W_2$. Такой трансформатор называется приведенным. Параметры вторичной обмотки приведенного трансформатора обозначены со штрихами. Схема замещения имеет вид, показанный на рис. 2.1.3. Схема замещения относится к одной фазе трансформатора. Параметры обмоток Z_1 и Z_2 на схеме замещения выносят отдельно.

Активное сопротивление r_m определяется потерями в стали

$$P_{cm} = m_1 I_0^2 r_m,$$

где m_1 – число фаз трансформатора.

Индуктивное сопротивление x_m отражает взаимоиндукцию обмоток.

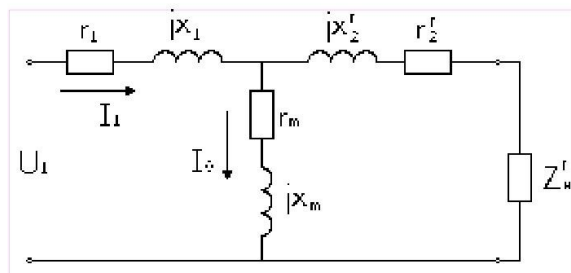


Рис. 2.1.3. Т-образная схема замещения трансформатора

Коэффициенты перехода от приведенного трансформатора к реальному определяются из условия сохранения энергетических показателей:

$$E_2' = E_2 \frac{W_1}{W_2} = k E_2,$$

$$I_2' = I_2 \frac{1}{k} \text{ (из равенства } E_2 I_2 = E_2' I_2')$$

$$r_2' = r_2 k^2 \text{ (из равенства } I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2').$$

Аналогично

$$x_2' = x_2 k^2,$$

Уравнения напряжений и токов для схемы замещения (рис. 2.7) согласно уравнения (2.1.7) и (2.1.8) примут вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j \dot{I}_2' x_2', \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 &= \dot{I}_{10} \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

Тема 2.2. Асинхронные машины

2.2.1. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы и могут работать в качестве как двигателя, так и генератора. Как правило, асинхронные машины используются в качестве двигателей (асинхронные двигатели – АД).

Неподвижная часть машины называется статором, подвижная – ротором. Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются (шихтуются) из отдельных листов электротехнической стали.

На внутренней поверхности статора и на внешней поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются проводники обмоток. Обмотка статора выполняется трехфазной. Подсоединяется к сети трехфазного тока и называется первичной обмоткой.

К конструктивным частям статора относятся: станина, в которую устанавливается магнитопровод, и подшипниковые щиты, служащие для поддерживания вала.

Воздушный зазор между статором и ротором в асинхронных машинах выполняется минимально возможным по условиям производства и надежности работы. В машинах мощностью в несколько киловатт величина зазора составляет около 0,5 мм, с ростом мощности и габаритов машины величина зазора увеличивается.

Обмотка ротора может быть выполнена трехфазной аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки ротора соединяются обычно в «звезду», а начала с помощью контактных колец и металлографитных щеток выводятся наружу. Такая асинхронная машина называется машиной с фазным ротором. К контактным кольцам обычно присоединяется трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Фазная обмотка ротора выполняется с тем же числом полюсов, что и статорная.

Асинхронные машины получили наиболее широкое применение в современных электрических установках, составляющих основу современного электропривода. Области применения асинхронных двигателей весьма широкие – от привода устройств автоматики и бытовых электроприборов до привода крупного горного оборудования (экскаваторов, дробилок, шахтных мельниц и т. п.).

2.2.2. Принцип действия

Обмотка статора при питании ее трехфазным током с частотой f_1 создает вращающийся магнитный поток Φ_1 с частотой вращения

$$n_1 = 60f_1 / p, \quad (2.2.1)$$

где p – число пар полюсов обмотки статора.

Частота вращения магнитного поля n_1 называется синхронной.

Вращающийся магнитный поток Φ_1 индуцирует ЭДС в обмотке ротора. Поскольку обмотка ротора замкнута, то возникает система токов ротора I_2 и создается вращающийся поток ротора $\Phi_{2.2}$. Поток ротора вращается относительно статора в ту же сторону и той же частотой n_1 , что и поток статора Φ_1 и имеет то же количество полюсов, но ориентирован, согласно правилу Ленца, практически ему навстречу. В результате взаимодействия неподвижных друг относительно друга потоков статора и ротора образуется результирующий поток Φ . Взаимодействие потока Φ и тока ротора приводит к возникновению электромагнитных сил и электромагнитного момента.

В режиме двигателя под действием этого момента ротор вращается в сторону вращения магнитного поля. В режиме генератора ротор вращается с помощью приводного двигателя со скоростью $n > n_1$, при этом ЭДС обмотки статора превышает напряжение сети, и машина отдает энергию в сеть.

Частота вращения n ротора асинхронной машины всегда отлична от частоты вращения магнитного поля n_1 , которую называют синхронной. Отсюда происходит название машины – асинхронная, т.е. несинхронная, в которой $n \neq n_1$. В противном случае проводники ротора не будут пересекаться магнитными линиями вращающегося поля, в них не будет индуцироваться ЭДС, не будет возникать тока ротора и момента.

2.2.3. Скольжение

Отличие частоты вращения ротора n и магнитного поля n_1 определяется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2.2.2)$$

Скольжение может выражаться в относительных единицах или процентах. Частоты вращения

$$n = n_1(1 - s). \quad (2.2.3)$$

Ниже приводится связь частоты вращения ротора n и скольжения s с режимом работы машины

| Генератор | Двигатель | Электродинамический тормоз |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| $n > n_1$ $-(x) < s < 0$ | $0 < n < n_1$ $0 < s < 1$ | $n < 0$ $1 < s < (x)$ |

$n = n_1$ $n = 0$
 $s = 0$ $s = 0$
 (режим идеального х.х) (режим КЗ)

Для двигательного режима работы $0 < n < n_1$ и скольжение $0 < s \leq 2.2$.

В начальный момент пуска АД $n = 0$ (режим КЗ) и скольжение

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1.$$

При $n = n_1$ имеем $s = 0$. Этот режим невозможен для асинхронной машины согласно принципу ее работы. Называется он режимом идеального холостого хода.

У АД общего назначения в номинальном режиме (т. е. в режиме, для которого машина предназначена) номинальное скольжение $s_n = 0,015 \dots 0,06$ (или 1,5...6 %).

2.2.4. Основы теории асинхронных машин

Физические процессы, происходящие в асинхронной машине, аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе (ТР). Отличие заключается лишь в особенностях их конструкции. В частности, наличие воздушного зазора между ротором и статором асинхронной машины приводит к значительному увеличению тока холостого хода I_0 . Для АД средней мощности ток I_0 составляет около 25–30 % от номинального тока.

Основной магнитный поток Φ , вращаясь с частотой n_1 , индуцирует ЭДС взаимной индукции в обмотке статора E_1 и в обмотке ротора $E_{2.2}$.

По аналогии с ТР формулы этих ЭДС можно записать в виде

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi W_1 k_{об1}; \quad (2.2.5)$$

$$E_{2.2} = 4,44 f_2 \Phi W_2 k_{об2}; \quad (2.2.6)$$

где W_1, W_2 – числа последовательно соединенных витков обмоток статора и ротора.

Наличие обмоточных коэффициентов $k_{об1}, k_{об2}$ обмоток статора и ротора учитывает особенности конструкции обмоток электрических машин. Обычно величина $k_{об} \approx 0,9 \dots 0,97$.

Эффективные числа витков обмоток статора и ротора

$$W_{1\phi} = W_2 k_{об1};$$

$$W_{2\phi} = W_2 k_{об2}$$

ЭДС взаимной индукции обмотки вращающегося ротора (2.2.6), с учетом формулы (2.2.4) для частоты f_2 , можно представить в виде

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi W_2 k_{об2} = 4,44 s f_1 \Phi W_2 k_{об2} = s E_2; \quad (2.2.7)$$

где $E_2 = 4,44 f_1 \Phi W_2 k_{об2}$ – ЭДС неподвижного ротора

Кроме ЭДС взаимной индукции в асинхронной машине, как и в ТР, существуют ЭДС самоиндукции (ЭДС рассеяния), наведенные потоками рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 x_1,$$

$$\dot{E}_{\sigma 2s} = -j \dot{I}_2 x_{2s}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки вращающегося ротора

$$x_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s x_2, \quad (2.2.8)$$

где L_2 – коэффициент самоиндукции обмотки ротора; $x_2 = 2\pi f_2 L_2$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки неподвижного ротора. Активное сопротивление r_2 обмотки ротора, пренебрегая эффектом вытеснения тока, можно принять постоянным. Полное сопротивление обмотки вращающегося ротора

$$Z_{2s} = r_2 + j x_{2s} = r_2 + j s x_2.$$

Уравнение напряжения обмотки вращающегося ротора

$$\dot{E}_{2s} = z_{2s} \dot{I}_2.$$

В преобразованном виде с учетом (2.2.7) и (2.2.8) это уравнение может быть записано в виде

$$s \dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j s \dot{I}_2 x_2$$

Разделив обе части уравнения на s , перейдем от уравнения вращающегося ротора к уравнению эквивалентного в электромагнитном отношении неподвижного ротора, в обмотке которого протекает ток частоты $f_2 = f_1$,

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} + j \dot{I}_2 x_2. \quad (2.2.9)$$

Осуществление такого формального преобразования позволяет заменить реальный вращающийся ротор фиктивным неподвижным ротором, у которого активное сопротивление обмотки меняется в зависимости от скольжения, а ЭДС – постоянна. Последнее обстоятельство позволяет осуществить приведение обмотки ротора к обмотке статора аналогично тому, как это осуществляется в ТР, и анализировать процессы в АД с помощью совмещенных для статорной и роторной цепей схем замещения и векторных диаграмм.

Рассмотрим формулы, позволяющие привести обмотку ротора к обмотке статора. Отношение ЭДС при неподвижном роторе ($f_1 = f_2$) определяет коэффициент трансформации по ЭДС:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_{1\varepsilon}}{W_{2\varepsilon\phi}} = k_e.$$

Для того, чтобы определить коэффициент трансформации по току k_i , следует исходить из равенства МДС с учетом числа

$$m_1 I_1 W_{1\varepsilon\phi} = m_2 I_2 W_{2\varepsilon\phi}$$

где m_1, m_2 – числа фаз обмоток статора и ротора.

Тогда

$$k_1 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 W_{1\varepsilon\phi}}{m_2 W_{2\varepsilon\phi}}.$$

Приведение числа витков вторичной обмотки (ротора) к числу витков первичной обмотки (статора) осуществляется аналогично ТР на основе сохранения энергетических показателей реального двигателя. При этом между фиктивными параметрами, относящимися к цепи обмотки неподвижного ротора, и реальными параметрами имеют место следующие соотношения (фиктивные параметры приведенной обмотки ротора обозначены штрихами) [2]:

$$E_2' = k_e E_2 = E_1;$$

$$r_2' = k_e k_1 k_2;$$

$$I_2' = \frac{I_2}{k_1};$$

$$x_2' = k_e k_1 k_2;$$

$$z_2' = \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2}.$$

2.2.5. Т-образная схема замещения

Для получения схемы замещения АД запишем уравнения напряжений для одной фазы обмотки статора и приведенной обмотки ротора. Для фазы обмотки статора (аналогично первичной обмотке ТР)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1,$$

где \dot{U}_1 ; I_1 ; r_1 – напряжение, ток и активное сопротивление фазы статорной обмотки. После преобразования уравнение примет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \quad (2.2.10)$$

Для фазы приведенной обмотки ротора ранее было получено соотношение (2.2.9)

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \frac{r'_2}{s} + j \dot{I}'_2 x'_2.$$

Уравнение токов (аналогично ТР)

$$\dot{I}'_m = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_2, \quad (2.2.11)$$

где I_m – ток намагничивания.

Уравнениям (2.2.9)–(2.2.11) соответствует схема замещения (рис. 2.2.1).

Индуктивное сопротивление x_m намагничивающего контура отражает сопротивление взаимоиנדукции обмоток статора и ротора. Сопротивление r_m намагничивающего контура введено в схему замещения искусственно для учета магнитных потерь мощности $p_{ст}$ (потерь в стали).

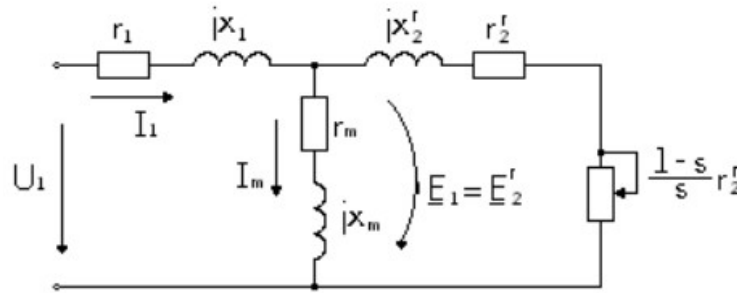


Рис. 2.2.1 Т-образная схема замещения

На схеме сопротивление $\frac{r'_2}{s}$ представлено в виде двух слагаемых:

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + \frac{1-s}{s} r'_2.$$

Целесообразность такого разделения состоит в том, что схема замещения приобретает наглядный физический смысл: умножив первое слагаемое r'_2 на $I_2'^2$, получим электрические потери в обмотке ротора:

$$p_{эл2} = m_1 I_2'^2 r'_2. \quad (2.2.12)$$

Умножив второе слагаемое $\frac{r'_2(1-s)}{s}$ на $I_2'^2$, получим полную механическую мощность $P_{мех}$. Полное входное сопротивление схемы замещения (пренебрегая r_m)

$$Z = r_1 + jx_1 + \frac{jx_m \left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right)}{\frac{r'_2}{s} + jx'_2 + jx_m}.$$

2.2.6. Пуск и регулирование оборотов асинхронного двигателя

2.2.6.1. Прямой пуск

Этот способ применяют для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Такие двигатели малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при

непосредственном подключении обмотки статора к сети возникающие пусковые токи не создали чрезмерных электродинамических усилий и превышения температуры, опасных для механической и термической прочности основных элементов машины. Двигатели обычно пускаются с помощью электромагнитного выключателя SF – магнитного пускателя (рис. 2.2.2, а) и разгоняются автоматически по естественной механической характеристике (рис. 2.2.2, б) от точки Π , соответствующей начальному моменту пуска, до точки P , соответствующей условию $M = M_{ст}$. Ускорение при разгоне определяется разностью абсцисс кривых M и $M_{ст}$ и моментом инерции ротора двигателя и механизма, который приводится во вращение. Если в начальный момент пуска $M_{п} < M_{ст}$, двигатель разогнаться не сможет.

Недостатком данного способа пуска, кроме сравнительно небольшого пускового момента, является также большой бросок пускового тока, в 5-7 раз превышающий номинальное значение тока. При электрических сетях сравнительно небольшой мощности это может вызвать значительное понижение напряжения, нежелательное для других потребителей. Несмотря на указанные недостатки, пуск двигателя путем непосредственного подключения обмотки статора к сети широко применяется благодаря простоте и хорошим технико-экономическим свойствам двигателя с короткозамкнутым ротором: низкой стоимости и высоким энергетическим показателям (η , $\cos \varphi$, и др.).

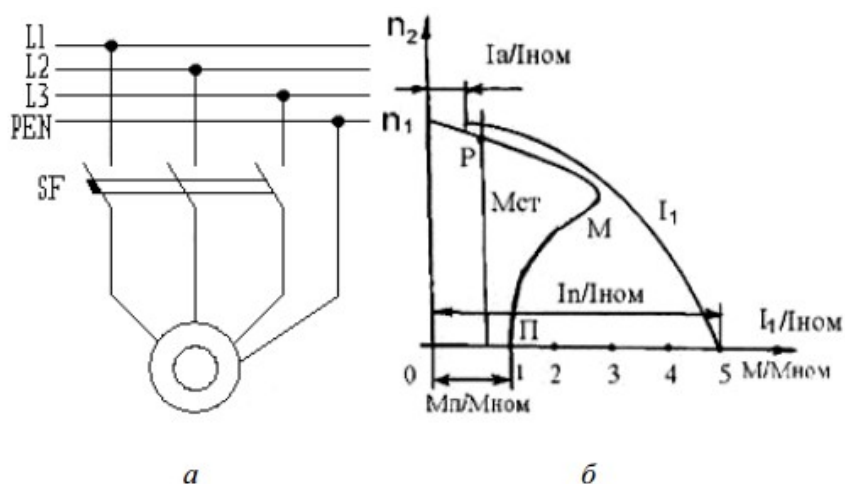


Рис. 2.2.2. Схема прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя (а) и графики изменения моментов и токов (б)

2.2.6.2. Пуск при пониженном напряжении

Такой пуск применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение может осуществляться различными путями:

А. Переключением обмотки статора при пуске с рабочей схемы Δ на пусковую схему Y . Это можно осуществлять с помощью трехполюсного переключателя Π (рис. 2.2.3, а) или контактора. При включении обмотки статора по схеме Y напряжение, подаваемое на фазы этой обмотки, уменьшается в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают обратно на схему Δ .

Б. Включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных активных (резисторов) или реактивных (реакторов) сопротивлений (рис. 2.2.3, б). При этом на указанных сопротивлениях создается некоторое падение напряжения ΔU_d , пропорциональное пусковому току, вследствие чего к обмотке статора будет приложено пониженное напряжение. По мере разгона двигателя снижается ЭДС E_2 , индуцированная в обмотке ротора, следовательно, и пусковой ток. В результате этого уменьшается падение напряжения ΔU_d на указанных сопротивлениях и возрастает приложенное к двигателю напряжение. Таким образом, при рассматриваемом способе пуска напряжение, приложенное к двигателю, автоматически растёт

по мере разгона ротора. После окончания разгона добавочные резисторы или реакторы замыкаются накоротко контактором $K_{2.2}$.

В. Подключение двигателя к сети через понижающий автотрансформатор A_{Tr} (рис. 2.2.3, в). Последний может иметь несколько ступеней, которые в процессе пуска двигателя переключаются соответствующей аппаратурой.

Недостатком указанных способов является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, пропорциональных квадрату приложенного напряжения. Поэтому их можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки.

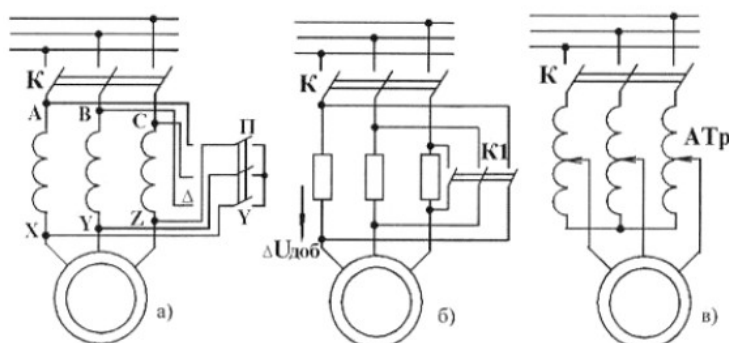


Рис. 2.2.3. Схема включения асинхронного двигателя при пуске с понижением напряжения

На рис. 2.2.4 приведены механические характеристики двигателя при нормальном и пониженном напряжении, т. е. при соединении обмотки статора по схеме Y и Δ . При соединении по схеме Y максимальный и пусковой моменты уменьшаются в 3 раза, вследствие чего двигатель не в состоянии осуществить пуск механизма с номинальным нагрузочным моментом.

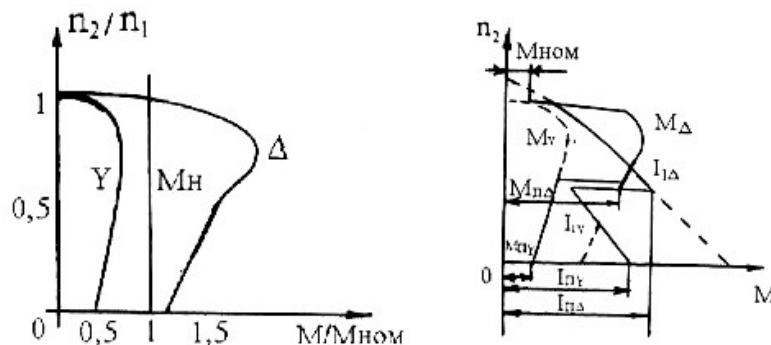


Рис. 2.2.4. Механические характеристики при включении обмотки статора по схемам Δ и Y (а) и графики изменения момента M и тока I при пуске с переключением обмотки статора со Y и Δ

2.2.6.3 Пуск с помощью реостата в цепи ротора

Наличие контактных колец у двигателя с фазным ротором позволяет подключить к обмотке ротора пусковой реостат. При этом активное сопротивление цепи ротора увеличивается до значения $R_2 = r_2' + r_0'$, где r_0' – электрическое сопротивление пускового реостата. Влияние возросшего значения активного сопротивления вызывает увеличение момента и уменьшение пускового тока, что и показано на рис. 2.2.5.

2.2.6.4. Регулирование частоты и направления вращения асинхронного двигателя

Под регулированием понимается такое изменение частоты вращения, которое производится воздействием на двигатель со стороны эксплуатирующего персонала. При этом

предполагается, что механическая характеристика нагрузки при регулировании остается прежней.

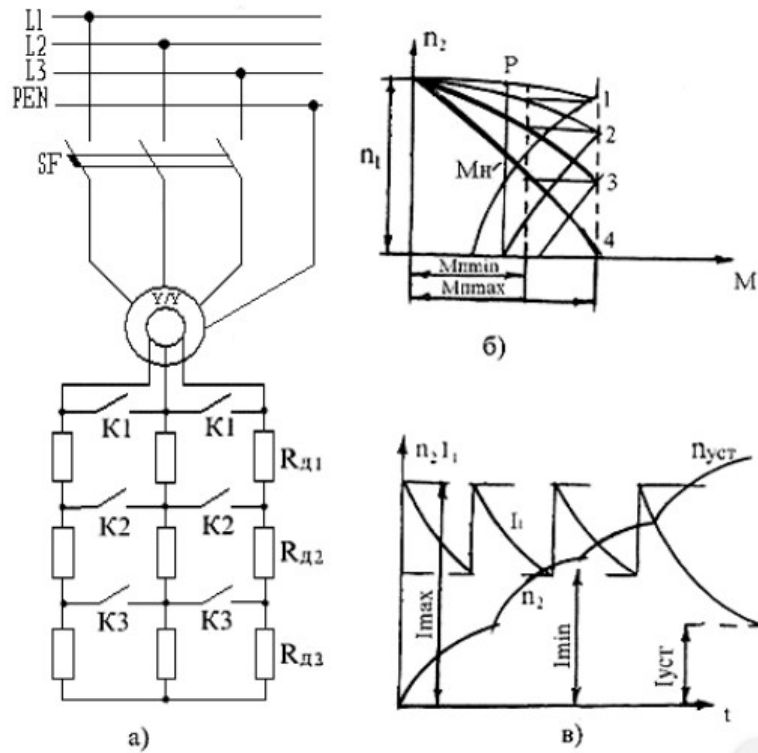


Рис. 2.2.5.Схема включения асинхронного двигателя при реостатном пуске (а), его пусковая диаграмма (б), графики изменения частоты вращения и тока (в)

Частота вращения асинхронного двигателя:

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

Из формулы следует три принципиально возможных метода регулирования асинхронных двигателей: изменение частоты f_1 (частотное регулирование); изменение числа полюсов $2p$ и скольжения s . Скольжение s обычно изменяют путем изменения потерь в цепи ротора с помощью реостата, но в некоторых случаях для этого изменяют величину питающего напряжения. Все указанные способы регулирования частоты вращения находят практическое применение. Рассмотрим их подробнее.

2.2.6.5. Частотное регулирование

Этот способ регулирования частоты вращения позволяет применять наиболее надежные и дешевые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и является одним из наиболее перспективных и широко используемых в настоящее время. Принцип его заключается в том, что, изменяя частоту питающего двигателя напряжения, можно изменять его частоту вращения, получая тем самым различные искусственные характеристики. Такой способ обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне, а получаемые характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ к тому же отличается и еще одним важным свойством: при регулировании частоты вращения асинхронного двигателя не происходит увеличения его скольжения, и потери скольжения оказываются небольшими, в связи с чем частотный способ оказывается весьма экономичным. Недостатком частотного регулирования является громоздкость и высокая стоимость источника питания.

2.2.6.6. Регулирование путем изменения числа полюсов

Среди производственных механизмов, требующих изменения скорости движения рабочего органа, имеются такие, у которых это изменение может происходить не плавно, а ступенчато. К таким механизмам можно отнести большинство грузовых и пассажирских лифтов, где для достижения требуемой точности остановки кабины производится предварительное снижение скорости ее движения. Для механизмов подачи многих металлорежущих станков регулирование скорости часто осуществляется путем ступенчатого изменения частоты вращения приводного электродвигателя. В этих случаях, а также и в некоторых других в качестве приводных двигателей широко используются многоскоростные асинхронные электродвигатели, у которых регулирование частоты вращения производится путем изменения числа пар полюсов статорной обмотки. При этом изменяется частота вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, а тем самым и частота вращения ротора двигателя.

На рис. 2.2.6 показана простейшая схема (для одной фазы), позволяющая изменять число полюсов обмотки статора в 2 раза.

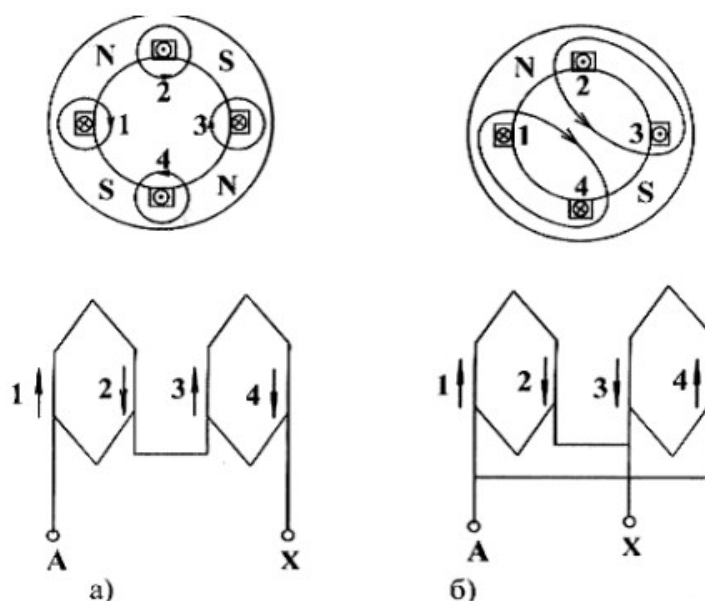


Рис. 2.2.6. Схема переключения одной фазы обмотки статора для изменения числа полюсов при $2p=4$ (а) и $2p=2$ (б)

Для этого каждую фазу обмотки статора разделяют на две части, которые переключают с последовательного соединения на параллельное. При включении катушек 1-2 и 3-4 в две параллельные ветви число полюсов уменьшается в два раза, следовательно, частота вращения магнитного поля увеличивается в 2 раза (рис. 2.2.6). При переключении число последовательно включенных витков в каждой фазе уменьшается вдвое, но т. к. частота вращения возрастает в два раза, ЭДС, индуцированная в фазе, остается неизменной. Следовательно, двигатель при обеих частотах вращения может быть подключен к сети с одинаковым напряжением. Чтобы не осуществлять переключений в обмотке ротора, последний выполняют короткозамкнутым.

2.2.6.7. Регулирование путем включения реостата в цепь ротора

Одним из наиболее простых способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является реостатное регулирование, т. е. регулирование введением дополнительных активных сопротивлений в цепи обмоток двигателей.

Однако на практике для целей регулирования частоты вращения преимущественно применяются дополнительные сопротивления в роторной цепи.

При включении в цепь ротора добавочных активных сопротивлений $R_{доб1}$, $R_{доб2}$, $R_{доб3}$ и других изменяется форма зависимости и механической характеристики $n_2 = f(M)$ двигателя (рис. 2.2.7, а). При этом некоторому нагрузочному моменту M_H соответствуют скольжения s_1 , s_2 , s_3, \dots , большие, чем скольжение s_e при работе двигателя на естественной характеристике (при $R_{доб} = 0$). Следовательно, установившаяся частота вращения двигателя уменьшается (рис. 2.2.7, б). Этот метод регулирования может быть использован только для двигателей с фазным ротором. Он позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах. Недостатками его являются: а) большие потери энергии в регулировочном реостате; б) чрезмерно «мягкая» механическая характеристика двигателя при большом сопротивлении в цепи ротора.

2.2.6.8. Регулирование путем изменения питающего напряжения

Возможность этого регулирования подтверждается графиками $M = f(s)$, построенными для разных значений U_1 (рис. 2.2.8).

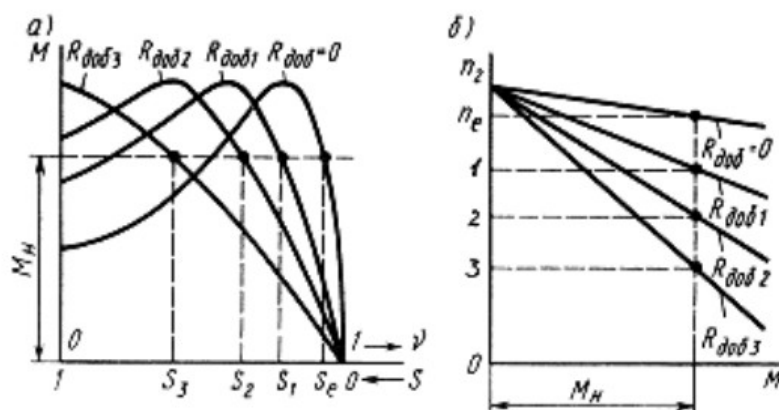


Рис. 2.2.7. Изменение формы механической характеристики при регулировании частоты вращения с помощью добавочного активного сопротивления

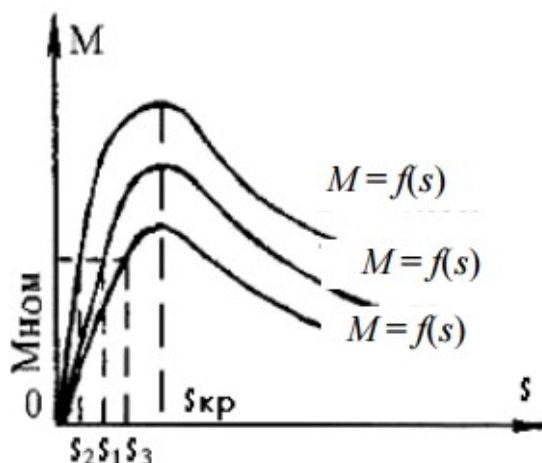


Рис. 2.2.8. Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя

При неизменной нагрузке на валу двигателя увеличение напряжения вызывает рост частоты вращения. Однако диапазон регулирования частоты вращения получается небольшим, что объясняется узкой зоной устойчивой работы двигателя, ограниченной

значениями критического скольжения и недопустимостью значительного изменения значения номинального напряжения.

2.2.6.9. Изменение направления вращения

Для изменения направления вращения ротора электродвигателя надо изменить направление вращения магнитного поля. Для этого необходимо изменить порядок чередования тока в фазах обмоток статора. В трехфазных машинах это осуществляется путем переключения двух любых проводов, подводящих ток из трехфазной сети к фазам этой обмотки (рис. 2.2.9).

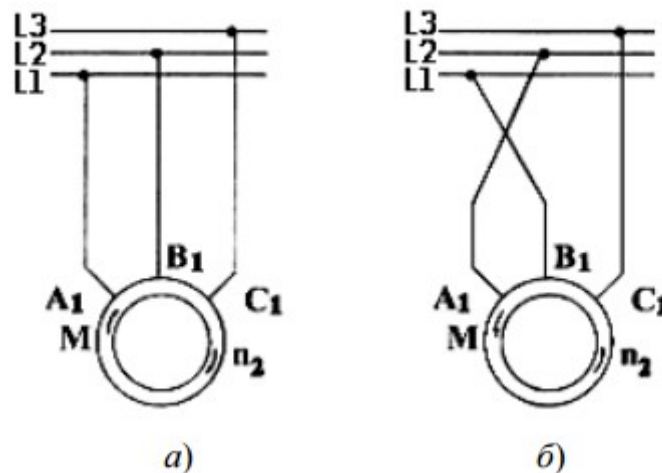


Рис. 2.2.9. Схема включения двигателя при изменении направления вращения (а,б)

Раздел 3. Электроснабжение

Тема 3.1. Основные сведения о системах электроснабжения

3.1.1. Категории надежности потребителей электрической энергии

Основные требования к системам электроснабжения. По надежности электроснабжения в соответствии с требованиями ПУЭ электроприемники разделяют на три категории.

К I категории относят электроприемники, перерыв в работе которых может представлять опасность для жизни людей, причинить значительный ущерб народному хозяйству, вызвать повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, нарушение сложного технологического процесса, функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства. Примеры электропотребителей I категории: котлы-утилизаторы, насосы водоснабжения и канализации, газоочистки, приводы вращающихся печей, печи с кипящим слоем, газораспределительные пункты, станы непрерывной прокатки, водоотлив, подъемные машины, вентиляторы главного проветривания, вентиляторы высокого давления и обжиговые, аварийное освещение. Из состава I категории выделяют особую группу электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства в целях предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования. В качестве примеров электроприемников особой группы для черной металлургии можно назвать электродвигатели насосов водоохлаждения доменных печей, газосмесительные станции воздухонагревателей, насосы испарительного охлаждения основных технологических установок.

Во II категорию входят электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и

промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного числа городских и сельских жителей.

К III категории относят все остальные электроприемники, не подходящие под определения I и II категорий. Это главным образом различные вспомогательные механизмы в основных цехах, цехи несерийного производства.

Электроприемники I категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания. Перерыв в их электроснабжении при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания от другого (на время действия АВР). Независимым источником питания называется источник, на котором сохраняется регламентированное напряжение при исчезновении его на другом или других источниках питания. К числу независимых источников питания относятся две секции или системы шин одной или двух электростанций и подстанций при одновременном соблюдении двух условий: 1) каждая из секций или систем-шин в свою очередь имеет питание от независимого источника; 2) секции (системы) шин не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключающуюся при нарушении нормальной работы одной из секций (систем) шин.

Электроприемники II категории рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых, взаимно резервирующих источников питания. При нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания с помощью дежурного персонала или выездной оперативной бригады.

Для электроприемников III категории электроснабжение может быть от одного источника питания при условии, что перерывы, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не более одних суток.

Главная понизительная подстанция считается одним источником, если питается по одной двухцепной линии, и двумя источниками, если питается по двум одноцепным линиям (на разных опорах) или по двум кабельным линиям, проложенным по разным трассам. ТЭЦ можно принять за несколько источников питания, если при выходе из строя генератора или при аварии на секции остальные секции (генераторы) продолжают работать. Отдельная трасса для кабельной линии – это отдельные (самостоятельные) траншея, блок, туннель (для последнего случая отдельной трассой можно назвать прокладку в трехстенном туннеле). Электроснабжение потребителей I категории должно осуществляться от двух независимых источников по отдельным трассам. Категории – одно из ключевых условий, определяющих схему электроснабжения. Очевидна возможность неоднозначного толкования таких определений. Концептуально они существенно отличаются от определенных (подсчитанных) в первой научной картине мира (длительно допустимые токи, размеры, расстояния, проходы и другие), а потому однозначно обязательных для исполнения (как и величины приемосдаточных испытаний, основанные на вероятностных представлениях).

Системой электроснабжения города называется совокупность электрических станций, понижающих и преобразовательных подстанций, питающих и распределительных линий и электроприемников, обеспечивающих технологические процессы коммунально-бытовых, промышленных и транспортных потребителей электроэнергии, расположенных на территории города и частично в пригородной зоне. Структурная схема электроснабжения крупного города, пример которой представлен на рис. 3.1.1, содержит комплекс сложных сооружений. Основными звеньями этого комплекса являются: источник питания – районная электростанция 1 с установленными повысительными трансформаторами 2; воздушная линия электропередачи 3 напряжением 110–220 кВ на металлических опорах; подстанция глубокого ввода 4 напряжением 110–220 кВ с распределительными устройствами (РУ) 5 напряжением 6–10–20–35 кВ; питающая кабельная линия 6–10–20 кВ; распределительный пункт 7, на шины которого подается напряжение 6–10–20 кВ; распределительная кабельная линия 8, питающая трансформаторную понизительную подстанцию 9; кабельная линия 10 напряжением 380 В, питающая вводно-распределительное устройство 11 жилого дома. От РУ 35 кВ по кабельной линии 12 напряжением 35 кВ получает питание главная понизительная подстанция 13 промышленного предприятия города, от которой по кабельным линиям 14 напряжение 380 В

поступает на распределительные щиты 15 цехов. Электрическую сеть города принято делить на следующие составные части рис 3.1.2: – электроснабжающая сеть города напряжением 35–110–220 кВ; – питающая электрическая сеть 6–10 кВ; – распределительная электрическая сеть 6–10 кВ; – распределительная сеть 380 В.

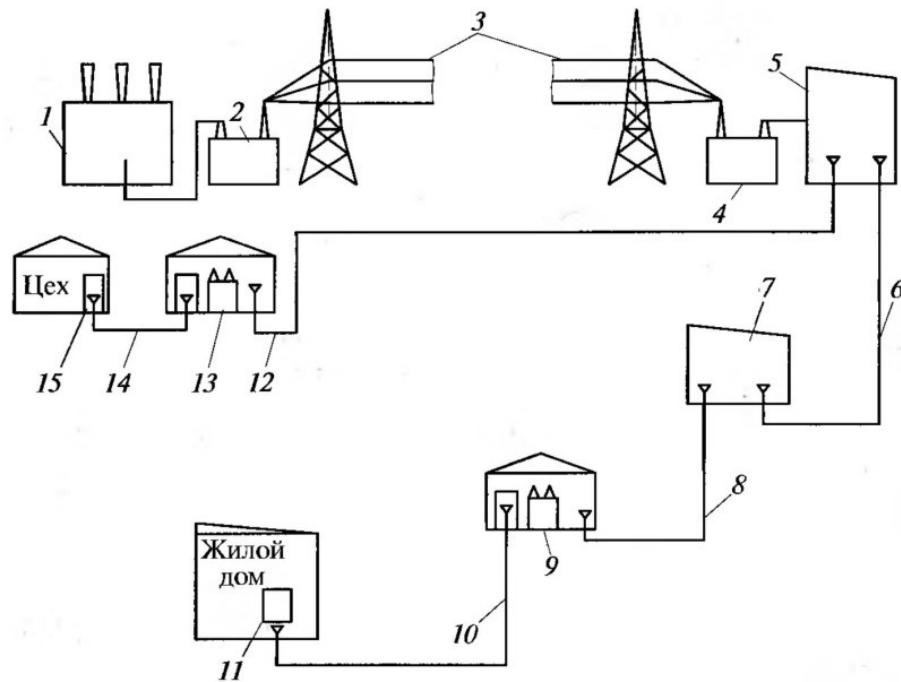


Рис. 3.1.1. Структурная схема электроснабжения города:

1 – районная электростанция; 2 – повысительный трансформатор; 3 – воздушная линия электропередачи напряжением 110–220 кВ; 4 – подстанция глубокого ввода (центр питания); 5 – распределительное устройство; 6 – питающая кабельная линия; 7 – распределительный пункт; 8 – распределительная кабельная линия; 9 – трансформаторная понизительная подстанция; 10, 14 – кабельные линии напряжением 380 В; 11 – вводно-распределительное устройство; 12 – кабельная линия напряжением 35 кВ; 13 – главная понизительная подстанция предприятия; 15 – распределительный щит на напряжение 380/220 В

Линии электропередачи электрических сетей СЭС городов состоят из: – воздушных линий 35–220 кВ внешнего электроснабжения города; – кабельных (или воздушных) линий 110–220 кВ глубоких вводов высокого напряжения в центральные районы жилых и промышленных территорий; – кабельных (или воздушных) линий наружных распределительных линий 0,38–6–10–20 кВ; – электрических линий внутренних сетей 0,38 кВ жилых, общественных и производственных зданий. Электроэнергия в процессе передачи её от электростанции до потребителей преобразуется один или несколько раз (по напряжению, роду тока или его частоты), и по мере приближения к потребителям распределяется на более мелкие потоки (осуществляется несколько ступеней распределения электроэнергии).

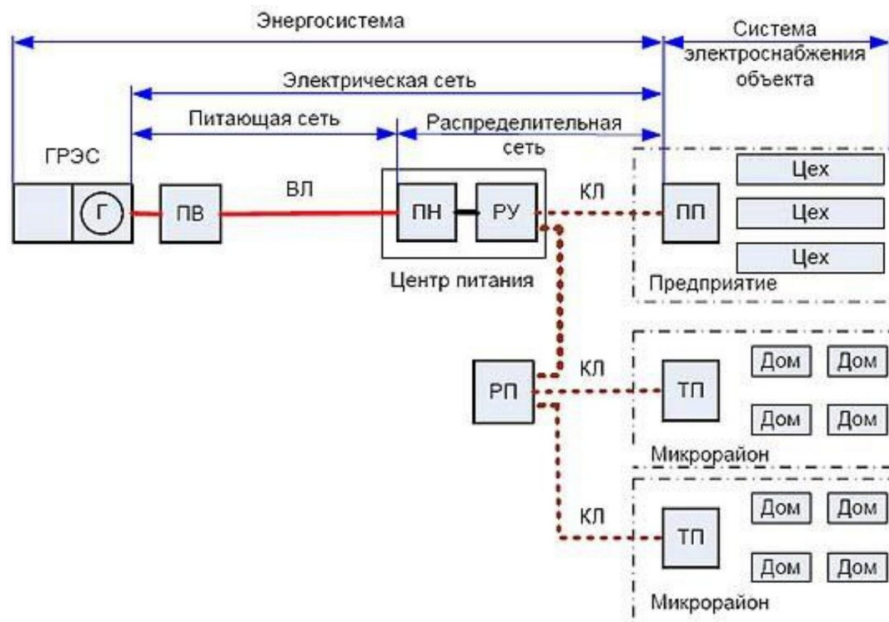


Рис. 3.1.2. Упрощенная структурная схема электроснабжения города:

ГРЭС – государственная районная электростанция; Г – генератор; ПВ – повысительная трансформаторная подстанция; ПН – понизительная трансформаторная подстанция; РУ – распределительное устройство 6–10 кВ; РП – распределительный пункт; ПП – пункт приема электроэнергии; ТП – трансформаторная подстанция; ВЛ – воздушная линия электропередачи; КЛ – кабельная линия электропередачи

При описании систем электроснабжения часто используют обобщающие термины — источник питания и пункт приема электроэнергии. От источника питания электроэнергия поступает на пункт приема электроэнергии. Источник питания является относительным термином. Для центра питания источником питания является повысительная подстанция. Для пункта приема электрической энергии – центр питания и т. д. Источниками питания (ИП) системы электроснабжения города являются городские электрические станции и понижающие подстанции. Центром питания (ЦП) называется распределительное устройство генераторного напряжения электрической станции или распределительное устройство вторичного напряжения понижающей подстанции, к шинам которого присоединяются распределительные сети данного района. Электрическими станциями являются обычно теплоэлектростанции, обеспечивающие тепловой и частично электрической энергией коммунально-бытовые и промышленные объекты.

Понижающими подстанциями систем электроснабжения городов являются: городские подстанции (35–220 кВ), располагающиеся вблизи границы города; подстанции глубоких вводов 110–220 кВ, сооруженные непосредственно на территориях жилых районов и в промышленных зонах крупных городов; транспортные подстанции 6–10–20/0,38 кВ коммунально-бытовых и промышленных потребителей электроэнергии; выпрямительные подстанции городского и пригородного электрифицированного транспорта. Для приема, преобразования и распределения электроэнергии используют различные устройства (электроустановки): – распределительные устройства (РУ); – распределительные пункты (РП); – подстанции; – трансформаторные подстанции (ТП); – преобразовательные подстанции. Электроприемники жилых зданий: – электроприемники квартир; – осветительные электроприборы; – бытовые электроприборы: нагревательные; хозяйственные; культурно-бытовые; санитарно-гигиенические; – электроприемники общедомового назначения: – осветительные электроприемники: светильники лестничных клеток, технических подполий, чердаков, вестибюлей, холлов, служебных и других помещений; – силовые электроприемники: лифтовые установки; вентиляционные системы; противопожарные устройства. Электроприемники общественных зданий [Киреева-2005]: – осветительные электроприемники; – силовые электроприемники; – механическое оборудование; – электротепловое оборудование; – холодильные машины; – подъемно-

транспортное оборудование; – санитарно-технические установки; – приточно-вытяжные вентиляционные установки и системы кондиционирования воздуха; – системы связи и сигнализации; – противопожарные устройства и др. Построение системы электроснабжения производят таким образом, чтобы в нормальном режиме все элементы системы находились под нагрузкой с максимально возможным использованием пропускной способности этих элементов. Резервирование питания электроприемников потребителей предусматривается в соответствии с их категорией в минимальных затратах средств и электрооборудования. Применение резервных линий и трансформаторов, не несущих нагрузку, допускают, как исключение, при наличии технико-экономических обоснований. При реконструкции действующих сетей максимально используют существующие электросетевые сооружения.

3.1.2. Выбор или изменение категории надежности электроснабжения.

В соответствии с правилами технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей к электрическим сетям, утвержденных постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 № 861, категория надежности электроснабжения электроприемников потребителей определяется в процессе [технологического присоединения энергопринимающих устройств](#) к электрическим сетям. При этом потребитель самостоятельно определяет какая категория надежности энергоснабжения ему необходима.

"Технологическое присоединение энергопринимающих устройств в целях обеспечения надежного их энергоснабжения и качества электрической энергии может быть осуществлено по одной из трех категорий надежности. Отнесение энергопринимающих устройств заявителя (потребителя электрической энергии) к определенной категории надежности осуществляется заявителем самостоятельно.

Отнесение энергопринимающих устройств к первой категории надежности осуществляется в случае, если необходимо обеспечить непрерывный режим работы энергопринимающих устройств, перерыв снабжения электрической энергией которых может повлечь за собой угрозу жизни и здоровью людей, угрозу безопасности государства, значительный материальный ущерб. В составе первой категории надежности выделяется особая категория энергопринимающих устройств, бесперебойная работа которых необходима для безаварийной остановки производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров".

Однако, стоит понимать, что при выборе 2 или 1 категории надежности, [стоимость подключения электричества](#) возрастет в 2 раза относительно присоединения по 3 категории надежности: ведь для энергоснабжения по 1 или 2 категории необходимо два независимых источника питания и присоединение к каждому из них будет стоить примерно одинаково.

