



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЭиАС
_____ В.Р. Храмшин

10.02.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Направление подготовки (специальность)
15.03.01 Машиностроение

Направленность (профиль/специализация) программы
Оборудование и технология сварочного производства

Уровень высшего образования - бакалавриат

Форма обучения
заочная

Институт/	Институт энергетики и автоматизированных
Кафедра	Электроснабжения промышленных
Курс	2

Магнитогорск
2023 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО - бакалавриат по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение (приказ Минобрнауки России от 09.08.2021 г.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Электроснабжения промышленных предприятий

23.01.2023, протокол № 4

Зав. кафедрой _____ А.В.Варганова

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИЭиАС

Председатель _____ В.Р. Храмшин

Согласовано:

Зав. кафедрой Машины и технологии обработки

_____ С.И. Платов

Рабочая программа составлена:

ст. преподаватель кафедры ЭПП, канд. техн. наук

_____ О.И.Петухова

Рецензент:

зам. начальника цеха электропривода ЦЭТЛ ПАО ММК ,

канд. техн. наук _____ А.Ю.Юдин

Лист актуализации рабочей программы

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2024 - 2025 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2025 - 2026 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2026 - 2027 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2027 - 2028 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2028 - 2029 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____

1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Целями освоения дисциплины (модуля) «Электротехника и электроника» являются теоретическая и практическая подготовка будущих бакалавров в области электротехники и электроники в такой степени, чтобы они могли выбирать необходимые электротехнические, электронные, электроизмерительные устройства, уметь их правильно эксплуатировать и составлять совместно со

2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Электротехника входит в обязательную часть учебного плана образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/

Математика

Физика

Информатика

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения

Производственная - технологическая

Источники питания для сварки

Безопасность жизнедеятельности

3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Электротехника» обучающийся должен обладать следующими

Код	Индикатор достижения компетенции
ОПК-7	Способен применять современные экологичные и безопасные методы рационального использования сырьевых и
ОПК-7.1	Применяет современные экологичные и безопасные методы рационального использования сырьевых и энергетических

4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц
108 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 10,7 акад. часов;
- аудиторная – 10 акад. часов;
- внеаудиторная – 0,7 акад. часов;
- самостоятельная работа – 93,4 акад. часов;
- в форме практической подготовки – 0 акад. час;

– подготовка к зачёту – 3,9 акад. час

Форма аттестации - зачет

Раздел/ тема дисциплины	Курс	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа студента	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код компетенции
		Лек. зан.	лаб. зан.	практ. зан.				
1.								
1.1 Линейные электрические цепи постоянного тока	2	1	2		12	1. Поиск дополнительной информации по заданной теме. 2. Самостоятельное изучение учебной литературы. 3. Работа с электронными библиотеками. 1. Выполнение контрольной		ОПК-7.1

1.2 Линейные электрические цепи однофазного синусоидального тока		2	2		12	1. Работа с электронными библиотеками. 2. Самостоятельное изучение учебной литературы. 3. Выполнение контрольной работы № 2	Контрольная работа № 1	ОПК-7.1
1.3 Трехфазные цепи					12	Работа с электронными библиотеками. 2. Самостоятельное изучение учебной литературы		ОПК-7.1
1.4 Трансформаторы		1			10	1. Самостоятельное изучение учебной литературы 3. Выполнение контрольной работы №2	Контрольная работа № 2.	ОПК-7.1
1.5 Электрические машины постоянного					10	1. Самостоятельное изучение учебной литературы		ОПК-7.1
1.6 Асинхронные двигатели			1		10	1. Самостоятельное изучение учебной литературы. 2. Подготовка к лабораторной работе № 24	1. Лабораторная работа № 24	ОПК-7.1
1.7 Элементная база электронных устройств. Источники вторичного			1		18	1. Самостоятельное изучение учебной литературы. 2. Подготовка к лабораторной работе №10	1. Лабораторная работа № 10	ОПК-7.1

1.8 Электрические измерения и приборы				9,4	1.Самостоятел ьное изучение учебной литературы		ОПК-7.1
Итого по разделу	4	6		93,			
2.							
2.1 Зачет	2						ОПК-7.1
Итого по разделу							
Итого за семестр	4	6		93,		зачёт	
Итого по	4	6		93,		зачет	

5 Образовательные технологии

Для реализации предусмотренных видов учебной работы в качестве образовательных технологий в преподавании дисциплины используются традиционная технология и технология проблемного обучения. Передача необходимых теоретических знаний и формирование основных представлений может происходить с использованием мультимедийного оборудования.

Лекции проходят в традиционной форме, в форме лекций-консультаций и проблемных лекций. Теоретический материал на проблемных лекциях является результатом усвоения полученной информации посредством постановки проблемного вопроса и поиска путей его решения. На лекциях – консультациях изложение нового материала сопровождается постановкой вопросов и дискуссией в поисках ответов на эти

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной
Представлено в приложении 1.

7 Оценочные средства для проведения промежуточной
Представлены в приложении 2.

8 Учебно-методическое и информационное **а) Основная литература:**

1. Электротехника и основы электроники : учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. — 10-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 736 с. — ISBN 978-5-8114-0523-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/112073> (дата обращения: 26.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Электротехника и электроника : учебное пособие / М. С. Анисимова, И. С. Попова. — Москва : МИСИС, 2019. — 135 с. — ISBN 978-5-907061-32-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL:

б) Дополнительная литература:

1. Введение в теоретическую электротехнику. Курс подготовки бакалавров / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Е. Б. Соловьева, Э. П. Чернышев. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-2406-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/89931> (дата обращения: 26.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Электротехника : учебник / С. М. Аполлонский. — Москва : КноРус, 2023. — 292 с. — ISBN 978-5-406-11277-9. — URL: <https://book.ru/book/948617> (дата обращения: 13.04.2023). — Текст : электронный. — Режим доступа: для авториз.

в) Методические указания:

1. Храмшин, Р.Р. Электрические приборы и измерения. : методические указания к лабораторной работе № 8 (ауд. 358) по дисциплине “Электротехника и основы электроники” для студентов электротехнических специальностей / Р.Р.

Храмшин, Г.В. Шохина, Т.П. Ларина, Т.Р. Храмшин ; Магнитогорский гос. технический ун-т им.Г.И.Носова. Магнитогорск : МГТУ им. Г.И.Носова, 2014.-24с. :ил.,граф., схемы. -Текст: непосредственный.

2. Храмшин, Р.Р. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока : методические указания к лабораторной работе № 1 (ауд. 358) по дисциплине “Электротехника и основы электроники” для студентов неэлектротехнических специальностей / Р.Р. Храмшин, Г.В. Шохина, Т.П. Ларина.;Магнитогорский гос. технический ун-т им.Г.И.Носова. Магнитогорск : МГТУ им. Г.И.Носова, 2013.-17с. : ил.,граф., схемы. -Текст: непосредственный.

3. Храмшин, Р.Р. Исследование линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока. Компенсация реактивной мощности.: методические указания к лабораторной работе № 2 (ауд. 358) по дисциплине “Электротехника и основы электроники” для студентов неэлектротехнических специальностей / Р.Р. Храмшин, Г.В. Шохина, Т.П. Ларина ;Магнитогорский гос. технический ун-т им.Г.И.Носова. Магнитогорск : МГТУ им. Г.И.Носова, 2013.-20с. : ил.,граф., схемы. -Текст: непосредственный.