Тема 3.2. Временные электрические сети строительных площадок

Лекция проводится в виде беседы

3.2.1. Общие сведения о временных электрических сетях строительных площадок

Электроэнергия на строительной площадке используется для:

- наружного и внутреннего освещения (10%);
- работы строительных машин и механизмов (башенный кран, штукатурная и малярная станции, бетононасос, сварочный аппарат и пр.) (70 %);
- технологических процессов (электропрогрев бетона, оттаивание мерзлого грунта и др.) (20%).

Для передачи и распределения электрической энергии служат электрические сети.

Они подразделяются на:

- воздушные линии,

- кабельные линии,
- электропроводки.

Воздушные линии (ВЛ) прокладываются на открытом воздухе и состоят из изолированных или неизолированных проводов, прикрепленных линейной арматурой к опорам, изоляторам или кронштейнам, к стенам зданий и инженерным сооружениям.

Кабельные линии прокладываются преимущественно под землей, в траншеях, каналах, коллекторах и состоят из одного или нескольких, совместно проложенных, кабелей.

Электропроводки прокладывают внутри зданий и сооружений или по их наружным стенам. Они выполняются изолированными проводами различных марок и кабелями с резиновой изоляцией, рассчитанными на напряжение до 1 000 В.

На строительных площадках для питания электроэнергией строительных механизмов и электроосветительных установок сооружаются в основном временные электрические сети, состоящие преимущественно из воздушных линий, как более дешевых и легко выполнимых.

Внутри строящихся зданий выполняются временные электропроводки.

Кабельные подземные линии применяют только в отдельных случаях, когда по тем или иным причинам использование воздушных линий на данном участке строительства невозможно.

Электрические сети на строительных площадках имеют специфические особенности, связанные с питанием электроэнергией передвижных строительных машин и механизмов. При изменении типа этих машин, их расположения и количества меняется и местоположение центров электрической нагрузки на территории строительства.

Основная особенность сетей на строительных площадках: они должны быть мобильны (подвижны), способны быстро следовать за изменениями электрической нагрузки.

В связи с этим на строительстве играют большую роль переносные участки электросетей, выполняемые преимущественно шланговыми кабелями, и так называемые инвентарные электротехнические устройства разного рода, легко перемещаемые с места на место.

К таким устройствам относятся:

- передвижные трансформаторные подстанции;
- передвижные и переносные распределительные шкафы;
- подключательные пункты;
- осветительные вышки;
- пусковые ящики для электродвигателей.

Переносные участки электросетей и инвентарные устройства в сочетании с временными воздушными линиями обеспечивают подачу электроэнергии в различные точки строительной площадки в короткие сроки и с минимальными затратами.

Все электрические сети сооружаются в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок (ПУЭ). К временным электросетям предъявляются те же требования, что и к постоянным. Строгое соблюдение этих требований при сооружении временных электросетей является необходимым условием обеспечения электробезопасности работающих на строительной площадке.

Воздушные линии

Опоры воздушных линий рекомендуется применять либо деревянные с железобетонными пасынками либо железобетонные. Использовать опоры, изготовленные целиком из дерева экономически нецелесообразно.

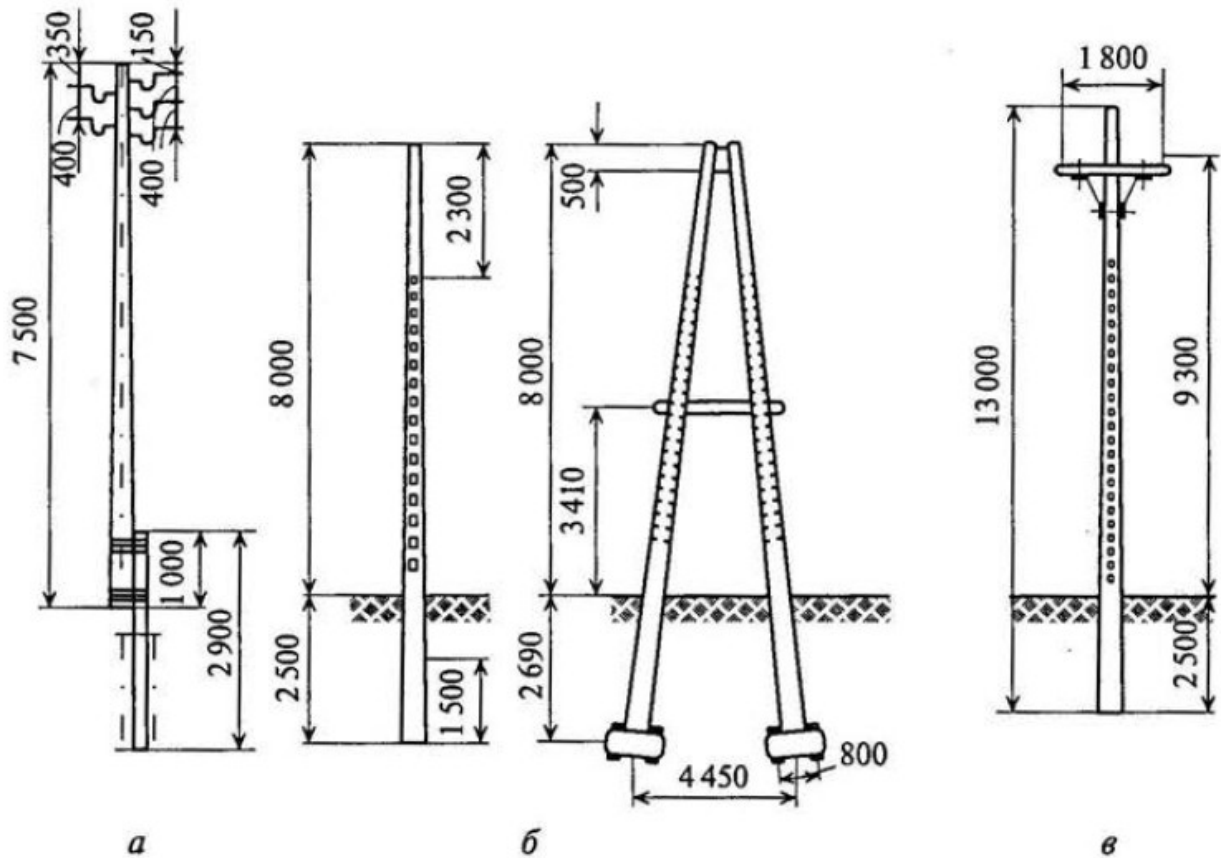


Рис. 3.2.1. Опоры воздушных линии:

- а – деревянная с железобетонным пасынком (приставкой), до 1 кВ;
- б – железобетонная, 0,4 кВ; в – железобетонная, 6...10 кВ

Для крепления проводов на опорах воздушных линий напряжением до 10кВ включительно применяют штыревые изоляторы; для линий напряжением 380/220 В - изоляторы типа ТФ, ШЛН, ШО (последние многорейковые для ответвлений); для линий напряжением 6..10 кВ – типа ШС.

Изоляторы к опорам крепятся: к стойкам опор – на крюках, а к траверсам (поперечным брускам) – на штырях. Для привязки проводов к изоляторам используют тонкую наволоку из того же материала, что и провод.

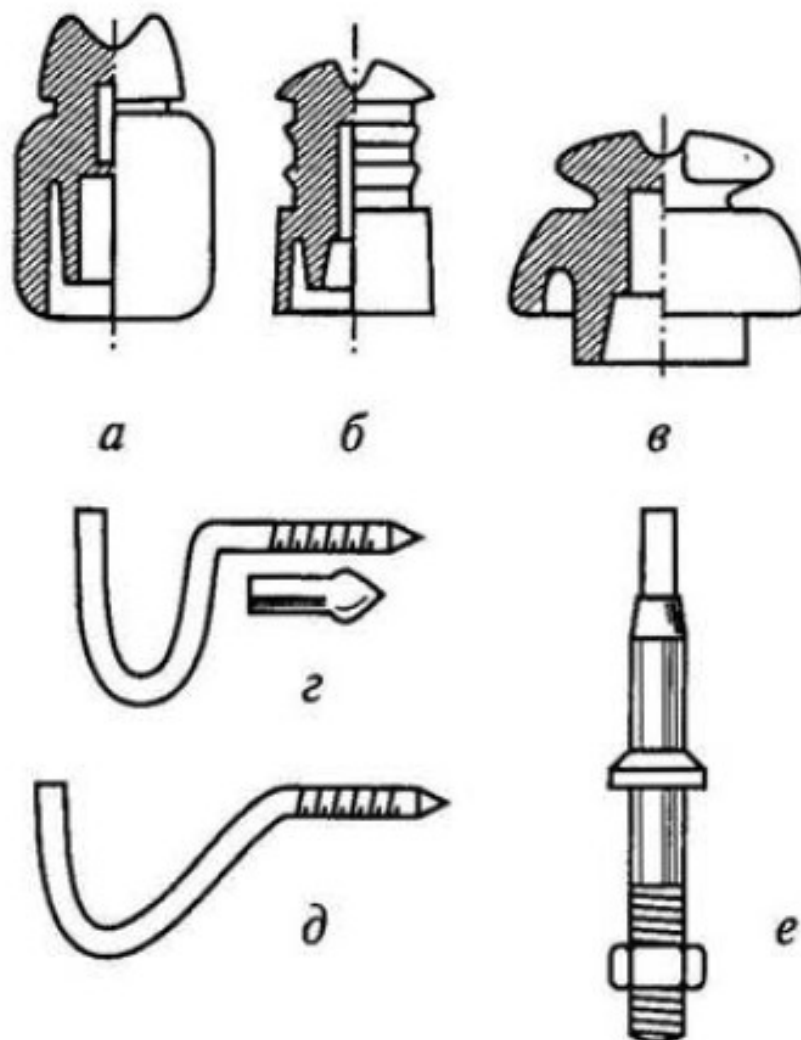


Рис. 3.2.2. Изоляторы и крюки:
 а – изолятор типа ТФ для ВЛ до 1 кВ; б – то же, типа ШО (для ответвлений);
 в – типа ШС для ВЛ 6...10 кВ; г, д – крюки; е – штырь

При строительстве воздушных линий должны соблюдаться установленные габариты – расстояния от низшей точки проводов до земли.

Для ВЛ напряжением 380/220 В в населенных местностях, на заводских территориях и строительных площадках - не менее 6 м, в ненаселённых местах - не менее 5 м; для ВЛ напряжением 6 ... 10 кВ эти расстояния соответственно увеличиваются до 7 и 6 м.

Электропроводки.

Постоянные электропроводки выполняют как открыто, так и скрыто - в трубах, в каналах, в пустотах строительных конструкций, под слоем штукатурки и т. п.

Временные электропроводки в строящихся зданиях, а также в производственных помещениях строительной площадки выполняются открыто, т. е. по поверхности строительных конструкций, по фермам и т.п. Провода прокладываются на изоляторах или, в сухих помещениях, на роликах.

Наружные электропроводки (проводки по стенам зданий и сооружений, по строительным лесам) и перекидки между близкорасположенными зданиями выполняются только на изоляторах. Изоляторы типа ТФ используются так же, как и на воздушных линиях. Устанавливают их на таких же крюках, якорях и штырях. Положение изоляторов при этом всегда должно быть вертикальным. Ролики устанавливают в любом положении, крепят их на шурупах, винтах (к металлу) и на специальных устройствах.

Провода привязывают к изоляторам и роликам мягкой оцинкованной стальной проволокой с подмоткой провода в месте крепления изоляционной лентой.

Подземные кабельные линии

По сравнению с воздушной линией подача энергии подземным кабелем является более надежной. Вместе с тем, подземный кабель надежен только при условии полной его сохранности, малейший прокол герметической оболочки кабеля (особенно кабеля с бумажной пропитанной изоляцией) неизбежно влечет за собой аварийный выход его из строя при эксплуатации.

Поэтому необходимо правильно организовать хранение кабеля до его прокладки (кабель поставляется намотанным на деревянных барабанах). Концы кабеля должны быть герметически заделаны.

Если необходимо отрезать на барабанах кусок кабеля, конец оставшегося кабеля должен быть немедленно запаян (или герметически закрыт каким-либо другим способом).

Недостатком кабельных линий является трудоёмкость их прокладки, а, следовательно, и их высокая стоимость.

3.2.2. Расчет электрической мощности, потребляемой строительной площадкой

Основой рационального решения комплекса технико-экономических вопросов электроснабжения является правильное определение ожидаемых электрических нагрузок. От этого зависят капитальные затраты в схеме электроснабжения, расход цветного металла, потери электроэнергии и эксплуатационные расходы.

Электрическая мощность, потребляемая электроприемником (электрическая нагрузка), меняется по часам суток и зависит от времени года: ночью она, как правило, значительно меньше, чем днем; в первую смену - несколько выше, чем во вторую; в зимние дни - в утренние часы и вечером - к нагрузке добавляется еще нагрузка от электрического освещения.

Потребность в электроэнергии на строительной площадке должна определяться в проектах организации строительства по физическим объемам работ и расчетным формулам.

Последовательность расчета электроснабжения строительной площадки включает:

1. определение потребителей электроэнергии и расчёт их мощности
2. выбор источников получения электроэнергии
3. составление рабочей схемы электроснабжения строительной площадки.

Исходными данными для расчета электрических нагрузок являются установленная мощность электроприёмников и характер изменения нагрузки.

Под установленной мощностью (P_y) групп потребителей понимают суммарную паспортную мощность всех электроприемников.

Например, установленная мощность башенного крана равна сумме номинальных мощностей всех его электродвигателей.

В результате расчета определяется максимальная (расчетная) нагрузка, которая служит основой для выбора сечения токоведущих частей, потерь мощности и напряжения в сетях, выбора мощности трансформаторов и компенсирующих устройств.

Для каждой группы электроприемников существует некоторое определенное соотношение между величинами расчетной (активной) (P_p) и установленной мощности. Это соотношение называется коэффициентом спроса:

$$K_c = \frac{P_p}{P_y}.$$

Зная установленную мощность и коэффициент спроса данной группы потребителей, можно определить расчетную (активную) мощность.

Активная мощность (Вт, кВт) – это полезная мощность, отбираемая устройством из электросети и преобразуемая в энергию любого иного вида (механическую, тепловую, электрическую, электромагнитную и др.):

$$P_p = P_y \cdot K_c.$$

Значения P_y , K_c определяют по справочной литературе.

Реактивная мощность (ВА, кВА) – это мощность или поток энергии, циркулирующий через реактивное сопротивление электрической цепи (емкостное или индуктивное).

Расчетную реактивную мощность (Q_p) определяют по формуле:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ находят для угла φ , косинус которого определяют из паспортных данных установки.

Полная расчетная мощность силовой нагрузки определяется как - полная мощность имеет практическое значение, как величина, описывающая нагрузки, фактически налагаемые потребителем на элементы подводящей электросети (провода, кабели, распределительные щиты, трансформаторные подстанции, ЛЭП), так как эти нагрузки зависят от потребляемого тока, а не от фактически использованной потребителем энергии.

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

Именно поэтому номинальная мощность трансформаторов и распределительных щитов измеряется в вольт-амперах, а не в ваттах)

3.2.3. Определение места расположения и выбор трансформаторной подстанции

Трансформаторные подстанции (ТП) служат для приема электроэнергии, преобразования напряжения и распределения электрической энергии на объекте.

По назначению различают следующие виды ТП:

- главные (повышающие и понижающие) подстанции, предназначенные для повышения напряжения линии электропередач при больших расстояниях. Понижающие или повышающие подстанции (главные понизительные подстанции - ГПП) служат пунктами приема электроэнергии от энергосистем и преобразования ее напряжения для дальнейшего распределения по крупным объектам. Высокое напряжение таких подстанций обычно может быть 1150 ... 30 кВ, низкое- 35 ... 6 кВ (чаще всего 10 кВ);

- распределительные, или просто трансформаторные подстанции (ТП), в которых электроэнергия, поступающая от ГПП, трансформируется с высшего напряжения 35 ... 6 кВ на низшее 660/380 или 380/220 В, на которое и рассчитано большинство потребителей.

На строительстве, однако, имеют место и мощные потребители электроэнергии по 6 и 10 кВ (землесосные снаряды, шагающие экскаваторы, компрессоры).

По конструктивному выполнению различают ТП:

- открытые,
- закрытые,
- передвижные

К открытым, оборудование которых устанавливается на открытом воздухе, относятся мачтовые подстанции с трансформаторами, установленными на деревянных или железобетонных опорах.

Открытые подстанции могут быть выполнены также с установкой трансформатора на помосте, а распределительного щита - в металлическом шкафу на уровне земли. На таких ТП предусматриваются ограждение и наружное освещение.

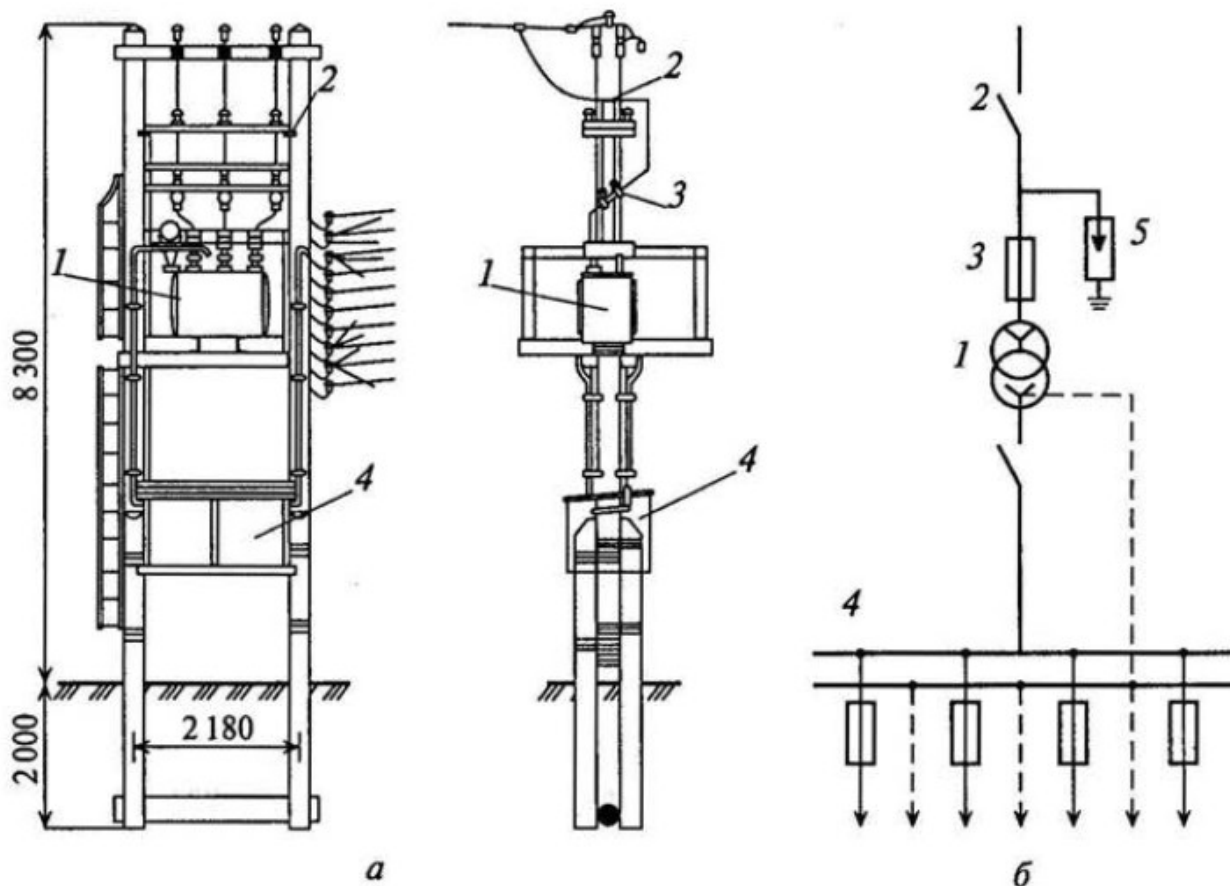


Рис. 3.2.3. Мачтовая открытая подстанция (а) и схема ТП с одним трансформатором (б):
 1 – трансформатор; 2 – разьдинитель; 3 – предохранитель; 4 – распределительный шкаф;
 5 – разрядник

Закрытые ТП располагаются в помещениях. В условиях строительства такими зданиями могут быть производственные объекты или специальные сооружения.

К закрытым трансформаторным подстанциям относятся также комплектные подстанции КТП или СКТП (строительные комплектные трансформаторные подстанции). Электрооборудование КТП размещается в металлическом корпусе. Ввод 6 ... 10 кВ может быть кабельным или воздушным.

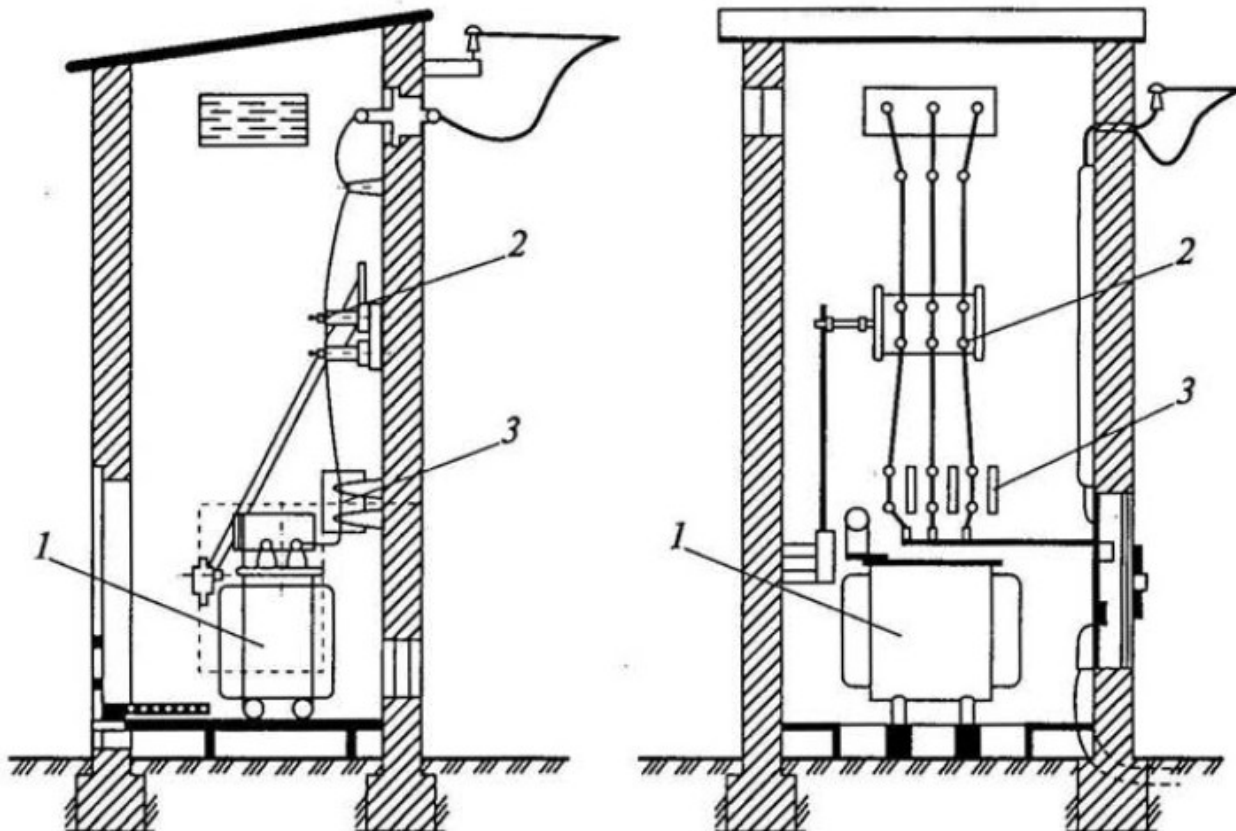


Рис. 3.2.4. Закрытая трансформаторная подстанция:
 1 – трансформатор; 2 – контакт замыкающий; 3 – предохранитель

Передвижные подстанции монтируются на авто- или железнодорожной платформе.

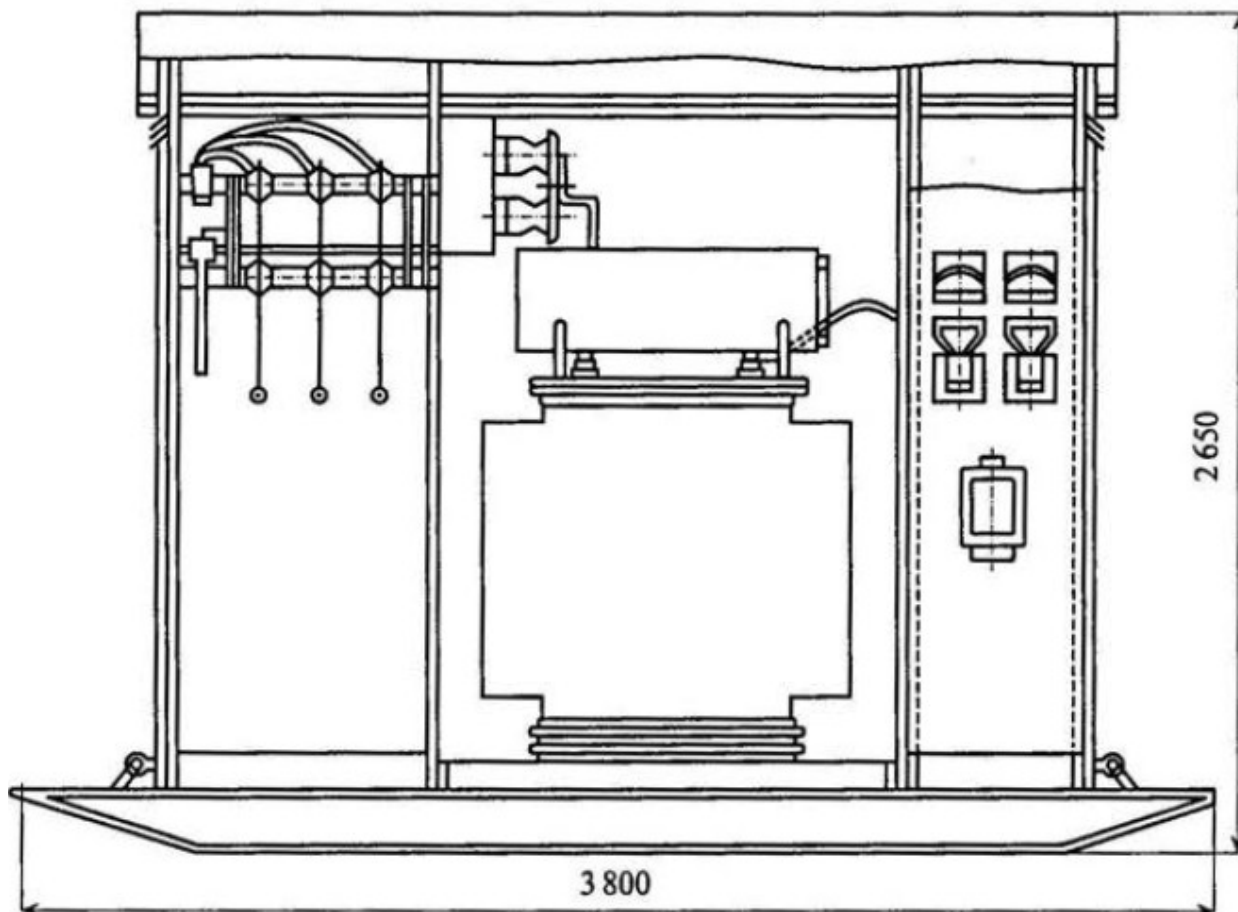


Рис. 3.2.5. Передвижная комплектная трансформаторная подстанция

Выбор типа, мощности ТП, ее расположение обуславливается величиной, характером электрических нагрузок и их пространственным расположением.

Расчет ведется в такой последовательности:

1) определяется расчетная мощность трансформатора:

$$S_T = \frac{\sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{\text{Э}})^2}}{B},$$

где P_p – расчетная активная мощность нагрузки, кВт; Q_p – расчетная реактивная мощность нагрузки, кВАр; $Q_{\text{Э}}$ – реактивная мощность энергосистемы (как правило $Q_{\text{Э}} = 0,33 \cdot P_p$); B – коэффициент загрузки трансформатора (для однострансформаторной подстанции $B = 0,95 \dots 1,0$).

Из справочных данных выбирают ближайший трансформатор равной или большей мощности.

2) определяется местоположение ТП

Как известно, правильный выбор центра нагрузок строительной площадки существенно снижает мощность электрических потерь и расход цветных металлов. Поэтому для правильного выбора наиболее удобного места расположения ТП строительной площадки производят определение центра нагрузок.

Координаты центра нагрузок находят по формулам:

$$X_0 = \frac{\sum_{j=1}^N (S_j \cdot X_j)}{\sum_{j=1}^N S_j};$$

$$Y_0 = \frac{\sum_{j=1}^N (S_j \cdot Y_j)}{\sum_{j=1}^N S_j}.$$

где X_j, Y_j – координаты центров нагрузки объектов на строительной площадке; S_j – полная мощность отдельных объектов, определяемая по формуле

$$S_j = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

Координаты центра нагрузки X_j и Y_j каждого потребителя электроэнергии на стройплощадке в отдельности принимаются в их геометрических центрах, а центр нагрузки башенного крана – расположенным в центре подкрановых путей. Наружное освещение, вследствие симметричного расположения в расчете, можно не учитывать.

ТП иногда может быть смещена от расчетного центра нагрузок, если это создает помехи технологическому процессу или попадает в опасную зону строительных механизмов. Окончательно месторасположение ТП принимают с учетом положения опасных зон, расположения подъездных путей и дорог.

3.2.4. Выбор сечения проводов

Правильный выбор сечения проводов и кабелей имеет весьма существенное значение. Сечение проводов с одной стороны должно быть выбрано достаточным для того, чтобы потеря напряжения при передаче необходимой мощности не превосходила допустимых

пределов и чтобы провод не перегревался под действием проходящего по нему тока. С другой стороны, сечение проводов должно быть выбрано экономно, с наименьшим расходом цветного металла.

Перегрев проводов током быстро приводит к выходу их из строя и перерыву в электроснабжении.

Выбор сечения проводов производят по следующим двум факторам:

- по допустимому нагреву проводов током (иными словами по их пропускной способности);
- по допустимой потере напряжения.

Из двух величин сечения, определенных по двум указанным факторам, выбирают большее, округляя его до ближайшего стандартного сечения.

При этом для воздушных линий решающим фактором оказывается, как правило, допустимая потеря напряжения, а для переносных шланговых кабельных линий, электропроводок и подземных кабельных линий небольшой протяженности определяющим признаком является их пропускная способность (по допустимому нагреву).

Расчетная сила тока для линии, питающей электропривод строительной машины с многодвигательным электроприводом на переменном токе (например, башенные краны), приближенно определяется по аналогичной формуле:

$$I_p = \frac{1000 \cdot P_{\Sigma \square} \cdot k_c}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta_d \cdot \cos \varphi},$$

где $P_{\Sigma \square}$ – суммарная номинальная мощность всех электродвигателей машины, кВт; k_c – коэффициент, учитывающий разновременность работы электродвигателей машины (коэффициент спроса для одной машины), принимаемый равным 0,7...0,8.

Далее по таблицам необходимо принять такое сечение, для которого бы допустимая сила тока по нагреву I_d была бы больше, чем расчетная сила тока.

Выбор сечения рекомендуется вести в таком порядке:

- для проводов воздушных линий определять сечение по допустимой потере напряжения и потом проверять по допустимому нагреву;
- для установочных, изолированных проводов, шланговых и других кабелей - сначала определять сечение по допустимому нагреву и затем проверять на допустимую потерю напряжения.

Выбор сечения по допустимому нагреву (допустимому току).

Длительно протекающая по проводнику сила тока, при которой устанавливается длительная допустимая температура нагрева, называется допустимой силой тока по нагреву I_d .

Величина его зависит как от марки провода или кабеля, так и от условий прокладки и температуры окружающей среды (приводится в таблицах).

Выбор сечения проводника по нагреву сводится к сравнению расчетного тока I_p с допустимым табличным значением для принятых марок провода или кабеля.

При выборе должно соблюдаться условие:

$$I_p \leq I_d.$$

Значение расчетной силы тока I_p для линии, питающей отдельный трехфазный электродвигатель определяется по формуле:

$$I_p = \frac{1000 \cdot P_H \cdot k_3}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta_d \cdot \cos \varphi},$$

где P_H - номинальная мощность электродвигателя, кВт; k_z - Коэффициент загрузки двигателя, принимаемый равным 0,85 0,90; U_H - номинальное напряжение двигателя (380 В); η_d - КПД двигателя (принимается равным 0,85 ... 0,92; для крановых двигателей 0,80 ... 0,85); $\cos\varphi$ - коэффициент мощности двигателя (принимается равным 0,80 ... 0,90; для крановых двигателей 0,70 ... 0,75).

Большие значения КПД и коэффициента мощности принимают для более крупных электродвигателей - порядка 30 кВт.

Потеря напряжения в трехфазовой линии определяется формулой:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos\varphi + x_0 \cdot \sin\varphi),$$

где ΔU – потеря напряжения, В; I – сила тока в линии, А; l – длина линии, км; r_0 и x_0 – активное и индуктивное сопротивление одного провода, Ом/км; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности электрической нагрузки; $\sin\varphi$ – тригонометрическая функция, по величине соответствующая значению коэффициента мощности ($\cos\varphi$).

В кабельных же линиях и в электропроводах индуктивное сопротивление мало, поэтому в расчете кабельных линий (шланговых и других) небольшой длины и электропроводок величиной x пренебрегают и расчет производится по формуле

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot r_0 \cdot \cos\varphi.$$

Если задаться допустимой потерей напряжения (5,5 ... 6,5 %), необходимое сечение определяют по формуле:

$$S = \frac{P \cdot l}{\Delta U} \cdot \frac{100\,000 \cdot p}{U_H^2},$$

где S – сечение провода, мм²; p – удельное активное сопротивление, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}}$ (для алюминия = 31,5); ΔU – допустимая потеря напряжения, %.

3.2.5 Выбор распределительных шкафов и предохранителей. Автоматические выключатели.

Сам по себе распределительный щит работать не может — ему необходима конструкция, которая будет обеспечивать удобный доступ, несложное управление и безопасную эксплуатацию. Такой конструкцией являются распределительные шкафы.

Шкаф распределительный — это внешняя оболочка распределительного щита. Шкаф распределительный силовой применяется для размещения в нем кабелей, счетчиков, предохранителей и автоматики. Они производятся в навесном и напольном варианте, в зависимости от типа помещения, где шкаф устанавливается.

Шкафы распределительные силовые типа ШРС И ШС предназначены для приёма и распределения электроэнергии, а также для защиты отходящих линий от коротких замыканий и перенапряжений. Подобные шкафы часто используются на стройках. Конструктивно представляют собой металлический корпус чаще напольного исполнения, в котором размещаются вводной рубильник-разъединитель и предохранители для защиты отходящих линий.

Электрический предохранитель – электрический аппарат, выполняющий защитную функцию. Предохранитель защищает электрическую цепь и её элементы от перегрева и возгорания при протекании высокой силы тока.

Автоматический выключатель – это механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальном состоянии цепи, а также

включать, проводить в течение заданного времени и автоматически отключать токи в указанном аномальном состоянии цепи, таких, как токи короткого замыкания.

Тема 3.3. Электронагрев в строительном производстве

3.3.1. Электронагрев в строительном производстве

- Электрические установки нагрева воды
- Электрические установки для обогрева
- Электропрогрев бетона
- Электроотопление грунта
- Электроотопление замороженных трубопроводов
- Нагрев и сушка при отделочных работах
- Разогрев битума
- Сушка древесины токами высокой частоты

3.3.2. Электропрогрев бетона

Методы электротермообработки бетона:

1) Электродный

а) сквозной (электроды помещаются вертикально в толщу бетона – для сборных и монолитных фундаментов, стен, блоков;)

б) периферийный (электроды закрепляются в опалубке в специальных щитах или термоактивном слое опилок, смоченных раствором хлористого натрия (NaCl) – для одностороннего прогрева конструкций толщиной более 20 см или двустороннего- до 20 см)

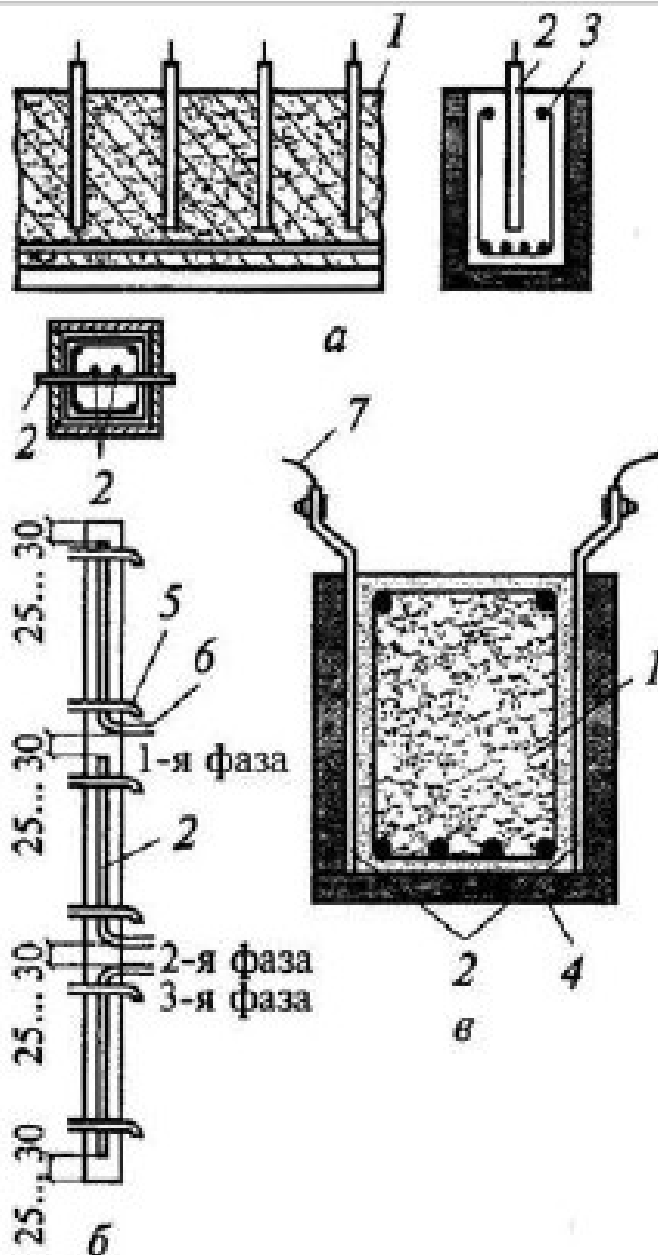


Рис. 3.3.1. Электродный метод электропрогрева бетона:

а – при помощи стержневых электродов; б – струнных; в – пластичных; 1 – бетон; 2 – электроды; 3 – арматура; 4 – опалубка; 5 – крюки; 6 – выходы для присоединения к питающей сети; 7 – провод

2) Индукционный (изделие помещается в переменное магнитное поле, образованное электрической обмоткой, и нагревается вихревыми токами – при прогреве сборных и монолитных конструкций: колонн, балок, рам и т.д.)

3) Инфракрасный прогрев высокотемпературными нагревателями (с помощью ламп накаливания, трубчатых, проволочных и других нагревателей – для прогрева монолитных конструкций сложной конфигурации и при сушке изделий)

4) Косвенный прогрев низкотемпературными нагревателями (с помощью трубчатых, плоских, струнных и других нагревателей, вмонтированных в опалубку или маты – для всех видов изделий).

5) Инфракрасный прогрев в камерах с излучательными поверхностями (при изготовлении плит и панелей).

6) Электропрогрев бетонной смеси вне формы (при котором смесь в горячем состоянии укладывается в форму – для возведения монолитных конструкций и при изготовлении изделий в заводских условиях.)

Прогрев электродным способом – только переменным током, т.к. постоянный ток вызывает необратимые хим. реакции, изменяющие структуру бетона. Сопротивление бетона

зависит от его удельного сопротивления, поверхности соприкосновения с бетоном и расстояния между электродами.

Электропроводность бетона, зависящая от содержания в нем влаги, по мере твердения бетона уменьшается. Для поддержания расчетного тепловыделения в бетон вводятся различные примеси CaCl, NaCl, ускоряющие твердение и уменьшающие сопротивление бетона.

Электроды: пластинчатые, полосовые, стержневые и струнные. Первые два вида – из кровельной стали, другие – прутки (5...12 мм). Пластинчатые электроды имеют вид пластин, целиком или частично закрывающих противоположные плоскости по толщине изделия. Струнные электроды закрепляются вдоль оси длинномерных конструкций.

Электропрогрев в зимнее время.

Замерзание бетона в процессе твердения снижает его прочность. При достижении бетоном 50...60% прочности замораживание не влияет на конечную прочность бетона. Исходя из этого выбирают режим прогрева.

Длительный режим – для массивных конструкций.

Ускоренный режим – для облегченных конструкций.

Промежуточный режим – для остальных конструкций.

Ступенчатый режим с несколькими изотермическими ступенями – для монолитных и сборных предварительно нагруженных конструкций.

Режим «изотермический прогрев и остывание» – прогрев осуществляется по методу электроразогрева вне формы (применяется для монолитных конструкций).

Саморегулирующийся режим с постоянным напряжением тока прогрева – для массивных конструкций).

Импульсный режим с попеременным отключением тока.

Электропрогрев бетона – при помощи трехфазных трансформаторов с масляным охлаждением с изменением напряжения ступенями.

Могут быть использованы и однофазные, в том числе сварочные трансформаторы.

Сварочные трансформаторы рассчитаны на повторно-кратковременный режим, и их непрерывная нагрузка при прогреве должна составлять 60 ... 70% номинальной.

Электропроводку от понизительных трансформаторов до места электропрогрева выполняют только изолированными проводами с креплением на деревянных опорах, на изоляторах или специальных переносных опорах. Во избежание потерь в линиях трансформаторы должны располагаться как можно ближе к электродам в месте прогрева бетона. Контакты соединительных проводов с электродами и с другими проводами обеспечиваются с помощью болтов или съемных зажимов.

По мере твердения бетона его сопротивление уменьшается. Для поддержания тока увеличивают напряжение на выходе трансформатора.

Измерение температуры бетона при электропрогреве производят термометрами в скважинах, заранее заготовленных, не менее трех в каждом элементе. В первые 5...6 ч температуру измеряют через каждый час, в последующие 18 ч – через 2 ч и в остальное время – 2 раза в смену.

Для электропрогрева бетона, кирпичной кладки, оштукатуренных поверхностей используются внешние источники тепла.

Электропрогрев изделий с использованием внешних источников тепла происходит за счет тепла, которое выделяется вне конструкции и передается бетону через промежуточные материалы (опилки, воду, воздух, пар, металлические стенки) или же за счет лучеиспускания. Внешний электропрогрев применяется только для изделий сложной конфигурации.

Прогрев бетона электрическими печами сопротивления

В электрических печах сопротивления, применяемых для косвенного прогрева бетона, нагревательным элементом служит нихромовая или фехрелевая проволока. Простейшая печь, предназначенная для электропрогрева бетонных и железобетонных изделий небольшой

толщины, представляет собой деревянный желоб параболической формы из шпунтованных досок толщиной 40 мм. Для прямого электропрогрева используют инвентарные электрощиты. Электрощит представляет собой раму из уголков, внутри которой на стальном листе толщиной 1 мм по слою тонкой изоляции уложена нагревательная стальная или нихромовая проволока. Сверху проволока изолирована листовым асбестом и слоем минеральной ваты толщиной 20 ... 30 мм, защищенным листом кровельного железа. Температура бетона регулируется включением в цепь разного числа электрощитов. Для прогрева железобетонных труб и колец используют цилиндрические печи с нагревательной спиралью, намотанной на кусок асбоцементной трубы.

Электропрогрев при помощи термоактивного слоя

Прогреваемую конструкцию покрывают слоем опилок, смоченных для повышения электропроводности слабым раствором соли (3 .. 5%). В опилки закладывают электроды из круглой или полосовой стали, включаемые в сеть. При включении тока опилки нагреваются и тепло передается конструкции. Для увеличения электропроводности опилок их после засыпки слегка прессуют.

Температура опилок поддерживается на уровне 80 ... 90 град. Необходимая мощность в период подъема температуры 7 ... 8 кВт на 1 м³ бетона, а расход электроэнергии на прогрев такого же объема бетона достигает 120 ... 160 кВт·ч.

Прогрев при помощи термоформ с нагревательными элементами

При электропрогреве сборных железобетонных изделий применяют панели из токопроводящей резины. Электропроводность такой резины создается за счет большого содержания в ней сажи. Нагревательные панели имеют средний токопроводящий слой толщиной 2 мм, в который заделаны электроды из латунной сетки или полосы, и два наружных слоя из обычной резины толщиной 0,5 мм.

Важным преимуществом этого способа является герметизация изделия в процессе его прогрева, исключающая испарение влаги из бетона.

Электропропаривание

Паровая среда в пропарочной камере создается с помощью электрических нагревательных элементов-спиралей или электродов, установленных в нижней части камеры. Мощность нагревательных устройств определяется из расчета 7 ... 8 кВт на 1 м³ прогреваемых изделий. К нагревателям подается сетевое напряжение. Для ускорения нагрева изделия рекомендуется при менять вместо воды 0,5 %-ный раствор поваренной соли.

Способ электропропаривания железобетонных изделий применяется для изделий сложной конфигурации.

Электропрогрев инфракрасными лучами.

При инфракрасном прогреве обеспечивается непосредственная передача тепловой энергии от источника излучения к нагреваемому изделию. В качестве источников инфракрасного излучения используются лампы накаливания типа ЗН мощностью 300 и 500 Вт при напряжении 127 и 220 В. Применяются также обычные лампы накаливания мощностью 200 ... 500 Вт.

Мощность, необходимая для электропрогрева бетона, являющаяся

одним из основных факторов, определяющих выбор электрооборудования и расчет питающей сети, зависит от модуля поверхности прогреваемой конструкции, температуры прогрева, температуры наружного воздуха, начальной температуры бетона, конструкции опалубки, эффективности утепления и особенно от скорости разогрева бетона.