4. Храмшин, Р.Р. Исследование трехфазной цепи при соединении приемников энергии «звездой»: методические указания к лабораторной работе № 4 (ауд. 358) по дисциплине

г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Программное обеспечение

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
MS Office 2007	№ 135 от 17.09.2007	бессрочно
7Zip	свободно	бессрочно

Электронные плакаты по дисциплине "Электроник	К-278-11 от 15.07.2011	бессрочно
Электронные плакаты по дисциплине "Электротех	К-278-11 от 15.07.2011	бессрочно
FAR Manager	свободно	бессрочно

Профессиональные базы данных и информационные

Название курса	Ссылка
Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И.	https://magtu.informsystema.ru/Marc.html?locale=ru
Российская Государственная	https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/
Информационная система - Единое окно доступа к	URL: http://window.edu.ru/
Поисковая система Академия Google (Google	URL: https://scholar.google.ru/

Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс	URL: https://elibrary.ru/project_risc.asp
Электронная база периодических изданий East	https://dlib.eastview.com/

9 Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническое обеспечение дисциплины
Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа ауд.365 Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

Учебная лаборатория для проведения лабораторных работ: лаборатория электрических цепей ауд. 358
Универсальный лабораторный стенд по электрическим цепям, электронике, электроизмерениям 9 шт.

Наглядные пособия –плакаты-12 шт.

Учебная лаборатория для проведения лабораторных работ: лаборатория электрических машин ауд .361
Универсальный лабораторный стенд по электрическим машинам 9 шт.

Наглядные пособия-плакаты-12 шт.

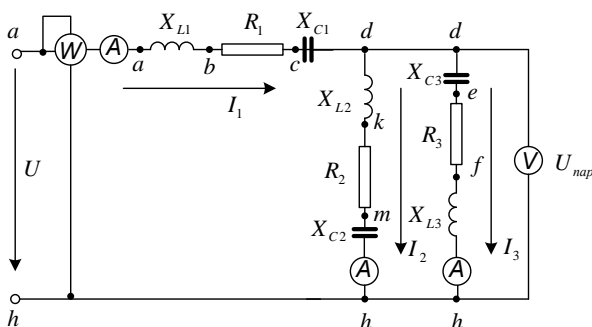
Учебная аудитория для проведения практических занятий , групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации ауд. 357, 354, 358, 361
Доска, мультимедийный проектор, экран

Помещение для самостоятельной работы обучающихся ауд. 343 Персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и доступом в электронную

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Контрольная работа №1. Расчет линейной электрической цепи синусоидального тока

1. По базе данных для своего варианта определить параметры электрической цепи, питающей от сети синусоидального тока с напряжением U .



2. Определить комплексные сопротивления ветвей в алгебраической и показательной формах.

3. Рассчитать комплексные сопротивления параллельного участка dh в алгебраической и показательной формах.

4. Определить комплексное входное сопротивление в алгебраической и показательной формах.

5. Рассчитать входной ток I_1 в алгебраической и показательной формах.

6. Рассчитать напряжение параллельного участка dh $U_{пар}$ в алгебраической и показательной формах.

Контрольная работа №2. Расчет характеристик трехфазного трансформатора

По техническим данным трехфазного двухобмоточного трансформатора требуется:

1) рассчитать и изобразить Т - образную схему замещения одной фазы;

При коэффициентах нагрузки $\beta = 0,05; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,2$:

2) построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$;

3) определить и построить зависимости:

а) КПД - $\eta = f(\beta)$;

б) отклонение напряжения $U_2 - U_2 = f(\beta)$; 4) построить векторную диаграмму.

7. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

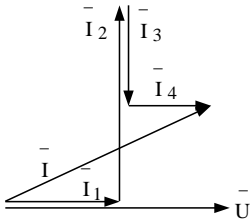
Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
<p>ОПК-7: Способен применять современные экологичные и безопасные методы рационального использования сырьевых и энергетических ресурсов в машиностроении;</p>		
<p>ОПК-7.1:</p>	<p>Применяет современные экологичные и безопасные методы рационального использования сырьевых и энергетических ресурсов в машиностроении</p>	<p><i>Перечень теоретических вопросов к экзамену</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Понятия электрической, электронной и магнитной цепей. Классификация и примеры цепей. Основные законы электротехники и их применение. 2. Физическая и математическая модели цепи. Источники, проводники и приемники. Идеализированные двухполюсные элементы и их свойства. 3. Линейные электрические цепи постоянного тока. Анализ цепи на основе законов Кирхгофа и Ома. 4. Эквивалентные преобразования участков цепей.

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<ol style="list-style-type: none"> 5. Основные методы анализа линейных цепей. 6. Свойства линейных электрических цепей: свойство линейности, принцип наложения, принцип взаимности. 7. Электрическая мощность и энергия постоянного электрического тока. Закон сохранения энергии в электрической цепи с постоянными токами. Баланс мощностей. 8. Основные характеристики и параметры синусоидальных токов и напряжений. Способы получения синусоидальных напряжений и токов. 9. Представление синусоидальных токов и напряжений векторами и комплексными числами. Законы электрических цепей в комплексной форме. 10. Фазовые соотношения между токами и напряжениями в цепи при синусоидальном токе. 11. Сопротивления элементов и участков цепей при синусоидальных токах.

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>12. Электрическая энергия и мощность в цепях с синусоидальным током. Активная, реактивная и полная мощности. Баланс активных и реактивных мощностей.</p> <p>13. Трехфазная система напряжений, основные соотношения, способы получения, источники трехфазного напряжения и их эквивалентные схемы.</p> <p>14. Трехфазная нагрузка. Симметричная и несимметричная нагрузка при соединении фаз в треугольник и звезду. Схемы и расчет эквивалентных параметров нагрузки в трехфазных цепях.</p> <p>15. Трехфазная трех- и четырехпроводная сеть с симметричной нагрузкой, схемы, расчетные соотношения для определения линейных и фазных токов и напряжений.</p> <p>16. Мощности трехфазной сети. Измерение активной и реактивной мощности.</p> <p>17. Однофазный трансформатор со стальным сердечником.</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>18. Свойства и особенности полупроводниковых диодов различных типов.</p> <p>19. Назначение и примеры простейших схем выпрямителей, принципы их работы.</p> <p>Примерный перечень практических заданий</p> <p>.Определить сопротивление резистора R2, если: R1 = 3 Ом, а показания амперметров указаны на схеме.</p>  <p>2. Определить напряжение источника U, если R=6 Ом, I=4А.</p>  <p>3. Определить сопротивление конденсатора X_C, если: U = 200 В, I = 4 А, cos φ = 0,8.</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<div data-bbox="580 256 823 391" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="580 395 1044 486">4. Определить показания амперметров A_1 и A_2 и реактивную мощность цепи Q, если: $U = 120$ В.</p> <div data-bbox="580 518 957 710" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="580 718 1044 837">5. Линейные токи при соединении нагрузки «звездой»: $I_A = I_B = I_C = 20$ А. Определить ток в нейтральном проводе, если $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = 30^\circ$.</p> <p data-bbox="580 845 1044 933">6. Определить показание вольтметра, если $Z_\phi = 10$ Ом, амперметр показывает 10 А.</p> <div data-bbox="580 941 823 1085" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="580 1093 1044 1244">7. Определить действующее значение тока, напряжения, сдвиг по фазе и характер нагрузки, если мгновенные значения тока и напряжения равны: $i = 10 \sin \omega t$, $u = 141 \sin (\omega t + 30^\circ)$.</p> <p data-bbox="580 1252 1044 1404">8. Какой ток можно измерить амперметром, сопротивление которого $R_A = 0,3$ Ом, $n_{ном} = 150$ дел., $C_A = 0,001$ А/дел., если включить его с шунтом, сопротивление которого $R_{ш} = 0,01$ Ом?</p> <p data-bbox="580 1412 1044 1436">9. Определить цену деления</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>вольтметра, имеющего номинальные данные: $U_{\text{ном}}=50 \text{ В}$, $n_{\text{ном}}=100 \text{ дел.}$, $R_V=1000 \text{ Ом}$, включенного с добавочным сопротивлением $R_D=3000 \text{ Ом}$.</p> <p>Приведите схему включения вольтметра с добавочным сопротивлением.</p> <p>10. Приведите электрическую схему, которой соответствует векторная диаграмма.</p> 
		<p>Перечень лабораторных работ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Электрические приборы и измерения; 2. Исследование свойств цепи постоянного тока; 3. Исследование электрической цепи синусоидального тока; 4. Исследование трехфазных цепей; 5. Исследование полупроводниковых