В качестве источников питания для электропрогрева применяют, как правило, трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения, автотрансформаторы и индукционные регуляторы. Трансформаторы выбирают по мощности и напряжению.

Ориентировочный расчет расхода электроэнергии (W) и требуемой мощности (P) для электропрогрева бетона производится соответственно по формулам:

$$W = W_{уд} \cdot V; P = p \cdot V,$$

где $W_{уд}$ – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м³; p – удельная мощность на 1 м³ бетона, кВт/м³; V – объем бетона, м³.

Удельный расход электроэнергии $W_{уд}$ (кВт·ч/м³) при прогревании бетона различными способами

- Электродный способ прогрева = 80...120;
- Индукционный способ = 120...150;
- Инфракрасный способ = 100...200.

Таблица 3.3.1

Удельная мощность для электропрогрева бетонных конструкций, кВт/м³

| Температура воздуха, °С | Температура прогрева, °С | |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| | 40 | 80 |
| 0 | 7,7...9,3/15,6...18 | 8,3...10,4/16,2...19,2 |
| -5 | 8,2...10,1/16,1...18,9 | 8,7...11,2/16,6...20 |
| -30 | 8,6...10,9/16,5...19,7 | 9,1...12/15...25 |

Примечание. До черты указаны пределы удельной мощности при скорости повышения температуры при нагреве 10 °С/ч, после черты – 20°С/ч.

3.3.3. Электропрогрев грунта

Существует несколько способов электропрогрева грунтов, из которых наиболее удобным, дешевым и безопасным является электродный способ с непосредственным подключением установок электронагрева к существующим электросетям напряжением до 380 В.

Электродный способ заключается в том, что через грунт пропускается электрический ток напряжением 220 или 380 В. Электропроводность грунта зависит от степени его влажности, состояния и температуры, наличия в грунте растворов солей, кислот, от строения грунта и т. п. Сложность строения грунта и происходящие в нем физические явления и изменения, значительно влияют на его электрическое сопротивление.

Поверхность прогреваемого участка грунта засыпается на 15 ... 25 см слоем опилок, смоченных водным раствором соли (поваренной, хлористого кальция) или соляной кислоты, имеющими назначение первоначально проводить ток и утеплять грунт; даже при напряжении 380 А ток практически не проходит через мерзлый грунт.

При электропрогреве грунта горизонтальными электродами (рис. 3.3.2, а) тепло передается грунту главным образом от нагревающегося слоя опилок, а участие самого грунта в цепи тока относительно небольшое. Только незначительный верхний слой грунта, прилегающий к электродам, включается в электроцепь и является сопротивлением, в котором выделяется тепло.

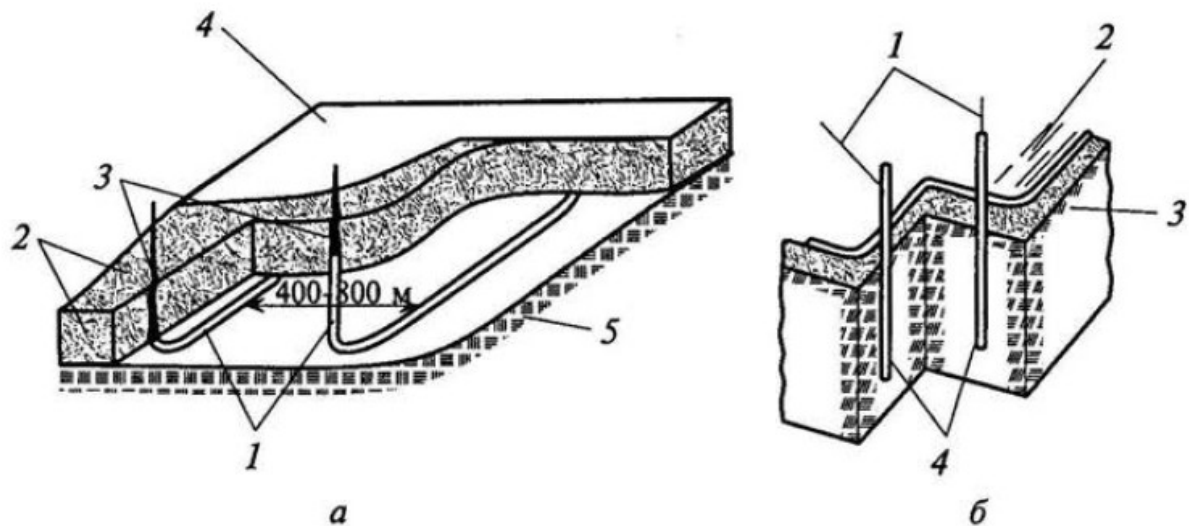


Рис. 3.3.2. Электропрогрев грунта:

- а – горизонтальными электродами: 1 – электроды; 2 – опилки, смоченные раствором соли; 3 – подводка электроэнергии; 4 – верхнее утепление (толь, маты и т.п.); 5 – грунт;
- б – вертикальными электродами; 1 – подвод электроэнергии; 2 – опилки с утеплителем; 3 – грунт; 4 – электроды

Горизонтальные электроды применяются при отоплении грунта на небольшую (до 0,5 ... 0,7 м) глубину, а также в тех случаях, когда вертикальные электроды неприменимы вследствие малой электропроводности грунта или невозможности забивки их в грунт, смешанный, например, с щебнем.

Отогрев вертикальными электродами (рис. 3.3.2, б) более эффективен и применяется при глубине мерзлого грунта более 0,7 м, а также при малом контакте между горизонтальными электродами и грунтом. В твердые грунты (глинистые и песчаные с влажностью более 15 ... 20%) электроды забиваются на глубину 20 ... 25 см, а затем осаживаются по мере оттаивания грунта. При оттаивании на глубину 1,5 м рекомендуется иметь два комплекта электродов - коротких и длинных. По мере оттаивания грунта короткие электроды заменяются длинными. Отогрев грунта на глубину 2 м и более следует производить ступенями с периодическим удалением оттаявших слоев (при выключенном токе). При вертикальных электродах грунт засыпается опилками, которые сначала служат побудителем к прогреву верхнего слоя грунта. По мере оттаивания слой грунта включается в цепь, после чего опилки только уменьшают теплопотери оттаиваемого грунта. Вместо опилок побудителем могут служить бороздки, пробитые зубилом между всеми электродами на глубину 6 см и залитые раствором соли.

В целях экономии электроэнергии и максимального использования мощности средняя положительная температура прогреваемого грунта не должна превышать 2 ... 5 град., в отдельных точках - 15 ... 20 град.; прогрев следует вести участками с перерывами в питании их током. Требуемая мощность и расход энергии при температуре грунта 15 град. в среднем на каждый кубический метр составляют 3,5 кВт при расходе электроэнергии 30 кВт·ч.

По сравнению с напряжением 380 В применение для электропрогрева мерзлого грунта электродов с напряжением 10кВ позволяет ускорить производство работ и сокращает их стоимость. Потребное количество электродов уменьшается, а расстояние между ними увеличивается. Сокращается объем подготовительных работ по погружению электродов в грунт. Основное количество тепла выделяется около электродов, остальная часть грунта прогревается до отрицательной температуры, близкой к нулю за счет тепловой энергии, аккумулированной около электродов. Грунт прогревается снизу вверх, за счет этого уменьшаются потери тепла в атмосферу. Прогрев мерзлого грунта до температуры -1,5 ... -0,5 град. благоприятные условия для его разработки землеройными механизмами, так как при полном оттаивании грунт примерзает к ковшу экскаватора или отвалу бульдозера. Кроме

того, увлажненный грунт, удаленный в отвал, смерзается, что вызывает дополнительные затраты при его погрузке в транспортные средства или при обратной его засыпке.

Техника безопасности при электропрогреве при напряжении до 10 кВ мерзлого грунта заключается в полном исключении попадания людей и животных в зону опасных шаговых напряжений.

Многократными измерениями установлены величины шаговых напряжений в грунтах при рабочем напряжении на электродах 10кВ; безопасное шаговое напряжение 40 В наблюдалось, как правило, на расстоянии 9 ... 10м от электродов, участвующих в прогреве грунта. Напряжения измерялись между вертикальными контрольными электродами, заглубленными в грунт на 1,5 м и на 5 ... 7 м.

Ограждение опасной зоны электропрогрева предусматривает расположение на расстоянии 15 м от крайних рабочих электродов многоярусного мягкого веревочного барьера, укрепленного на инвентарных деревянных опорах. Концы веревок крепятся к рычагам конечных выключателей, устанавливаемых на опорах. Конечные выключатели срабатывают при натяжении любой из горизонтальных веревочных преград, что вызывает отключение напряжения подводимого к установке электропрогрева грунта.

3.3.4. Нагрев и сушка при отделочных работах

При выполнении отделочных работ, включающих в себя штукатурные, малярные, плиточные, обойные работы, в зимнее время должна быть предусмотрена сушка стен. В первую очередь, должно быть использовано обогревание помещения по постоянной схеме. Если отопление помещения по постоянной схеме перед началом отделочных работ выполнить не удастся, применяют передвижные калориферы с вентилятором, тепловые пушки.

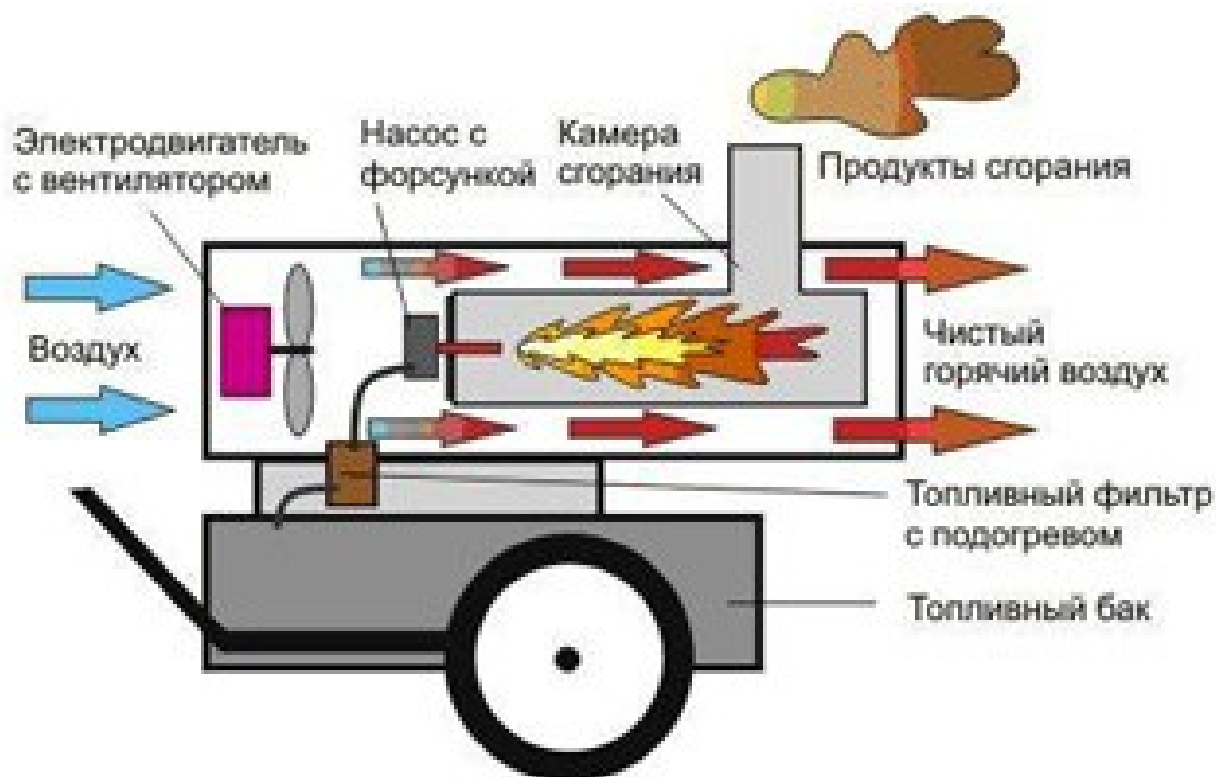


Рис. 3.3.3. Дизельная тепловая пушка

Мобильные теплогенераторы представляют собой передвижные установки для получения чистого горячего воздуха и подачи его в помещение как напрямую, так и посредством гибких вентиляционных рукавов. Специальная насадка позволяет распределять горячий воздух сразу в несколько помещений.

В отличие от тепловых пушек, мобильные теплогенераторы оснащаются полноценной жидкотопливной горелкой и теплообменником из нержавеющей стали. Это гарантирует в

несколько раз более длительный срок службы прибора по сравнению с тепловой пушкой, ремонтнопригодность и безотказность. Как следствие, мобильные теплогенераторы часто приобретаются прокатными организациями для сдачи в аренду строителям. Мощность мобильных теплогенераторов доходит до 200 кВт.

Широко применяют установки инфракрасного излучения. На рис. 3.3.4. показана сушильная установка. Она состоит из шести нагревателей 1, выполненных из керамических кордиеритовых стержней, на которые навита нихромовая спираль, трех параболических отражателей (рефлекторов) 2. Нагреватели

и отражатели представляют собой излучатель, закрытый кожухом 3. Излучающая часть установки крепится на штативе 6. Нагреватели с торцов имеют защитные ограждения. Излучатель может поворачиваться и фиксироваться стопором 5 на секторе 4. В комплект установки входит автоматический выключатель. Параболическая форма отражателей позволяет получать мощный направленный поток лучистой энергии. Потребляемая мощность установки 10 кВт.

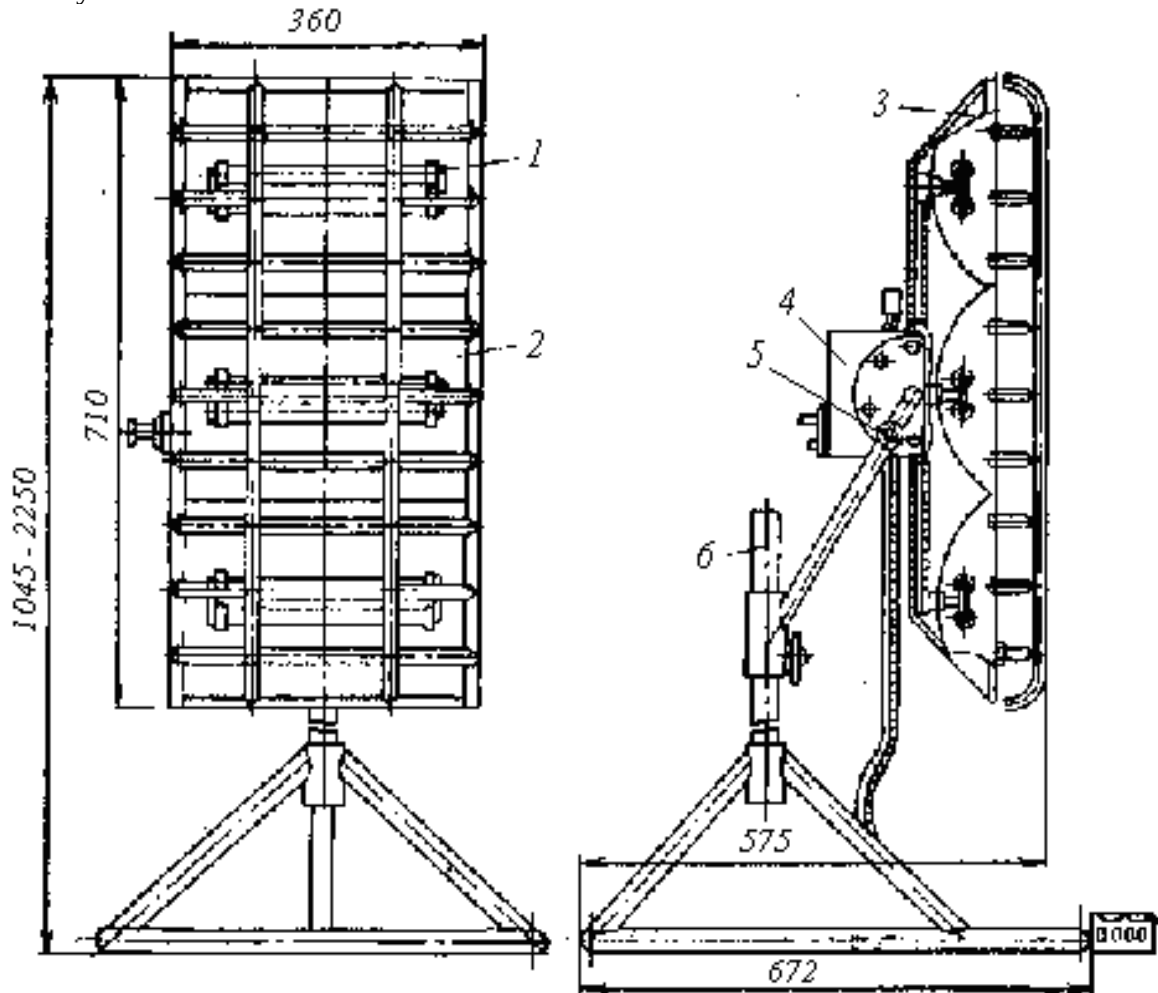


Рис. 3.3.4.. Сушильная установка с инфракрасным излучением:
1 – нагреватель; 2 – отражатель; 3 – кожух; 4 – сектор; 5 – стопор; 6 – штатив

3.3.5. Разогрев битума

До недавнего времени при производстве фундаментов, крыш битум разогревался в котлах, нагреваемых сжиганием топлива. В настоящее время широко применяются электробитумоварки с трубчатыми и индукционными электронагревателями. Индукционная битумоварка состоит из стального цилиндрическо-го корпуса с двумя днищами. Толщина стенок и днищ 8 мм. Корпус располагается горизонтально. Вокруг корпуса намотана обмотка из алюминиевого провода сечением 16 мм², являющаяся индуктором, который вызывает нагрев корпуса вихревыми токами и расплавление битума. При напряжении 380 В и токе 30 А битум плавится через 1 ч.

Битумоварка позволяет автоматизировать процесс нагрева и поддержания температуры.

3.3.6. Сушка древесины токами высокой частоты

Нагрев материалов можно осуществить с помощью нагревательных установок за счет конвективной передачи теплоты. Однако прямой электрический нагрев материала ускоряет процесс, например, сушки древесины. Под диэлектрическим нагревом понимается нагрев диэлектриков в электрическом поле конденсатора за счет токов смещения. Принцип диэлектрического нагрева материалов приведен на рис. 3.3.5. Нагреваемый материал, представляющий собой диэлектрик, помещается в электрическое поле конденсатора. Питание осуществляется током с частотой 20–40 МГц и выше. Токи высокой частоты (ТВЧ) формируются генератором ТВЧ. Использование электрического поля высокой частоты снижает потери. Энергия переменного электрического поля преобразуется в тепло в диэлектрике и осуществляет нагрев материала. Для поддержания стабильного технологического режима осуществляется изменение частоты или напряжения, подводимого к конденсатору. Обкладками конденсатора служат металлические сетки, проложенные между слоями древесины.

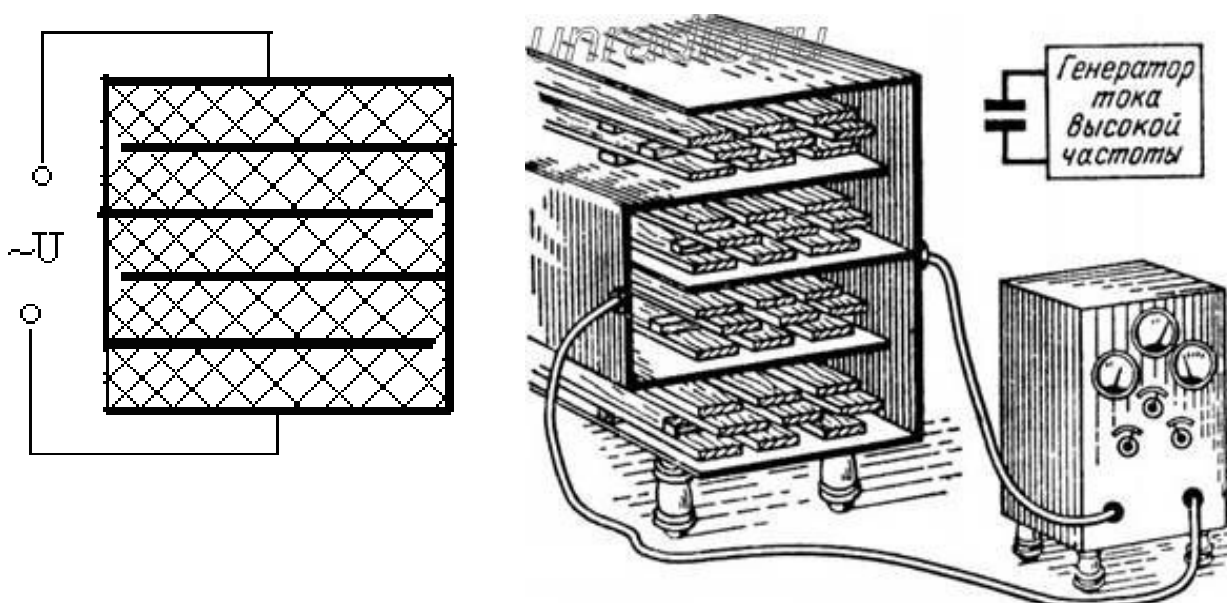


Рис. 3.3.5. Принцип диэлектрического нагрева при сушке древесины

Сушка в электрическом поле ТВЧ отличается высокой интенсивностью.

В отличие от других способов передачи тепла нагрев древесины в высокочастотном поле происходит равномерно и сразу по всему объему. Энергия, потребляемая древесиной, превращается в теплоту и расходуется на нагревание материала и на испарение из него влаги. Вследствие теплообмена с окружающей средой температура на поверхности древесины оказывается значительно ниже, чем внутри. В связи с этим возникает температурный перепад, обеспечивающий значительную интенсификацию процесса сушки по сравнению с обычной конвективной сушкой.

При температуре внутри материала выше 100° дополнительно к обычному явлению передачи влаги на поверхность древесины, вследствие влагопроводности, влага переносится в парообразном состоянии. Таким образом, продолжительность сушки может быть сокращена по сравнению с камерной сушкой в десятки раз.

При диэлектрической сушке повышается качество сушки древесины.

Основной недостаток диэлектрической сушки – сравнительно высокая стоимость расходуемой электроэнергии. Однако при определенных условиях (сушка заготовок из твердых лиственных материалов, предварительно высушенных атмосферной сушкой до

влажности 30%) диэлектрическая сушка может быть экономически более выгодной, чем камерная.

3.3.7. Электроотогрев замороженных трубопроводов

Отогревание трубопроводов осуществляют прямым и косвенным нагревом. При прямом нагреве электрический ток пропускают по стенкам труб. Если стыки раструбного трубопровода залиты цементом или другим изолирующим материалом, нарушающим непрерывность электрической цепи, применяют косвенный нагрев, при котором отогревают прилегающий к трубопроводу грунт.

При прямом нагреве применяют трансформаторы со вторичным напряжением 30–65 В, мощностью 30–40 кВА. В связи с тем, что трансформатор работает на воздухе при низкой температуре, он допускает работу с перегрузкой.

Присоединение трансформатора к отогреваемому трубопроводу выполняется гибким медным проводом (сварочным). Для этого над трубой откапываются ямы. Трубу в месте присоединения провода зачищают от краски и ржавчины до металлического блеска. Провод присоединяют к трубе стальными зажимами. Ямы засыпаются опилками. Трансформатор включается в сеть напряжением 220, 380 В. Нагрев трубопровода осуществляется благодаря протеканию по нему электрического тока от трансформатора.

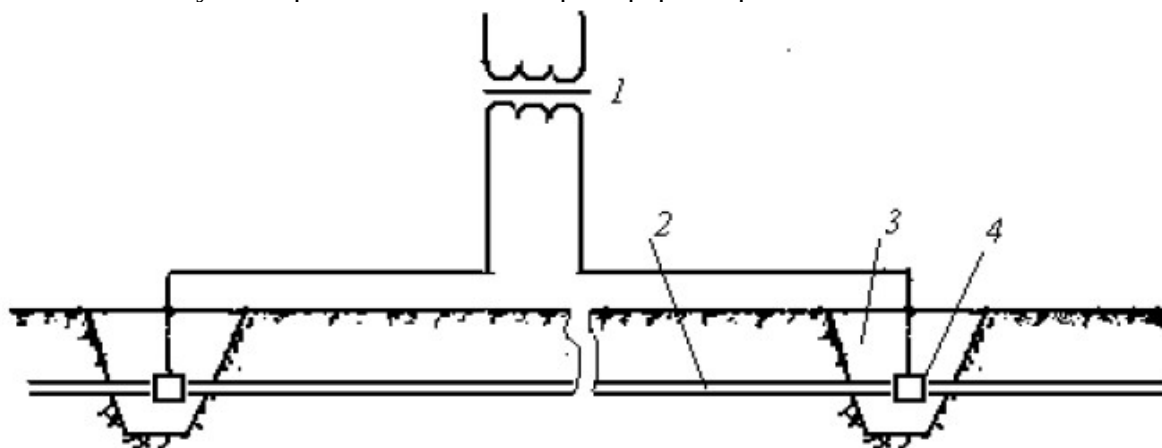


Рис. 3.3.6. Схема электрического отогревания замороженного трубопровода:
1 – трансформатор; 2 – трубопровод; 3 – засыпка опилками; 4 – контактный зажим

3.3.8. Электросварка и термическая обработка металлов

В строительном производстве широко используется электрический нагрев – повышение температуры тел с использованием электрической энергии.

Нагрев тел осуществляется на основе принципа выделения тепла либо на участках электрической цепи, обладающих наибольшим сопротивлением либо в электрическом поле. Электрический нагрев используется при сварке и термообработке металлов. Электрическая дуговая сварка применяется при изготовлении и монтаже металлических и железобетонных конструкций, в заготовительных цехах и на строительных площадках.

Термическая обработка металлов с использованием электрической энергии применяется при изготовлении и ремонте инструмента и приспособлений в механических цехах и мастерских для производства строительных и монтажных работ на СП и цехах заводов по производству железобетонных конструкций.



3.3.7. Виды, применяемых сварок

Рис.

При нагреве металлов используются прямой электроконтактный и косвенный методы нагрева. Электроконтактный способ применяется для нагрева металлических тел, обладающих электронной проводимостью. Примерами электроконтактного нагрева могут быть сквозной нагрев заготовок при их обработке давлением, контактная сварка и прогрев трубопроводов. Косвенный нагрев металла осуществляется, например, в индукционных печах.

Электрическая сварка

Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения деталей машин, конструкций и сооружений при их местном или общем нагреве.

Электрическая сварка – сварка, при которой нагрев осуществляется под действием электрического тока. Электрическая сварка может быть дуговой и контактной.

Электродуговая сварка

Электрическая сварка, при которой нагрев осуществляется под действием электрической дуги, называется электродуговой сваркой. Электрическая дуга представляет электрический разряд в газах, возникающий между электродами при определенных условиях. При возникновении электрической дуги газы, занимающие пространство между электродами ионизируются. Температура электрической дуги может достигать 7000 град., при этом электрическая дуга выделяет большое количество световой энергии. Электрическая дуга используется как для сварки, так и для резки металлов. Электродуговая сварка выполняется на переменном и постоянном токе. В процессе сварки свариваемые металлы нагреваются до температуры плавления, а при остывании расплава получается прочное соединение. Электрическая сварка делится на ручную и автоматическую. Сварка электрической дугой производится на открытом воздухе, под флюсом в парах металла и флюса и в защитных газах (аргон, гелий).

При сварке и резке металлов применяются угольные и металлические электроды.

Электроды делят на плавящиеся и неплавящиеся.

Плавящиеся электроды представляют собой металлические стержни с покрытием, прутки, проволоку, пластины. Неплавящиеся электроды выполняют в виде вольфрамовых и углеродистых стержней для контактной сварки.

Сварочные установки могут быть стационарными и передвижными.

Стационарная установка представляет собой сварочный пост, укомплектованный источником питания, оборудованием и приспособлениями для сварки.

Передвижные сварочные установки должны быть удобными для их перемещения. Как правило, их размещают на тележках в виде агрегатов.

В качестве источника электрической дуги могут применяться сварочные трансформаторы на переменном токе, сварочные выпрямители и сварочные генераторы на постоянном токе.

Устойчивость сварочной дуги переменного тока по сравнению с дугой постоянного тока снижается в связи с переходом переменного тока через нуль с частотой 50 Гц.

Электрическая дуга зажигается при напряжении 60–70 В и устойчиво горит при напряжении 20–30 В. Сварочный ток зависит от толщины или диаметра свариваемых деталей и находится в пределах 10–400 А.

Контактная сварка

Электрическая контактная сварка основана на принципе выделения тепла на участках электрической цепи, обладающих наибольшим сопротивлением, т.е. в месте стыка свариваемых деталей.

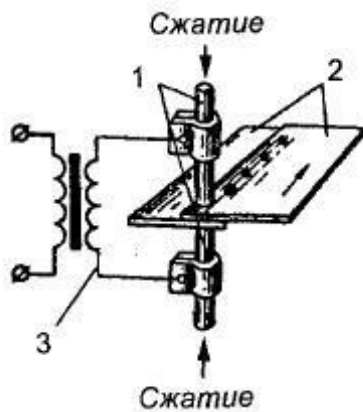


Рис. 3.3.8. Контактная точечная сварка:
1 – электроды, подводящие сварочный ток к свариваемым изделиям; 2 – свариваемые изделия с нахлесточным соединением; 3 – сварочный трансформатор

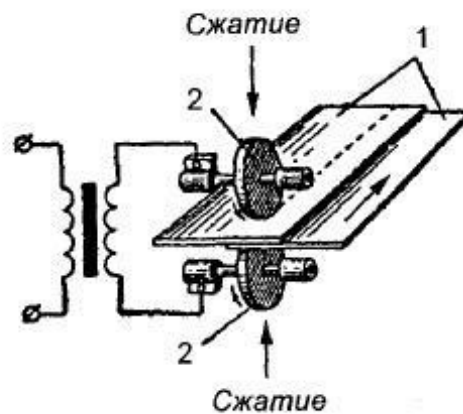


Рис. 3.3.9. Контактная шовная (роликовая) сварка:

1 – изделие; 2 – токоподводящие вращающиеся ролики (подача изделия вдоль шва выполняется вращающимися роликами)

3.3.9. Электрическое освещение на строительных площадках

Правильная организация электрического освещения на строительной площадке имеет существенное значение для успешного выполнения строительно-монтажных работ, особенно в осенне-зимний период при сокращении светлого времени суток. Недостаточная освещенность рабочего места снижает производительность труда, ухудшает качество работы и, кроме того, во многих случаях является причиной травматизма (несчастных случаев).

Правильно организованное освещение, прежде всего, должно создавать достаточную освещенность для того, чтобы глаз человека мог легко, не утомляясь, различать все детали, необходимые при данной работе. Кроме того, освещение должно быть по возможности равномерным, без резких теней; источник света не должен быть виден непосредственно глазом (для того чтобы не было слепящего действия).

Освещение на строительной площадке делится на общее, местное и комбинированное.

Общее освещение подразделяется:

- равномерное (освещается все помещение или наружная площадка, светильники устанавливаются равномерно),
- локализованное устанавливается на отдельных участках помещения или наружной территории, создается большая освещенность. Устанавливаются дополнительные светильники или они размещаются более часто.

При местном освещении – освещаются только рабочие поверхности.

При комбинированном освещении применяется и общее и местное.

Дополнительно устраивается аварийное освещение, обеспечивающее минимальную освещенность. Для аварийного освещения устраивается отдельное питание.

В качестве источников света в строительстве применяют:

- лампы накаливания;
- газоразрядные лампы;
- ртутные лампы низкого давления – люминесцентные;
- ртутные лампы высокого давления - лампы ДРЛ.

В лампах накаливания световая энергия получается за счет нагревания тонкой вольфрамовой нити проходящим по ней электрическим током. Нить помещена в стеклянную колбу, заполненную инертным газом; имеются также конструкции ламп накаливания, у которых нить помещена в вакууме - из колбы откачен воздух. Раскаленная (при температуре порядка 3000 град.) нить ярко светится. Колба лампы укреплена на металлическом резьбовом цоколе, с помощью которого лампа ввертывается в патрон, служащий для ее подсоединения к проводам электросети. Лампы накаливания выпускают на напряжения 220, 127, 36 и 12 В.

На стройках, как правило, применяют лампы на 220 В. Их выпускают мощностью от 15 до 1500 Вт. Лампы накаливания для напряжений 36 и 12 В выпускают мощностью от 11 до 100 Вт.

При понижении напряжения против номинального световой поток и светоотдача ламп накаливания резко снижаются. Повышение напряжения сверх 105% номинального значительно уменьшает срок службы лампы.

Действие газоразрядных ламп основано на электрическом разряде в среде разреженного газа.

Люминесцентная лампа (рис. 3.3.10) представляет собой длинную (порядка 450 ... 1500 мм) стеклянную трубку с двумя цоколями на концах, заполненную разреженным газом - аргоном и небольшим количеством паров ртути. На внутреннюю поверхность трубки нанесен слой специального состава - люминофора. В цоколи лампы впаяны вольфрамовые электроды. При включении лампы в электрическую сеть между ее электродами в парах ртути в трубке возникает газовый разряд и невидимое ультрафиолетовое излучение, под воздействием которого люминофор начинает светиться - дает яркий видимый свет.

Люминесцентные лампы включаются в сеть с помощью специальных пускорегулирующих устройств (ПРУ).

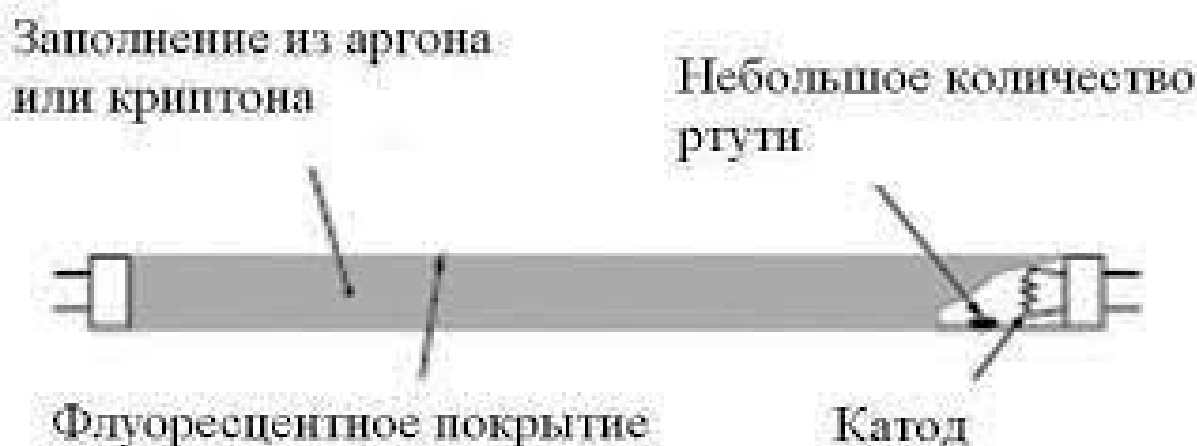


Рис. 3.3.10. Устройство люминесцентной лампы

Люминесцентные лампы выпускают мощностью в 15, 20, 30, 40 и 80 Вт, пяти типов по цветности (окраске) излучаемого света:

ЛДЦ - дневного света, предназначенные для правильной светопередачи;

ЛД - дневного света;

ХБ - холодного белого света;

ЛТБ - теплого белого света

ЛБ - белого света.

По светоотдаче на 1 Вт мощности все люминесцентные лампы значительно (в 2,5 .. 4 раза) превосходят лампы накаливания. Наибольшей светоотдачей обладают лампы белого света (ЛБ), они рекомендуются для освещения всех производственных помещений, кроме тех, в которых требуется правильное различение цветовых оттенков.

Ртутная лампа высокого давления типа ДРЛ по внешнему виду похожа на крупную лампу накаливания. Ее устройство показано на рис. 3.3.11, б. В отличие от люминесцентной лампы в лампе ДРЛ электрический разряд в ртутных парах происходит не во всей колбе, а в маленькой трубке («горелке») из кварцевого стекла, прозрачного для ультрафиолетовых лучей (рис. 10.1, б). Под влиянием ультрафиолетового излучения горелки специальный люминофор, нанесенный на внутреннюю поверхность колбы, дает яркий, слегка зеленоватый свет (близкий к белому).

Лампы ДРЛ имеют резьбовой цоколь и ввинчиваются в те же патроны, что и лампы накаливания. Однако в сеть они включаются так же, как и люминесцентные, по особой схеме

с помощью специальных пускорегулирующих аппаратов (ПРА), содержащих дроссель, конденсаторы, разрядник и др.

Выпускают лампы ДРЛ мощностью 250, 500, 750 и 1000 Вт. Они являются высокоэкономичными источниками света.

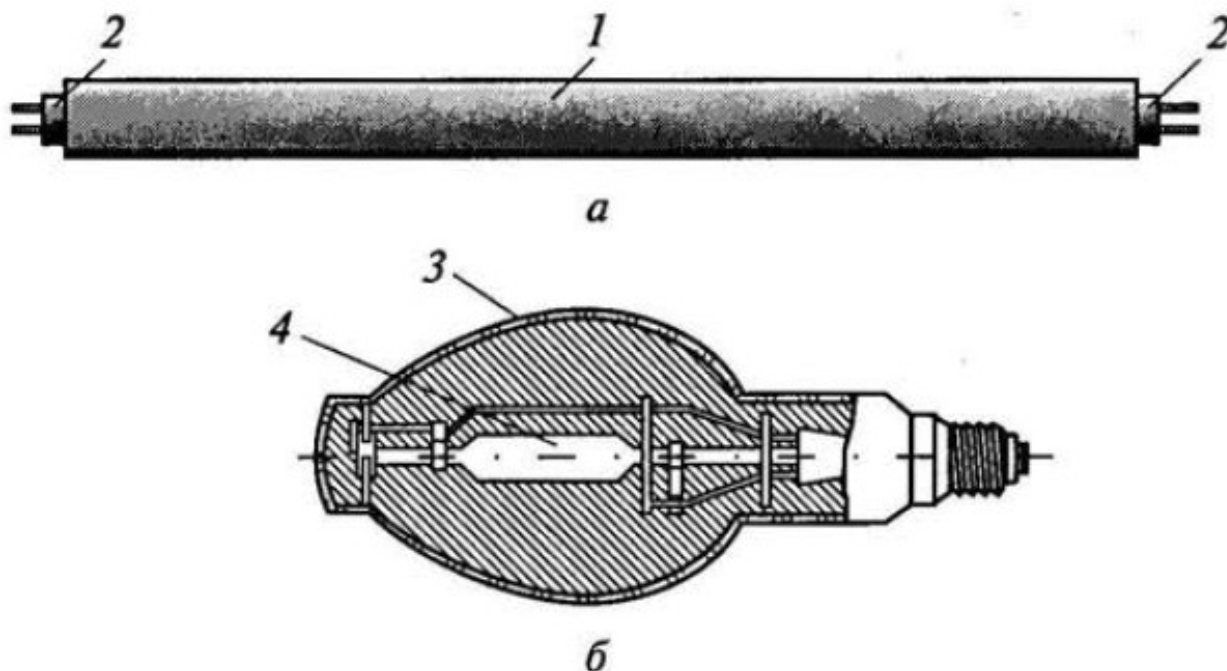


Рис. 3.3.11. Газоразрядные лампы:

а – люминесцентная; б – ртутная; 1 – трубка; 2 – цоколь; 3 – баллон лампы; 4 – горелка из кварцевого стекла

Для создания необходимых условий освещения служит осветительная арматура.

Осветительная арматура вместе с помещенной в нее лампой называется светильником.

4.3. Лабораторные работы

| <i>№ п/п</i> | <i>Номер раздела дисциплины</i> | <i>Наименование тем Лабораторных работ</i> | <i>Объем (час.)</i> | <i>Вид занятия в интерактивной , активной, инновационной формах, (час.)</i> |
|------------------|---|--|-------------------------|---|
| 1 | 1. | Пассивные элементы электрических цепей | 1 | - |
| 2 | 1. | Исследование линейных электрических цепей постоянного тока | 2 | - |

| | | | | |
|--------------|----|--|-----------|--------------------|
| 3 | 1. | Исследование амплитудных и фазовых соотношений в последовательной RLC – цепи | 2 | - |
| 4 | 1. | Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи синусоидального тока при соединении фаз приемника по схеме «звезда». | 2 | - |
| 5 | 2. | Исследование однофазного трансформатора | 2 | - |
| 6 | 2. | Исследование асинхронного двигателя | 2 | - |
| 7 | 3. | Снятие времятоковой характеристики автоматического воздушного выключателя | 3 | Дискуссия (2 часа) |
| 8 | 3. | Работа магнитного пускателя в нереверсивной схеме управления асинхронным двигателем | 3 | Дискуссия (2 часа) |
| ИТОГО | | | 17 | 4 |

4.4. Семинары/ практические занятия

| <i>№ п/п</i> | <i>Номер раздела дисциплины</i> | <i>Наименование тем практических занятий</i> | <i>Объем (час.)</i> | <i>Вид занятия в интерактивной , активной, инновационной формах, (час.)</i> |
|------------------|---|--|-------------------------|---|
| 1 | 1. | Решение задачи постоянного тока, используя законы Кирхгофа | 2 | |
| 2 | 1. | Решение задачи постоянного тока методом двух узлов | 1 | |
| 3 | 1. | Решение задачи постоянного тока методом контурных токов | 1 | |
| 4 | 1. | Решение задачи однофазного синусоидального тока, используя законы Кирхгофа | 2 | |
| 5 | 1. | Решение задачи трехфазной цепи по схеме соединения звезда | 2 | |
| 6 | 1. | Решение задачи трехфазной цепи по схеме соединения звезда с нейтральным проводом | 1 | |
| 7 | 1. | Решение задачи трехфазной цепи по схеме соединения треугольник | 2 | |
| 8 | 2. | Решение задачи по теме «Трансформаторы» | 2 | |
| 9 | 2. | Выбор типа и мощности электрического двигателя | 2 | |
| 10 | 2. | Выбор типа и мощности электрического двигателя | 2 | |
| ИТОГО | | | 17 | |

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

| <i>№, наименование разделов дисциплины</i> | <i>Компетенции</i> | <i>Кол-во часов</i> | <i>Компетенции</i> | | | | <i>Σ комп.</i> | <i>t_{ср}, час</i> | <i>Вид учебных занятий</i> | <i>Оценка результатов</i> |
|--|--------------------|---------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | <i>ОПК</i> | <i>ПК</i> | | | | | | |
| | | | | <i>1</i> | <i>6</i> | <i>8</i> | | | | |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> | |
| 1. Электротехника | | 31 | + | - | - | - | 1 | 31 | Лк, ЛР, ПЗ, СР | зачет |
| 2. Электрические машины | | 21 | - | + | - | - | 1 | 21 | Лк, ЛР, ПЗ, СР | зачет |
| 3. Электроснабжение | | 20 | - | - | + | + | 2 | 20 | Лк, ЛР, СР | зачет |
| всего часов | | 72 | 31 | 21 | 10 | 10 | 4 | 18 | | |

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Емцев А.Н. Аппараты и схемы электрической части станций и подстанций: учебное пособие / В.А. Фадеев. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – 254 с. (74-96, 126-130)
2. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с. (стр. 253-281)

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

| № | <i>Наименование издания</i> | <i>Вид занятия (Лк, ЛР)</i> | <i>Количество экземпляров в библиотеке, шт.</i> | <i>Обеспеченность, (экз./ чел.)</i> |
|----------------------------------|---|---------------------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Основная литература | | | | |
| 1 | Емцев А.Н. Аппараты и схемы электрической части станций и подстанций: учебное пособие / В.А. Фадеев. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – 254 с. | Лк, ЛР | 49 | 1,0 |
| 2 | Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с. | Лк, ЛР, ПЗ | 219 | 1,0 |
| 3 | Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с. | Лк, ЛР, ПЗ | 98 | 1,0 |
| Дополнительная литература | | | | |
| 4 | Иванченко Г.Е. Электрооборудование в строительстве: учебное пособие / Г.Е. Иванченко. – М.: Высшая школа, 1986. – 176 с.: ил. – Б.ц. | Лк | 45 | 1,0 |
| 5 | Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с. | Лк, ЛР, ПЗ | 57 | 1,0 |
| 6 | Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 8-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2016. - 730 с. http://e.lanbook.com/book/71749 | Лк, ЛР, ПЗ | 6+ ЭР | 1,0 |
| 7 | Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов / Б.И. Кудрин. – 2-е изд. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с. | Лк | 30 | 1,0 |
| 8 | Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с. | Лк, ПЗ | 6+ ЭР | 1,0 |

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение обучающимися учебной дисциплины «Электроснабжение с основами электотехники» рассчитано на один семестр.

Занятия лекционного типа

В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные, наиболее сложные понятия темы, а также связанные с ней теоретические и практические проблемы, дает рекомендации на выполнение самостоятельной работы. В ходе лекций обучающимся рекомендуется:

- вести конспектирование учебного материала;
- обращать внимание на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации по их применению;
- задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций.

В рабочих конспектах желательно оставлять поля, на которых во внеаудиторное время можно сделать пометки из учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся, дополняющего материал прослушанной лекции, а также пометки, подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. Для успешного

овладения курсом необходимо посещать все лекции, так как тематически отдельные темы курса взаимосвязаны между собой. В случаях пропуска занятия обучающемуся необходимо самостоятельно изучить материал и ответить на контрольные вопросы по пропущенной теме во время индивидуальных консультаций.

Лабораторные занятия

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать все указания преподавателя или учебно-вспомогательного персонала. Перед работой необходимо ознакомиться с методическими указаниями, оформить необходимые таблицы в тетради. После всех произведенных расчетов и выполненных графиков необходимо оформить отчет.

Самостоятельная работа. Подготовка к зачету

Подготовка к зачету предполагает:

- изучение основной и дополнительной литературы;
- изучение конспектов лекций;

Перечень вопросов к зачету представлен в приложении 1 п. 2. Баллы за зачет выставляются по критериям, представленным в приложении 1 п. 3.

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа № 1

Пассивные элементы электрических цепей

Цель работы: ознакомление с устройством, параметрами и свойствами резистивных, емкостных и индуктивных элементов; экспериментальная проверка принципов преобразования пассивных двухполюсников.