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		выпрямителей.
ОПК-6.2:	Оценивает по критериям технологический процесс в профессиональной области с точки зрения безопасности и эффективности	<p><i>Перечень теоретических вопросов к экзамену</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Однофазный трансформатор со стальным сердечником. 2. Трехфазные трансформаторы: назначение, конструкция, принцип действия, основные эксплуатационные параметры. 3. Получение вращающегося магнитного поля в трехфазной цепи. 4. Асинхронные двигатели: назначение, конструкция, принцип действия. 5. Способы пуска и регулирования скорости асинхронных двигателей. 6. Двигатели постоянного тока: назначение, конструкция, способы возбуждения, основные характеристики. 7. Уравнение движения электропривода. 8. Режимы работы

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>электроприводов.</p> <p>9. Выбор мощности двигателя электропривода.</p> <p>10. Выбор вида и типа двигателя.</p> <p>11. Тиристорное и транзисторное управление электроприводом</p> <p>12. Общие сведения о полупроводниках.</p> <p>13. Электронно-дырочный переход. Характеристики, параметры и назначение полупроводниковых диодов, тиристоров.</p> <p>14. Общие сведения и классификация источников электропитания.</p> <p>15. Нулевые схемы выпрямления. Однофазные, трехфазные и управляемые выпрямители.</p>
		<p><i>Примерный перечень практических заданий</i></p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>1. Дано: $U_{1\text{ном}}=220\text{ В}$, $U_{2\text{ном}}=127\text{ В}$, $S_{\text{ном}}=1100\text{ ВА}$.</p> <p>Определить номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора и коэффициент трансформации K.</p> <p>Почему номинальные токи не равны по величине?</p> <p>2. Однофазный трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{ном}}=600\text{ кВА}$ включен в сеть с напряжением $U_{1\text{ном}}=10\text{ 000 В}$. Напряжение на зажимах вторичной обмотки $U_{2\text{ном}}=400\text{ В}$. Определить число витков первичной обмотки W_1 и коэффициент трансформации k, если число витков вторичной обмотки $W_2=25$.</p> <p>3. Во вторичной обмотке трансформатора наводится ЭДС $E_2=100\text{ В}$ с частотой $f=50\text{ Гц}$.</p> <p>Определить ЭДС E_2, если амплитуда напряжения на</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>первичной обмотке не изменится, а частота возрастет до 400 Гц?</p> <p>4. Трансформатор имеет следующие данные: $S_{\text{ном}}=10\ 000\ \text{ВА}$, $P_0=200\ \text{Вт}$, $P_k=400\ \text{Вт}$. Определить КПД трансформатора при $\cos\varphi=0,8$ и $\beta=0,5$.</p> <p>5. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет паспортные данные: $P_{\text{ном}}=10\ \text{кВт}$, $U_{\text{ном}}=220\ \text{В}$, $I_{\text{яном}}=50\ \text{А}$, $n_{\text{ном}}=1000\ \text{об/мин}$, $R_{\text{я}}=0,4\ \text{Ом}$.</p> <p>Определить частоту вращения якоря двигателя при идеальном холостом ходе.</p> <p>6. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения имеет номинальные данные: $P_{\text{ном}}=55\ \text{кВт}$, $U_{\text{ном}}=440\ \text{В}$, $I_{\text{яном}}=140\ \text{А}$, $R_{\text{я}}=0,1\ \text{Ом}$.</p> <p>Определить противо - ЭДС и электромагнитную мощность двигателя.</p> <p>7. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальные данные: $P_{\text{ном}}=10\ 000\ \text{Вт}$,</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>$U_{ном}=220\text{ В}$, $I_{ном}=55\text{ А}$,</p> <p>$n_{ном}=1000\text{ об/мин}$, $R_{я}=0,4\text{ Ом}$, $R_{в}=44\text{ Ом}$.</p> <p>Определить КПД η и момент вращения двигателя.</p> <p>8. Двигатель параллельного возбуждения имеет номинальные данные: $P_{ном}=1,5\text{ кВт}$, $U_{ном}=110\text{ В}$, $I_{ном}=18\text{ А}$, $n_{ном}=3000\text{ об/мин}$, $R_{в}=104\text{ Ом}$, $R_{я}=0,47\text{ Ом}$.</p> <p>Определить противо – ЭДС двигателя и номинальный момент на валу.</p> <p>9. Номинальные данные двигателя параллельного возбуждения: $U_{ном}=110\text{ В}$, $I_{ном}=14\text{ А}$, $P_{ном}=1,5\text{ кВт}$, $R_{я}=0,5\text{ Ом}$, $R_{в}=220\text{ Ом}$.</p> <p>Определить противо – ЭДС при нагрузке равной $I_{я}=1,5I_{ном}$.</p> <p>10. Трехфазный асинхронный двигатель имеет номинальные данные:</p> <p>$P_{ном}=10\text{ кВт}$, $U_{ном}=220/380\text{ В}$, $n_{ном}=950\text{ об/мин}$, $\eta=85\%$, $\cos\phi=0,681$.</p> <p>Определить номинальную</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>мощность потребления энергии из сети и момент на валу двигателя, если обмотка статора соединена «звездой».</p> <p>11 Определить номинальную мощность потребления энергии из сети и полные потери энергии в двигателе, если: $P_{ном}=4,5$ кВт, к.п.д. $\eta=90\%$.</p> <p>12 Максимальный момент асинхронного двигателя $M_{13Нм}$ при $U_1=U_{1ном}$. Чему он равен при $U_1=0,8U_{ном}$, если $R_2=const$?</p> <hr/> <p><i>Перечень лабораторных работ</i></p> <p>1. Исследование однофазного трансформатора;</p> <p>2. Исследование двигателей постоянного тока;</p> <p>3. Исследование асинхронных двигателей с фазным ротором.</p> <p>4. Электрические приборы и измерения;</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства

б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания

Для получения зачета по дисциплине «Электротехника» обучающийся показывает знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, навыки решения простых задач в области электротехники и электроники, умеет пользоваться современными средствами информационных технологий, владеет практическими навыками работы с электротехнической аппаратурой.

Лабораторная работа № 1

Исследование линейной электрической цепи постоянного тока.

Цель работы:

1. Изучение основных законов линейных электрических цепей постоянного тока и методов их расчета.
2. Исследование распределения токов, напряжений и мощностей в разветвленной электрической цепи постоянного тока.

1. Теоретические сведения

Электрической цепью называют совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий ЭДС, тока и напряжения.

Генерирующие устройства преобразуют химическую, механическую, тепловую и световую энергии в электрическую. Это источники электрической энергии. На зажимах источников в процессе преобразования неэлектрической энергии в электрическую за счет действия сторонних сил создается ЭДС E . На рис. 1 приведены условные обозначения гальванического элемента (*a*), генератора постоянного тока (*б*), термопары (*в*) и фотоэлемента (*г*), преобразующих указанные виды энергии в электрическую.

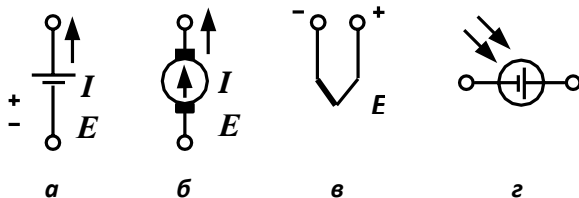


Рис. 1. Обозначения источников постоянного тока на схемах: *a* – гальванический элемент и аккумулятор; *б* – генератор постоянного тока; *в* – термопара; *г* – фотоэлемент

В приемниках происходят необратимые преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Например, аккумулятор становится приемником в процессе его зарядки, когда электрическая энергия преобразуется в

химическую (рис. 2, а). В электрической машине, работающей в режиме двигателя, электрическая энергия превращается в механическую (см. рис. 2, б); в электрической печи (см. рис. 2, в) или резисторе (см. рис. 2, г) – в тепловую; в лампе накаливания (см. рис. 2, д) – в световую.