Краткие теоретические сведения

Всем пассивным элементам присущи следующие свойства:

- если по элементу протекает ток, то элемент поглощает электрическую энергию, необратимо преобразуя её в тепловую энергию;
- ток, протекающий по элементу, является причиной образования внутри его и в окружающем пространстве магнитного поля, в котором происходит накопление некоторого количества энергии;
- если к элементу приложено напряжение, то в нем образуется электрическое поле, в котором также накапливается определенное количество энергии.

Различным элементам эти свойства присущи в различной степени: резистивным присуще в основном преобразовывать электрическую энергию в тепловую, индуктивным - образовывать магнитные, а емкостным - электрические поля. Идеальными элементами принято называть такие, которым присуще только одно из названных свойств. Соответственно различают идеальные резистивные элементы (резисторы), идеальные индуктивные (катушки индуктивности) и идеальные емкостные элементы (конденсаторы).

К идеальным резистивным элементам можно отнести нагревательные элементы, лампы накаливания, а также резисторы, используемые в радиоэлектронной аппаратуре.

Основным параметром таких элементов является сопротивление, поскольку количество поглощаемой им энергии пропорционально величине сопротивления

$$W_R = R \cdot I^2 \cdot t$$

К индуктивным элементам относятся обмотки электрических машин, электромагнитов, трансформаторов, катушки индуктивности, дроссели. Величина энергии, сосредоточенной в магнитном поле индуктивного элемента, определяется величиной тока и индуктивностью элемента L , которая является основным его параметром

$$W_M = L \cdot \frac{I^2}{2}$$

Индуктивность зависит от числа витков, формы и геометрических размеров элемента, а также от магнитной проницаемости среды. Расчет индуктивностей требует знания теории электромагнитного поля. В общем случае для расчета индуктивности любого элемента можно считать справедливой зависимость

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot w^2 \Gamma,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная; μ - относительная магнитная проницаемость; w - число витков; Γ - геометрический фактор, зависящий от формы и размеров элемента.

В простейшем случае для катушки, намотанной на кольцевом магнитопроводе из материала с относительной проницаемостью μ (рис. 1.1), выражение для индуктивности имеет вид

$$L = \frac{4\mu w^2 S 10^{-7}}{d_{cp}} [\text{Гн}], \quad (1.1)$$

где S - площадь сечения магнитопровода, м^2 ; d - средний диаметр кольца, м ; w - число витков.

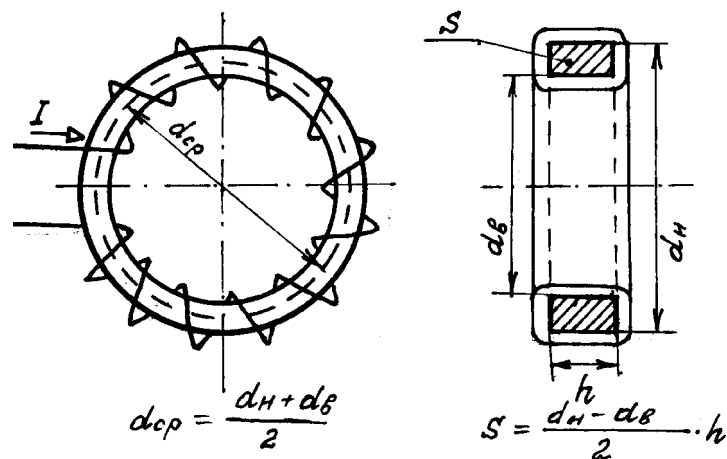


Рис. 1.1. Индуктивный элемент на кольцевом магнитопроводе

К емкостным элементам относятся конденсаторы. В простейшем случае конденсатор представляет собой две металлические пластины, разделенные диэлектриком (рис.1.2).

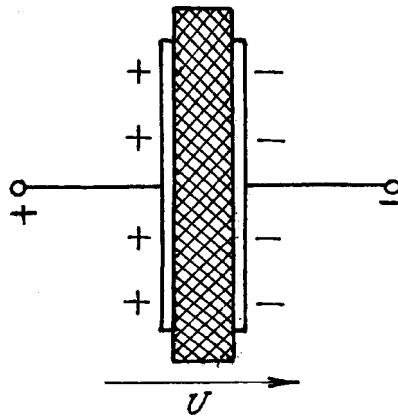


Рис. 1.2. Плоский конденсатор

Если к конденсатору приложено напряжение U , то между его пластинами образуется электрическое поле, в котором сосредоточена энергия

$$W_э = C \frac{U^2}{2},$$

где C - емкость конденсатора, зависящая от формы пластины, их взаимного расположения и диэлектрической проницаемости среды. Емкость плоского конденсатора (рис. 1.2) определяется выражением

$$C = \frac{\xi_r \xi_0 S}{d}, \Phi,$$

где ξ_r - относительная диэлектрическая проницаемость; ξ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость (в системе СИ $\xi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/m$); S - площадь пластин, m^2 ; d - расстояние между пластинами, m .

Таким образом, емкость конденсатора, как и индуктивность катушки, зависит от геометрии элемента и свойств среды.

Описание лабораторной панели

На панели размещены пять резисторов типа МЛТ с различными номинальными сопротивлениями. Выводы резисторов снабжены гнездами, что позволяет, используя переключки, коммутировать разнообразные резистивные двухполюсники.

В правой верхней части панели расположены металлобумажные конденсаторы типа МБМ ($C1, C2, C3, C4$), а также оксидный конденсатор К50-6 ($C5$). Конденсаторы $C1, \dots, C4$ используются для составления двухполюсников. Конденсатор $C5$ большой емкости предназначен для демонстрации свойства накопления энергии в его электростатическом поле.

В нижней части панели располагаются образцы индуктивных элементов. Элемент $L1$ выполнен в виде катушки на кольцевом магнитопроводе из феррита и содержит 2 обмотки с одинаковым количеством витков. Элемент $L2$ представлен в двух вариантах: в виде цилиндрической катушки с броневым сердечником из феррита ($L2'$) и такой же катушки без сердечника ($L2''$). Сравнив индуктивности этих катушек, можно уяснить влияние магнитной проницаемости среды на величину индуктивности элемента. Индуктивный элемент $L3$ (дроссель с сердечником из электротехнической стали) обладает большой индуктивностью и предназначен для демонстрации явления самоиндукции.

Порядок выполнения:

1. Резисторы и резистивные двухполюсники

1.1. Измерить сопротивления резисторов R_1, \dots, R_5 . Результаты измерений, а также номинальные значения сопротивлений резисторов занести в табл. 1.1.

1.2. Пользуясь данными табл. 1.1, рассчитать сопротивления двухполюсников, изображенных на рис. 1.3.

1.3. Скоммутировать двухполюсники, схемы которых представлены на рис. 1.3, а, б, в, г; измерить их сопротивления и сопоставить результаты измерения с расчетными данными.

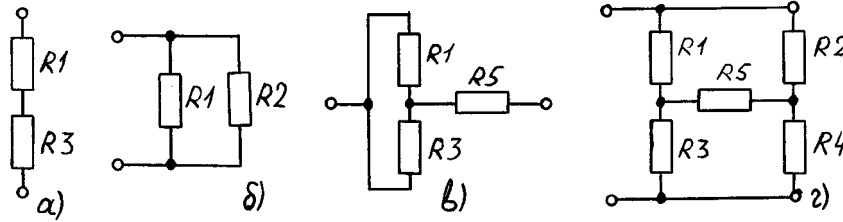


Рис. 1.3. Варианты резистивных двухполюсников

1.4. Для двухполюсника, схема которого изображена на рис. 1.3, в, рассчитать максимально допустимую величину входного напряжения, полагая допустимую мощность рассеяния резисторов R_1 и R_3 равной по $2 W_m$, а $R_5 - 0.5 W_m$.

Таблица 1.1

| Номинальные и измеренные значения сопротивления резисторов | | | | | |
|--|--|-------|--|-------|--|
| Сопротивления, кОм | R_1 | R_2 | R_3 | R_4 | R_5 |
| $R_{ном}$ | | | | | |
| $R_{изм}$ | | | | | |
| а) $R_{расч} = \dots$ $R_{изм} = \dots$ | б) $R_{расч} = \dots$ $R_{изм} = \dots$ | | в) $R_{расч} = \dots$ $R_{изм} = \dots$ | | г) $R_{расч} = \dots$ $R_{изм} = \dots$ |

2. Конденсаторы

2.1. Измерить емкости конденсаторов C_1, \dots, C_4 . Результаты измерений и номинальные значения емкостей (в микрофарадах) занести в табл. 1.2, оформив ее аналогично табл. 1.1.

2.2. Пользуясь данными табл. 1.2, рассчитать эквивалентные емкости двухполюсников, изображенных на рис. 1.2.

2.3. Скоммутировать двухполюсники (рис. 1.4, а, б, в), измерить их емкости и сопоставить результаты измерений с расчетными значениями.

2.4. Для двухполюсника, представленного схемой на рис. 1.4, б, определить допустимую величину входного напряжения.

а) $C_{расч} = \dots$ б) $C_{расч} = \dots$ в) $C_{расч} = \dots$
 $C_{изм} = \dots$ $C_{изм} = \dots$ $C_{изм} = \dots$

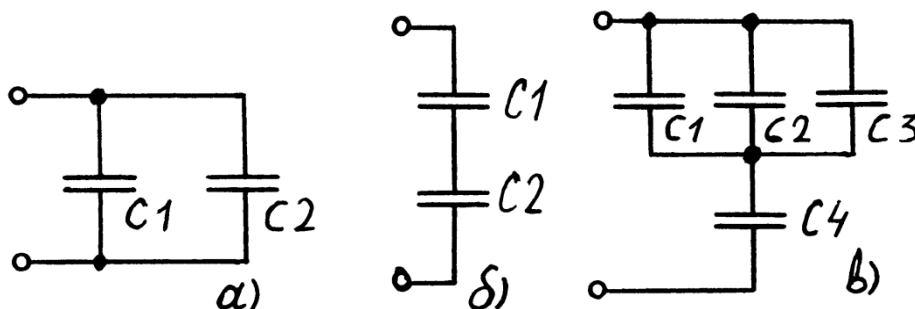


Рис. 1.4. Варианты исполнения емкостных двухполюсников

На рис. 1.5 показана схема для демонстрации эффекта накопления энергии в электростатическом поле конденсатора.

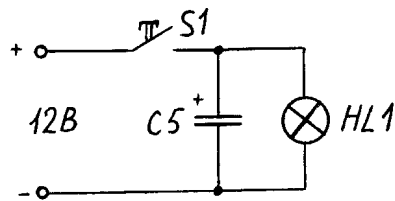


Рис. 1.5. Схема для демонстрации эффекта накопления энергии в электростатическом поле конденсатора

Нажав и отпустив кнопку $S1$, наблюдать за поведением лампы накаливания $HL1$. Дать объяснение наблюдаемому явлению.

3. Индуктивные элементы

На рис. 1.6 показаны схемы представленных на панели индуктивных элементов.

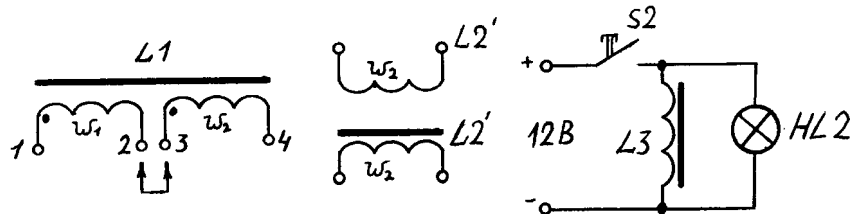


Рис. 1.6. Электрические схемы для исследования индуктивных элементов

3.1. Пользуясь формулой (1.1), рассчитать индуктивности элемента $L1$ с одной и двумя обмотками, включенными последовательно. Произвести измерения соответствующих индуктивностей, сопоставить результаты измерений. Уяснить зависимость между индуктивностью и числом витков при неизменных геометрических размерах.

3.2. Измерить индуктивности элементов $L2'$ и $L2''$. Уяснить влияние магнитопровода на величину индуктивности, оценить величину магнитной проницаемости.

3.3. Нажав и отпустив кнопку $S2$ (рис. 1.6, в), наблюдать за лампой $HL2$. Дать объяснение наблюдаемому явлению.

Форма отчетности:

1. Резистивные элементы.
 - 1.1. Схемы эксперимента.
 - 1.2. Результаты измерений сопротивлений (табл. 1.1).
 - 1.3. Расчет сопротивлений двухполюсников и результаты измерений.
 - 1.4. Расчет допустимого входного напряжения.
2. Конденсаторы.
 - 2.1. Схемы эксперимента.
 - 2.2. Результаты измерений емкостей.
 - 2.3. Расчет эквивалентных емкостей двухполюсников и результаты измерений.
 - 2.4. Расчет допустимого входного напряжения.
 - 2.5. Краткое пояснение к эксперименту по схеме, изображенной на рис.1.3.
3. Индуктивные элементы.
 - 3.1. Схемы эксперимента.
 - 3.2. Результаты расчетов и измерений индуктивностей элемента, выполненного на кольцевом магнитопроводе.
 - 3.3. Результаты измерений индуктивностей катушек без магнитопровода и с броневым магнитопроводом.
 - 3.4. Краткое пояснение к эксперименту по схеме, изображенной на рис. 1.4, в.
4. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие элементы электрических цепей относятся к пассивным? Какими свойствами обладают эти элементы?
2. Дайте определение понятию “идеальный пассивный элемент”. Назовите параметры идеальных элементов.
3. От чего зависит допустимая мощность рассеяния резистивного элемента?
4. Как изменится напряжение на заряженном конденсаторе, если параллельно с ним подключить незаряженный конденсатор такой же емкости?
5. Назовите возможные способы регулирования индуктивности (емкости).

Лабораторная работа № 2

Исследование линейных электрических цепей постоянного тока

Цель работы: выявление степени соответствия аналитических методов анализа линейных электрических цепей постоянного тока экспериментальным.

Краткие теоретические сведения

Прямая задача анализа электрических цепей заключается в определении токов и напряжений на участках данной цепи при известных параметрах ее элементов и характеристиках присутствующих здесь источников электрической энергии. Поставленную задачу можно выполнить при непосредственном использовании законов Ома и Кирхгофа, а также методами контурных токов, узловых потенциалов, наложения, эквивалентного генератора и другими. Правильность выполненного анализа подтверждается балансом мощностей и законченностью потенциальной диаграммы цепи постоянного тока. Кроме того, потенциальная диаграмма есть один из способов представления электрической цепи постоянного тока.

Анализ линейных электрических цепей постоянного тока с помощью законов Ома и Кирхгофа.

Закон Ома для участка цепи гласит, что напряжение на этом участке прямо пропорционально току и сопротивлению упомянутого участка:

$$U = IR.$$

Первый закон Кирхгофа гласит, что алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

где n - число токов, сходящихся в данный узел.

Второй закон Кирхгофа гласит, что алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС активных элементов, входящих в состав этого контура:

$$\sum_{i=1}^n U_i = \sum_{p=1}^m E_p,$$

где n и m - число пассивных и активных элементов, входящих в состав рассматриваемого контура.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{p=1}^m E_p.$$

Или с учетом закона Ома

Для анализа электрической цепи предлагаемым здесь методом необходимо составить математическую модель этой цепи.

Математическая модель электрической цепи представляет собой совокупность уравнений, составленных на основании законов Кирхгофа. Причем число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа определяется числом узлов исследуемой цепи, уменьшенным на единицу, а по второму закону - числом элементарных контуров. Так, для электрической цепи постоянного тока, схема которой изображена на рис. 2.1, математическая модель выглядит так:

$$\left. \begin{aligned} I_1 - I_3 - I_5 &= 0; \\ I_2 - I_4 + I_5 &= 0; \\ I_3 - I_1 + I_6 &= 0; \\ I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3 &= E_1; \\ -I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 &= 0; \\ I_2 \cdot R_2 + I_4 \cdot R_4 &= E_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

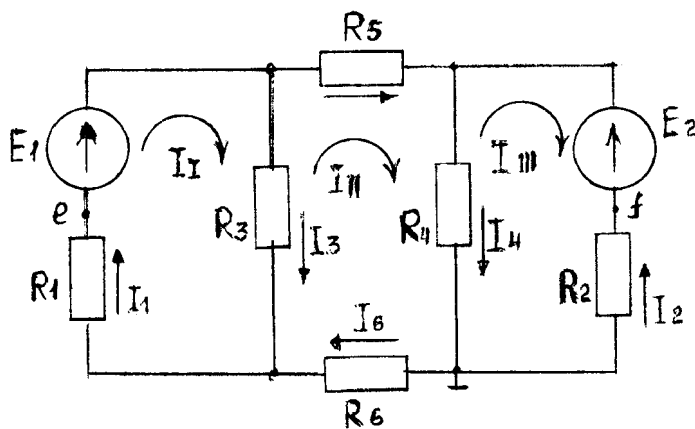


Рис. 2.1. Схема электрической цепи постоянного тока

Совместное решение уравнений полученной модели даст результат решения прямой задачи анализа данной электрической цепи.

Очевидно, что составление математической модели любой электрической цепи следует начинать с выбора условно положительных направлений токов в ветвях этой цепи.

Метод контурных токов.

Этот метод позволяет выполнить прямую задачу анализа электрических цепей и рекомендуется к применению, когда число элементарных контуров в исследуемой цепи меньше количества узлов в этой цепи. Идея метода контурных токов заключается в сокращении числа уравнений в математической модели цепи.

По этому методу поставленная задача решается в два этапа.

Сначала предполагается, что каждый элементарный контур обладает собственным током. Для электрической цепи, схема которой приведена на рис. 3.1, это - контурные токи I_1 ,

I_{II} и I_{III} . Их условно положительные направления выбраны здесь совпадающими с направлением движения часовой стрелки. В этом случае трансформированная математическая модель будет содержать лишь уравнения, составленные на основании второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_I (R_1 + R_3) - I_{II}R_3 &= E_1; \\ - I_I R_3 + I_{II} (R_3 + R_4 + R_5 + R_6) - I_{III}R_4 &= 0; \\ - I_{II}R_4 + I_{III}(R_2 + R_4) &= E_2. \end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений определит количественные значения контурных токов исследуемой цепи.

На следующем этапе решения поставленной изначально задачи через вычисленные значения контурных токов определяют токи в ветвях исследуемой цепи:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_I; \\ I_2 &= - I_{III}; \\ I_3 &= I_I - I_{II}; \\ I_4 &= I_{II} - I_{III}; \\ I_5 &= I_{II}; \\ I_6 &= I_{II}. \end{aligned}$$

Из представленного в общем виде примера решения видно, что токи I_5 и I_6 равны. Впрочем, это очевидно и из визуальной оценки схемы данной в качестве примера электрической цепи (рис. 2.1).

Метод узловых потенциалов.

Этот метод, как и предыдущий, позволяет решить прямую задачу анализа электрических цепей и рекомендуется к применению, когда количество узлов в исследуемой цепи если и превышает количество элементарных контуров, то не более чем на единицу.

Токи в ветвях исследуемой электрической цепи по методу узловых потенциалов определяются из предположения, что известен потенциал каждого узла этой цепи. Для этого достаточно воспользоваться законом Ома для электрической цепи, представленной схемой на рис. 2.1. Эта процедура выполняется следующим образом:

\dot{U}

(2.2)

где

$$G_1 = \frac{1}{R_1}; G_2 = \frac{1}{R_2}; G_3 = \frac{1}{R_3}; G_4 = \frac{1}{R_4}; G_5 = \frac{1}{R_5}; G_6 = \frac{1}{R_6}.$$

Численные значения потенциалов узлов анализируемой цепи определяются в результате подстановки равенств (2.2) в уравнения, составленные на основании первого закона Кирхгофа, каковыми являются первые три уравнения математической модели (2.1). Если при этом принять потенциал узла d в исследуемой цепи (рис. 2.1) равным нулю,

$$\varphi_d = 0,$$

то численные значения потенциалов узлов этой цепи определяются из совместного решения системы

$$\left. \begin{aligned} & \\ & \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где G_{aa} ; G_{bb} и G_{cc} - собственные проводимости узлов a, b, c соответственно; G_{ab} , G_{ac} , G_{ba} , G_{bc} , G_{ca} , G_{cb} - взаимные проводимости соответствующих узлов; I_a, I_b , и I_c - узловые токи.

Для исследуемой в качестве примера электрической цепи

$$\begin{aligned} G_{aa} &= G_1 + G_3 + G_6; \\ G_{bb} &= G_1 + G_3 + G_5; \\ G_{cc} &= G_2 + G_4 + G_5; \\ G_{ab} &= G_{ba} = G_1 + G_3; \\ G_{ac} &= G_{ca} = 0; \\ G_{bc} &= G_{cb} = G_5; \\ I_a &= -E_1 G_1; \\ I_b &= E_1 G_1; \\ I_c &= E_2 G_2. \end{aligned}$$

Итак, порядок определения токов в ветвях электрической цепи следующий:

- 1) выбираются условно положительные направления токов в ветвях;
- 2) выбирается узел, условно обладающий нулевым потенциалом;
- 3) из решения системы уравнений, подобной системе (2.3), определяются величины потенциалов прочих узлов цепи;
- 4) по равенствам, аналогичным уравнениям (2.2), определяются величины токов в ветвях анализируемой электрической цепи.

Метод наложения.

Этот метод основан на принципе суперпозиции, который гласит, что каждое явление в линейной системе можно рассматривать как сумму элементарных явлений.

Применительно к электротехнике ток в каждой ветви линейной цепи с несколькими источниками электрической энергии можно рассматривать как алгебраическую сумму частичных токов от каждого источника.

В нашем случае, применяя метод наложения, из исследуемой цепи (рис. 2.1) следует исключить все источники ЭДС, заменяя их соответствующими внутренними сопротивлениями, кроме одного (E_1), и измерить или рассчитать частичные токи

$I'_1, I'_2, I'_3, I'_4, I'_5$ и I'_6 (рис. 2.2, а). Затем, исключив все источники ЭДС, кроме E_a , определить частичные токи $I''_1, I''_2, I''_3, I''_4, I''_5$ и I''_6 (рис. 2.2, б).

Алгебраическая сумма частичных токов соответствующих ветвей даст величину результирующих токов, действующих в полной цепи (рис. 2.2, в):

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_1 - I''_1; & I_4 &= I'_4 + I''_4; \\ I_2 &= I''_2 - I'_2; & I_5 &= I''_5 - I'_5; \\ I_3 &= I'_3 + I''_3; & I_6 &= I'_6 - I''_6. \end{aligned}$$

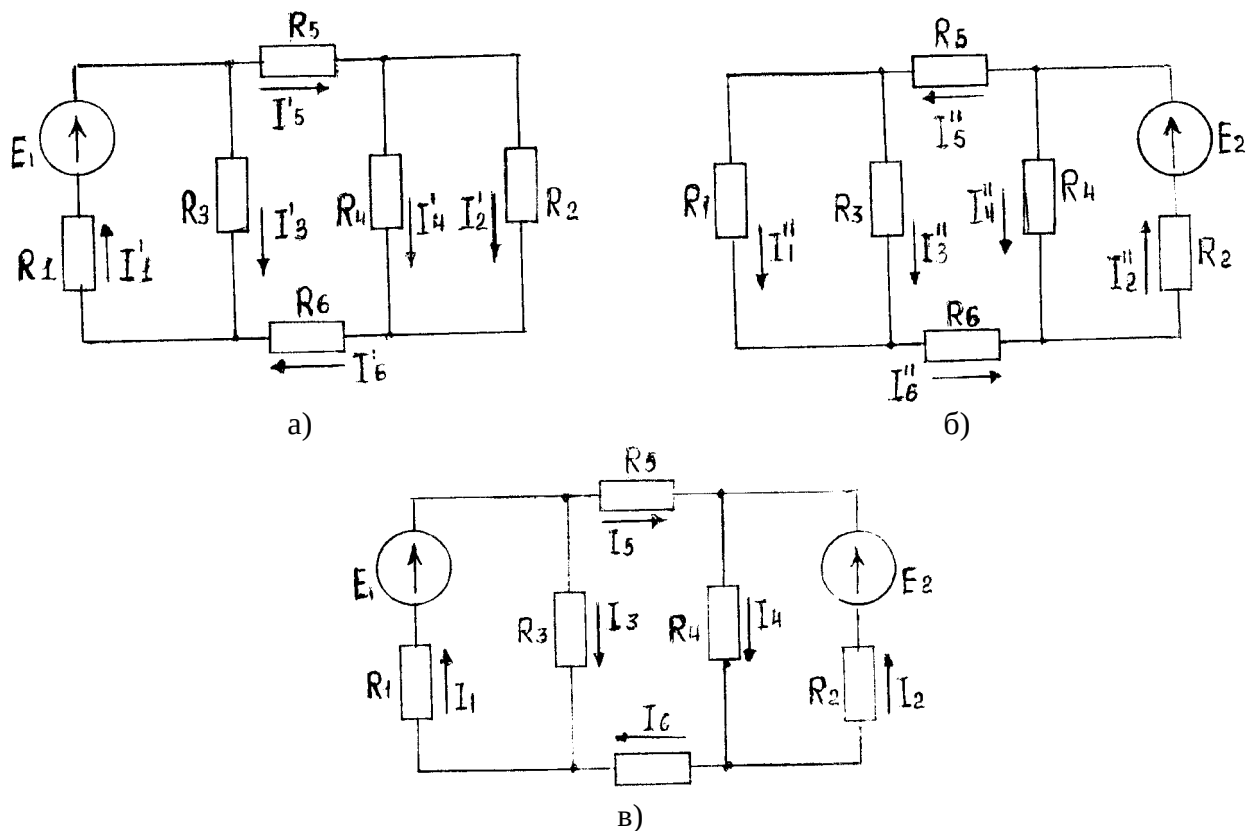


Рис. 2.2. Схема алгоритма использования метода наложения для решения прямой задачи анализа электрической цепи

Алгебраическая сумма частичных токов соответствующих ветвей даст величину результирующих токов, действующих в полной цепи (рис. 2.2, в):

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_1' - I_1''; & I_4 &= I_4' + I_4''; \\
 I_2 &= I_2'' - I_2'; & I_5 &= I_5'' - I_5'; \\
 I_3 &= I_3' + I_3''; & I_6 &= I_6' - I_6''.
 \end{aligned}$$

Метод эквивалентного генератора.

Иногда нет необходимости в определении токов во всех ветвях электрической цепи, а достаточно знать ток в какой-либо одной ветви. В этом случае используют метод эквивалентного генератора.

Идея этого метода заключается в выделении интересующей ветви и замене оставшейся части цепи активным двухполюсником, который замещается эквивалентным генератором, обладающим ЭДС, равной по величине напряжению холостого хода двухполюсника, и внутренним сопротивлением.

В качестве примера определим ток в ветвях с резистором R_5 (рис. 2.1) методом эквивалентного генератора. Схема такого решения представлена на рис. 2.3.

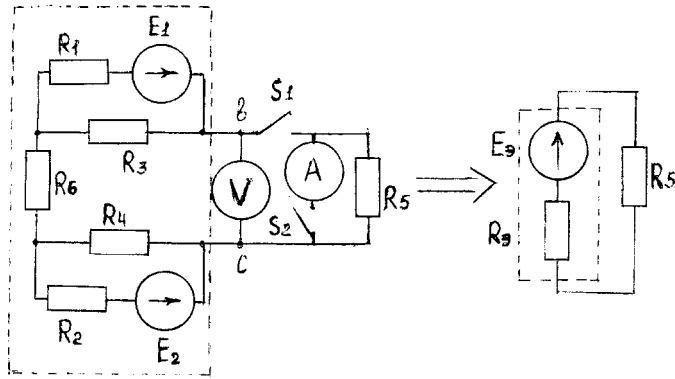


Рис. 2.3. Схема определения тока I_5 методом эквивалентного генератора

ЭДС эквивалентного генератора можно измерить вольтметром при разомкнутом ключе S_1 либо определить аналитически как разность потенциалов между точками b и c при отсутствии ветви с R_1 . Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора также может быть определено аналитически как эквивалентное сопротивление пассивного двухполюсника, полученного из активного заменой всех входящих в состав последнего источников электрической энергии своими внутренними сопротивлениями. Так, для рассматриваемого примера:

$$R_э = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_6 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}.$$

Это сопротивление можно определить и экспериментально. Для чего нужно замкнуть ключи S_1 и S_2 , обеспечив тем самым режим короткого замыкания эквивалентного генератора, и измерить ток короткого замыкания I_k , как это показано на рис. 2.3. Затем, воспользовавшись измеренным ранее напряжением холостого хода (ЭДС эквивалентного генератора), определить $R_э$:

$$R_э = \frac{U_{xx}}{I_k} = \frac{E_э}{I_k}.$$

Теперь можно определить и ток в ветви с резистором R_5 :

$$I_5 = \frac{E_э}{R_э + R_5}.$$

Баланс мощностей.

Баланс мощностей есть следствие закона сохранения энергии: мощность источников электрической энергии, входящих в состав исследуемой цепи, определяется суммарной мощностью, потребляемой пассивными элементами этой цепи:

$$P_u = P_n, \quad (2.4)$$

где

$$P_u = \sum_{i=1}^n E_i I_i;$$

$$P_n = \sum_{i=1}^k I_i^2 R_i;$$

n - число источников электрической энергии, входящих в состав исследуемой электрической цепи; i - число пассивных элементов этой цепи.

Перед составлением баланса мощностей необходимо разобраться, в каком режиме работают источники электрической энергии: в режиме генератора или в режиме нагрузки.

Если ток в ветви с источником электрической энергии совпадает по направлению с ЭДС этого источника, то последний работает в режиме генератора, а его мощность записывается в левой части равенства (2.4). В случае несовпадения направлений упомянутых тока и ЭДС говорят, что источник электрической энергии работает в режиме нагрузки и его мощность записывается при составлении баланса мощностей в правой части равенства (2.4).

Потенциальная диаграмма цепи постоянного тока.

Потенциальная диаграмма есть один из способов графического изображения электрической цепи постоянного тока, иллюстрирующая поконтурно изменение потенциала от каждого элемента, входящего в состав данного контура упомянутой цепи.

Потенциальная диаграмма для внешнего контура электрической цепи, схема которой изображена на рис. 2.1, строится так. Принимается, что потенциал какой-либо точки контура равен нулю. Например:

$$\varphi_d = 0.$$

Эта точка и принимается за начало обхода контура. Потенциалы остальных точек внешнего контура определяются так:

$$\begin{aligned}\varphi_a &= \varphi_d - I_6 R_6; \\ \varphi_e &= \varphi_a - I_1 R_1; \\ \varphi_b &= \varphi_e + E_1; \\ \varphi_c &= \varphi_b - I_5 R_5; \\ \varphi_f &= \varphi_c - E_2; \\ \varphi_d &= \varphi_f + I_2 R_2 = 0.\end{aligned}$$

Величины потенциалов в точках электрической цепи можно определить и экспериментально с помощью вольтметра. Для этого необходимо измерить разность потенциалов (напряжение) между точкой с нулевым потенциалом и другой точкой, где необходимо узнать значение потенциала. Тогда для исследуемой цепи (рис. 2.1):

$$\begin{aligned}U_{ad} &= \varphi_a - \varphi_d = \varphi_a; \\ U_{ed} &= \varphi_e - \varphi_d = \varphi_e; \\ U_{bd} &= \varphi_b - \varphi_d = \varphi_b; \\ U_{cd} &= \varphi_c - \varphi_d = \varphi_c; \\ U_{fd} &= \varphi_f - \varphi_d = \varphi_f.\end{aligned}$$

Изменение отклонения стрелки вольтметра соответствует изменению знака потенциала. Ориентировочно потенциальная диаграмма анализируемой цепи будет выглядеть так, как показано на рис. 2.4.

Описание лабораторной панели.

Лабораторная работа выполняется на специализированной панели, на которой установлены источники электрической энергии постоянного тока, резисторы, переключатели, гнезда для вольтметра и амперметра. Предлагаемая для исследования цепь частично скоммутирована.

Источники ЭДС E_1 и E_2 представлены на панели своими схемами замещения, где элементы R_1 и R_2 можно рассматривать как внутренние сопротивления этих источников.

Сопротивления соединительных проводов, амперметров и проводимость вольтметра сравнительно с сопротивлениями резисторов и проводимостью отдельных участков цепи ничтожно малы; их рекомендуется принять равными нулю.

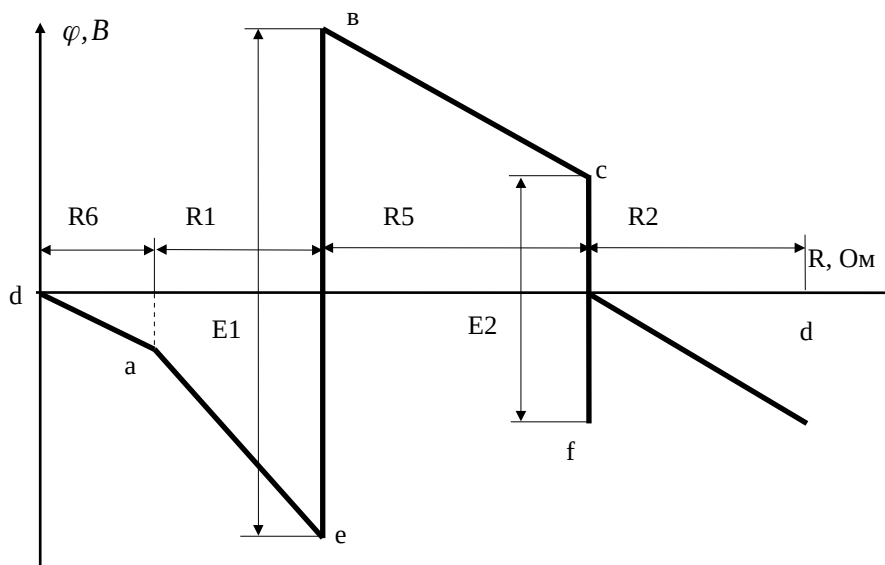


Рис. 2.4. Потенциальная диаграмма внешнего контура электрической цепи постоянного тока (рис.3.1)

Порядок выполнения:

1. По величинам E_1 и E_2 и параметрам R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 и R_6 , указанным на лабораторной панели или преподавателем, для электрической цепи, схема которой приведена на рис. 2.5, определить истинные направления и рассчитать величины токов во всех ветвях данной цепи.

Для этого использовать метод контурных токов и метод узловых потенциалов. Результаты расчетов внести в табл. 2.1.

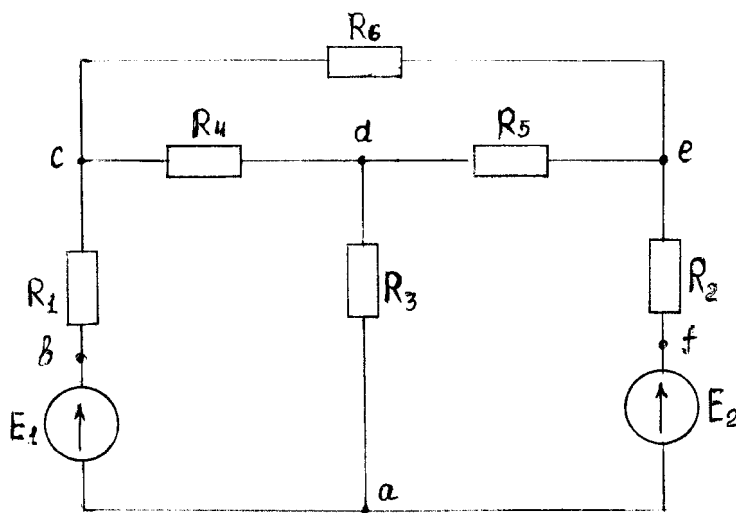


Рис. 2.5. Схема исследуемой электрической цепи

Таблица 2.1

Результаты вычислений и измерений токов в ветвях цепи

| Способ определения | I_1, A | I_2, A | I_3, A | I_4, A | I_5, A | I_6, A |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Метод контурных токов | - | - | - | - | - | - |
| Метод узловых потенц. | - | - | - | - | - | - |
| Метод эквивалентного генератора | - | - | - | - | - | - |

| | | | | | | |
|----------|---|---|---|---|---|---|
| Измерено | - | - | - | - | - | - |
|----------|---|---|---|---|---|---|

Здесь и далее индексация токов принимается совпадающей с индексацией резисторов.

2. Скоммутировать на лабораторной панели электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 2.5. Измерить токи и рассчитать по закону Ома напряжения на участках цепи. Полученные результаты занести в первую строку табл. 2.2 и в последнюю строку табл. 2.1.

Таблица 2.2

| E_1 | E_2 | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 | I_5 | I_6 | U_1 | U_2 | U_3 | U_4 | U_5 | U_6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| в | | А | | | | | | В | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | | | | | | | |

3. Исключить из исследуемой цепи источник ЭДС E_2 , замкнув накоротко образовавшийся разрыв. Измерить токи в ветвях и рассчитать напряжения на участках цепи. Полученные результаты занести во вторую строку табл. 3.2.

4. Восстановить цепь, включить источник ЭДС E_2 . Исключить из исследуемой цепи источник ЭДС E_1 , замкнув накоротко образовавшийся разрыв. Измерить токи в ветвях и рассчитать напряжения на участках цепи. Результаты измерений занести в третью строку табл. 2.2.

5. По данным табл. 2.2 проверить справедливость законов Кирхгофа и принципа суперпозиции (метода наложения).

6. Методом эквивалентного генератора определить ток в ветви с резистором R_6 . Для этого, разомкнув указанную ветвь, измерить напряжение холостого хода (ЭДС эквивалентного генератора) и, замкнув накоротко резистор R_6 , измерить ток короткого замыкания. Результаты вычисления занести в табл. 2.1.

7. Оценить степень совпадения величины токов в одноименных ветвях из табл. 2.1.

8. Приняв потенциал в узле а равным нулю, измерить потенциал в остальных узлах цепи. Результаты измерений занести в табл. 2.3.

9. Приняв потенциал узла а равным нулю, пользуясь значениями E_1 , E_2 и данными табл. 2.2, рассчитать потенциалы узлов исследуемой цепи. Результаты расчета занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

| Способ определения | φ_a | φ_b | φ_c | φ_d | φ_e | φ_f |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | B | B | B | B | B | B |
| Измерено | 0 | | | | | |
| Вычислено | 0 | | | | | |

10. По данным табл. 2.3 построить потенциальную диаграмму для контура $abcdefa$ исследуемой цепи (рис. 2.5).

11. Составить баланс мощностей для исследуемой цепи (рис. 2.5).

12. В исследуемой цепи по указанию преподавателя изменить величину резистора R_3 . Измерить токи в ветвях цепи. Результаты измерений занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

| I_1 | I_2 | I_3 | I_4 | I_5 | I_6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| А | А | А | А | А | А |
| | | | | | |

13. Составить баланс мощностей при измененном резисторе R_3 , предварительно определив величину последнего через падение напряжения на нем, которое необходимо измерить.

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема подвергнутой эксперименту электрической цепи.
3. Таблицы результатов измерений и расчетов по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Потенциальная диаграмма.
6. Балансы мощностей.
7. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. – 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте принципы построения математических моделей электрических цепей.
2. Сформулируйте принцип суперпозиции. Какова его область применения? Почему?
3. Дайте краткую характеристику методам расчета линейных электрических цепей постоянного тока.
4. Охарактеризуйте элементы линейных электрических цепей.
5. Что такое эквивалентный генератор?
6. Как изменятся направления токов в ветвях исследуемой цепи при изменении величины резистора R_3 ?

Лабораторная работа № 3

Исследование амплитудных и фазовых соотношений в последовательной RLC-цепи

Цель работы: исследование режимов цепи при различных соотношениях между реактивными сопротивлениями; получение амплитудно- и фазочастотных характеристик.

Краткие теоретические сведения.

На рис. 3.1, а представлена схема цепи, содержащая последовательно соединенные идеальные резистор, индуктивный элемент и конденсатор. Цепь питается синусоидальным напряжением, действующее значение которого U , а частота f .

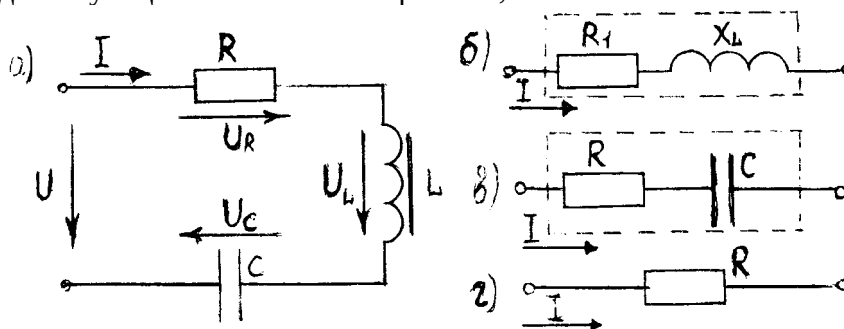


Рис. 3.1. Последовательная RLC-цепь (а) и ее эквивалентные схемы (б, в, г)

Полное сопротивление цепи, величина тока и напряжение на ее элементах определяются выражениями:

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2}; \quad (3.1)$$

$$I = \frac{U}{Z}; \quad (3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} U_a &= I \cdot R; \\ U_L &= I \cdot X_L; \\ U_C &= I \cdot X_C, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где $x_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi f \cdot L$; $x_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi f \cdot C}$ – реактивные сопротивления индуктивного и емкостного элементов; $x = x_L - x_C$ – реактивное сопротивление цепи.

В зависимости от соотношений между x_L и x_C в цепи возможны 3 режима.

1. Преобладает индуктивное сопротивление ($x_L > x_C$). В этом случае реактивное сопротивление цепи $x > 0$, цепь носит активно-индуктивный характер, а ее эквивалентная схема содержит резистор и индуктивный элемент с сопротивлением x (рис. 3.1, б). Фазовый угол между напряжением U и током I положителен и составляет

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{R} > 0. \quad (3.4)$$

2. Преобладает емкостное сопротивление ($x_L < x_C$). Теперь реактивное сопротивление $x < 0$, характер цепи – емкостный, что соответствует эквивалентной схеме рис. 3.1, в. Фазовый угол становится отрицательным (ток опережает напряжение по фазе) и равен

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{R} < 0. \quad (3.5)$$

3. Индуктивное и емкостное сопротивления равны, реактивное сопротивление $x = 0$, цепь становится чисто активной (рис. 3.1, г). В этом случае полное сопротивление цепи минимально и равно ее активному сопротивлению, а величина тока при неизменном напряжении U принимает максимальное значение

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

Этот режим, представляющий особый интерес, получил название последовательного резонанса или *резонанса напряжений*.

Поскольку реактивные сопротивления зависят как от параметров элементов, так и от частоты, добиться резонанса можно тремя способами:

1. Изменением индуктивности. Если величина емкости и частота неизменны, то при

$$L_o = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad (3.6)$$

наступает резонанс.

2. Изменением емкости. Для достижения резонанса емкость должна быть равна

$$C_0 = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}.$$

3. Регулированием частоты. При неизменных индуктивности и емкости резонанс наступит при

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.7)$$

Эта частота называется резонансной. В настоящей работе изменение режимов цепи и ее настройка в резонанс производятся регулированием частоты. Зависимости $I(f)$, $U_L(f)$, $U_C(f)$ и $\varphi(f)$ называются резонансными характеристиками цепи. Их вид показан на рис. 3.2.

При $f=0$ $x_c \rightarrow \infty$, полное сопротивление цепи бесконечно велико, и ток равен нулю. С увеличением частоты емкостное сопротивление убывает быстрее, чем возрастает индуктивное. Поэтому полное сопротивление снижается, а ток возрастает, достигая максимального значения $I_{max} = \frac{U}{R}$ при резонансе, когда $f=f_0$. В частотном интервале $f_0 > f > 0$ цепь имеет емкостный характер. При резонансе индуктивное и емкостное сопротивления становятся равными

$$x_L = x_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = p. \quad (3.6)$$

Эту величину принято называть *характеристическим* или *волновым* сопротивлением цепи. Характер цепи - чисто активный ток, - принимает максимальное значение, а фазовый угол равен нулю.

Отношение характеристического сопротивления к активному называется *добротностью* контура

$$Q = \frac{p}{R}. \quad (3.7)$$

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах при резонансе равны и составляют

$$U_{L0} = U_{C0} = QU. \quad (3.8)$$

Однако максимум для U_C имеет место при частоте несколько меньше резонансной и составляет

$$U_{Cmax} = U \cdot \frac{Q}{\sqrt{1 - \frac{1}{4 \cdot Q^2}}}. \quad (3.9)$$

При $f > f_0$ индуктивное сопротивление растет быстрее, чем снижается емкостное, поэтому $x_L > x_C$, и цепь по характеру становится индуктивной. Вследствие увеличения полного сопротивления ток начинает снижаться, а напряжение U_L сначала возрастает, достигая максимума, а затем снижается, стремясь к U . Величина $U_L \text{ max}$ такая же, как $U_C \text{ max}$ (3.9).

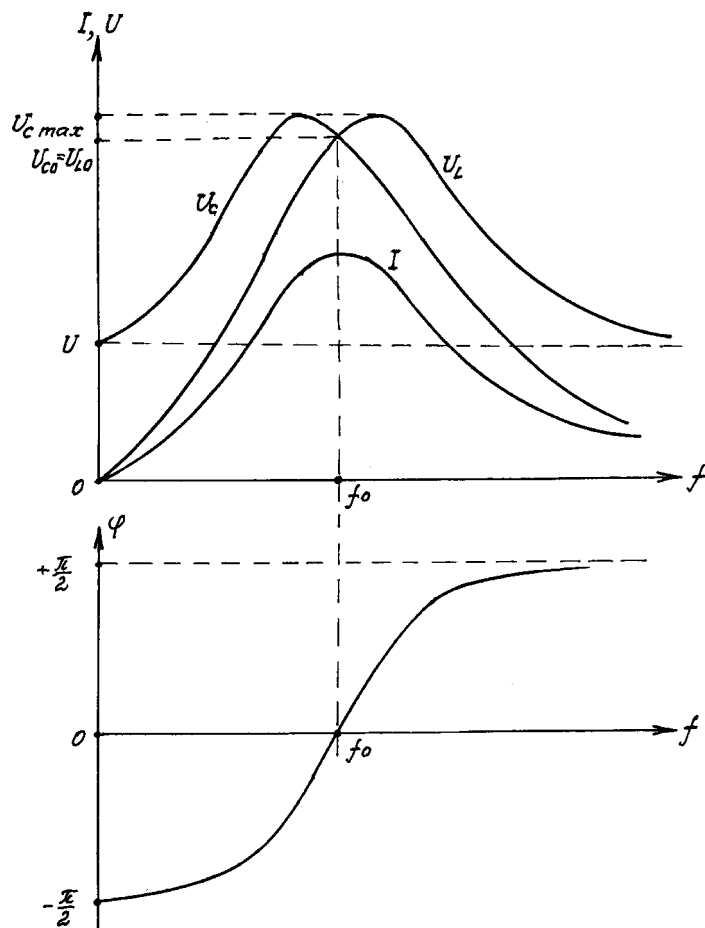


Рис. 3.2. Амплитудно-частотные (а) и фазочастотные (б) характеристики цепи

Выражения (3.8) и (3.9) свидетельствуют, что в высокодобротных контурах напряжения на реактивных элементах цепи вблизи резонанса будут значительно больше питающего напряжения, т.е. при этом имеют место *резонансные перенапряжения*.