В электрической цепи источники и приемники соединяются проводниками, которые обеспечивают передачу электрической энергии от источ-

ников к приемникам.

В электрические цепи часто включают вспомогательные и измери-

тельные устройства. Вспомогательные элементы служат для управления режимом электрической цепи (например, коммутаторы), защиты от перенапряжений или недопустимого значения тока (реле, предохранители).

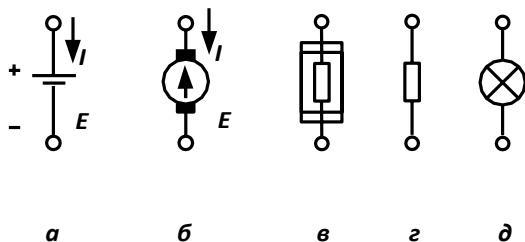
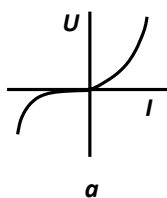


Рис. 2. Обозначения приемников на схемах: а – аккумулятор при зарядке; б – двигатель постоянного тока; в – электрическая печь; г – резистор; д – лампа накаливания

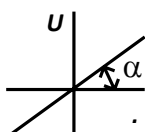
Основными характеристиками элементов электрических цепей являются зависимости их напряжения от тока. Такие зависимости называют вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

Элементы электрической цепи делятся на активные и пассивные. Все источники электрической энергии являются активными элементами, они характеризуются определенным значением ЭДС E . Приемники электрической энергии могут быть как пассивными, так и активными.

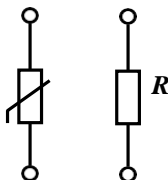
Пассивными называются приемники, в которых не возникает ЭДС. ВАХ пассивных элементов проходят через начало координат – в отсутствие напряжения ток этих элементов равен нулю. Пассивные элементы характеризуются электрическим сопротивлением R , которое у одних приемников зависит от приложенного напряжения, а у других не зависит. В первом случае приемники имеют нелинейные ВАХ (рис. 3, а), поэтому их называют нелинейными элементами (выпрямительные диоды, стабилитроны и др.).



а



б



в

Линейные пассивные элементы имеют линейную ВАХ, показанную на рис. 3, б. Сопротивление линейных элементов не зависит от напряже-

Рис. 3. Нелинейная (а) и линейная (б) ВАХ приемников, условные обозначения нелинейного (в) и линейного (г) резистивных элементов

ния. Условные графические обозначения нелинейного и линейного резистивных элементов приведены соответственно

на рис. 3, в, г.

ВАХ источников электрической энергии, которые часто называют внешними характеристиками, также могут быть нелинейными и линейными (рис. 4). У большинства источников электрической энергии напряжение на их зажимах с ростом тока уменьшается за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении R_{em} .

$$U = E - R_{em}I.$$

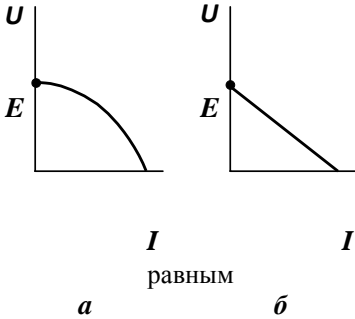


Рис. 4. Нелинейная (а) и линейная (б) внешние характеристики источников электрической энергии

Если внутреннее сопротивление источника много меньше сопротивления приемника ($R_{em} \ll R_n$), то при определенных изменениях тока напряжение U практически остается неизменным и

ЭДС E . Такой источник электрической энергии называют идеальным источником ЭДС. ВАХ идеального источника ЭДС приведена на рис.5, а, а его условное графическое