Лабораторная установка

Панель для выполнения лабораторной работы содержит резисторы, индуктивный элемент и конденсаторы. В соответствующих точках мнемонической схемы имеются гнезда, предусмотренные для включения амперметра и измерения напряжений вольтметром. Питание панели осуществляется от генератора ГЗ-18, в котором предусмотрено регулирование частоты и напряжения.

Порядок выполнения:

1. По заданным параметрам электрической цепи рассчитать резонансную частоту.
2. Рассчитать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики цепи, задаваясь 5-6 значениями частоты так, чтобы резонансная частота находилась примерно посередине этого интервала. Напряжение генератора задает преподаватель. Результаты расчетов необходимо оформить в виде таблицы.

Таблица 3.1

Теоретические резонансные характеристики
($R=...$ Ом ; $L=...$ мГн ; $C=...$ мкФ)

| $U,$ B | $f,$ $Гц$ | $X_L,$ $Ом$ | $X_C,$ $Ом$ | $X,$ $Ом$ | $Z,$ $Ом$ | $I,$ A | $U_a,$ B | $U_L,$ B | $U_C,$ B | $\varphi,$ $град.$ |
|-------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | | |

3. Собрать схему цепи (рис. 3.3), используя элементы, для которых производится расчет. Предъявить преподавателю.

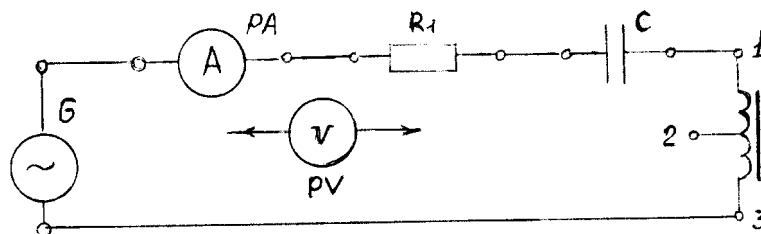


Рис. 3.3. Схема эксперимента (G-генератор ГЗ-38 ;
РА- амперметр 0 . . . 1,5 А; PV-вольтметр 0 . . . 25 . . . 100 В)

Таблица 3.2

Результаты измерений резонансных характеристик

| $U,$ B | $f,$ $Гц$ | $I,$ A | $U_a,$ B | $U_L,$ B | $U_C,$ B | $Z,$ $Ом$ | φ° |
|-------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| | | | | | | | |

При отсутствии фазометра значения фазового угла определяют путем косвенных измерений, пользуясь формулой

$$\varphi = \arctg \cdot \frac{U_L - U_C}{U_a},$$

где R - активное сопротивление цепи, равное полному ее сопротивлению в режиме резонанса.

4. По результатам расчетов и эксперимента построить резонансные характеристики цепи.
5. Построить в масштабе векторные диаграммы для режимов: $f < f_0$, $f = f_0$ и $f > f_0$.
6. Сформулировать выводы по работе.

Форма отчетности:

1. Расчет параметров цепи и резонансных характеристик (схема цепи; расчет f_0 , ρ , Q , U_0 , U_{max} ; расчет величин, необходимых для построения характеристик; таблица результатов).
2. Результаты эксперимента.
3. Построение резонансных характеристик и векторных диаграмм.
4. Выводы.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Каковы возможные причины несовпадения результатов расчета и эксперимента?
2. В чем опасность резонанса напряжений в энергетических устройствах?
3. Дайте определение понятиям “характеристическое сопротивление контура” и “добротность контура”. Каковы их величины для исследованной Вами цепи?
4. Покажите вид резонансных характеристик, если регулируемым фактором является индуктивность (емкость).

Лабораторная работа № 4

Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи синусоидального тока при соединении фаз приемника по схеме «звезда»

Цель работы: изучение симметричных и несимметричных режимов работы трехфазных электрических цепей при соединении фаз приемников по схеме «звезда».

Краткие теоретические сведения.

Трехфазная электрическая цепь представляет собой совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три одинаковых по величине ЭДС, сдвинутых по фазе на 120° .

Основные элементы трехфазной цепи - трехфазные генераторы и приемники электрической энергии - представляют собой совокупность групп однофазных элементов. Это могут быть фазовые обмотки генератора, электрических двигателей и т.п. На схеме (рис.

4.1) трехфазный генератор представлен совокупностью ЭДС \dot{E}_A, \dot{E}_B и \dot{E}_C , а приемник электрической энергии - совокупностью резисторов, обладающих полными сопротивлениями, и Z_a, Z_b и Z_c .

Начала фазовых групп часто обозначают начальными буквами латинского алфавита (а, в, с), а концы - конечными буквами этого же алфавита (х, у, z соответственно).

Фазовые группы приемников электрической энергии могут образовывать самые различные соединения.

Соединение фазовых групп, при котором их концы соединены вместе, а начала пофазно соединены с выводами трехфазного генератора, называют соединением по схеме «звезда» (рис. 4.1).

Провод, соединяющий начала соответствующих фазовых групп генератора и приемника, называют линейным. Ток, протекающий по этому проводу, называют линейным. На рис. 4.1 это $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

Ток, протекающий по любой из фазовых групп, называют фазным. В рассматриваемом примере это токи $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$.

Из рис. 4.1 нетрудно заметить, что $\dot{I}_A = \dot{I}_a, \dot{I}_B = \dot{I}_b, \dot{I}_C = \dot{I}_c$.

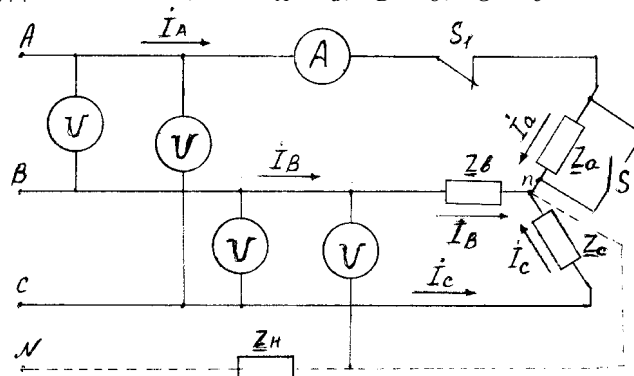


Рис. 4.1. Пример исполнения схемы трехфазной электрической цепи при соединении фаз приемника по схеме «звезда»

Отсюда вывод: при соединении фаз приемника по схеме «звезда» линейные и фазные токи одинаковы: $\dot{I}_л = \dot{I}_ф$.

Разность потенциалов между началом и концом соответствующих фазовых групп называется фазным напряжением. На рис. 4.1 в качестве примера указано фазное напряжение $U_{ф(a)}$.

Разность потенциалов между линейными проводами называется линейным напряжением. На рис. 4.1 показано линейное напряжение U_{BC} .

Узел, где при соединении фазовых групп по схеме «звезда» соединяются концы указанных групп, называется нейтральной точкой или просто нейтралью. Для генератора это точка N , для приемника - n (рис. 4.1).

Разность потенциалов между точками n и N называют напряжением смещения нейтрали или просто смещением нейтрали (U_{Nn}).

Нередко нейтрали приемника и генератора соединяют между собой. Такие цепи называют трехфазными четырехпроводными. Дополнительный провод, соединяющий нейтрали генератора и приемника, обычно называют нейтральным. На рис. 4.1 он указан штриховой линией, а резистор Z_n иллюстрирует сопротивление этого провода.

Режимы работы трехфазных приемников электрической энергии делятся на симметричные и несимметричные.

Симметричный режим работы возможен лишь при равенстве сопротивлений фазовых групп:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c \quad (4.1)$$

Сопротивления фазных обмоток трехфазных генераторов и линейных проводов обычно выполняют одинаковыми, поэтому фазные (линейные) токи, фазные и линейные напряжения при симметричном режиме работы равны между собой по модулю:

$$\begin{aligned} I_a &= I_b = I_c; \\ U_a &= U_b = U_c; \\ U_{AB} &= U_{BC} = U_{CA}. \end{aligned}$$

При несоблюдении условия (5.1) режим работы приемников электрической энергии будет несимметричным. Несимметричный режим может быть плановым, когда равенство (4.1) нарушается сознательно, и аварийным (обрыв провода, короткое замыкание).

При дальнейшем повествовании и при выполнении лабораторной работы будем считать сопротивления линейных проводов ничтожно малыми, учитывать которые нет смысла. Это допущение не нарушит в данном случае логику наших рассуждений и всей лабораторной работы в целом.

Трехфазная трехпроводная электрическая цепь.

1. Симметричный режим. В этом случае сопротивления фаз приемника одинаковы по величине и по характеру.

Здесь фазные напряжения по величине равны между собой и их векторы отличаются друг от друга на угол 120° . Эти напряжения практически равны соответствующим ЭДС генератора.

Линейные напряжения, равные векторной сумме соответствующих фазных напряжений, тоже равны по величине, а их векторы отличаются друг от друга на угол 120° .

При симметричном режиме линейные напряжения превышают фазные по величине в $\sqrt{3}$ раз:

$$U_l = \sqrt{3}U_\phi \quad (4.2)$$

Фазные (линейные) токи определяются из закона Ома:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \\ \dot{I}_b &= \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \\ \dot{I}_c &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Угол сдвига между векторами соответствующих фазных напряжений и токов определяется характером сопротивлений фаз приемника.

Смещение нейтрали при симметричном режиме отсутствует:

$$U_{Nn} = 0.$$

Векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной электрической цепи при указанном режиме работы приведена на рис. 4.2, а.

2. Несимметричный режим работы приемников электрической энергии в общем случае предполагает нарушение равенств (4.1). Фазные (линейные) токи в этом случае неодинаковы. Но равенство величин линейных напряжений сохраняется. Равенство (4.2) здесь нарушается. Напряжение смещения нейтрали при нарушении симметричного режима становится отличным от нуля и определяется по формуле

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad (4.4)$$

$$\text{где } \underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}; \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}; \quad \underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}.$$

Фазные напряжения определяют из равенств:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{E}_a - \dot{U}_{Nn}; \\ \dot{U}_b &= \dot{E}_b - \dot{U}_{Nn}; \\ \dot{U}_c &= \dot{E}_c - \dot{U}_{Nn}. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Фазные (линейные) токи определяются по формулам (4.3).

На рис. 4.2, б показана векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной электрической цепи для общего случая несимметричного режима работы приемников электрической энергии.

Величина напряжения смещения нейтрали на векторной диаграмме характеризуется расстоянием между точками N , расположенными в геометрическом центре треугольника, образованного векторами линейных напряжений, и n . Положение точки n на векторной диаграмме можно определить пересечением дуг, проведенных из соответствующих вершин треугольника линейных напряжений радиусами, равными с учетом принятого масштаба (В/мм) величинам фазных напряжений U_a, U_b, U_c . Векторы токов на векторной диаграмме (рис. 4.2,б) откладываются от точки n .

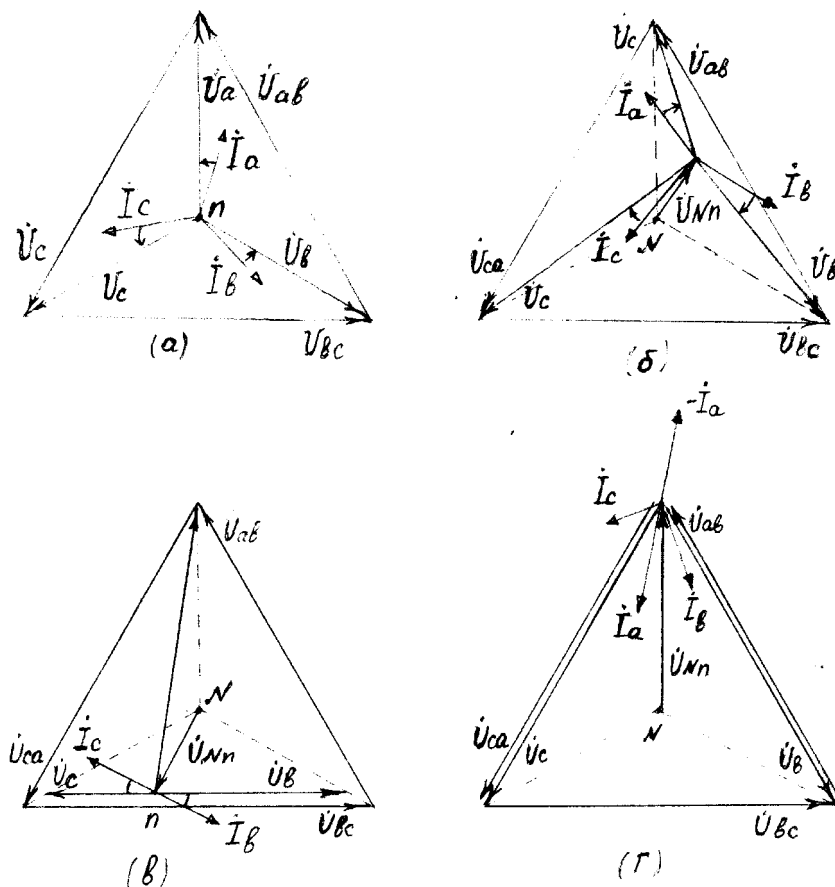


Рис. 4.2. Векторные диаграммы для возможных режимов работы трехфазной трехпроводной электрической цепи

3. Обрыв фазного провода (холостой ход соответствующей фазы). В этом случае ток в поврежденном проводе будет равен нулю. Токи в двух других фазных проводах будут равны между собой, поскольку оказываются включены последовательно на линейное напряжение. А рассматриваемая электрическая цепь из трехфазной превращается в двухфазную.

Для электрической цепи, изображенной на рис. 4.1, этот режим достигается размыканием ключа S_1 .

На векторной диаграмме нейтральная точка приемника n смещается на одну из сторон треугольника, образованного векторами линейных напряжений (рис. 4.2, в). Фазное напряжение в поврежденной фазе при этом возрастает, а в двух других уменьшается до тех пор, пока их арифметическая сумма не станет равна величине линейного напряжения.

4. Короткое замыкание фазы приемника. В этом случае напряжение на зажимах поврежденной фазы становится равным нулю, а величины фазных напряжений на двух других возрастают до величины линейного.

Токи в двух неповрежденных фазах определяются амперметром или по формулам, аналогичным равенствам (4.3). А ток поврежденной фазы, например фазы A , определяется из первого закона Кирхгофа:

$$I_a = -(I_b + I_c).$$

Нейтральная точка приемника на векторной диаграмме для указанного режима (рис. 4.2, г) сместится в вершину треугольника, образованного векторами линейных напряжений. Величина напряжения смещения нейтрали в этом случае будет равна фазному напряжению поврежденной фазы до ее повреждения.

Для электрической цепи, схема которой изображена на рис. 4.1, режим короткого замыкания фазы можно исполнить замыканием ключа S_2 .

Трехфазная четырехпроводная электрическая цепь.

Четвертый (нейтральный) провод в трехфазной электрической цепи необходим для сохранения симметрии фазных напряжений. Симметрия фазных напряжений подразумевает равенство их величин.

Но в реальных случаях нейтральный провод может обладать значительным по величине сопротивлением, которое нельзя игнорировать. В этих случаях речь может идти лишь о некоторой степени выравнивания величин фазных напряжений. Это происходит за счет принудительного сокращения величины напряжения смещения нейтрали, которое здесь определяется так:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_n},$$

где $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_n}$.

При симметричном режиме напряжение смещения нейтрали при любой конструкции трехфазной электрической цепи равно нулю и фазные напряжения не изменяют своих величин. Векторная диаграмма в указанных условиях остается неизменной (рис. 4.2, а).

При несимметричных режимах наличие нейтрального провода, обладающего ощутимым сопротивлением, вызывает лишь некоторое снижение величины напряжения смещения нейтрали и, как следствие этому, частичное выравнивание фазных напряжений. В этом случае векторные диаграммы отличаются от векторных диаграмм, изображенных на рис. 4.2, б, в, г, лишь сокращением величины вектора \dot{U}_{Nn} .

Если же нейтральный провод обладает настолько малым по сравнению с Z_a , Z_b и Z_c сопротивлением Z_n , что его можно игнорировать, приравняв нулю, то напряжение смещения нейтрали оказывается равным нулю, а фазные напряжения - равными между собой при любом режиме.

Ток в нейтральном проводе определится как алгебраическая сумма фазных токов:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

При симметричном режиме ток в нейтральном проводе равен нулю, и необходимость в этом проводе исчезает.

Векторная диаграмма токов и напряжений для несимметричного режима при $Z_n \approx 0$ показана на рис. 4.3, а. А для режима холостого хода (обрыв фазы А) при этих же условиях - на рис. 4.3, б.

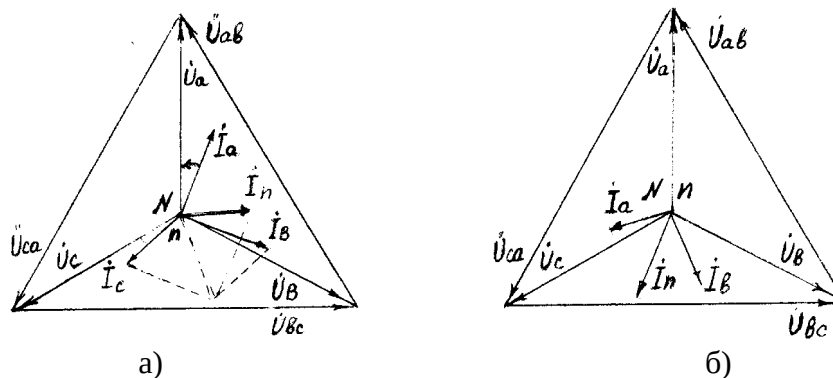


Рис. 4.3. Векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной четырехпроводной электрической цепи при $Z_n \approx 0$ для несимметричного режима (а) и режима холостого хода (б)

Следует отметить, что при минимизации сопротивления нейтрального провода до нуля равенство (4.2) сохраняется при всех режимах работы трехфазной электрической цепи.

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели представлены линейные и нейтральный провода трехфазной электрической цепи. Линейными проводами подключен источник трехфазной ЭДС. Кроме того, на панели помещены фазные приемники электрической энергии в виде набора резисторов, сопротивление которых можно принять чисто активным, и конденсатора, обладающего лишь емкостным сопротивлением.

Для включения измерительных приборов панель снабжена специальными гнездами.

Порядок выполнения:

1. Собрать трехфазную трехпроводную электрическую цепь (рис. 4.4).

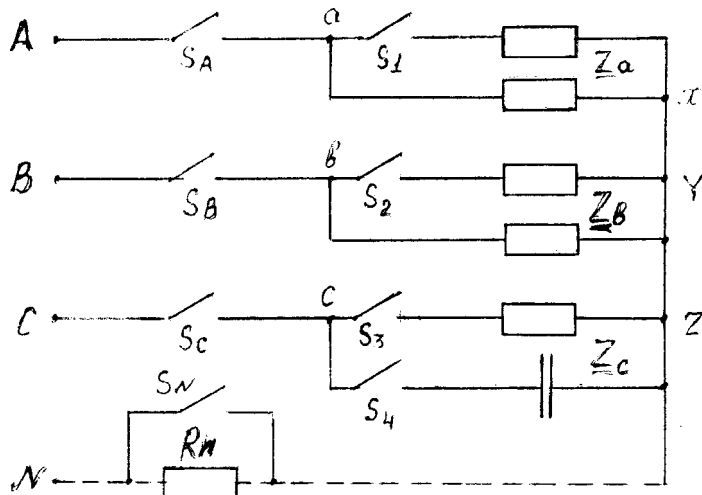


Рис. 4.4. Схема для исследования трехфазной электрической цепи

2. Установить симметричную нагрузку и измерить фазные (линейные) токи, фазные и линейные напряжения, а также напряжение смещения нейтрали. Вычислить сопротивления нагрузок фаз. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

3. Установить несимметричную однородную (одинаковый характер фазных нагрузок) нагрузку и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

4. Установить несимметричную неоднородную нагрузку, включив в фазу С конденсатор и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характеристики и параметры трехфазной трехпроводной электрической цепи

| Режимы работы цепи | ИЗМЕРЕНО | | | | | | | | | | Вычислено | | |
|------------------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | U_{AB} | U_{BC} | U_{CA} | U_a | U_b | U_c | U_{Nn} | I_a | I_b | I_c | Z_a | Z_b | Z_c |
| | В | | | | | | А | | | | Ом | | |
| Симметричная нагрузка | | | | | | | | | | | | | |
| Несимметрич. однородная нагрузка | | | | | | | | | | | | | |
| Несимметрич. неоднородная нагрузка | | | | | | | | | | | | | |
| Обрыв фазного провода | | | | | | | | | | | | | |
| Короткое замыкание фазы | | | | | | | | | | | | | |

5. Установить однородную нагрузку фаз.
6. Отключить один из фазных проводов и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты занести в табл. 4.1.
7. Восстановить трехфазную трехпроводную цепь.
8. Выполнить короткое замыкание одной из фаз и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты занести в табл. 4.1.
9. По данным таблицы 5.1 построить векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима работы цепи, указанного в таблице.
10. Подключить идеализированный (не обладающий сопротивлением) нейтральный провод, который показан на рис. 4.4 штриховой линией. Сопротивление R_N должно быть замкнуто накоротко.
11. Установить симметричную нагрузку. Измерить линейные и фазные напряжения, фазные (линейные) токи и ток в нейтральном проводе. Вычислить величины сопротивлений фазных нагрузок. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Характеристики и параметры трехфазной четырехпроводной цепи при $R_N=0$

| Режимы работы цепи | ИЗМЕРЕНО | | | | | | | | | | Вычислено | | |
|------------------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | U_{AB} | U_{BC} | U_{CA} | U_a | U_b | U_c | I_a | I_b | I_c | I_n | Z_a | Z_b | Z_c |
| | В | | | | | А | | | | | Ом | | |
| Симметричная нагрузка | | | | | | | | | | | | | |
| Несимметрич. однородная нагрузка | | | | | | | | | | | | | |
| Несимметрич. неоднородная нагрузка | | | | | | | | | | | | | |
| Обрыв фазного провода | | | | | | | | | | | | | |

12. Установить несимметричную однородную нагрузку и повторить измерения и вычисления п.11. Результаты занести в табл. 4.2.
13. Установить несимметричную неоднородную нагрузку и повторить измерения и вычисления п.11. Результаты занести в табл. 4.2.
14. Установить однородную нагрузку фаз.
15. Отключить один из фазных проводов и повторить измерения и вычисления п.11. Результаты занести в табл. 4.2.
15. По данным табл. 4.2 построить векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима работы цепи, указанного в таблице.
17. Восстановить трехфазную четырехпроводную электрическую цепь.
18. Включить в нейтральный провод резистор R_N .
19. Установить симметричную нагрузку. Измерить линейные и фазные напряжения, напряжение смещения нейтрали, фазные (линейные) токи и ток в нейтральном проводе. Вычислить величины сопротивлений фазных нагрузок. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 45.1.
20. Установить несимметричную однородную нагрузку и повторить измерения и вычисления п.19. Результаты занести в табл. 4.3.
21. Установить несимметричную неоднородную нагрузку и повторить измерения и вычисления п.19. Результаты занести в таблицу 4.3.
22. Отключить один из фазных проводов и повторить измерения и вычисления п.19. Результаты занести в табл. 4.3.

23. По данным табл. 4.3 построить векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима работы цепи, указанного в таблице.

24. Сформулировать выводы по работе.

Таблица 4.3

Характеристики и параметры трехфазной четырехпроводной цепи при $R_N \neq 0$

| Режимы работы цепи | ИЗМЕРЕНО | | | | | | | | | | | ВЫЧИСЛЕНО | | |
|------------------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | U_{AB} | U_{BC} | U_{CA} | U_a | U_b | U_c | U_{Nn} | I_a | I_b | I_c | I_n | Z_a | Z_b | Z_c |
| | В | | | | | | | А | | | | Ом | | |
| Симметричная нагрузка | | | | | | | | | | | | | | |
| Несимметрич. однородная нагрузка | | | | | | | | | | | | | | |
| Несимметрич. неоднородная нагрузка | | | | | | | | | | | | | | |
| Обрыв фазного провода | | | | | | | | | | | | | | |

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Таблицы результатов измерений и вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назвать области применения трехпроводных и четырехпроводных трехфазных цепей.
2. Каково назначение нейтрального провода?
3. Каковы основные соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при различных режимах работы трехфазной цепи.
4. Пояснить порядок построения векторных диаграмм токов и напряжений.
5. Как определить характер фазных нагрузок по векторным диаграммам токов и напряжений?

Лабораторная работа №5

Исследование однофазного трансформатора

Цель работы: ознакомиться с устройством и принципом действия однофазного трансформатора. Опытным путем исследовать работу трансформатора на холостом ходу, при коротком замыкании и под нагрузкой. Построить рабочие характеристики.

Краткие теоретические сведения

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения с условием сохранения частоты.

Трансформаторы получили широкое распространение при передаче электрической энергии на большие расстояния и для распределения энергии между ее потребителями. Трансформаторы, используемые в системе электроснабжения для обеспечения электроэнергией основных потребителей, называются силовыми. Они могут быть повышающими и понижающими. От синхронных генераторов на электрических станциях обычно получают электрическую энергию напряжением порядка 10 кВ при токе порядка десятков кА. Электрическую энергию, характеризующуюся такими токами, неэкономично передавать на большие расстояния из-за значительных в этом случае потерь активной мощности в линии, равной $\Delta P = 3I^2 R$. Поэтому с помощью повышающих трансформаторов ток, передаваемый в линию электропередачи, понижают – при условии соответствующего повышения напряжения, с целью уменьшения потерь в линии. На месте потребления, с помощью понижающих трансформаторов, напряжение уменьшается до нужной величины. Область применения трансформаторов очень широка. Они применяются в электротермических установках, преобразовательных устройствах, в радиотехнике, устройствах автоматического управления, электродуговой сварке. Условное изображение трансформаторов представлено на рис. 5.1,б,в.

Трансформатор состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника – магнитопровода 1, (рис. 5.1,а), на котором размещены две обмотки: первичная 1, к которой подводят напряжение U_1 от источника питания (она имеет число витков w_1), и вторичная 2, к которой подключают потребителей на напряжение U_2 (с числом витков w_2). Начала обмотки обычно обозначают А и а, концы Х и х.

Для уменьшения потерь мощности на нагревание стали за счет *гистерезиса* и вихревых токов магнитопровод трансформаторов собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,5 мм, изолированных друг от друга бумажной или лаковой изоляцией.

По типу или конфигурации магнитопровода трансформаторы подразделяют на стержневые, броневые и прочие. Горизонтальные части магнитопровода 1, 2 (рис. 5.1 а) называют ярмом, а вертикальные 3 – стержнем. Магнитопровод броневое типа применяется для сухих трансформаторов малой мощности. Наружные броневые стержни этого магнитопровода частично защищают обмотки трансформатора от механических повреждений.

Обмотки трансформаторов обычно выполняют из медного изолированного круглого или прямоугольного сечения провода. По способу охлаждения трансформаторы делятся на сухие (серия ТС) и масляные (серия ТМ).

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Под действием переменного напряжения U_1 по виткам первичной обмотки протекает переменный ток I_1 , создающий переменную намагничивающую силу $F_1 = I_1 w_1$, которая, в свою очередь, создает переменный основной магнитный поток Φ (рис. 5.1 а), замыкающийся по стальному магнитопроводу. Замыкаясь, магнитный поток Φ оказывается сцепленным как с первичной, так и с вторичной обмотками и наводит в обеих обмотках электродвижущие силы, действующие значения которых равны:

$$E_1 = 4.44 f_1 w_1 \hat{O}_m; \quad E_2 = 4.44 f_2 w_2 \hat{O}_m,$$

где Φ_m – амплитуда магнитного потока; f_1 – частота сети переменного тока; w_1 и w_2 – соответственно число витков первичной и вторичной обмоток.

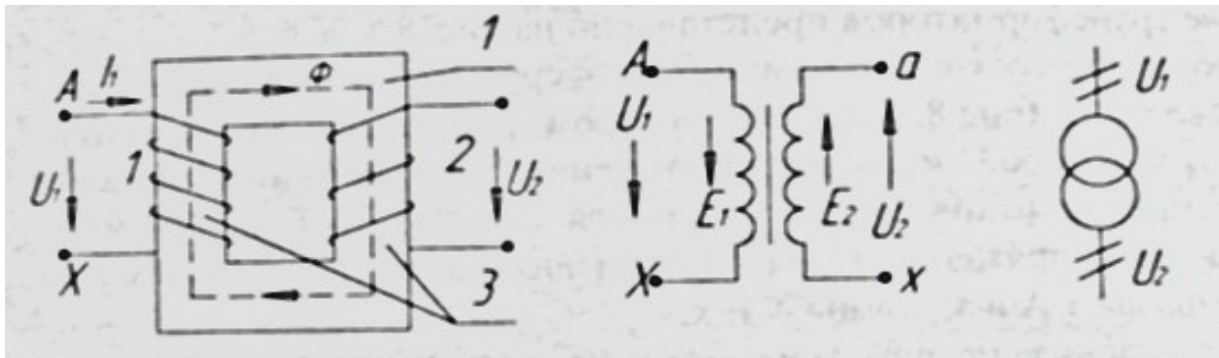


Рис. 5.1. Графические обозначения трансформатора

Таким образом, при подключении первичной обмотки трансформатора к источнику переменного тока на зажимах вторичной обмотки индуцируется переменная ЭДС E_2 , вторичная обмотка становится источником питания и к ней можно присоединить какой-либо электроприемник.

Основные параметры, характеризующие трансформатор:

- номинальная мощность S_H , ВА – указывается в паспорте;
- номинальные напряжения: первичной обмотки U_{1H} , В, вторичной обмотки U_{2H} , В – указывается в паспорте;
- номинальные токи: первичной обмотки I_{1H} , А, вторичной обмотки I_{2H} , А, которые определяются для однофазного трансформатора по формулам:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}}; \quad I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}};$$

- коэффициент трансформации, представляющий отношение ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора, или отношение количества витков w_1 и w_2 этих обмоток:

$$k_{\delta\delta} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Величину коэффициента трансформации можно определить с достаточной точностью из опыта холостого хода (когда вторичная обмотка разомкнута, $I_2=0$ и I_1 очень мал) как отношение

$$k_{\delta\delta} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}.$$

- коэффициент полезного действия η определяют как отношение активной мощности, получаемой потребителем, к активной мощности, потребляемой трансформатором из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_2}$$

где $\sum \Delta P$ – активная мощность потерь (потери мощности) в трансформаторе.
 - коэффициент нагрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$$

Основные рабочие характеристики трансформатора (снимаются при постоянных значениях U_{1H} и частоты сети f_1):

$$U_2 = f(\beta); \quad \eta = f(\beta); \quad \cos \varphi_1 = f(\beta);$$

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} \cdot 100\% = f(\beta)$$

где $\cos \varphi_1$ – коэффициент мощности первичной цепи.

Зависимость напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 или от коэффициента нагрузки β называется внешней характеристикой трансформатора. Внешняя характеристика дает возможность определить изменение напряжения U_2 при увеличении нагрузки от холостого хода до номинальной и более.

Опыт холостого хода трансформатора.

Это такой режим работы трансформатора, при котором к первой обмотке подведено номинальное напряжение U_{1H} , а вторичная обмотка разомкнута.

Измерения, проведенные при опыте холостого хода, позволяют определить:

– номинальное напряжение на зажимах вторичной обмотки: $U_{20} = U_{2H}$;

$$k_{cp} \approx \frac{U_{1H}}{U_{2H}};$$

– коэффициент трансформации:

– ток холостого хода I_{10} , подсчитывается в процентах от номинального тока

$$I_{10\%} = \frac{I_{10}}{I_{1H}} \cdot 100\%$$

первичной обмотки I_{1H} :

– активную мощность P_0 , потребляемую трансформатором из сети на покрытие потерь в сердечнике;

– параметры намагничивающего контура схемы замещения трансформатора на холостом ходу (рис. 5.2):

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

– коэффициент мощности $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_{10}}$.

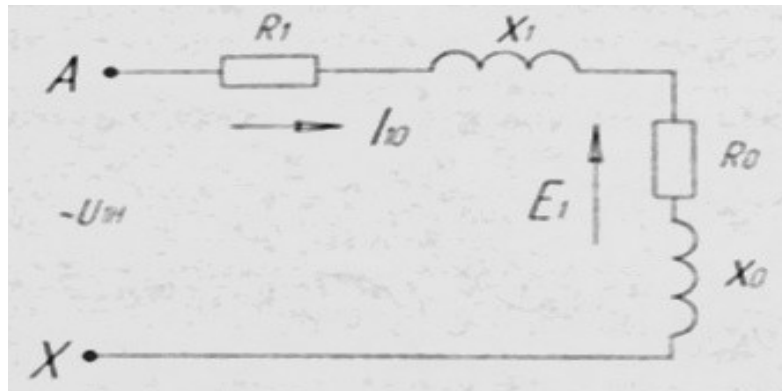


Рис. 5.2. Г-образная схема замещения трансформатора

В этом режиме работы к первичной обмотке трансформатора подводится номинальное напряжение U_{1H} , а вторичная обмотка замыкается на сопротивление нагрузки. Мощность, потребляемая трансформатором из сети:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

А мощность, отдаваемая во внешнюю цепь:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Величина тока I_2 и его сдвиг по фазе φ_2 по отношению к напряжению U_2 зависит от величины и характера сопротивления нагрузки $Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$.

Работа трансформатора под нагрузкой.

Нагрузки трансформатора оценивают коэффициентом нагрузки β и определяют как отношение токов:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}.$$

Важнейшей характеристикой трансформатора является его внешняя характеристика. Это зависимость $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1H} = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$, (рис. 5.3).

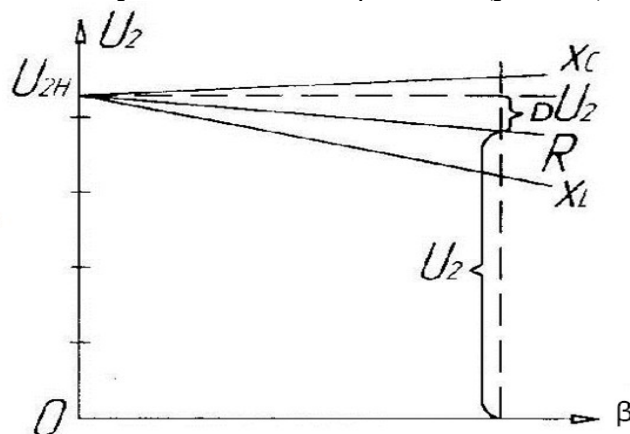


Рис. 5.3. Внешние характеристики трансформатора

Внешние характеристики трансформатора зависят от характера нагрузки.

Работа трансформатора под нагрузкой позволяет снять внешнюю характеристику трансформатора и определить КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Опыт короткого замыкания.

Для проведения опыта вторичную обмотку замыкают накоротко при первичном напряжении, пониженным регулятором напряжения до такой величины, при которой токи в обмотках будут равны номинальным, т.е. паспортным: $I_1 = I_{1H}$; $I_2 = I_{2H}$.

Напряжение U_{1k} , при котором проводится опыт короткого замыкания, называется абсолютным напряжением короткого замыкания.

Отношение этого напряжения к первичному номинальному, выражению в процентах, называется относительным напряжением короткого замыкания U_k :

$$U_k = \frac{U_{1k}}{U_1} \cdot 100\%$$

Обычно U_k имеет значение (5.5 – 10.5)% U_{1H} .

Можно определить активную $U_{ак}$ и индуктивную $U_{рк}$ составляющие относительного напряжения короткого замыкания в процентах

$$U_{ак} = \frac{R_k I_{1k}}{U_{1H}} \cdot 100\% = \frac{P_{к.Н}}{S_H} \cdot 100\%$$

где

$$R_k = \frac{P_{к.Н}}{I_{1H}^2};$$

$$U_{рк} = \sqrt{U_k^2 - U_{ак}^2}$$

Поскольку опыт короткого замыкания проводится при напряжении, пониженном в 10-20 раз по сравнению с номинальным, а ток вторичной обмотки действует размагничивающе, то здесь можно пренебречь мощностью потерь в стали и считать, что трансформатор потребляет из сети в этом режиме лишь мощность, расходуемую на нагрев обмоток (потери мощности в меди):

$$P_{к.Н} = P_M = I_{2H}^2 R_2 = U_{1k} I_{1H} \cos \varphi_k$$

Если потери мощности в стали в этом режиме постоянны (при $U_{1k} = const$), то потери мощности в меди являются переменными.

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$$

Введя коэффициент нагрузки β , можно выразить мощность потерь в меди в режиме отличном от номинального $P_k = \beta^2 P_{к.Н}$. При $\beta = 0$ (холостой ход), $P_k = 0$, а при $\beta = 1$ (номинальная нагрузка или опыт короткого замыкания), $P_k = P_{к.Н}$.

На рис. 5.4 показаны зависимости потерь холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k , а также КПД в зависимости от коэффициента нагрузки β .

Из опыта короткого замыкания определяются номинальная мощность потерь в обмотках трансформатора $P_{к.н}$ и параметры его обмоток, а также напряжение короткого замыкания U_k и токи в аварийном режиме короткого замыкания:

$$I_{1k} = \frac{U_{1H}}{Z_k}; \quad I_{2k} = k_{\delta\delta} I_{2H},$$

где

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}; \quad R_k = R_1 + R_2'; \quad X_k = X_1 + X_2';$$

$\left. \begin{array}{l} R_2' = k_{mp}^2 R_2; \\ X_2' = k_{mp}^2 X_2. \end{array} \right\}$ – активные и индуктивные сопротивления вторичной обмотки трансформатора, приведенные к первичной обмотке.

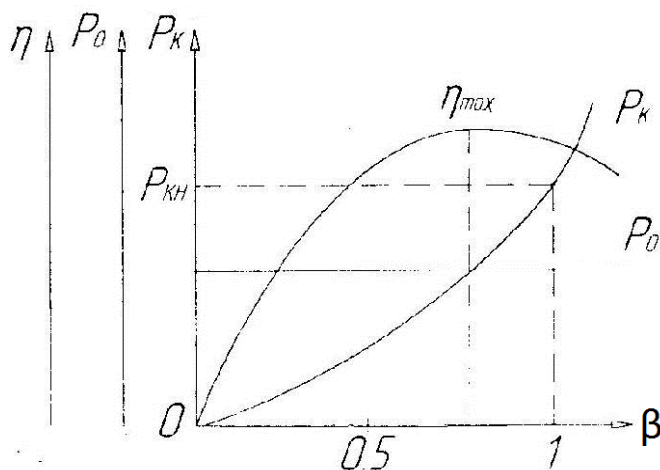


Рис. 5.4. Характеристики трансформатора

Описание лабораторной установки

Эксперименты выполняются на лабораторном оборудовании компьютерного исполнения с использованием мультиметров и аналоговых электроизмерительных приборов. Электрические цепи собираются на монтажном плато.

В экспериментах используются: регулируемый автотрансформатор А1 (модуль 318.1), трехфазная трансформаторная группа А2 (модуль 347.1), блок мультиметров Р1 (модуль 508.2), измеритель мощностей Р2 (модуль 507.2), реостат А13(модуль 323.3). В качестве нагрузки трансформатора рекомендуется использовать дополнительный реостат $R \approx 1400 \text{ Ом}$.

Порядок выполнения работы

Опыт холостого хода

1. Ознакомиться с оборудованием, используемым в серии экспериментов по исследованию однофазного трансформатора.

2. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

3. Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1 (модуль 318.1).

4. Соединить электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора А1 (модуль 318.1) с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220В (выполняется преподавателем).

5. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, изображенной на рис. 5.5.

6. К вторичной обмотке трансформатора подключить вольтметр.

7. Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 (модуль 318.1) в крайнее против часовой стрелки положение.

8. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

9. Активизировать мультиметры блока Р1 (модуль 508.2), задействованные в эксперименте.

10. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1(модуль 318.1), установить номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора и выполнить измерение на вторичной обмотке.

11. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

12. По формуле

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2}$$

рассчитать коэффициент трансформации исследуемого трансформатора.

13. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

14. Активизировать мультиметры блока Р1(модуль 508.2), задействованные в эксперименте.

15. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1(модуль 318.1), изменять напряжение U на выводах первичной и вторичной обмоток испытуемого однофазного трансформатора в диапазоне 0...220В и занести показания вольтметра Р6.1 (напряжение U) и амперметра Р6.2 (ток I_0 первичной обмотки трансформатора), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (модуль 507.2) – активная P_0 и реактивная Q_0 мощности, потребляемые трансформатором в таблицу 5.6.

16. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

17. Используя данные таблицы 5.1, вычислить соответствующие напряжению U значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 5.1.

12. Используя данные таблицы 5.1, построить характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ однофазного трансформатора.

Таблица 5.1

| | | | | | | | | | | |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U_1 , В | | | | | | | | | | |
| U_2 , В | | | | | | | | | | |
| I_0 , мА | | | | | | | | | | |
| P_0 , Вт | | | | | | | | | | |
| Q_0 , Вт | | | | | | | | | | |
| $\cos \varphi_0$ | | | | | | | | | | |

Опыт короткого замыкания

1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соединить гнезда защитного заземления "⊥" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1(модуль 318.1).

3. Соединить электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора А1(модуль 318.1) с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220В (выполняется преподавателем).

Рис. 5.5.
:ma

4. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, изображенной на рис. 5.6.

5. Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 (модуль 318.1) в крайнее против часовой стрелки положение.

6. В трехфазной трансформаторной группе А2 (модуль 347.1) переключателем установить желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

7. Установить суммарное сопротивление реостата А13 (модуль 323.3) равным 200 Ом.

8. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

9. Активизировать мультиметры блока Р1(модуль 508.2), задействованные в эксперименте.

10. Медленно вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 (модуль 318.1) по часовой стрелке, увеличивать ток I_K первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора до тех пор пока показания амперметра Р6.2 не достигнут **0,5А (не более!)** и занести показания амперметра Р6.2 (ток I), вольтметра Р6.1 (напряжение U), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (модуль 507.2) – активная P_K и реактивная Q_K мощности, потребляемые трансформатором в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

| | | | | | | | | | | |
|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| I_K, A | | | | | | | | | | |
| U, B | | | | | | | | | | |
| $P_K, Bт$ | | | | | | | | | | |

11. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

12. Используя данные таблицы 5.2, построить характеристики короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$ однофазного трансформатора.

Работа однофазного трансформатора с нагрузкой

1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1 (модуль 318.1).

3. Соединить электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора А1(модуль 318.1) с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220В (выполняется преподавателем).

4. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, изображенной на рис. 5.6.

Разомкнуть выводы вторичной обмотки трансформатора и подключить к ним в качестве нагрузки дополнительный реостат R_2 ($R \approx 1400$ Ом), вольтметр РЗ и амперметр Р4. Полученную схему эксперимента можно представить укрупнено так, как показано на рис. 5.7.

5. Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора А1(модуль 318.1) в крайнее против часовой стрелки положение.

6. В трехфазной трансформаторной группе А2 (модуль 347.1) переключателем установить желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

7. Установить суммарное сопротивление реостата А13 (модуль 323.3) равным 100 Ом.

8. Рассчитать номинальный ток вторичной обмотки трансформатора по формуле

$$I_{2ном} = \frac{S_{ф.ном}}{U_{2ном}},$$



Рис. 5.5.

ма

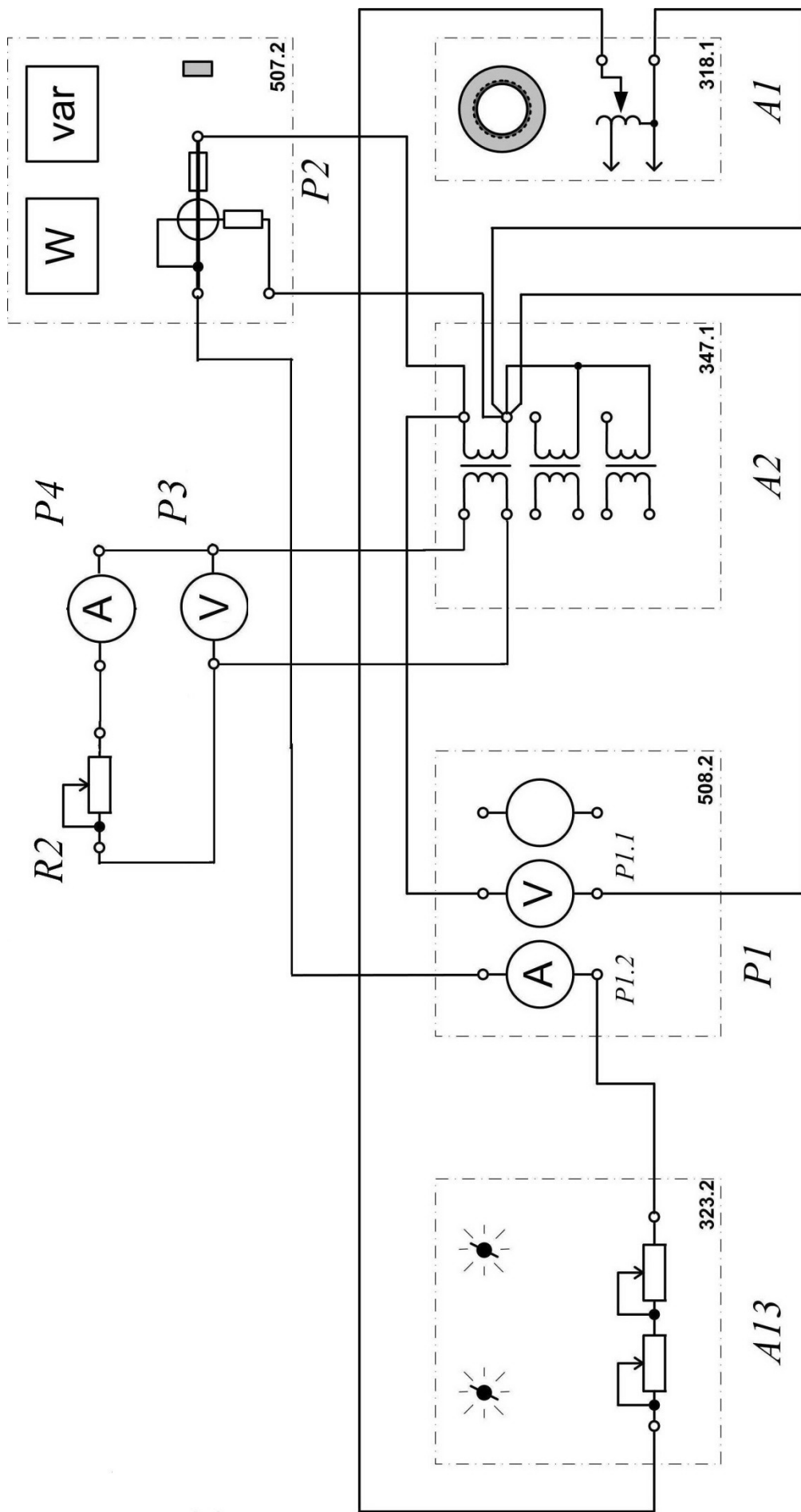


Рис. 5.7. Схема экспериментальной установки для исследования работы однофазного трансформатора под нагрузкой

где $S_{\text{ф.ном}}$ – номинальная мощность фазы трансформатора, равная 80 ВА; $U_{2\text{ном}}$ – установленное на блоке А2 номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

9. Используя известный $I_{2ном}$ и заданные значения β , рассчитать I_2 по уравнению $I_2 = \beta I_{2ном}$, записать полученные значения в табл. 5.3.

10. Установить наибольшее сопротивление реостата R_2 , использующегося в качестве нагрузки.

11. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

12. Активизировать мультиметры блока P1(модуль 508.2), а также ваттметр и варметр измерителя P2 (модуль 507.2), задействованные в эксперименте.

13. Уменьшая сопротивление нагрузочного реостата R_2 , устанавливать поочередно табличные значения I_2 , снять показания приборов и записать их в табл. 5.3. При проведении опыта напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора следует поддерживать неизменным $U_{1H} = const$.

14. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

15. Для построения рабочих характеристик вычислить по уравнениям:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{U_1 I_1};$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

где $\cos \varphi_2 = 1$;

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{U_2 I_2}{P_1} \cdot 100\% ;$$

$$\Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% .$$

где U_{20} – напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при $\beta = 0$.

Результаты занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

| β | ИЗМЕРЕНО | | | | ВЫЧИСЛЕНО | | | |
|---------|----------|-------|-------|-------|----------------|-------|--------|--------------|
| | I_1 | I_2 | U_2 | P_1 | $\cos \varphi$ | P_2 | η | ΔU_2 |
| | А | А | В | Вт | — | Вт | % | % – |
| 0 | | | | | | | | |
| 0.25 | | | | | | | | |
| 0.5 | | | | | | | | |
| 0.75 | | | | | | | | |
| 6.0 | | | | | | | | |

16. По данным таблицы 5.3 построить рабочие характеристики трансформатора: $U_2 = f(\beta)$, $\eta = f(\beta)$, $\cos \varphi_1 = f(\beta)$, $\Delta U_2 = f(\beta)$.

17. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$.

18. Сделать выводы по работе.

Форма отчетности:

1. Наименование работы.

2. Цель работы.

3. Схема экспериментальной установки для выполнения опыта холостого хода трансформатора.
4. Таблица измерений и вычислений результатов опыта холостого хода трансформатора.
5. Рабочие формулы для обработки результатов опыта холостого хода трансформатора.
6. Характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$.
7. Схема экспериментальной установки для выполнения опыта короткого замыкания трансформатора.
8. Таблица измерений результатов опыта короткого замыкания трансформатора.
9. Характеристики короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$.
10. Схема экспериментальной установки для выполнения опыта по исследованию работы трансформатора с нагрузкой.
16. Таблица измерений и вычислений результатов исследования работы трансформатора с нагрузкой.
12. Рабочие формулы для обработки результатов исследования работы трансформатора с нагрузкой.
13. Рабочие характеристики однофазного трансформатора $U_2 = f(\beta)$, $\eta = f(\beta)$, $\cos\varphi_1 = f(\beta)$, $\Delta U_2 = f(\beta)$.
14. Внешняя характеристика трансформатора $U_2 = f(I_2)$.
15. Выводы.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Каково назначение трансформатора?
2. Объясните принцип действия трансформатора.
3. Для чего предназначен опыт холостого хода трансформатора?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Для чего предназначен опыт короткого замыкания трансформатора?
6. Назовите причины потерь мощности в трансформаторе.
7. Какую мощность измерений ваттметр, включенный в первичную цепь трансформатора, в опыте холостого хода, в опыте короткого замыкания?
8. Каким образом уменьшают потери мощности в стали трансформатора за счет гистерезиса и вихревых токов?
9. Что такое внешняя характеристика трансформатора? Поясните ее вид.

Лабораторная работа №6

Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы: ознакомиться с устройством и принципом действия трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; приобрести практические навыки в сборке схемы установки; построить рабочие и механические характеристики.

Краткие теоретические сведения

Асинхронный двигатель (АД) трехфазного тока представляет собой электрическую машину, служащую для преобразования электрической энергии трехфазного тока в механическую.

Слово “асинхронный” означает несинхронный или неодновременный. При этом имеется в виду, что у асинхронного двигателя частота вращения магнитного поля статора отличается от частоты вращения ротора.

Благодаря простоте устройства, высокой надежности в эксплуатации и меньшей стоимости по сравнению с другими двигателями асинхронные двигатели трехфазного тока нашли широкое применение.

Трехфазный асинхронный двигатель изобретен выдающимся русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским в 1889г. Конструкция асинхронного двигателя, предложенная им, была настолько проста, надежна и экономична, что в основных чертах сохранилась до настоящего времени.

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора.

Статор состоит из алюминиевой или чугунной станины, внутри которой помещен сердечник – магнитопровод. Сердечник, собранный из штампованных листов электротехнической стали в виде цилиндра, на внутренней стороне имеет пазы, в которых размещена обмотка, питаемая от сети трехфазного тока и создающая вращающееся магнитное поле.

Ротор представляет собой стальной цилиндр, укрепленный на валу двигателя. На наружной поверхности ротора имеются пазы для укладки обмотки. Вал ротора вращается в подшипниках, закрепленных в торцевых щитах станины статора. В роторе происходит процесс преобразования электрической энергии трехфазного тока в механическую.

Для уменьшения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи сердечники статора и ротора набираются из листов электротехнической стали толщиной 0.35–0.5 мм. Сердечники статора и ротора, разделенные воздушным зазором, составляют магнитную цепь двигателя.

Обмотка каждой фазы статора укладывается в пазы и состоит из отдельных секций, имеющих несколько витков медного или алюминиевого изолированного провода.

Обмотки каждого статора соединяются между собой в звезду или треугольник; на щиток машины выводится шесть концов обмоток и обычно указывается два напряжения, например 220/380 В. Это означает, что двигатель может работать при одном из двух напряжений: 220 В – соединение фаз треугольником и 380 В – соединение фаз звездой.

По устройству обмотки ротора АД делятся на два типа: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется из медных алюминиевых стержней, закладываемых в пазы ротора и соединяемых по торцам кольцами из того же материала, что и стержни. В целом такая обмотка образует проводящую металлическую клетку, напоминающую «беличье колесо». Следует отметить, что как в АД с фазным ротором, так и в АД с короткозамкнутым ротором при работе цепь ротора всегда замкнута.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в АД при его работе.

При подключении обмотки статора к трехфазной сети переменного тока по фазам этой обмотки потекут токи, создающие вращающееся магнитное поле.

Частота вращения магнитного поля n_1 (синхронная частота вращения) зависит от частоты питающего напряжения f_1 и числа пар полюсов p обмотки статора, если $p=1$, а $f_1=50$ Гц, то

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

Угловая скорость магнитного поля:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с}$$

Синхронная частота вращения и угловая скорость в зависимости от числа пар полюсов имеют следующие величины, указанные в таблице 6.1.

Таблица 6.1

| p – число пар полюсов | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------|------|------|-------|------|------|------|
| n_1 , об./мин | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 |
| ω_1 , рад/с | 314 | 157 | 104.7 | 79.5 | 62.8 | 52.3 |

Вращающееся магнитное поле одного полюса замыкается через воздушный зазор, по сердечникам статора и ротора и, пересекая обмотку статора и ротора, наводит в них ЭДС самоиндукции E_1 и взаимоиндукции E_2 .

Действующее значение ЭДС фазы статора:

$$E_1 = 4.44 k_{об1} f_1 w_1 \Phi \approx U_1;$$

ротора:

$$E_2 = 4.44 k_{об2} f_2 w_2 \Phi,$$

где U_1 – фазное напряжение на обмотке статора; f_1 и f_2 – частоты изменения ЭДС в статоре и роторе; w_1 и w_2 – количество витков в фазных обмотках статора и ротора; $k_{об1}$ и $k_{об2}$ – обмоточные коэффициенты статора и ротора, учитывающие наличие сдвига фаз между ЭДС в соседних витках обмоток; Φ – магнитный поток.

Поскольку обмотка ротора замкнута накоротко, то по ней потечет ток I_2 . В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с током ротора I_2 создается электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор начнет вращаться в сторону вращения магнитного поля. Частота вращения ротора n_2 всегда меньше частоты вращения магнитного поля. Разность частот вращения магнитного поля и ротора $n_s = n_1 - n_2$ называется частотой скольжения; с этой частотой вращения поле статора вращается относительно ротора.

Относительная частота скольжения,

$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

называется скольжением асинхронного двигателя.

При номинальной нагрузке на валу АД номинальное скольжение $s_H=(2-8)\%$.

Номинальная частота вращения ротора n_2 указывается на табличке АД.

Рабочие свойства асинхронного двигателя определяются механической характеристикой, это $n_2 = f(M_{\text{дв}})$ (рис. 6.1) и рабочими характеристиками (рис. 6.2).

Под рабочими характеристиками понимаются зависимости потребляемой мощности P_1 , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos\varphi$, скольжения s , вращающего момента двигателя $M_{\text{дв}}$, коэффициента полезного действия η от полезной механической мощности на валу двигателя P_2 :

$$(n_1; I_1; \cos\varphi; S; M; \eta) = f(P_2).$$

При этом подводимое к двигателю напряжение является номинальным $U_1=U_H=const$, $f_1=f_H=const$. Примерный характер рабочих характеристик показан на рис. 6.2.

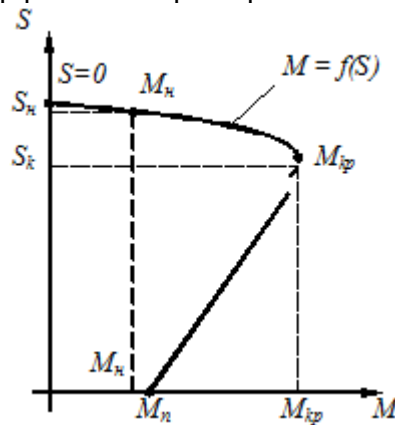


Рис. 6.1. Механическая характеристика асинхронного двигателя

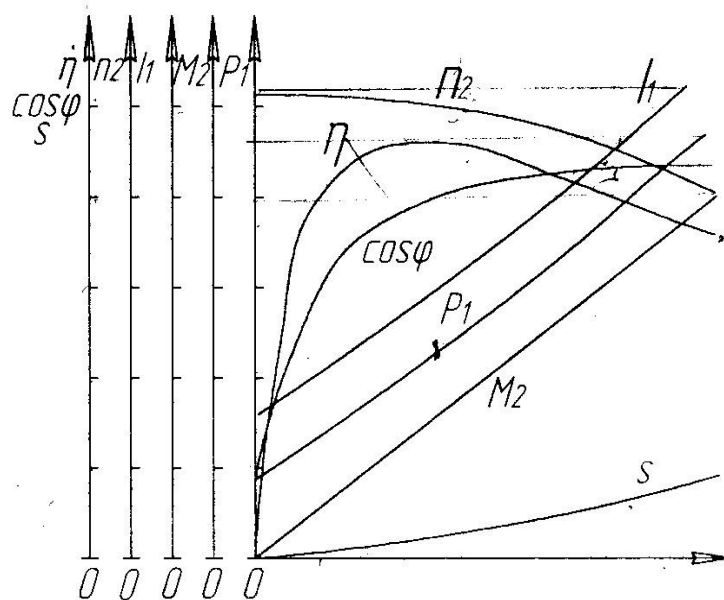


Рис. 6.2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Описание лабораторной установки

Эксперименты выполняются на лабораторном оборудовании компьютерного исполнения с использованием мультиметров и аналоговых электроизмерительных приборов. Электрические цепи собираются на монтажном плато.

Источник G1 (модуль 201.2) – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания G2 (модуль 206.1) двигателя постоянного тока используется для питания обмотки возбуждения машины постоянного тока M2 (модуль 101.2), работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений G5 (модуль 104) генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 (модуль 506.2) электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель получает питание через выключатель A6 (модуль 301.1) и трехфазную трансформаторную группу A2 (модуль 347.1) от трехфазного источника питания G1 (модуль 201.2).

Активная нагрузка A10 (модуль 306.1) используется для нагрузки генератора M2 (модуль 101.2).

С помощью мультиметров блока P1 (модуль 508.2) контролируются ток статорной обмотки испытуемого двигателя M1 (модуль 102.1), ток и напряжение якорной обмотки генератора M2 (модуль 101.2).

С помощью измерителя P2 (модуль 507.2) контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем M1 (модуль 102.1).

В таблице 6.2 указаны паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя M1 (модуль 102.1), а в таблице 6.3 – паспортные данные генератора постоянного тока независимого возбуждения M2 (модуль 101.2), используемого здесь в качестве нагрузки асинхронного двигателя.

Таблица 6.2

| P , Вт | U , В | I , А | n , об/мин | p , число пар полюсов | $\cos\varphi$ | η |
|----------|---------|---------|--------------|-------------------------|---------------|--------|
| 100 | 220 | 0.35 | 1250 | 2 | 0.73 | 36 |

Таблица 6.3

| P , Вт | U_{a1} , В | I_{a1} , А | U_{a2} , В | I_{a2} , А | n , об/мин | η |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| 90 | 220 | 0.56 | 220 | 0.2 | 1500 | 57.2 |

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Собрать электрическую схему тепловой защиты машины переменного тока (рис. 6.3), соединив гнезда ТК на блоках M1 (модуль 102.1) и G1 (модуль 201.2).
3. Соединить гнезда защитного заземления " \oplus " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1 (модуль 201.2).
4. Собрать электрическую схему для снятия рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 6.4).
5. Реостат A9 (модуль 307.1) поставить в нулевое положение по всем фазам ($R = 0$).
6. Предъявить схему для проверки преподавателю.
7. Переключатели режима работы источника G2 (модуль 206.1) и выключателя A6 (модуль 301.1) установить в положение «РУЧН.».
8. Регулировочную рукоятку источника G2 (модуль 206.1) повернуть до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 (модуль 306.1) – установить 0% от максимального значения.

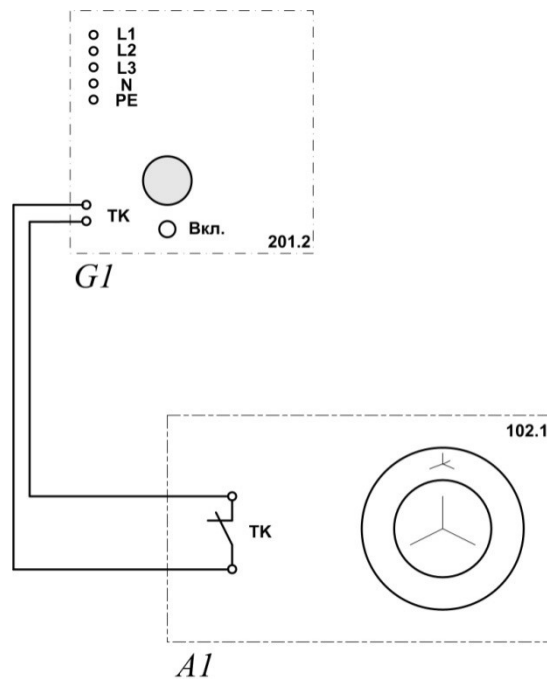


Рис. 6.3. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

9. В трехфазной трансформаторной группе А2 (модуль 347.1) установить номинальное первичное напряжение трансформатора 230В, номинальное вторичное напряжение трансформатора 220В.

10. Включить кнопки «СЕТЬ» блоков А6 (модуль 301.1), блок мультиметров Р1 (модуль 508.2) и активировать мультиметры, измеритель мощностей Р2 (модуль 507.2), указатель частоты вращения Р3 (модуль 506.2).

11. Включить источник G1 (модуль 201.2). О наличии напряжений на выходе источника должны сигнализировать светящиеся лампочки.

12. Запустить двигатель М1 (модуль 102.1) нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя А6 (модуль 301.1).

13. Нажать кнопку "ВКЛ." источника G2 (модуль 206.1).

14. Вращая регулировочную рукоятку источника G2 (модуль 206.1), установить номинальное напряжение на обмотке возбуждения генератора 220В.

15. Вращая регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 (модуль 306.1) – изменять значение активной нагрузки 0% до 100% , с шагом 10%.

Для каждого значения активной нагрузки записывать показания приборов в таблицу 6.4 (опытные данные). Приборы регистрируют следующие величины:

Вольтметр Р4 – линейное напряжение U_1 на статорной обмотке двигателя М1.

Амперметр Р1.1 – ток I_1 статорной обмотки двигателя М1;

Ваттметр и варметр – соответственно активную P_{11} и реактивную Q_{11} мощности одной фазы двигателя М1;

Указатель частоты вращения – частоту вращения n_2 двигателя М1;

Амперметр Р1.2 и вольтметр Р1.3 – соответственно ток I_a и напряжение U_a якорной обмотки генератора М2.

15. По завершении эксперимента нажать кнопки «ОТКЛ» выключателя А6 и источника G1.

16. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков А6, Р1, Р2, Р3.

17. Регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 установить в положение – 0%.

18. Используя опытные данные таблицы 6.4, вычислить для каждого значения напряжения U_a , В расчетные величины полезной активной мощности P_2 , Вт, полной потребляемой из сети активной мощности P_1 , Вт, полезного механического момента M_2 , Н.м, коэффициента мощности $\cos\varphi$, скольжения s и коэффициента полезного действия η асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по формулам:

$$P_2 = I_a U_a;$$

$$P_1 = 3P_{11};$$

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2};$$

$$\cos\varphi = \frac{P_{11}}{\sqrt{P_{11}^2 + Q_{11}^2}};$$

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%,$$

где n_1 – частота вращения магнитного поля, равная 1500 об/мин.

Занести полученные результаты в таблицу 7.4 (расчетные данные).

Таблица 6.4

| $P_a, \%$ | 0 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Опытные данные | | | | | | | | | | |
| $U_1, В$ | | | | | | | | | | |
| $I_1, А$ | | | | | | | | | | |
| $P_{11}, Вт$ | | | | | | | | | | |
| $Q_{11}, вар$ | | | | | | | | | | |
| $n_2, об/мин$ | | | | | | | | | | |
| $I_a, А$ | | | | | | | | | | |
| $U_a, В$ | | | | | | | | | | |

| Расчетные данные | | | | | | | | | | |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| P_2 , Вт | | | | | | | | | | |
| P_1 , Вт | | | | | | | | | | |
| M_2 , Н·м | | | | | | | | | | |
| $\cos \varphi$ | | | | | | | | | | |
| s , % | | | | | | | | | | |
| η , % | | | | | | | | | | |

19. Используя данные таблицы 6.4, построить в масштабе на одном графике рабочие характеристики $I_1=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $n_2=f(P_2)$, $s=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $\cos\varphi=f(P_2)$, $M_2=f(P_2)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

20. Используя данные таблицы 6.4, построить рабочий участок механической характеристики $n = f(M)$ асинхронного двигателя.

21. Сделать выводы по работе.

Форма отчетности:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки для исследования асинхронного двигателя.
4. Таблица результатов измерений и вычислений.
5. Рабочие формулы.
6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя $I_1=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $n_2=f(P_2)$, $s=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $\cos\varphi=f(P_2)$, $M_2=f(P_2)$.
7. Механическая характеристика асинхронного двигателя $n = f(M)$.
8. Выводы.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Объясните конструкцию короткозамкнутого асинхронного двигателя.
2. Что такое скольжение асинхронного двигателя? Какой диапазон изменения скольжения у асинхронного двигателя?
3. Как осуществляется реверсирование асинхронных двигателей трехфазного тока?
4. Какие характеристики асинхронного двигателя называются рабочими?
5. Какими способами можно регулировать частоту вращения асинхронного двигателя?
6. Изобразите механическую характеристику асинхронного двигателя.
7. От чего зависит вращающий момент асинхронного двигателя?
8. Какие виды потерь имеют место в асинхронных двигателях?

Лабораторная работа № 7

2 часа лабораторной работы проводится в форме дискуссии

Снятие времятоковой характеристики автоматического воздушного выключателя

Цель работы: изучить конструкции автоматических воздушных выключателей однополюсного и трехполюсного исполнения. На примере автоматического воздушного выключателя АП50 рассмотреть конструкцию и принцип действия теплового и электромагнитного расцепителя.

Порядок выполнения работы

Снять времятоковую характеристику автоматического однополюсного выключателя с использованием элементов стендов ЭА1-С-Р и ЭА2-С-Р.

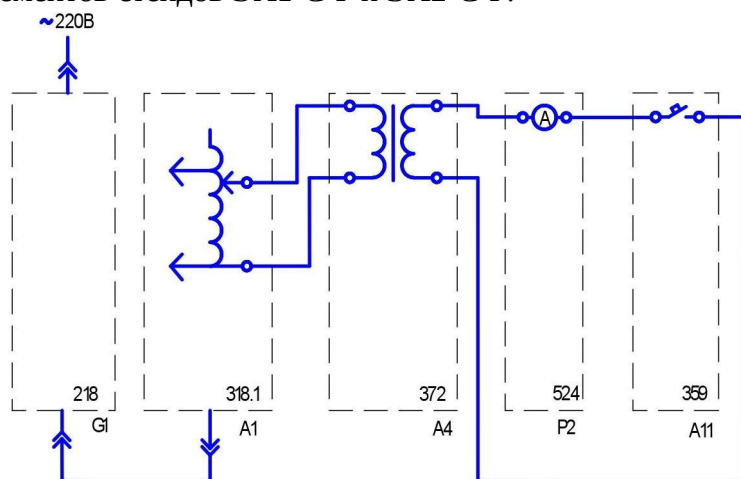


Рис. 7.1. Электрическая схема соединений

Таблица 7.1

Перечень аппаратуры

| Обозначение | Наименование | Тип | Параметры |
|-------------|---|--------|------------------------|
| G1 | Однофазный источник питания | 218 | ~ 220 В / 16 А |
| A1 | Регулируемый автотрансформатор | 318, 1 | ~ 0...240 В / 2 А |
| A4 | Однофазный трансформатор | 372 | 120 ВА / 220 / 24 В |
| A11 | Автоматический однополюсный трансформатор | 359 | ~ 230 В / 0,5 А |
| P2 | Измеритель тока и времени | 524 | 0...5 А / 0,01...999 с |

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора А1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
4. Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1.
5. Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя тока и времени P2.
6. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее по часовой стрелке положение.
7. Включите выключатель А11.
8. Включите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А1.

9. После отключения выключателя А11 снимите показания тока I и времени t , высвечивающиеся на индикаторах измерителя тока и времени Р2, и занесите их в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

| | | | | | | | | | |
|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| I, A | | | | | | | | | |
| t, c | | | | | | | | | |

10. Отключите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А1.

11. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 против часовой стрелки примерно на 45 градусов.

12. Спустя, например, 5 минут повторите операции, начиная с включения выключателя А11 и заканчивая поворотом регулировочной рукоятки автотрансформатора А1.

13. Операции повторяйте до тех пор, пока после включения выключателя «СЕТЬ» автотрансформатора А1 выключатель А11 не перестанет отключаться.

14. Отключите автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

15. Отключите выключатели «СЕТЬ» автотрансформатора А1, измерителя тока и времени Р2.

16. Используя данные таблицы (пункт «9»), постройте искомую времятоковую характеристику $t = f(I)$ автоматического воздушного выключателя.

17. Сформулируйте выводы по проделанной работе

Форма отчетности:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки для исследования автоматического воздушного выключателя.
4. Таблица результатов измерений и вычислений.
5. Времятоковые характеристики автоматического воздушного выключателя $t = f(I)$.
7. Механическая характеристика асинхронного двигателя $n = f(M)$.
8. Выводы.

Основная литература

1. Емцев А.Н. Аппараты и схемы электрической части станций и подстанций: учебное пособие / В.А. Фадеев. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – 254 с.
2. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Объясните конструкцию и принцип действия автоматического воздушного выключателя.
2. Какие виды защиты есть в автоматическом воздушном выключателе до 1000 В?

Лабораторная работа № 8

2 часа лабораторной работы проводится в форме дискуссии

Работа магнитного пускателя в нереверсивной схеме управления асинхронным двигателем

Цель работы: ознакомиться с составом оборудования в схеме управления асинхронным двигателем; изучить устройство и принцип действия нереверсивного магнитного пускателя.

Порядок выполнения работы

Собрать схему включения асинхронного двигателя с использованием элементов стендов ЭА1-С-Р и ЭА2-С-Р.

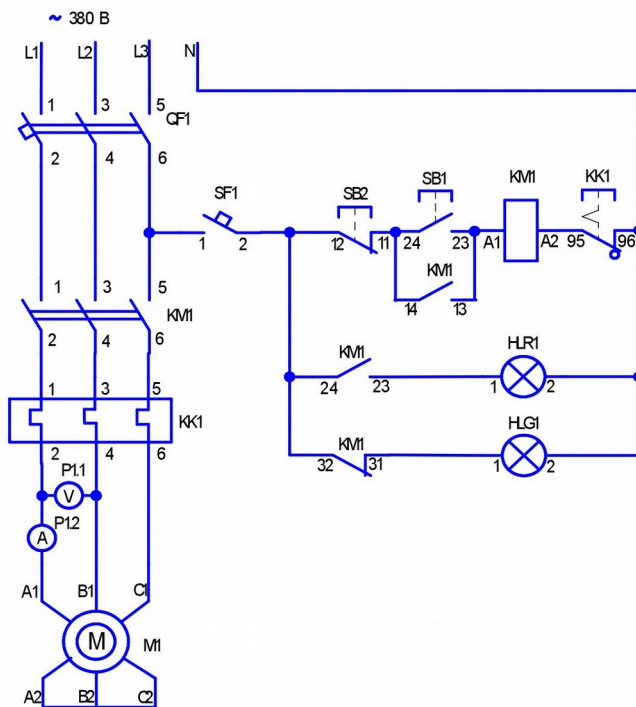


Рис. 8.1. Электрическая схема соединений

Таблица 8.1

Перечень аппаратуры

| Обозначение | Наименование | Тип | Параметры |
|-------------|--|-------|--|
| G1 | Однофазный источник питания | 218 | ~ 220 В / 16 А |
| G2 | Трехфазный источник питания | 201,2 | ~ 400 В / 16 А |
| M1 | Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором | 106 | 120 Вт / ~ 380 В / 1500 мин ⁻¹ |
| A2 | Контактор | 364 | ~ 380 В / 10 А |
| A5 | Электротепловое реле | 356 | ~ 660 В / 10 А уставка 0,42...0,58 А |
| A10 | Автоматический трехполюсный выключатель | 360 | ~ 440 В / 10 А |
| A11 | Автоматический однополюсный выключатель | 359 | ~ 230 В / 0,5 А |
| A12 | Кнопочный пост | 354.1 | ~ 500 В / 10 А / 3 кнопки |

| | | | |
|-----|----------------------------|-------|--|
| | управления | | |
| A13 | Блок световой сигнализации | 355,1 | ~ 220 В / 3 лампы |
| P1 | Блок мультиметров | 508,3 | 3 мультиметра: ~ 0...100 В / 0...10 А / 0...20 МОм |

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.

3. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

4. Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1.

5. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.

6. Активизируйте используемые мультиметры P1.1 и P1.2.

7. Включите источник G2. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

8. Включите выключатель A10.

9. Включите выключатель A11. В результате загорится зеленая лампа блока A13, сигнализирующая о готовности двигателя M1 к пуску.

10. Нажмите верхнюю кнопку поста управления A12. В результате произойдет прямой пуск двигателя M1, о чем будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа в блоке A13. Вольтметр P1.1 и амперметр P1.2 покажут напряжение и ток двигателя M1. Зеленая лампа в блоке A13 погаснет.

11. Нажмите нижнюю кнопку поста управления A12. В результате произойдет отключение двигателя M1 от электрической сети и последующий его останов. Двигатель M1 будет готов к очередному пуску, о чем будет сигнализировать загоревшаяся зеленая лампа в блоке A13. Красная лампа в блоке A13 погаснет.

12. По завершении эксперимента отключите нажатием на кнопку «красный гриб» трехфазный источник питания G2 и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

Форма отчетности:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки для пуска асинхронного двигателя.
4. Выводы.

Основная литература

1. Емцев А.Н. Аппараты и схемы электрической части станций и подстанций: учебное пособие / В.А. Фадеев. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – 254 с.
2. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
2. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Объясните конструкцию магнитного пускателя в схеме пуска асинхронного двигателя.
2. Каким образом осуществляется реверсирование асинхронного двигателя.
3. Объясните физические процессы, происходящие асинхронном двигателе в момент пуска.

Практическое занятие 1

Решение задачи постоянного тока, используя законы Кирхгофа

Цель работы: научиться применять законы Кирхгофа для решения задачи постоянного тока.

Для линейной электрической цепи постоянного тока, схема которой изображена на рис. 1.1,а, необходимо выполнить следующее: составить математическую модель цепи, определить токи во всех ветвях электрической цепи, определить показания вольтметра магнитоэлектрической системы (входное сопротивление прибора принять бесконечно большим), составить баланс мощности, построить потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи.

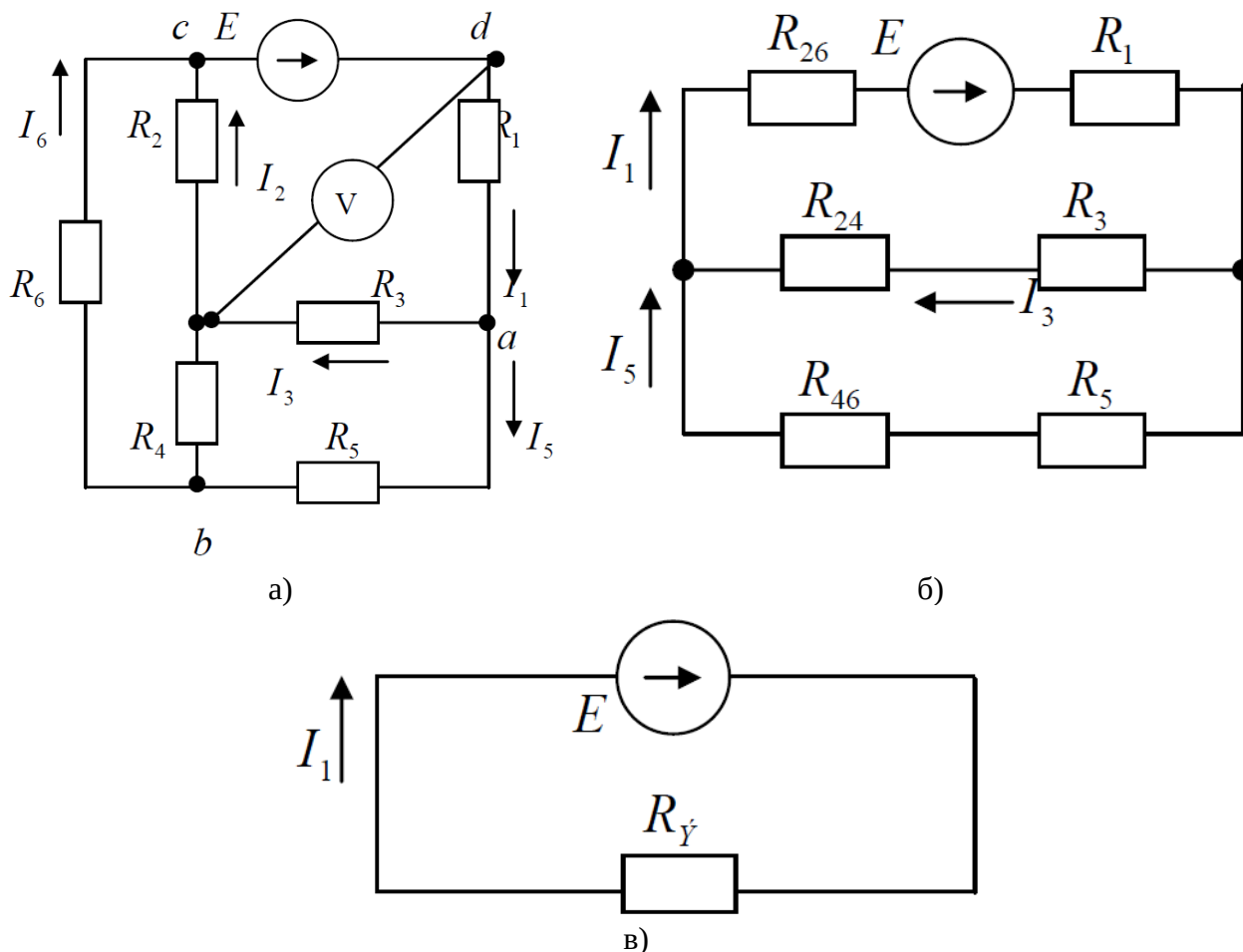


Рис.1.1. Схема электрической цепи постоянного тока

Исходные данные: $E = 100\text{В}$; $R_1 = 50\text{Ом}$; $R_2 = 100\text{Ом}$; $R_3 = 80\text{Ом}$; $R_4 = 150\text{Ом}$;
 $R_5 = 30\text{Ом}$; $R_6 = 120\text{Ом}$.

Решение.

Условно положительные направления искомых токов указаны на рис. 1.1,а.

Математическая модель электрической цепи представляет собой совокупность уравнений, составленных на основании законов Кирхгофа. Количество уравнений, составляемых на основании 1-ого закона Кирхгофа, на единицу меньше количества узлов, а по 2-ому – определяется количеством элементарных контуров. Элементарный контур – это контур, не пересекающийся ни одной ветвью.

В заданной цепи 4 (четыре) узла и 3 (три) элементарных контура. Это означает, математическая модель этой цепи включает в свой состав 3 (три) уравнения, составленных на основании 1-ого закона Кирхгофа 3 (три) уравнения – на основании 2-ого закона Кирхгофа:

$$\left. \begin{array}{l} ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \end{array} \right\}$$

Заданная электрическая цепь имеет один источник электрической энергии. Для анализа таких цепей чаще всего используется метод эквивалентных преобразований, который предполагает сворачивание заданной цепи до двухэлементной (рис. 1.1,в).

Свернуть изначально заданную схему (рис. 1.1,а) без дополнительных преобразований практически невозможно, поскольку она не содержит последовательно и параллельно соединенных элементов. Существующий набор таких преобразований весьма разнообразен. В данном случае возможно преобразование треугольника, составленного из резисторов R_2 , R_4 и R_6 в эквивалентную звезду из резисторов R_{24} , R_{26} и R_{46} . В результате таких преобразований получается электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 1.1,б.

Величины сопротивлений резисторов эквивалентной звезды определяются так:

$$R_{24} = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4 + R_6} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15 + 12} = 4.05 \quad \text{Ом};$$

$$R_{26} = \frac{R_2 R_6}{R_2 + R_4 + R_6} = \frac{10 \cdot 12}{10 + 15 + 12} = 3.24 \quad \text{Ом};$$

$$R_{46} = \frac{R_4 R_6}{R_2 + R_4 + R_6} = \frac{15 \cdot 12}{10 + 15 + 12} = 4.86 \quad \text{Ом}.$$

В полученной таким образом электрической цепи имеются последовательные и параллельные соединения резисторов. Эквивалентное сопротивление цепи определится так:

$$R_{\Sigma} = R_{26} + R_1 + \frac{(R_3 + R_{24})(R_5 + R_{46})}{R_3 + R_5 + R_{24} + R_{46}} = 3,24 + 5 + \frac{(8 + 4,05)(3 + 4,86)}{8 + 3 + 4,05 + 4,86} = 13 \quad \text{Ом}.$$

Судя по схеме, изображенной на рис. 1.1,в, ток I_1 определится по закону Ома:

$$I_1 = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{100}{13} = 7,69 \quad \text{А}.$$

Токи I_3 и I_5 определяются по схеме, изображенной на рис. 1.1,б:

$$I_3 = I_1 \frac{R_5 + R_{46}}{R_3 + R_5 + R_{24} + R_{46}} = 7,69 \frac{3 + 4,86}{8 + 3 + 4,05 + 4,86} = 3,04 \text{ А};$$

$$I_5 = I_1 \frac{R_3 + R_{24}}{R_3 + R_5 + R_{24} + R_{46}} = 7,69 \frac{8 + 4,05}{8 + 3 + 4,05 + 4,86} = 4,65 \text{ А}.$$

Величины остальных токов определяются из уравнений математической модели для исходной цепи.

Из четвертого уравнения математической модели следует, что

$$I_2 = \frac{E - I_1 R_1 - I_3 R_3}{R_2} = \frac{100 - 7,69 \cdot 5 - 3,04 \cdot 8}{10} = 3,72 \text{ А}.$$

Из третьего уравнения следует, что

$$I_6 = I_1 - I_2 = 7,69 - 3,72 = 3,97 \text{ А}.$$

А из второго уравнения следует, что

$$I_4 = I_5 - I_6 = 4,65 - 3,97 = 0,68 \text{ А}.$$

В результате этих вычислений определены токи во всех ветвях исходной цепи.

Показания вольтметра определяются из 2-ого закона Кирхгофа для контура, образованного вольтметром и резисторами R_1 и R_3 :

$$U_V = I_1 R_1 + I_3 R_3 = 7,69 \cdot 5 + 3,04 \cdot 8 = 62,83 \text{ В}.$$

Баланс мощности предполагает равенство генерируемой и потребляемой мощностей:

$$EI_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 .$$

Левая часть этого равенства иллюстрирует мощность источника электрической энергии:

$$P_{И} = EI_1 = 100 \cdot 7,69 = 769 \text{ Вт}.$$

Правая часть этого равенства представляет суммарную мощность энергии, потребляемой резисторами:

$$P_{Н} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 =$$

$$= 7,69^2 \cdot 5 + 3,72^2 \cdot 10 + 3,04^2 \cdot 8 + 0,68^2 \cdot 15 + 4,65^2 \cdot 3 + 3,97^2 \cdot 12 = 769 \text{ Вт}.$$

Мощности источника электрической энергии и потребителей совпали. Баланс мощности соблюдается.

Потенциальная диаграмма электрической цепи постоянного тока строится в декартовой системе координат: по оси ординат откладываются величины потенциалов в отдельных точках того или иного контура, а по оси абсцисс – омические сопротивления отдельных участков этого контура.

Потенциальная диаграмма электрической цепи постоянного тока иллюстрирует изменения потенциала от каждого элемента контура.

Потенциал одной точки (например, точки a) следует принять известным. Пусть он имеет нулевое значение: $\phi_a = 0$. Тогда потенциалы других точек при обходе внешнего контура (рис. 1.1,а) по направлению движения часовой стрелки определяются так:

$$\begin{aligned}\phi_b &= \phi_a - I_5 R_5 = 0 - 4,65 \cdot 3 = -13,95 \text{ В}; \\ \phi_c &= \phi_b - I_6 R_6 = -13,95 - 3,97 \cdot 12 = -61,59 \text{ В}; \\ \phi_d &= \phi_c + E = 61,59 + 100 = 38,41 \text{ В}; \\ \phi_a &= \phi_d - I_1 R_1 = 38,41 - 7,69 \cdot 5 = -0,04 \text{ В} \approx 0.\end{aligned}$$

Погрешность расчета менее 5%, что вполне допустимо.

Потенциальная диаграмма заданной электрической цепи постоянного тока по внешнему контуру построена на рис. 1.2.

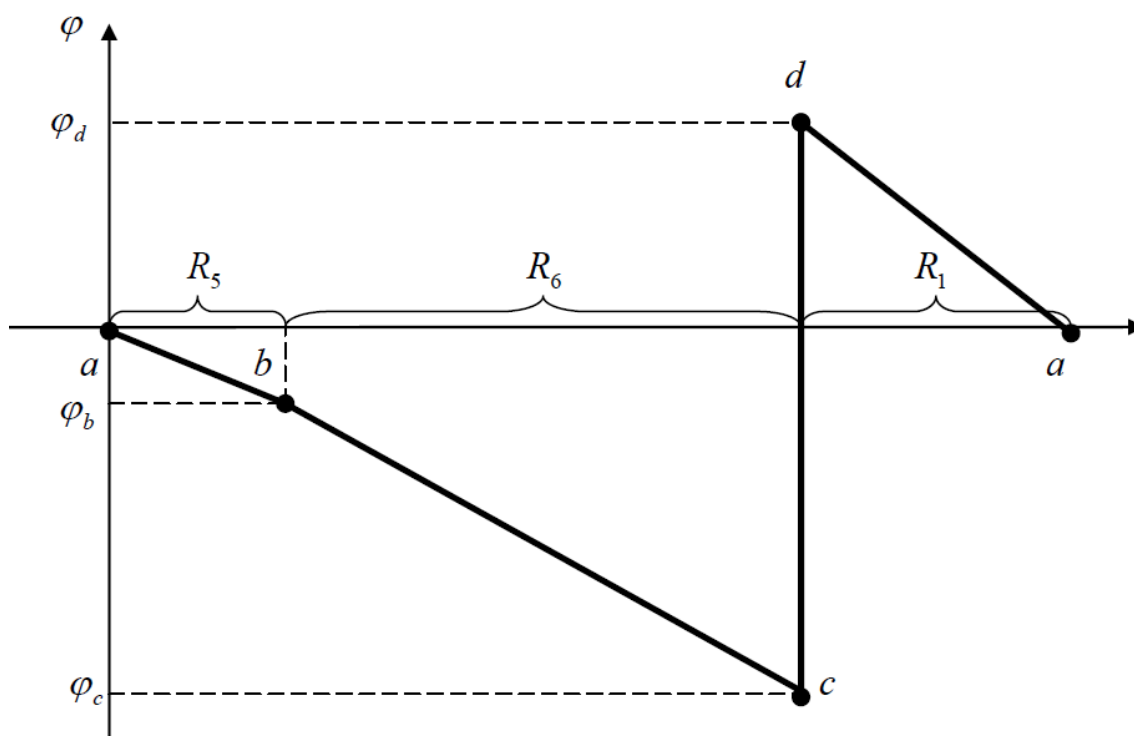


Рис. 1.2. Потенциальная диаграмма электрической цепи постоянного тока по внешнему контуру к рис. 1.1, а

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.
2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назовите область применения цепей постоянного тока?
2. Назовите законы Кирхгофа и закон Ома?
3. Объясните порядок расчета задачи постоянного тока с помощью законов Кирхгофа и закона Ома?

Практическое занятие 2

Решение задачи постоянного тока методом двух узлов

Цель работы: научиться применять метод двух узлов для решения задачи постоянного тока.

Для линейной электрической цепи постоянного тока, схема которой изображена на рис. 2.1,а, необходимо выполнить следующее: составить математическую модель цепи, определить токи во всех ветвях электрической цепи, составить баланс мощности, построить потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи.

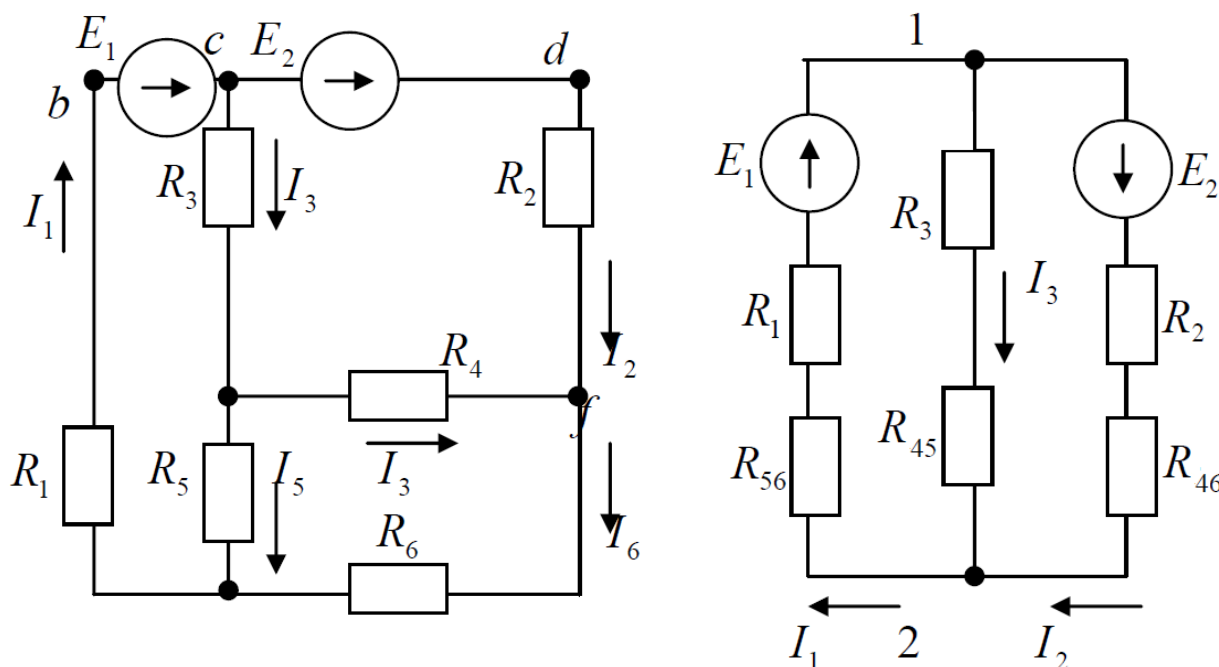
Исходные данные: $E = 100\text{В}$; $R_1 = 50\text{Ом}$; $R_2 = 100\text{Ом}$; $R_3 = 80\text{Ом}$; $R_4 = 150\text{Ом}$;

$$R_5 = 30\text{Ом}; R_6 = 120\text{Ом}.$$

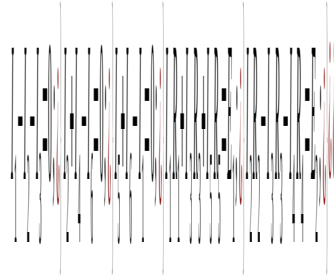
Решение.

Условно положительные направления токов в ветвях заданной цепи указаны на рис. 2.1,а.

Математическая модель электрической цепи (рис. 2.1.а):



а) б)
 Рис. 2.1. Схема электрической цепи постоянного тока



Совместное решение этих уравнений позволит определить численные значения токов в ветвях. Но это будет громоздкое решение. А, значит, не оптимальное.

Преобразование треугольника, составленного из резисторов R_4 , R_5 и R_6 в эквивалентную звезду позволит получить цепь с двумя узлами (рис. 2.1,б), для анализа которой применим метод двух узлов.

Величины омических сопротивлений резисторов, составляющих эквивалентную звезду, определяются так:

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{15 \cdot 3}{15 + 3 + 12} = 1.5 \text{ Ом};$$

$$R_{46} = \frac{R_4 R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{15 \cdot 12}{15 + 3 + 12} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{56} = \frac{R_5 R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{3 \cdot 12}{15 + 3 + 12} = 1.2 \text{ Ом}.$$

Напряжение между двумя узлами полученной таким образом электрической цепи определится так:

$$U_{12} = \frac{\sum_{i=1}^2 E_i G_i}{\sum_{i=1}^3 G_i} = \frac{E_1 G_1 - E_2 G_2}{G_1 + G_2 + G_3} = \frac{\frac{E_1}{R_1 + R_{56}} - \frac{E_2}{R_2 + R_{46}}}{\frac{1}{R_1 + R_{56}} + \frac{1}{R_2 + R_{46}} + \frac{1}{R_3 + R_{45}}} =$$

$$= \frac{\frac{100}{5 + 1.2} - \frac{50}{10 + 6}}{\frac{1}{5 + 1.2} + \frac{1}{10 + 6} + \frac{1}{8 + 1.5}} = 39.52 \text{ В}.$$

Токи в ветвях цепи, схема которой изображена на рис. 2.1,б, определяются по закону Ома:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{12}}{R_1 + R_{56}} = \frac{100 - 39.52}{5 + 1.2} = 9.75 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{12}}{R_2 + R_{46}} = \frac{50 + 39,52}{10 + 6} = 5,59 \quad \text{А};$$

$$I_3 = \frac{U_{12}}{R_3 + R_{45}} = \frac{39,52}{8 + 1,5} = 4,16 \quad \text{А}.$$

Оставшиеся токи определяются из уравнений математической модели исходной цепи. Из пятого уравнения:

$$I_4 = \frac{I_2 R_2 - I_3 R_3 - E_2}{R_4} = \frac{5,59 \cdot 10 - 4,16 \cdot 8 - 50}{15} = -1,83 \quad \text{А}.$$

Знак «-» показывает, что ток I_4 направлен не так, как показано на рис. 2.1,а, а в противоположную сторону.

Из второго уравнения:

$$I_6 = I_2 + I_4 = 5,59 - 1,83 = 3,76 \quad \text{А}.$$

Из третьего уравнения:

$$I_5 = I_1 - I_6 = 9,75 - 3,76 = 5,99 \quad \text{А}.$$

Баланс мощности предполагает равенство генерируемой и потребляемой мощностей: $P_{II} = P_H$.

Суммарная мощность, генерируемая источниками ЭДС, оба из которых работают в режиме генератора, определится так:

$$P_{II} = E_1 I_1 + E_2 I_2 = 100 \cdot 9,75 + 50 \cdot 5,59 = 1254 \quad \text{Вт}.$$

Суммарная мощность, потребляемая шестью резисторами, входящими в состав анализируемой электрической цепи постоянного тока, определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$\begin{aligned} P_H &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = \\ &= 9,75^2 \cdot 5 + 5,59^2 \cdot 10 + 4,16^2 \cdot 8 + 1,83^2 \cdot 15 + 5,99^2 \cdot 3 + 3,76^2 \cdot 12 = 1254 \quad \text{Вт}. \end{aligned}$$

Баланс мощности соблюдается.

Для построения потенциальной диаграммы по внешнему контуру электрической цепи постоянного тока необходимо определить величины потенциалов в отдельных точках контура.

Пусть потенциал точки a имеет нулевое значение: $\phi_a = 0$. Тогда при обходе внешнего контура по направлению часовой стрелки:

$$\phi_b = \phi_a - I_1 R_1 = 0 - 9,75 \cdot 5 = -48,75 \quad \text{В};$$

$$\phi_c = \phi_b + E_1 = -48,75 + 100 = 51,25 \quad \text{В};$$

$$\phi_d = \phi_c + E_2 = 51,25 + 50 = 101,25 \quad \text{В};$$

$$\phi_e = \phi_d - I_2 R_2 = 101,25 - 5,59 \cdot 10 = 45,35 \text{ В};$$

$$\phi_a = \phi_e - I_6 R_6 = 45,35 - 3,76 \cdot 12 = 0,23 \text{ В} \approx 0.$$

Погрешность расчета менее 5%, что вполне допустимо.

Потенциальная диаграмма заданной электрической цепи постоянного тока по внешнему контуру построена на рис. 2.2

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

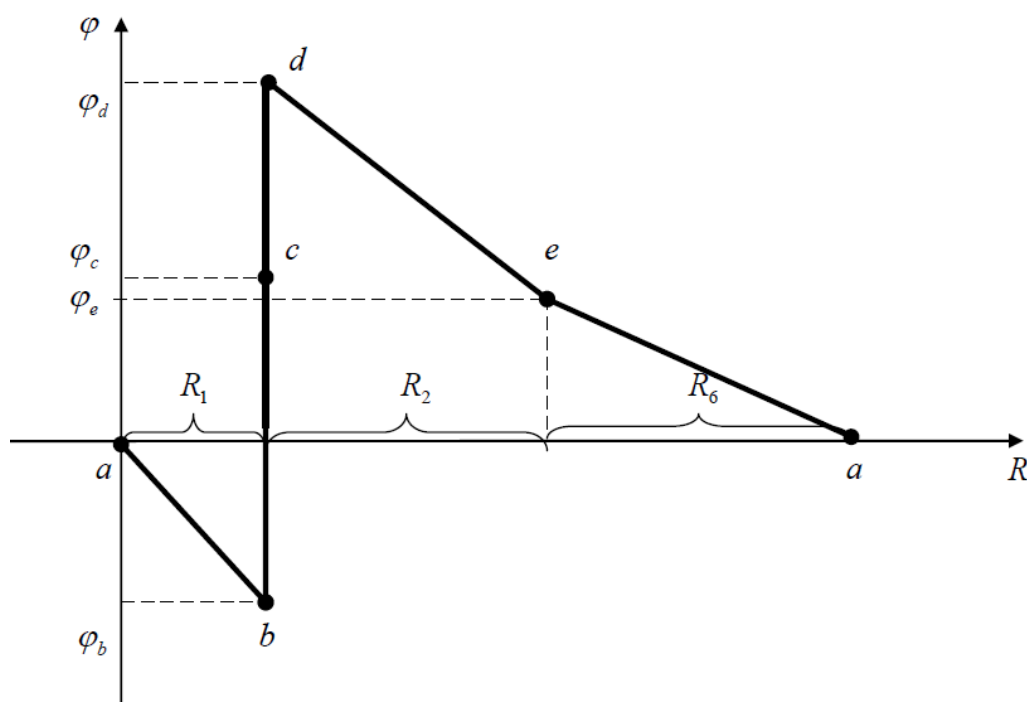


Рис. 2.2. Потенциальная диаграмма электрической цепи постоянного тока по внешнему контуру

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.
2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Объясните принцип преобразования схем из треугольника в звезду?

2. Объясните порядок расчета задачи методом двух узлов?
3. Объясните порядок составления потенциальной диаграммы?

Практическое занятие 3

Решение задачи постоянного тока методом контурных токов

Цель работы: научиться применять метод контурных токов для решения задачи постоянного тока.

Для линейной электрической цепи постоянного тока, схема которой изображена на рис. 3.1, необходимо выполнить следующее: составить математическую модель цепи, определить токи во всех ветвях электрической цепи, составить баланс мощности.

Исходные данные: $E = 100\text{В}$; $R_1 = 50\text{Ом}$; $E_3 = 80\text{ В}$; $R_2 = 10\text{Ом}$; $R_3 = 80\text{Ом}$;
 $R_4 = 150\text{Ом}$; $R_5 = 30\text{Ом}$; $R_6 = 120\text{Ом}$.

Решение.

Условно положительные направления токов в ветвях исходной цепи указаны на рис.

3.1.

Математическая модель электрической цепи, заданной в условиях примера, выглядит так:

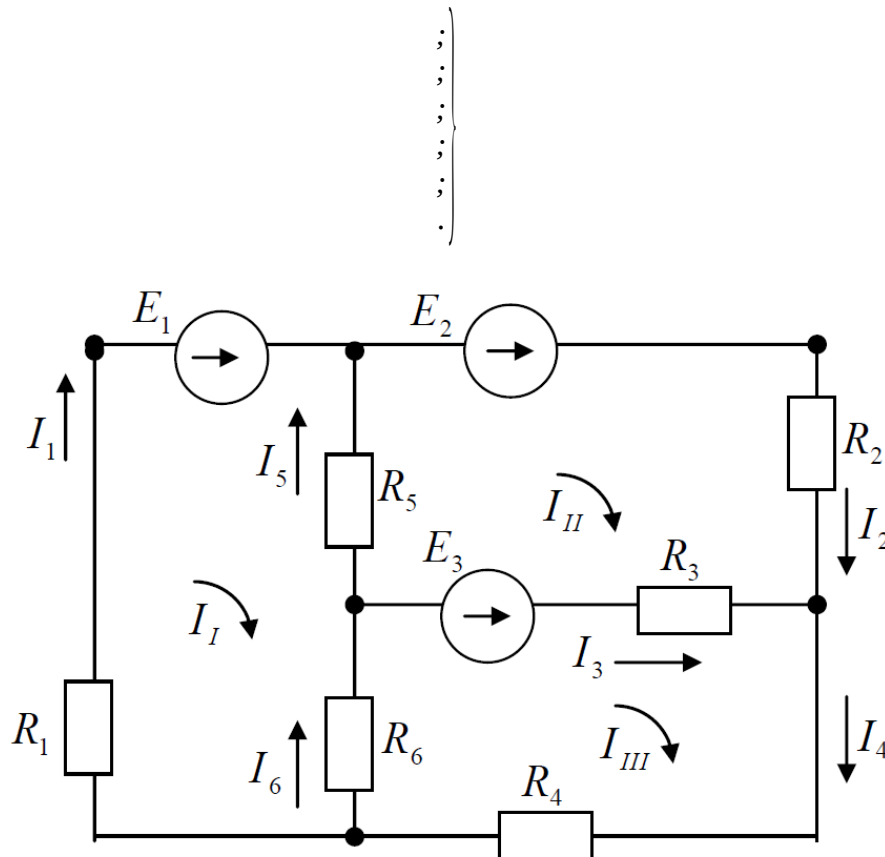


Рис. 3.1. Схема электрической цепи постоянного тока

Исходная электрическая цепь имеет в своем составе три источника ЭДС и не подлежит эквивалентным преобразованиям. Токи можно определить из совместного решения уравнений, образующих математическую модель. Но это будет весьма громоздкое

решение. Число уравнений математической модели сократится вдвое при использовании метода контурных токов. В данном случае этот метод можно считать оптимальным.

Метод контурных токов основан на абстракции: контуры анализируемой электрической цепи обладают собственными контурными токами. Причем количество контурных токов определяется числом элементарных контуров. Эти токи указаны на рис. 3.1. Математическая модель с учетом только контурных токов выглядит так:

$$\left. \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \right\}$$

С учетом численных значений омических сопротивлений резисторов и ЭДС математическая модель предстанет в виде:

$$\left. \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \right\}$$

Или:

$$\left. \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \right\}$$

Совместное решение этих уравнений, в принципе, можно использовать любой известный из курса математики метод. Пусть это будет метод, использующий правило Крамера.

Определители полученной системы уравнений вычисляются так:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 20 & -3 & -12 \\ -3 & 21 & -8 \\ -12 & -8 & 35 \end{vmatrix} = 9505$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 100 & -3 & -12 \\ -30 & 21 & -8 \\ 80 & -8 & 35 \end{vmatrix} = 81422$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 20 & 100 & -12 \\ -3 & -30 & -8 \\ -12 & 80 & 35 \end{vmatrix} = 19100$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 20 & -3 & 100 \\ -3 & 21 & -30 \\ -12 & -8 & 80 \end{vmatrix} = 54600$$

Величины контурных токов определяются так:

$$I_I = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{81422}{9505} = 8,57 \text{ А};$$

$$I_{II} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{19100}{9505} = 2,01 \text{ А};$$

$$I_{III} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{54600}{9505} = 5,74 \text{ А}.$$

Токи в ветвях заданной цепи:

$$I_1 = I_I = 8,57 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{II} = 2,01 \text{ А};$$

$$I_3 = I_{III} - I_{II} = 5,74 - 2,01 = 3,73 \text{ А};$$

$$I_4 = I_{III} = 5,74 \text{ А};$$

$$I_5 = I_{II} - I_I = 2,01 - 8,57 = -6,56 \text{ А};$$

$$I_6 = I_{III} - I_I = 5,74 - 8,57 = -2,83 \text{ А}.$$

Знак «-» перед численным значением токов I_5 и I_6 означает, что истинные направления этих токов противоположны условно избранному и указанному на рис. 3.1.

Баланс мощности предполагает равенство генерируемой и потребляемой мощностей $P_{II} = P_H$.

Мощность, генерируемая источниками ЭДС, определяется так:

$$P_{II} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = 100 \cdot 8,57 + 50 \cdot 2,01 + 80 \cdot 3,73 = 1256 \text{ Вт}.$$

Суммарная мощность, потребляемая резисторами цепи, схема которой изображена на рис. 3.1, определится так:

$$\begin{aligned} P_H &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = \\ &= 8,57^2 \cdot 5 + 2,01^2 \cdot 10 + 3,73^2 \cdot 8 + 5,74^2 \cdot 15 + 6,56^2 \cdot 3 + 2,83^2 \cdot 12 = 1238 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Ошибка в инженерных расчетах, выполняемых с определенной точностью, неизбежна из-за вынужденных округлений результатов расчетов. В данном случае относительная ошибка выполненных вычислений составляет

$$\delta = \frac{1256 - 1238}{1256} \cdot 100\% = 1,4\% < 5\%$$

что вполне в инженерных расчетах.

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.

5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.

5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.

3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. От чего зависит число уравнений, составляемых при расчете цепи методом контурных токов?

2. По каким соображениям выбираются направления токов в ветвях исходной цепи? Как уточняются эти направления?

3. Объясните порядок расчета задачи методом контурных токов?

Практическое занятие 4

Решение задачи однофазного синусоидального тока, используя законы Кирхгофа

Цель работы: научиться применять законы Кирхгофа для решения задачи однофазного синусоидального тока.

Для линейной электрической цепи синусоидального тока, схема которой изображена на рис. 6, необходимо выполнить следующее: составить математическую модель цепи; определить токи во всех ветвях электрической цепи; определить показания вольтметра электромагнитной и ваттметра электродинамической систем (сопротивления измерительных обмоток напряжения приборов принять бесконечно большим, а сопротивление измерительной обмотки тока – бесконечно малым); составить баланс активной, реактивной и полной мощностей; построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов.

Исходные данные: $e = 141 \sin(\omega t + 30^\circ)$; $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 10$ Ом; $R_3 = 8$ Ом;

$L_1 = 15,9$ мГн; $L_2 = 31,8$ мГн; $C_1 = 328$ мкФ; $C_2 = 637$ мкФ;

$C_3 = 100$ мкФ; $f = 50$ Гц.

Решение.

Расчет в данном случае целесообразно выполнять для действующих значений ЭДС, напряжений и токов.

Условно положительные направления токов в ветвях в какой-либо фиксированный, в данном случае начальный момент времени указаны на рис. 4.1.

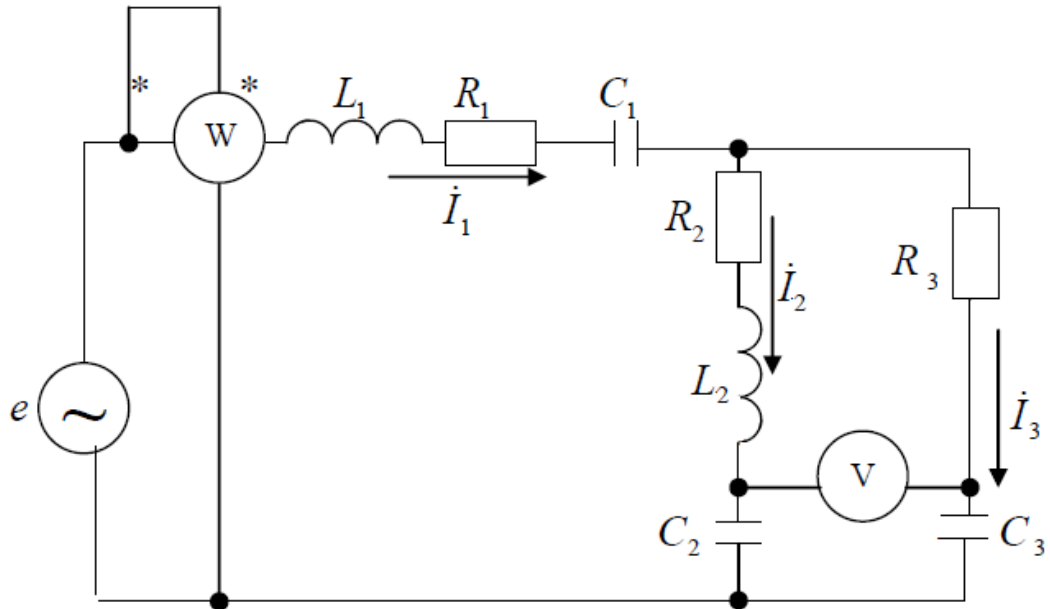


Рис. 4.1. Схема электрической цепи синусоидального тока

Математическую модель анализируемой цепи можно представить так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 &= 0 ; \\ \dot{I}_1 \left[R_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] + \dot{I}_2 \left[R_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \right] &= \dot{E} ; \\ \dot{I}_2 \left[R_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \right] - \dot{I}_3 \left(R_3 - j \frac{1}{\omega C_3} \right) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Ее можно записать и так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 &= 0 ; \\ \dot{I}_1 [R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})] + \dot{I}_2 [R_2 + j(X_{L2} - X_{C2})] &= \dot{E} ; \\ \dot{I}_2 [R_2 + j(X_{L2} - X_{C2})] - \dot{I}_3 (R_3 - jX_{C3}) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Можно записать еще проще:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 &= 0 ; \\ \dot{I}_1 \underline{Z}_1 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2 &= \dot{E} ; \\ \dot{I}_2 \underline{Z}_2 - \dot{I}_3 \underline{Z}_3 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

В заданной цепи присутствует лишь один источник электрической энергии. Поэтому здесь вполне применим метод эквивалентных преобразований.

Циклическая частота изменения электрического тока во времени определится так:

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

Численные значения индуктивных сопротивлений в анализируемой цепи:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ Ом}.$$

Численные значения емкостных сопротивлений:

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314 \cdot 318 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ Ом};$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 31,85 \text{ Ом}.$$

Комплексное значение полного сопротивления первой ветви (в неразветвленной части цепи):

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1}) = 5 + j(5 - 10) = 5 - j5 = 7,07 e^{-j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Второй ветви:

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2}) = 10 + j(10 - 5) = 10 + j5 = 11,18 e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Третьей ветви:

$$\underline{Z}_3 = R_3 - jX_{C3} = 8 - j31,85 = 32,85 e^{-j76^\circ} \text{ Ом}.$$

Эквивалентное полное сопротивление цепи:

$$\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 5 - j5 + \frac{11,18 e^{j45^\circ} \cdot 32,85 e^{-j76^\circ}}{10 + j5 + 8 - j31,85} = 16,27 - j3,62 = 16,67 e^{-j13^\circ} \text{ Ом}.$$

ЭДС в исходных данных рассматриваемого примера задана мгновенным значением, то есть в виде закона изменения мгновенного значения ЭДС во времени. Действующее значение этой ЭДС определится так.

$$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi_e} = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 100 e^{j30^\circ} \text{ В}.$$

Комплексное значение тока в неразветвленной части цепи:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}_\Sigma} = \frac{100 e^{j30^\circ}}{16,67 e^{-j13^\circ}} = 6 e^{j43^\circ} = (4,39 + j4,06) \text{ А}.$$

В таком случае комплексные значения остальных токов определяются так:

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} = 6 e^{j43^\circ} \frac{32,85 e^{-j76^\circ}}{10 + j5 + 8 - j31,85} = 6,1 e^{j23^\circ} = (5,62 + j2,38) \quad \text{А;} \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} = 6 e^{j43^\circ} \frac{11,18 e^{j45^\circ}}{10 + j5 + 8 - j31,85} = 2,08 e^{j126^\circ} = (-1,23 + j1,68) \quad \text{А.} \end{aligned}$$

Комплексное значение напряжения в месте подключения вольтметра (рис. 4.1) определится так:

$$\begin{aligned} \dot{U}_V &= \dot{I}_2 (R_2 + jX_{L2}) - \dot{I}_3 R_3 = \\ &= 6,1 e^{j23^\circ} (10 + j10) - 2,08 e^{j126^\circ} \cdot 8 = 42,1 + j66,53 = 78,73 e^{j58^\circ} \quad \text{В.} \end{aligned}$$

Показания вольтметра электромагнитной системы: $U_V = 78,73 \quad \text{В.}$

Ваттметр электродинамической системы регистрирует активную мощность электрической цепи:

$$P_W = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 = 6^2 \cdot 5 + 6,1^2 \cdot 10 + 2,08^2 \cdot 8 = 587 \quad \text{Вт.}$$

Баланс активной мощности предполагает равенство генерируемой и потребляемой активных мощностей: $P_{И} = P_{Н}$.

Баланс реактивной мощности предполагает равенство генерируемой и потребляемой реактивных мощностей: $Q_{И} = Q_{Н}$.

Баланс полной мощности предполагает равенство генерируемой и потребляемой полных мощностей: $\tilde{S}_{И} = \tilde{S}_{Н}$.

Последнее равенство подразумевает равенства вещественных и мнимых составляющих полных мощностей, то есть баланс полной мощности предполагает балансы активных и реактивных мощностей:

$$\tilde{S}_{И} = P_{И} + jQ_{И} = \tilde{S}_{Н} = P_{Н} + jQ_{Н}.$$

Полная мощность, генерируемая источником ЭДС:

$$\tilde{S}_{И} = \dot{E} \bar{I}_1 = 100 e^{j30^\circ} \cdot 6 e^{-j43^\circ} = 600 e^{-j13^\circ} = (587 - j135) \quad \text{ВА,}$$

где $\bar{I}_1 = 6 e^{-j43^\circ}$ А – сопряженный вектор тока в неразветвленной части цепи.

Генерируемая активная мощность: $P_{И} = 587 \quad \text{Вт.}$

Генерируемая реактивная мощность: $Q_{И} = 135 \quad \text{ВАр.}$

Причем реактивная мощность имеет емкостной характер.

Потребляемая полная мощность определяется так:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{Н} &= I_1^2 Z_1 + I_2^2 Z_2 + I_3^2 Z_3 = \\ &= 6^2 (5 - j5) + 6,1^2 (10 + j5) + 2,08^2 (8 - j31,85) = (587 - j135) = 600 e^{-j13^\circ} \quad \text{ВА.} \end{aligned}$$

Потребляемая активная мощность: $P_H = 587$ Вт.

Потребляемая реактивная мощность: $Q_H = 135$ ВАр.

Балансы активной, реактивной и полной мощностей сошлись.

Векторную диаграмму напряжений и токов лучше всего на комплексной плоскости (рис. 4.2).

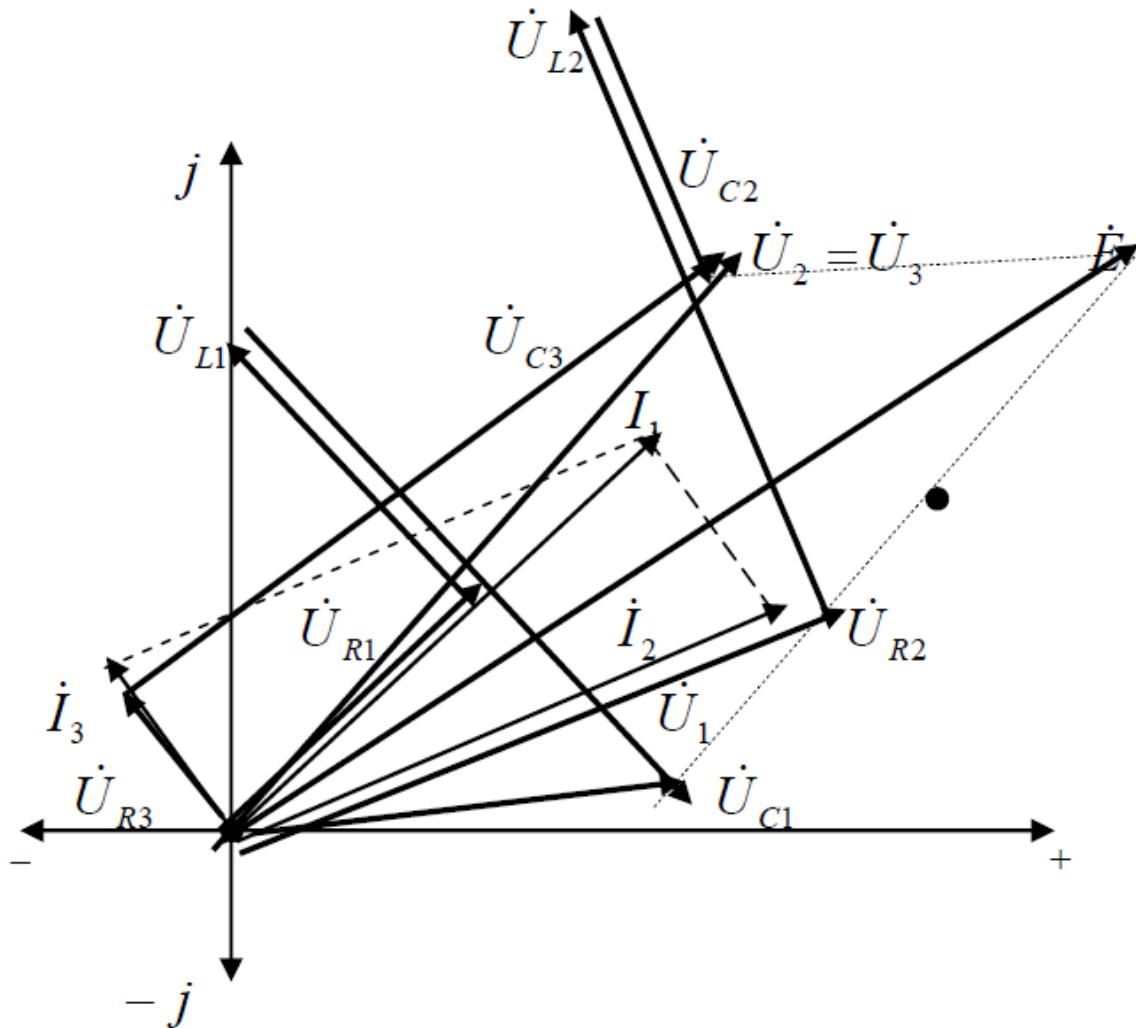


Рис. 4.2. Векторная диаграмма напряжений и токов

В первую очередь на комплексной плоскости следует указать в масштабе токи:

$$\dot{I}_1 = 6e^{j43^\circ} \text{ А}; \quad \dot{I}_2 = 6,1e^{j23^\circ} \text{ А}; \quad \dot{I}_3 = 2,08e^{j126^\circ} \text{ А}.$$

Для построения векторов напряжения на комплексной плоскости необходимо определить их величины:

$$\begin{aligned} U_{R1} &= I_1 R_1 = 6 \cdot 5 = 30 \text{ В}; \\ U_{L1} &= I_1 X_{L1} = 6 \cdot 5 = 30 \text{ В}; \\ U_{C1} &= I_1 X_{C1} = 6 \cdot 10 = 60 \text{ В}; \\ U_{R2} &= I_2 R_2 = 6,1 \cdot 10 = 61 \text{ В}; \\ U_{L2} &= I_2 X_{L2} = 6,1 \cdot 10 = 61 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$U_{C2} = I_2 X_{C2} = 6,1 \cdot 5 = 30,5 \text{ В};$$

$$U_{R3} = I_3 R_3 = 2,08 \cdot 8 = 16,64 \text{ В};$$

$$U_{C3} = I_3 X_{C3} = 2,08 \cdot 31,85 = 66,25 \text{ В}.$$

Эти напряжения следует поместить в масштабе на комплексной плоскости, помня, что напряжение на идеальном резистивном элементе совпадает по фазе с соответствующим током, напряжение на идеальном индуктивном элементе опережает соответствующий ток на 90° , а напряжение на идеальном емкостном элементе отстает от соответствующего тока на 90° . Причем следует обратить внимание на то, что суммарные напряжения на второй и третьей ветвях должны полностью совпадать: $\dot{U}_2 = \dot{U}_3$. Кроме того, должны выполняться равенства:

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{E} \quad ; \quad \dot{U}_1 + \dot{U}_3 = \dot{E} \quad .$$

Фора отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.
2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Способы изображения синусоидально изменяющихся величин. Представьте их для тока $i = 10\sin(\omega t + 45^\circ)$.
2. Мощность в цепи однофазного синусоидального тока. Для заданной схемы определите все виды мощности (S, P, Q).
3. Объясните принцип составления законов Кирхгофа для однофазных цепей синусоидального тока. От чего зависит число уравнений, составляемых при расчете цепи методом контурных токов?

Практическое занятие 5

Решение задачи трехфазной цепи по схеме соединения звезда

Цель работы: научиться решать задачи трехфазного синусоидального тока, по схеме соединения звезда.

Для трехфазной линейной электрической цепи, схема которой изображена на рис. 5.1,а, необходимо выполнить следующее: определить фазные и линейные токи, потребляемую активную мощность, построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Исходные данные: $U_{\ell}=380$ В; $R_A=5$ Ом; $L_B=15,9$ мГн; $C_C=637$ мкФ;
 $f=50$ Гц.

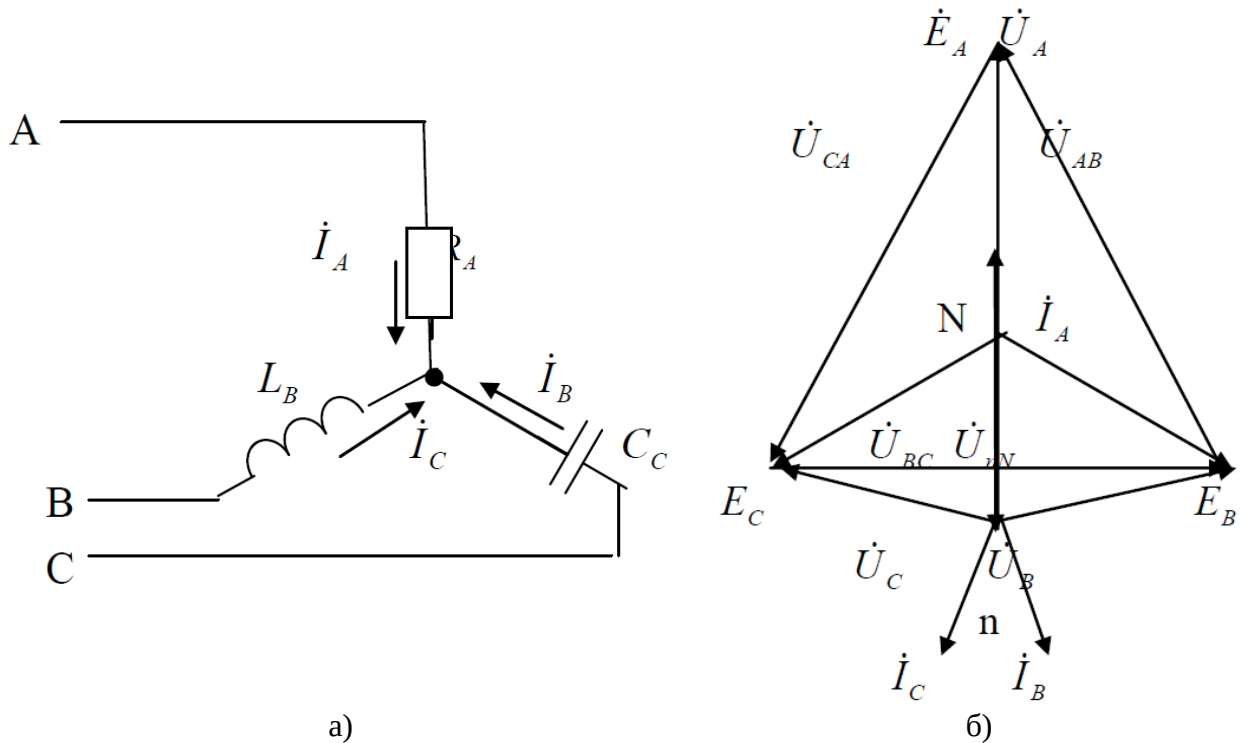


Рис. 5.1. Схема трехфазной электрической (а) цепи и векторная диаграмма напряжений и токов (б)

Решение.

ЭДС каждой фазы определится так:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= \frac{\dot{U}_{\ell}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В;} \\ \dot{E}_B &= \frac{\dot{U}_{\ell}}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} = (-110 - j190,5) \text{ В;} \\ \dot{E}_C &= \frac{\dot{U}_{\ell}}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} = (-110 + j190,5) \text{ В.} \end{aligned}$$

Полные сопротивления каждой фазы:

$$\begin{aligned} Z_A &= R_A = 5 \text{ Ом;} \\ Z_B &= jX_L = j\omega L_B = j2\pi fL_B = j2\pi \cdot 50 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = j5 = 5 e^{j90^\circ} \text{ Ом;} \\ Z_C &= -jX_C = -j \frac{1}{\omega C_C} = -j \frac{1}{2\pi f C_C} = -j \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = -j5 = 5 e^{-j90^\circ} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Фазные сопротивления во всех фазах одинаковы по величине, но различны по характеру. Этот факт свидетельствует о том, что рассматриваемая трехфазная цепь несимметричная. В таком случае напряжение смещения нейтрали отлично от нуля и вычисляется так:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\frac{\dot{E}_A}{Z_A} + \frac{\dot{E}_B}{Z_B} + \frac{\dot{E}_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} = \frac{\frac{220}{5} + \frac{220e^{-j120^\circ}}{5e^{j90^\circ}} + \frac{220e^{j120^\circ}}{5e^{-j90^\circ}}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{5e^{90^\circ}} + \frac{1}{5e^{-90^\circ}}} = -161,05 \quad \text{В.}$$

Фазные напряжения:

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN} = 220 + 161,05 = 381,05 \quad \text{В;}$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN} = -110 - j190,5 + 161,05 = 51,05 - j190,5 = 197,22e^{-j75^\circ} \quad \text{В;}$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN} = -110 + j190,5 + 161,05 = 51,05 + j190,5 = 197,22e^{j75^\circ} \quad \text{В.}$$

При соединении фаз приемника по схеме «звезда» фазные и линейные токи одинаковы и определяются по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{381,05}{5} = 76,21 \quad \text{А;}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{197,22e^{-j75^\circ}}{5e^{j90^\circ}} = 39,444e^{-j165^\circ} = (-38,1 - j10,21) \quad \text{А;}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{197,22e^{j75^\circ}}{5e^{-j90^\circ}} = 39,444e^{j165^\circ} = (-38,1 + j10,21) \quad \text{А.}$$

Активная мощность рассматриваемой цепи потребляется только в фазе А:

$$P = P_A = I_A^2 R_A = 76,21^2 \cdot 5 = 26040 \quad \text{Вт.}$$

Векторная диаграмма напряжений и токов в рассматриваемой цепи построена на рис. 5.1,б.

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.

3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Поясните методику расчета цепи трехфазного тока при соединении приемников в звезду без нейтрального провода.
2. Что такое напряжение смещения нейтрали и как его найти?

Практическое занятие 6

Решение задачи трехфазной цепи по схеме соединения звезда с нейтральным проводом

Цель работы: научиться решать задачи трехфазного синусоидального тока, по схеме соединения звезда с нейтральным проводом.

Для трехфазной линейной электрической цепи, схема которой изображена на рис. 6.1,а, необходимо выполнить следующее: определить фазные и линейные токи и ток в нейтральном проводе, потребляемую активную мощность и построить векторную диаграмму напряжений и токов.

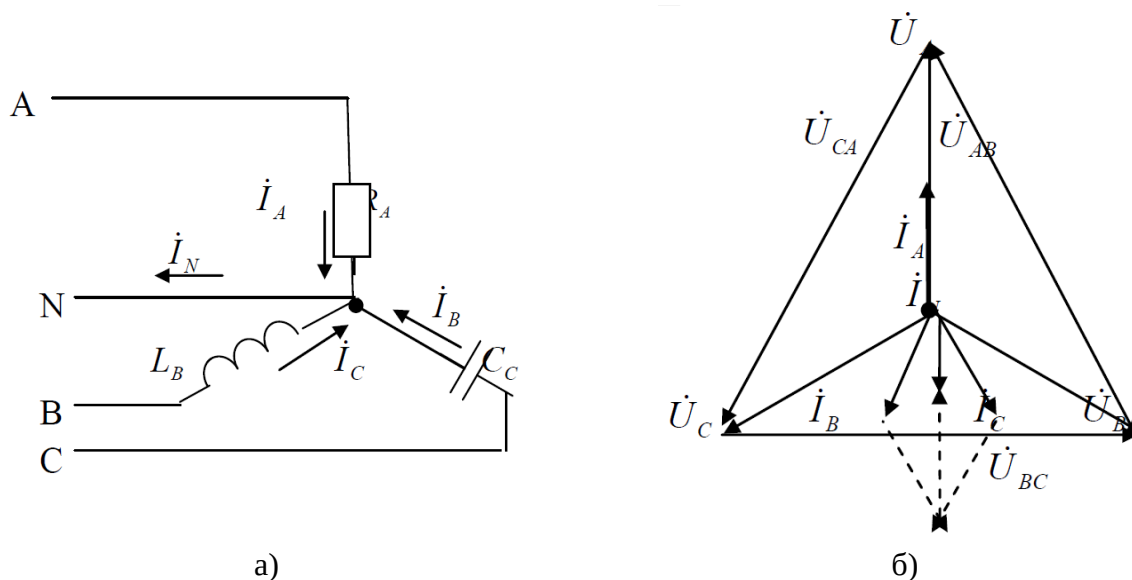


Рис. 6.1. Схема трехфазной электрической (а) цепи и векторная диаграмма напряжений и токов (б)

Исходные данные: $U_l = 380$ В; $R_A = 5$ Ом; $L_B = 15,9$ мГн; $C_C = 637$ мкФ;
 $f = 50$ Гц.

Решение.

Наличие нейтрального провода с пренебрежительно малым сопротивлением в трехфазной цепи обеспечивает равенство величин фазных напряжений. В таком случае напряжение сдвига нейтрали отсутствует, а фазные напряжения равны фазным ЭДС:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \frac{\dot{U}_\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \quad \text{В;} \\ \dot{U}_B &= \frac{\dot{U}_\Delta}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} = (-110 - j190,5) \quad \text{В;} \\ \dot{U}_C &= \frac{\dot{U}_\Delta}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} = (-110 + j190,5) \quad \text{В.}\end{aligned}$$

Полные сопротивления каждой фазы:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_A &= R_A = 5 \quad \text{Ом;} \\ \underline{Z}_B &= jX_L = j\omega L_B = j2\pi fL_B = j2\pi \cdot 50 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = j5 = 5 e^{j90^\circ} \quad \text{Ом;} \\ \underline{Z}_C &= -jX_C = -j \frac{1}{\omega C_C} = -j \frac{1}{2\pi fC_C} = -j \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = -j5 = 5 e^{-j90^\circ} \quad \text{Ом.}\end{aligned}$$

При соединении фаз приемника по схеме «звезда» фазные и линейные токи одинаковы и определяются по закону Ома:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{220}{5} = 44 \quad \text{А;} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{5 e^{j90^\circ}} = 44 e^{-j210^\circ} = (-38,105 + j22) \quad \text{А;} \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{220 e^{j120^\circ}}{5 e^{-j90^\circ}} = 44 e^{j210^\circ} = (-38,105 - j22) \quad \text{А.}\end{aligned}$$

Ток в нейтральном проводе определяется алгебраической суммой фазных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 44 - 38,105 + j22 - 38,105 - j22 = -32,21 \quad \text{А.}$$

Активная мощность рассматриваемой цепи потребляется только в фазе А:

$$P = P_A = I_A^2 R_A = 44^2 \cdot 5 = 9680 \quad \text{Вт.}$$

Векторная диаграмма напряжений и токов в рассматриваемой цепи построена на рис. 6.1,б.

Форма отчетности

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.

2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.

3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Поясните методику расчета цепи трехфазного тока при соединении приемников в звезду с нейтральным проводом.

2. Назначение нейтрального провода?

3. Назвать области применения трехпроводных и четырехпроводных трехфазных цепей.

Практическое занятие 7

Решение задачи трехфазной цепи по схеме соединения треугольник

Цель работы: научиться решать задачи трехфазного синусоидального тока, по схеме соединения треугольник.

Для трехфазной линейной электрической цепи, схема которой изображена на рис. 7.1,а, необходимо выполнить следующее: определить фазные и линейные токи, потребляемую активную мощность и построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Исходные данные: $U_{\text{л}}=380$ В; $R_{\text{AB}}=5$ Ом; $L_{\text{BC}}=15,9$ мГн; $C_{\text{CA}}=637$ мкФ;

$$f=50 \text{ Гц.}$$

Решение.

При соединении фаз приемника по схеме «треугольник» фазные напряжения равны линейным:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{AB}} &= 380 \text{ В;} \\ \dot{U}_{\text{BC}} &= 380 e^{-j120^\circ} = (-190 - j329,09) \text{ В;} \\ \dot{U}_{\text{CA}} &= 380 e^{j120^\circ} = (-190 + j329,09) \text{ В.} \end{aligned}$$

Полные сопротивления каждой фазы:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{AB}} &= R_{\text{AB}} = 5 \text{ Ом;} \\ \underline{Z}_{\text{BC}} &= jX_L = j\omega L_{\text{BC}} = j2\pi f L_{\text{BC}} = j2\pi \cdot 50 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = j5 = 5e^{j90^\circ} \text{ Ом;} \\ \underline{Z}_{\text{CA}} &= -jX_C = -j \frac{1}{\omega C_{\text{CA}}} = -j \frac{1}{2\pi f C_{\text{CA}}} = -j \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = -j5 = 5e^{-j90^\circ} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

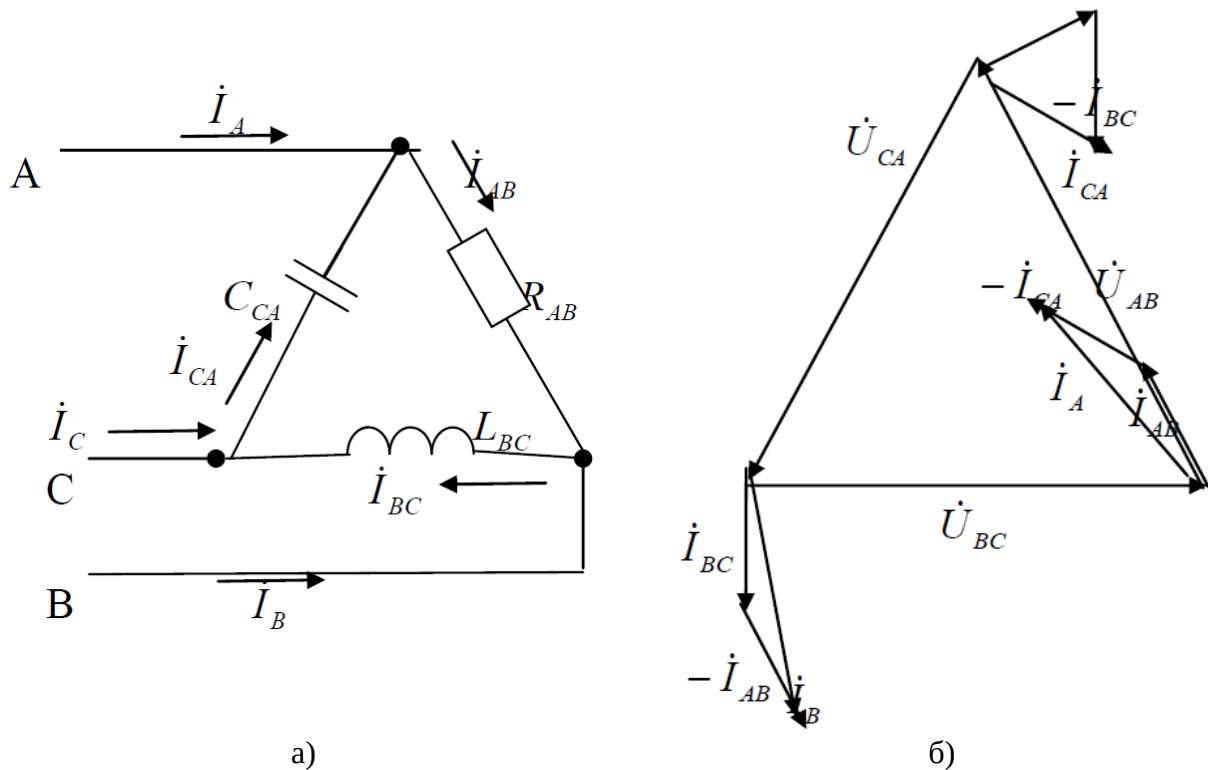


Рис. 7.1. Схема трехфазной электрической (а) цепи и векторная диаграмма напряжений и токов (б)

Фазные токи определяются по закону Ома:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{380}{5} = 76 \quad \text{А;} \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{380 e^{-j120^\circ}}{5 e^{j90^\circ}} = 76 e^{-j210^\circ} = (-65,82 + j38) \quad \text{А;} \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{380 e^{j120^\circ}}{5 e^{-j90^\circ}} = 76 e^{j210^\circ} = (-65,82 - j38) \quad \text{А.} \end{aligned}$$

Линейные токи определяются из 1-ого закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 76 + 65,82 + j38 = 141,82 + j38 = 146,82 e^{j15^\circ} \quad \text{А;} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -65,82 + j38 - 76 = 141,82 + j38 = 146,82 e^{j165^\circ} \quad \text{А;} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = -65,82 - j38 + 65,82 - j38 = -j76 = 76 e^{-j90^\circ} \quad \text{А.} \end{aligned}$$

Активная мощность рассматриваемой цепи потребляется только в фазе АВ:

$$P = P_{AB} = I_{AB}^2 R_{AB} = 76^2 \cdot 5 = 28880 \quad \text{Вт.}$$

Векторная диаграмма напряжений и токов в рассматриваемой цепи построена на рис. 7.1,б.

Форма отчетности:

1. Цель работы.

2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.
2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Поясните методику расчета цепи трехфазного тока при соединении приемников в треугольник.
2. Каковы основные соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при различных режимах работы трехфазной цепи.
3. Определите характер фазных нагрузок по векторным диаграммам токов и напряжений?

Практическое занятие 8

Решение задачи по теме «Трансформаторы»

Цель работы: научиться решать задачи по определению первичных и вторичных параметров трансформатора.

Для двухобмоточного трехфазного трансформатора, соединение обмоток которого $Y/Y_0 - 0$, известно: номинальная мощность $S_{ном} = 100$ кВА; номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $\dot{U}_{1ном} = 6000$ В; номинальное напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора $\dot{U}_{2ном} = 400$ В; напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5$ %; мощность короткого замыкания $P_k = 2400$ Вт; мощность холостого хода $P_0 = 600$ Вт; ток холостого хода $i_0 = 7$ %.

Требуется выполнить следующее: составить уравнения электрического и магнитного состояний трансформатора; определить коэффициент трансформации; определить номинальные токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора; построить T-образную схему замещения трансформатора; определить параметры T-образной схемы замещения трансформатора; определить действительные параметры вторичной обмотки трансформатора; построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(\beta)$ при активно-индуктивной нагрузке ($\cos \phi_2 = 0,75$); для $\cos \phi_2 = 0,75$ построить

графическую зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки $\eta = f(\beta)$, где $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$ – коэффициент нагрузки.

Решение.

Строго говоря, трехфазный трансформатор нельзя считать абсолютно симметричной системой. Например, при трехстержневом исполнении магнитопровода магнитный поток, а, следовательно, и магнитная индукция, и индуцируемая ЭДС в среднем стержне больше, чем в боковых. Но электромагнитные процессы в каждой фазе трансформатора однотипны и могут быть описаны идентичными уравнениями.

Уравнения электрического состояния каждой фазы трансформатора выглядят так:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -e_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 \\ u_2 &= -e_2 - L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} - i_2 R_2 \end{aligned} \right\},$$

где u_1 , u_2 и i_1 , i_2 – мгновенные значения напряжений и токов первичной и вторичной обмоток трансформатора; e_1 – ЭДС самоиндукции в первичной обмотке трансформатора; e_2 – ЭДС взаимоиндукции во вторичной обмотке трансформатора; $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ – собственные индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора; R_1 и R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Уравнение магнитного состояния фазы трансформатора обычно представляют как соотношение намагничивающих сил (МДС):

$$i_1 w_1 = i_0 w_1 + i_2 w_2,$$

где w_1 и w_2 – количество витков в первичной и вторичной фазных обмотках трансформатора; i_0 – ток холостого хода.

Уравнения магнитного и электрического состояний фазы трансформатора для действующих значений ЭДС, напряжений и токов переписутся так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 w_1 &= \dot{I}_0 w_1 + \dot{I}_2 w_2 ; \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + jX_{L1} \dot{I}_1 + \dot{I}_1 R_1 \\ \dot{U}_2 &= -\dot{E}_2 - jX_{L2} \dot{I}_2 - \dot{I}_2 R_2 \end{aligned} \right\},$$

где \dot{E}_1 , \dot{E}_2 , \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{I}_1 и \dot{I}_2 – изображения на комплексной плоскости действующих значений ЭДС, напряжений и токов первичной и вторичной фазных обмоток трансформатора; \dot{I}_0 – комплексное значение действующей величины тока холостого хода; X_{L1} и X_{L2} – индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной фазных обмоток трансформатора.

Коэффициент трансформации определяется как отношение количества витков первичной и вторичной обмоток трансформатора $k = w_1 / w_2$. Ориентир

$$k = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{6000}{400} = 15$$

Номинальный ток в первичной обмотке трансформатора:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,6 \text{ А.}$$

Номинальный ток во вторичной обмотке трансформатора:

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ном}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 248,9 \text{ А.}$$

T-образная схема замещения одной фазы двухобмоточного трансформатора изображена на рис. 8.1.

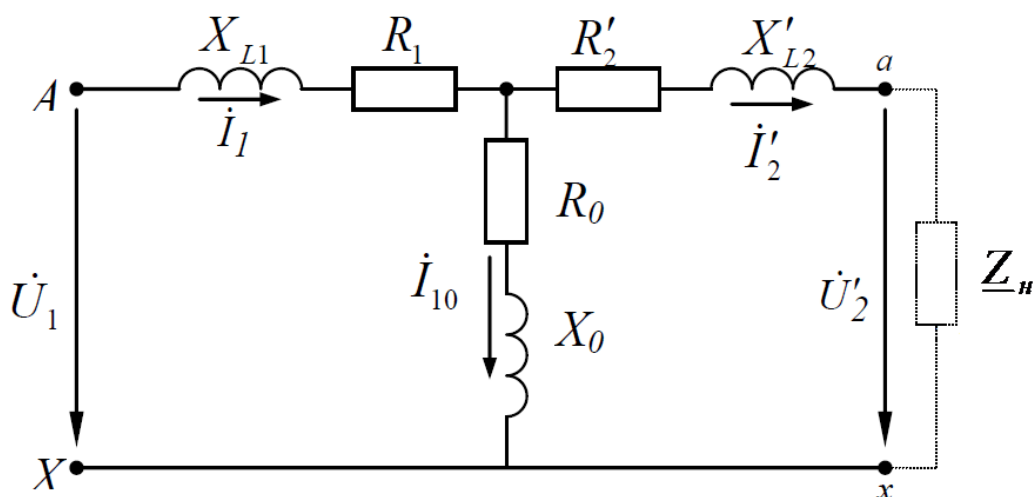


Рис. 8.1. T-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора

Ток в ветви намагничивания определяется величиной тока холостого хода:

$$I_0 = \frac{i}{100} I_{1\text{ном}} = \frac{7}{100} \cdot 9,6 = 0,67 \text{ А.}$$

Сопротивления ветви намагничивания:

$$Z_0 = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 0,67} = 5170 \text{ Ом;}$$

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{600}{3 \cdot 0,67^2} = 446 \text{ Ом;}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5170^2 - 446^2} = 5151 \text{ Ом.}$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{u_k U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot 100 I_{1\text{ном}}} = \frac{5,5 \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 9,6} = 19,8 \quad \text{Ом};$$

$$R_k = \frac{P_k}{3 I_{1\text{ном}}^2} = \frac{2400}{3 \cdot 9,6^2} = 8,68 \quad \text{Ом};$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{19,8^2 - 8,68^2} = 17,8 \quad \text{Ом}.$$

Сопротивление первичной обмотки и приведенной к ней вторичной:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{8,68}{2} = 4,34 \quad \text{Ом};$$

$$X_{L1} = X_{L2}' = \frac{X_k}{2} = \frac{17,8}{2} = 8,9 \quad \text{Ом}.$$

Действительные сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{4,34}{15^2} = 0,0193 \quad \text{Ом};$$

$$X_{L2} = \frac{X_{L2}'}{k^2} = \frac{8,9}{15^2} = 0,0396 \quad \text{Ом}.$$

Для построения внешней характеристики трансформатора необходимо определить величину потерь напряжения в его вторичной обмотке. Это определяется по формуле:

$$\Delta U_{2\%} = \beta (u_{ka} \cos \phi_2 + u_{kp} \sin \phi_2),$$

где

$$u_{ka} = \frac{u_k R_k}{Z_k} = \frac{5,5 \cdot 8,68}{19,8} = 2,4\% ;$$

$$u_{kp} = \sqrt{u_k^2 - u_{ka}^2} = \sqrt{5,5^2 - 2,4^2} = 4,95\% .$$

Напряжение на внешних зажимах вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле:

$$U_2 = \frac{U_{2\text{ном}} (100 - \Delta U_{2\%})}{100} .$$

Результаты расчета потерь напряжения во вторичной обмотке и напряжения на ее внешних зажимах сведены в табл. 1.

Для построения зависимости $\eta = f(\beta)$ необходимо определить КПД трансформатора по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \phi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \phi + P_0 + \beta^2 P_k}$$

Результаты расчеты сведены в табл. 8.1.

По результатам вычислений, приведенных в табл. 8.1, на рис. 8.2 построена внешняя характеристика трансформатора, а на рис. 8.3 – зависимость КПД от нагрузки.

Таблица 8.1.

Результаты расчета внешней характеристики и коэффициента полезного действия

| β | $\Delta U_{2\%}$ | U_2 , В | η |
|---------|------------------|-----------|--------|
| 0,01 | - | - | 0,555 |
| 0,025 | - | - | 0,757 |
| 0,05 | - | - | 0,904 |
| 0,1 | 0,507 | 397,97 | 0,924 |
| 0,2 | 1,014 | 395,94 | 0,956 |
| 0,3 | 1,521 | 393,92 | 0,965 |
| 0,4 | 2,028 | 391,89 | 0,967 |
| 0,5 | 2,535 | 389,86 | 0,969 |
| 0,6 | 3,042 | 387,83 | 0,967 |
| 0,7 | 3,549 | 385,80 | 0,966 |
| 0,8 | 4,056 | 383,78 | 0,964 |
| 0,9 | 4,563 | 381,75 | 0,963 |
| 1,0 | 5,070 | 379,72 | 0,962 |

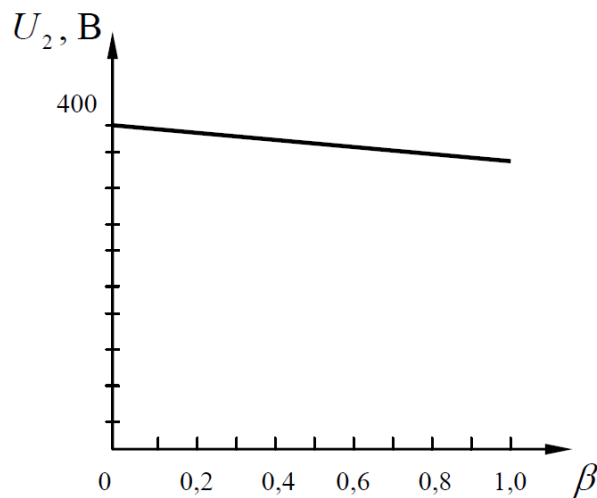


Рис. 8.2. Внешняя характеристика трансформатора

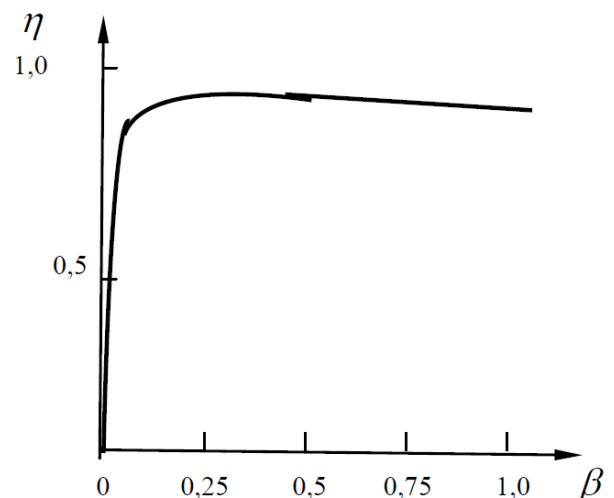


Рис. 8.3. Графическая зависимость КПД трансформатора от нагрузки

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература

1. Иванов, И. И. Электротехника: Учебник. / Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 4-е изд.,

стер. – СПб.: Лань, 2006. – 496 с.

2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.

3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Принцип работы трансформатора?
2. Объясните понятие «коэффициент трансформации»?

Практическое занятие 9

Выбор типа и мощности электрического двигателя

Цель работы: научиться решать задачи по определению мощности и выбора асинхронного электродвигателя.

Выбрать электрический двигатель для производственного механизма с графиком нагрузки (нагрузочной диаграммой), заданным в виде табл. 9.1. Ротор двигателя должен иметь частоту вращения порядка 980 об/мин (возможны отклонения в пределах нескольких процентов). Помещение, где будет установлен двигатель, сухое, проветриваемое, без пыли и грязи. Дополнительных требований к электроприводу производственного механизма нет.

Требуется выполнить следующее: построить нагрузочную диаграмму (график нагрузки), выбрать целесообразную мощность электрического двигателя, выбрать по соответствующей справочной литературе тип и сопутствующие технические характеристики электрического двигателя, проверить выбранный двигатель на перегрузочную способность, определить пусковой и критический (максимальный) моменты и соответствующие им скорости вращения вала механизма, рассчитать и построить механическую характеристику выбранного двигателя.

Таблица 9.1

График нагрузки производственного механизма

| P_1 | P_2 | P_3 | t_1 | t_2 | t_3 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| кВт | | | с | | |
| 12 | 8 | 6 | 20 | 30 | 15 |

Решение.

График нагрузки (нагрузочная диаграмма) производственного механизма построена на рис. 9.1. Судя по этому графику электропривод производственного механизма, работает в продолжительном режиме.

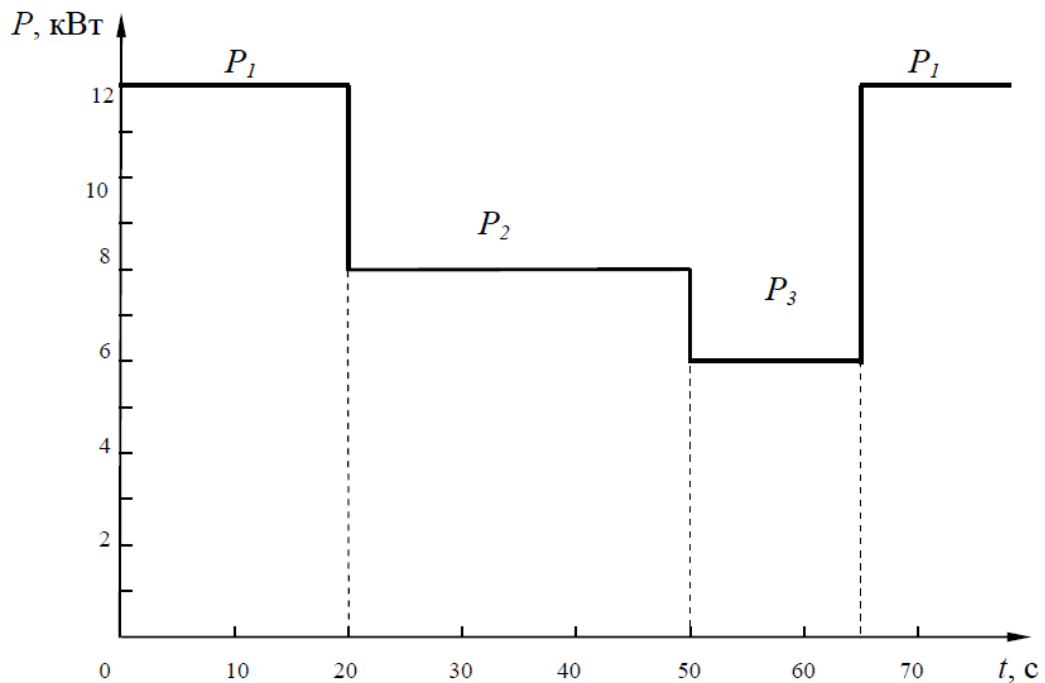


Рис. 9.1. График нагрузки производственного механизма

Исходя из условий эксплуатации электропривода производственного механизма, указанных в задании решаемого примера, избранию подлежит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Мощность электрического двигателя, работающего в продолжительном режиме, избирается по эквивалентной мощности:

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{T_{\text{Ц}}}},$$

где $T_{\text{Ц}}$ — время цикла работы двигателя, определяемое по формуле:

$$T_{\text{Ц}} = \sum_{i=1}^n t_i = t_1 + t_2 + t_3 = 20 + 30 + 15 = 65 \text{ с.}$$

Тогда эквивалентная мощность будет определяться величиной:

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{T_{\text{Ц}}}} = \sqrt{\frac{12^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 30 + 6^2 \cdot 15}{65}} = 9,06 \text{ кВт.}$$

По данным каталога (табл. П.2.1) в качестве приводного двигателя, исходя из условия $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{Э}}$, может быть использован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А160М6УЗ. Его технические характеристики:

- номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 11$ кВт;
- коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}} = 86$ %;
- коэффициент мощности $\cos \phi_{\text{ном}} = 0,86$;
- номинальное скольжение $s_{\text{ном}} = 2,7$ %;

- критическое скольжение $s_k = 15\%$;
- кратность критического момента $m_k = 2,0$;
- кратность пускового момента $m_n = 1,2$;
- кратность пускового тока $i_n = 6,0$.

Число полюсов определяется предпоследней цифрой в обозначении типа двигателя. В данном случае $2p = 6$.

Частота вращения магнитного поля статора:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин,}$$

где $f = 50$ Гц – частота изменения напряжения и тока во времени.

Номинальная частота вращения ротора:

$$n_{ном} = n_1 \left(1 - \frac{s_{ном}}{100} \right) = 1000 \left(1 - \frac{2,7}{100} \right) = 973 \text{ об/мин.}$$

Выбранный по мощности асинхронный двигатель подлежит проверке на тепловую и механическую перегрузку.

Неравенство $P_{ном} \geq P_{\varepsilon}$ является проверкой на тепловую перегрузку.

Механическая перегрузка (перегрузочная способность) определяет способность двигателя преодолевать кратковременные перегрузки. Необходимость проверки вызвана тем, что перегрузочная способность асинхронного двигателя ограничена его критическим моментом M_k . Если в графике нагрузки имеются пики с $M > M_k$, то возможна остановка двигателя. Проверку на перегрузочную способность двигателя следует производить с учетом возможного снижения питающего напряжения на 10% от номинального, то есть при $U = 0,9U_{ном}$. Такое снижение напряжения на внешних клеммах двигателя допускает ГОСТ Р 54149–2010.

Поскольку момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален квадрату напряжения, результат проверки на перегрузочную способность следует считать положительным, если выполняется условие

$$0,81 M_k \geq M_{max} ,$$

где M_k – критический (максимальный) момент, развиваемый двигателем при номинальном напряжении; M_{max} – максимальное (пиковое) значение момента сопротивления (из графика нагрузки).

Номинальный момент двигателя:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9550 \frac{11}{973} = 108 \text{ Нм;}$$

Критический (максимальный) момент:

$$M_k = m_k M_{ном} = 2 \cdot 108 = 216 \text{ Нм.}$$

Частота вращения ротора при критическом моменте на валу двигателя:

$$n_k = n_1 \left(1 - \frac{s_k}{100} \right) = 1000 \left(1 - \frac{15}{100} \right) = 850 \text{ об/мин.}$$

Максимальный статический момент с учетом того, что максимальная мощность P_1 наблюдается в первый интервал времени t_1 , определится так:

$$M_{\max} = 9550 \frac{P_1}{n_k} = 9550 \frac{12}{850} = 135 \text{ Нм.}$$

По перегрузочной способности выбранный двигатель проходит, так как выполняется условие:

$$0,81 M_k = 0,81 \cdot 216 = 175 \text{ Нм} < M_{\max} = 135 \text{ Нм.}$$

В случае невыполнения этого условия следует выбрать двигатель с большей мощностью и повторить проверку на перегрузочную способность.

Механическая характеристика электрического двигателя представляет собой зависимость $M = f(s)$ или $n_2 = f(M)$. Для построения этой характеристики следует, задаваясь численными значениями скольжения от 0 до 1 (в относительных единицах) рассчитать величину момента по формуле:

$$M = \frac{2 M_k}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}}.$$

Частоты вращения ротора следует определять по формуле:

$$n_2 = n_1 (1 - s).$$

Результаты расчета момента и частоты вращения ротора асинхронного двигателя сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета механической характеристики асинхронного двигателя к примеру 9

| s | M, Нм | n ₂ , об/мин | s | M, Нм | n ₂ , об/мин |
|-------|--------|-------------------------|-----|--------|-------------------------|
| 0 | 0 | 1000 | 0,4 | 142,03 | 600 |
| 0,027 | 108,00 | 973 | 0,5 | 118,90 | 500 |
| 0,05 | 129,60 | 950 | 0,6 | 101,65 | 400 |
| 0,1 | 199,38 | 900 | 0,7 | 88,51 | 300 |
| 0,15 | 216,00 | 850 | 0,8 | 78,25 | 200 |
| 0,2 | 207,36 | 800 | 0,9 | 70,05 | 100 |
| 0,3 | 172,80 | 700 | 1,0 | 63,37 | 0 |

По данным табл.3 на рис. 9.2 построены механические характеристики выбранного асинхронного двигателя.

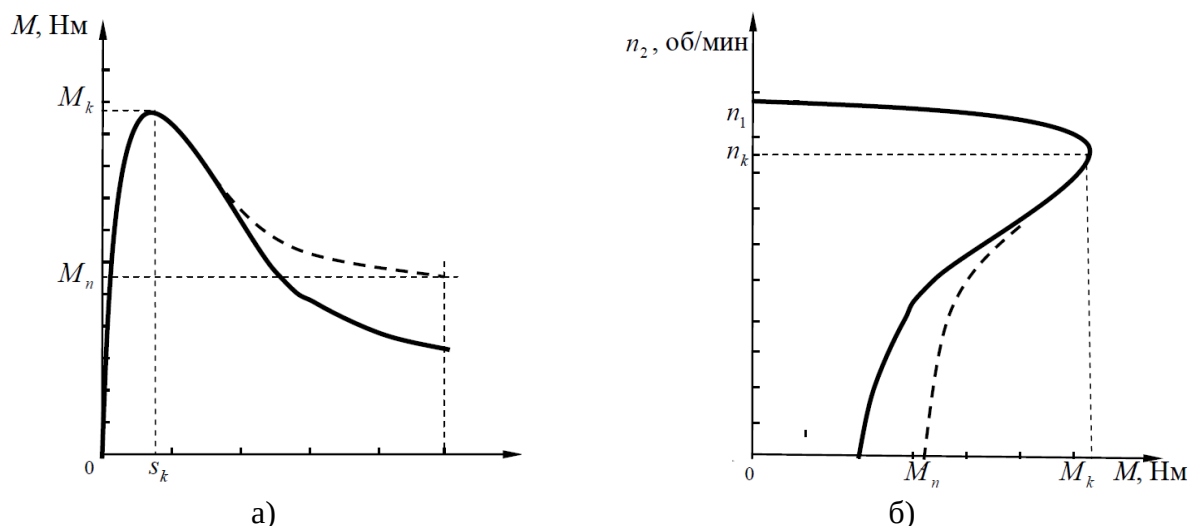


Рис. 9.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Использованная для расчета момента формула является ориентировочной и не учитывает модификационные изменения серии асинхронных двигателей 4А, направленных на улучшение пусковых свойств. Неточность проявляется лишь в области неустойчивой работы двигателя. Действительный вид этой области механической характеристики показан на рис. 9.2 штриховой линией.

Действительный пусковой момент выбранного асинхронного двигателя следует определять по формуле:

$$M_n = m_n M_{ном} = 1,2 \cdot 108 = 129,6 \text{ Нм.}$$

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины. / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.
2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./ Г. И. Атабеков. – 7-е изд. стереотип. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Объясните принцип работы асинхронного двигателя?
2. Что такое скольжение и как оно влияет на скорость двигателя?

Практическое занятие 10

Выбор типа и мощности электрического двигателя

Цель работы: научиться решать задачи по определению мощности и выбора асинхронного электродвигателя.

Выбрать электрический двигатель для производственного механизма с графиком нагрузки (нагрузочной диаграммой), заданным в виде табл. 10.1. Питание двигателя должно выполняться от трехфазной сети с номинальным напряжением 380 В. Желаемая частота вращения вала производственного механизма не более 1500 об/мин. Помещение, где будет установлен двигатель, сухое, проветриваемое, без пыли и грязи. Дополнительных требований к электроприводу производственного механизма нет.

Требуется выполнить следующее: построить нагрузочную диаграмму (график нагрузки), выбрать целесообразную мощность электрического двигателя, выбрать по соответствующей справочной литературе тип и сопутствующие технические характеристики электрического двигателя, проверить выбранный двигатель на перегрузочную способность, определить пусковой и критический (максимальный) моменты и соответствующие им скорости вращения вала механизма.

Таблица 10.1

График нагрузки производственного механизма

| P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 | P_6 | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| кВт | | | | | | с | | | | | |
| 16 | 10 | 0 | 8 | 0 | 5 | 10 | 30 | 20 | 10 | 25 | 5 |

Решение

График нагрузки производственного механизма приведен на рис. 10.1. Судя по этому графику, производственный механизм работает в повторно-кратковременном режиме.

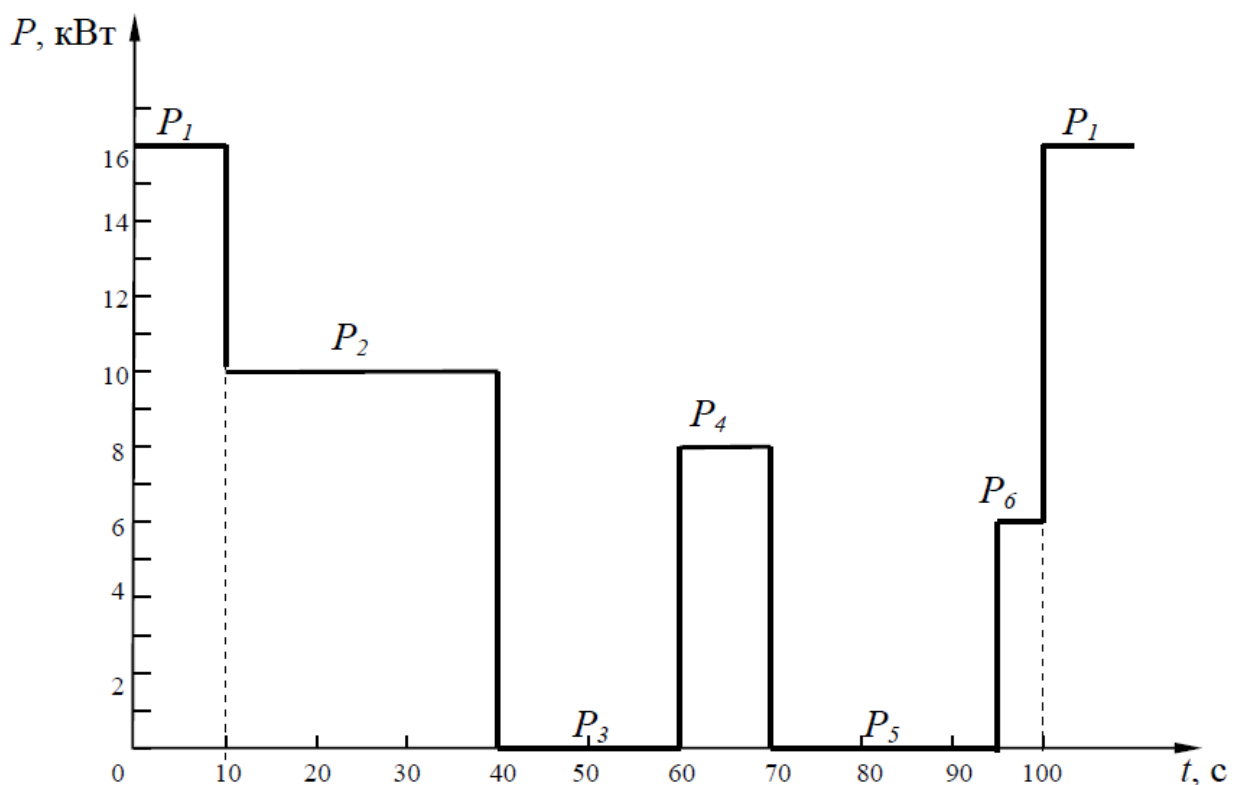


Рис. 10.1. График нагрузки производственного механизма

Исходя из условий эксплуатации электропривода производственного механизма, указанных в задании, избрану подлежит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Мощность электрического двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, подбирается по эквивалентной мощности:

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_p}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5 + P_6^2 t_6}{t_1 + t_2 + t_4 + t_6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{16^2 \cdot 10 + 10^2 \cdot 30 + 0^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 10 + 0^2 \cdot 25 + 5^2 \cdot 5}{10 + 30 + 10 + 5}} = 10,72 \text{ кВт.}$$

В уравнение входит время работы производственного механизма t_p , определяемое в данном случае из равенства:

$$t_p = t_1 + t_2 + t_4 + t_6 = 10 + 30 + 10 + 5 = 55 \text{ с.}$$

Время остановки двигателя:

$$t_0 = t_3 + t_5 = 20 + 25 = 45 \text{ с.}$$

Коэффициент повторного включения определяет относительную продолжительность включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{T_{ц}} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{55}{55 + 45} \cdot 100\% = 55\%$$

Тип двигателя будет выбираться из каталога, где указаны технические характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, предназначенных для работы в продолжительном режиме (табл. П.2.1), для которых стандартный коэффициент повторного включения следует принимать равным 100%: $ПВ_{ст} = 100\%$.

С учетом повторного включения величина эквивалентной мощности подлежит корректировке:

$$P'_{\text{Э}} = P_{\text{Э}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} = 10,72 \sqrt{\frac{55}{100}} = 7,95 \text{ кВт.}$$

По данным каталога в качестве приводного двигателя, исходя из условия $P_{\text{ном}} \geq P'_{\text{Э}}$, может быть избран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А132М4УЗ. Его технические характеристики:

- номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 11$ кВт;
- коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}} = 87,5$ %;
- коэффициент мощности $\cos \phi_{\text{ном}} = 0,87$;
- номинальное скольжение $s_{\text{ном}} = 2,8$ %;
- критическое скольжение $s_k = 19,5$ %;
- кратность критического момента $m_k = 3,0$;

– кратность пускового момента $m_n = 2,2$;

– кратность пускового тока $i_n = 7,5$.

Число полюсов определяется предпоследней цифрой в обозначении типа двигателя. В данном случае $2p = 4$.

Частота вращения магнитного поля статора:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин,}$$

Номинальная частота вращения ротора:

$$n_{\text{ном}} = n_1 \left(1 - \frac{s_{\text{ном}}}{100} \right) = 1500 \left(1 - \frac{2,8}{100} \right) = 1458 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения ротора при критическом моменте на валу двигателя:

$$n_k = n_1 \left(1 - \frac{s_k}{100} \right) = 1500 \left(1 - \frac{19,5}{100} \right) = 1207,5 \text{ об/мин.}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9550 \frac{11}{1458} = 72,05 \text{ Нм;}$$

Критический (максимальный) момент:

$$M_k = m_k M_{\text{ном}} = 3 \cdot 72,05 = 216,15 \text{ Нм.}$$

Максимальный статический момент с учетом того, что максимальная мощность развивается производственным механизмом в первый интервал времени, определится так:

$$M_{\text{max}} = 9550 \frac{P_1}{n_k} = 9550 \frac{16}{1207,5} = 126,54 \text{ Нм.}$$

По перегрузочной способности выбранный двигатель проходит, так как выполняется условие:

$$0,81 M_k = 0,81 \cdot 216,15 = 175 \text{ Нм} \quad \text{и} \quad M_{\text{max}} = 126,54 \text{ Нм.}$$

Форма отчетности:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Результаты вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
5. Выводы по работе.

Основная литература

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины. / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 736 с.
2. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие для вузов./

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назовите основные способы регулировки скорости вращения асинхронного электродвигателя?
2. Назовите способы торможения асинхронного двигателя?
3. Нарисуйте механическую характеристику асинхронного двигателя. Обозначьте на ней основные точки и объясните их?

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. ОС Windows 7 Professional;
2. Microsoft Imagine Premium;
3. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
4. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;
5. Adobe Reader.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

| Вид занятия (Лк, ЛР, СР, ПЗ) | Наименование аудитории | Перечень основного оборудования | № Лк, ЛР |
|--|---|---|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Лк | Лекционная аудитория | Учебная мебель | № 1-3 |
| ЛР | Лаборатория теоретические основы электротехники | Учебная мебель; Лабораторная установка Электрические и магнитные цепи, электрические машины и привод ЭОЭ1-С-К; лабораторная установка Основы электроники ОЭ1-Н-Р | № 1-6 |
| | Лаборатория электрических аппаратов | Учебная мебель; Лабораторная установка Электрические аппараты ЭА1-С-Р; лабораторная установка Электрические аппараты ЭА2-С-Р; | № 7-8 |
| ПЗ | Лекционная аудитория | Учебная мебель | №1-10 |
| СР | Читальный зал №3 | Учебная мебель; Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF); | ЛР № 1-8 ПЗ № 1-10 |
| | | принтер HP LaserJet P3005 | |

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

| № компетенции | Элемент компетенции | Раздел | Тема | ФОС |
|---------------|--|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| ОПК-2 | способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико-математический аппарат | 1. Электротехника | 1.1 Цепи постоянного тока 1.2 Цепи однофазного синусоидального тока 1.3 Трехфазные цепи | <i>Вопросы к зачету</i> 1.1-1.21 |
| ПК-1 | знанием нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования, планировки и застройки населенных мест | 2. Электрические машины | 2.1. Трансформаторы 2.2. Асинхронные машины | <i>Вопросы к зачету</i> 2.1-2.6 |
| ПК-6 | способностью осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, обеспечивать надежность, безопасность и эффективность их работы | 3. Электроснабжение | 3.1 Основные сведения о системах электроснабжения 3.2 Временные электрические сети строительных площадок 3.3 Электронагрев в строительном производстве | <i>Вопросы к зачету</i> 3.1-3.6 |
| ПК-8 | владением технологией, методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства, эксплуатации, обслуживания зданий, сооружений, инженерных систем, производства строительных материалов, изделий и конструкций, машин и оборудования | | | |

2. Вопросы к зачету

| № п/п | Компетенции | | ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ | № и наименование раздела |
|-------|-------------|---|---|-----------------------------|
| | Код | Определение | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | ОПК-2 | способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, | 1.1. Закон Ома, Кирхгофа. Работа и мощность электрической цепи при синусоидальном токе. 1.2. Электрическая цепь с активным сопротивлением при синусоидальном токе. | 1. Электротехника |

| | | | | |
|---|------|--|--|---|
| | | <p>возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико-математический аппарат</p> | <p>1.3. Электрическая цепь с индуктивностью при синусоидальном токе. 1.4. Электрическая цепь с емкостью при синусоидальном токе. 1.5. Последовательное соединение резистора, индуктивности и емкости. Резонанс напряжений. 1.6. Параллельное соединение резистора индуктивности, емкости. Резонанс токов. 1.7. Трехфазный генератор. Получение трехфазной системы ЭДС. 1.8. Четырехпроводная цепь. Соединение обмоток генератора и фаз приемника звездой. 1.9. Получение трехфазной ЭДС. Роль нейтрального провода. 1.9. Узел, ветвь, контур, участок цепи. 1.10. Трехпроводная цепь. Соединение нагрузки звездой. 1.11. Законы Ома и Кирхгофа при постоянном токе. Работа и мощность электрической цепи при постоянном токе. 1.12. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником. 1.13. Баланс мощностей электрической цепи и КПД при постоянном токе. 1.14. Определение мощности трехфазного тока при несимметричной нагрузке. 1.15. Определение мощности трехфазного тока при симметричной нагрузке. 1.16. Расчет цепей с одним источником питания при постоянном токе. 1.17. Расчет разветвленных цепей постоянного тока с несколькими источниками. 1.18. Потенциальная диаграмма при постоянном токе. 1.19. Получение и изображение синусоидального тока. 1.20. Роль нейтрального провода. 1.21. Активная, реактивная и полная мощности электрической цепи синусоидального тока.</p> | |
| 2 | ПК-1 | <p>знанием нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и</p> | <p>2.1. Принцип действия однофазного трансформатора, устройство трансформатора и его назначение. 2.2. Холостой ход трансформатора: физические процессы, уравнения электрического состояния обмоток, составляющие тока холостого хода, действующее значение ЭДС обмоток, коэффициент трансформации, векторная диаграмма, схема замещения. 2.3. Режим короткого замыкания</p> | <p>2. Электрические машины</p> |

| | | | | |
|---|------|--|--|---------------------|
| | | оборудования, планировки и застройки населенных мест | трансформатора: опыт к.з., физические процессы; уравнения и векторная диаграмма трансформатора в режиме к.з., треугольник Z_k трансформатора, физический смысл u_k трансформатора? 2.4. Сварочные трансформаторы. 2.5. Измерительные трансформаторы тока и напряжения. 2.6. Внешняя характеристика трансформатора. Потери мощности и КПД трансформатора. | |
| 3 | ПК-6 | способностью осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, обеспечивать надежность, безопасность и эффективность их работы | 3.1. Особенности электроснабжения предприятий строительной индустрии и строящихся объектов. 3.2. Расчет электрических сетей на потерю напряжения. 3.3. Молниезащита зданий и сооружений. 3.4. Искусственное освещение производственных помещений и площадок. 3.5. Мероприятия по экономии электрической энергии. 3.6. Электрические системы пожаробезопасности. | 3. Электроснабжение |
| 4 | ПК-8 | владением технологией, методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства, эксплуатации, обслуживания зданий, сооружений, инженерных систем, производства строительных материалов, изделий и конструкций, машин и оборудования | | |

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

| Показатели | Оценка | Критерии |
|--------------------------|----------------|---|
| Знать (ОПК-2): | зачтено | Оценка «зачтено» выставляется обучающимся, |

| | | |
|--|-------------------|---|
| <p>- сущность естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; (ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> - нормативную базу в области инженерных изысканий; - основные принципы проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования <p>(ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> способы организации технической эксплуатации зданий; - способы безопасной и эффективной эксплуатации зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства; | | <p>показавшим всестороннее знание теоретических основ дисциплины, в частности знание нормативной базы в области инженерных изысканий, способов безопасной и эффективной эксплуатации зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, технологию процессов строительного производства; умение пользоваться нормативной базой в области инженерных изысканий, обеспечивать надежность и эффективность работы зданий.</p> |
| <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> - технологию процессов строительного производства; - способы эксплуатации зданий; - способы производства строительных материалов; <p>Уметь: (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - выявлять сущность естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; - применять физико-математический аппарат для решения проблем в профессиональной деятельности; <p>(ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> - пользоваться нормативной базой в области инженерных изысканий; - составить план застройки населенного пункта; - размещать оборудование для застройки в населенных пунктах; <p>(ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> - осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию | <p>не зачтено</p> | <p>Вопрос по зачету не раскрыт, обнаруживается существенное непонимание теоретических основ изучаемой дисциплины.</p> |

| | | |
|---|--|--|
| <p>зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства;</p> <ul style="list-style-type: none"> - обеспечить надежность и эффективность работы зданий; <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> - обслуживать здания, сооружения, инженерные системы; - организовывать производство строительных материалов, изделий и конструкций; - ориентироваться в процессах строительного производства и эксплуатации зданий, сооружений, инженерных систем; <p>Владеть:</p> <p>(ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - способами решения естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; - навыками применения физико-математического аппарата для решения; <p>(ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования; - способами размещения инженерных систем; <p>(ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами организации и технической эксплуатации зданий; - способами безопасной и эффективной эксплуатации зданий; <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами производства строительных материалов, изделий и конструкций, а также эксплуатацией зданий и сооружений; - методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства. | | |
|---|--|--|

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина «Электроснабжение с основами электротехники» направлена на приобретение у обучающихся теоретических и практических знаний в области электроснабжения и электротехники в такой степени, чтобы они могли выбирать необходимые электротехнические, электронные, электроизмерительные устройства, уметь объяснить их работу и правильно эксплуатировать.

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к изыскательскому и проектно-конструкторскому, производственно-технологическому и производственно-управленческому видам деятельности, указанными в учебном плане.

Изучение дисциплины «Электроснабжение с основами электротехники» предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- самостоятельные работы;
- зачет.

С целью определения уровня овладения компетенциями, закрепленными за дисциплиной, в заданные преподавателем сроки проводится текущий контроль знаний, умений и навыков каждого обучающегося и аттестация по итогам освоения дисциплины. Текущий контроль проводится на аудиторных занятиях с целью определения качества усвоения материала по окончании изучения очередной учебной темы в следующих формах: письменный опрос.

Аттестация по итогам освоения дисциплины.

Для контроля усвоения данной дисциплины учебным планом предусмотрен зачет. На зачете обучающимся предлагается ответить на два вопроса билета, составленного из вопросов, примеры которых приведены в приложении 1 табл. 2. На подготовку к ответу на билет студентам выделяется от 30 до 40 минут. На все вопросы студент готовит письменный конспективный ответ, который затем докладывает преподавателю.

Самостоятельную работу необходимо начинать с проработки теоретического материала по пройденной теме.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

АННОТАЦИЯ

рабочей программы дисциплины

Электроснабжение с основами электротехники

1. Цель и задачи дисциплины

Цель изучения дисциплины является: приобретение у обучающихся теоретических и практических знаний в области электроснабжения и электротехники в такой степени, чтобы они обладали знаниями методов расчета электрических цепей, типовых схемных решений электроснабжения зданий и сооружений и владели навыками расчета элементов этих систем.

Задачей изучения дисциплины является:

– изучение основных положений теории и практики расчета однофазных и трехфазных электрических цепей, устройств и принципов работы электрических машин и электрооборудования; типовых схем электроснабжения зданий, сооружений и строительных объектов и основных направлений развития этих систем;

– уметь выбирать типовые схемные решения систем электроснабжения зданий и сооружений и электрооборудования, применяемого на строительных объектах.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебной работы, включая самостоятельную работу: Лк – 17 час., ЛР – 17 час., Пр – 17 час., СР – 21 час.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 72 часов, 2 зачетных единиц.

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Электротехника
2. Электрические машины
3. Электроснабжение

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций: ОПК-2 – способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико-математический аппарат;

ПК-1 – знанием нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования, планировки и застройки населенных мест;

ПК-6 – способностью осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, обеспечивать надежность, безопасность и эффективность их работы;

ПК-8 – владением технологией, методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства, эксплуатации, обслуживания зданий, сооружений, инженерных систем, производства строительных материалов, изделий и конструкций, машин и оборудования.

4. Вид промежуточной аттестации: зачет

**Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год**

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры №____ от «__» _____ 20 ____ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

| № компетенции | Элемент компетенции | Раздел | ФОС |
|---------------|--|--------------------------------|---|
| ОПК-2 | способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико-математический аппарат | 1. Электротехника | Вопросы по лабораторным работам. Отчеты по лабораторным работам. |
| ПК-1 | знанием нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования, планировки и застройки населенных мест | 2. Электрические машины | Вопросы по лабораторным работам. Отчеты по лабораторным работам. |
| ПК-6 | способностью осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, обеспечивать надежность, безопасность и эффективность их работы | 3. Электроснабжение | Вопросы по лабораторным работам. Отчеты по лабораторным работам. |
| ПК-8 | владением технологией, методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства, эксплуатации, обслуживания зданий, сооружений, инженерных систем, производства строительных материалов, изделий и конструкций, машин и оборудования | | |

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

| Показатели | Оценка | Критерии |
|--|------------|---|
| <p>Знать (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - сущность естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; <p>(ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> - нормативную базу в области инженерных изысканий; - основные принципы проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования <p>(ПК-6):</p> <p>способы организации технической эксплуатации зданий;</p> <ul style="list-style-type: none"> - способы безопасной и эффективной эксплуатации зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства; <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> - технологию процессов строительного производства; - способы эксплуатации зданий; - способы производства строительных материалов; <p>Уметь: (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - выявлять сущность естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; - применять физико-математический аппарат для решения проблем в профессиональной деятельности; <p>(ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> - пользоваться нормативной базой в области инженерных изысканий; - составить план застройки населенного пункта; - размещать оборудование для застройки в населенных пунктах; <p>(ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> - осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства; - обеспечить надежность и эффективность работы зданий; | зачтено | <p>Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически его излагает, умеет находить взаимосвязь теории с практикой, не затрудняется с ответом при видоизменении вопроса, владеет специальной терминологией, демонстрирует общую эрудицию в предметной области, использует при ответе ссылки на материал специализированных источников.</p> |
| | не зачтено | <p>Обучающийся имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, не знает значительной части программного материала, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении теоретического материала, не владеет специальной терминологией, допускает существенные ошибки при ответе.</p> |

| | | |
|--|--|--|
| <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none">- обслуживать здания, сооружения, инженерные системы;- организовывать производство строительных материалов, изделий и конструкций;- ориентироваться в процессах строительного производства и эксплуатации зданий, сооружений, инженерных систем; <p>Владеть:</p> <p>(ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none">- способами решения естественнонаучных проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности;- навыками применения физико-математического аппарата для решения; <p>(ПК-1):</p> | | |
|--|--|--|

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 08.03.01 Строительство от «12» марта 2015 г. № 201

для набора 2017 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «04» апреля 2017г. № 203

для набора 2018 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. № 130.

Программу составил:

Плотников Михаил Павлович, доцент кафедры ЭиЭ, к.т.н. _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «___» _____ 201__ г., протокол № ____

Заведующий кафедрой ЭиЭ _____ Ю.Н. Булатов

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий кафедрой СМиТ _____ С.А. Белых

Директор библиотеки _____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета энергетики и автоматики

от «___» _____ 201__ г., протокол № ____

Председатель методической комиссии факультета _____ А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления _____ Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____