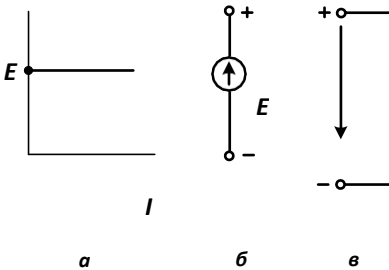


Рис. 5. ВАХ (а), условное обозначение (б), зажимы (полюса) (в) идеального источника ЭДС

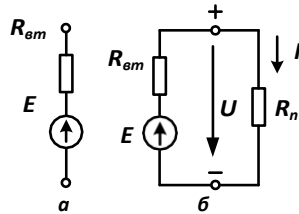


Рис. 6. Схема замещения реального источника (а) и схема замещения цепи, состоящей из источника и пассивного приемника (б)

обозначение – на рис. 5, б. Поскольку напряжение источника в этом случае является неизменным ($U = E$), на схемах вместо источника ЭДС часто показывают зажимы, к которым приложено напряжение U (см. рис. 5, в).

Если к источнику электрической энергии подключен пассивный приемник с сопротивлением R_n , то электрическую цепь можно представить ее схемой замещения, состоящей из идеального источника ЭДС E и двух резистивных элементов с сопротивлениями R_{em} и R_n (см. рис. 6, б).

Для однозначности описания процессов, происходящих в цепи, необходимо знать не только значения токов и напряжений, но также их направления. Стрелки, поставленные на схемах, указывают направления ЭДС, напряжений и токов, для которых значения обозначенных величин

положительны. Из физики известно, что за положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов, за положительное направление ЭДС – направление действия сторонних сил на положительный заряд, за положительное направление напряжения – направление убывания потенциала. Так как положительные заряды внутри источника движутся в направлении сторонних сил, то положительные направления тока и ЭДС совпадают. В приемнике положительные заряды движутся в направлении убывания потенциала, следовательно, положительные направления тока и напряжения приемника совпадают.

В схеме замещения неразветвленной электрической цепи (см. рис. 6, б) ЭДС E , направленная внутри источника от «минуса» к «плюсу», создает ток I того же направления, который определяется по закону Ома для всей цепи:

$$I = E / (R_{em} + R_n).$$

При этом напряжение $U = R_n I = \frac{R_n}{R_n + R_{em}} E$, а мощность приемника

$$P_n = R_n I^2 = R_n \left(\frac{U}{R_n} \right)^2 = \frac{U^2}{R_n}.$$

Для активного приемника (рис. 7, в) ток

$$I = (E_1 - E_2) / (R_{em1} + R_{em2}).$$

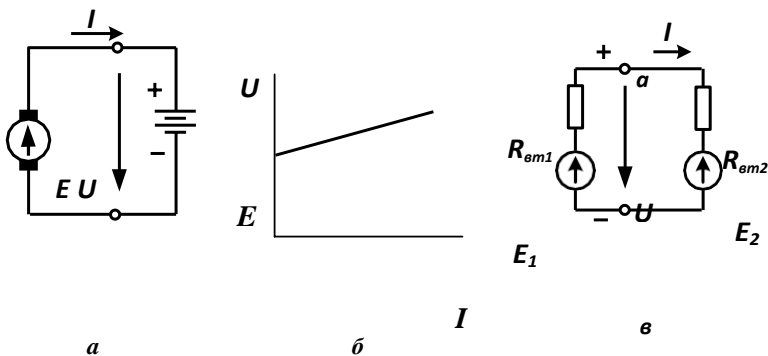


Рис. 7. Схема цепи, состоящей из генератора и аккумулятора (а), ВАХ активного приемника (б) и схема замещения цепи (в)

Режимы работы источников постоянного тока. Рассмотрим простейшую цепь, содержащую источник электрической энергии и пассивный приемник. Схема замещения такой цепи приведена на рис. 6, б.

Работа этой цепи характеризуется режимами холостого хода, короткого замыкания, согласованным и номинальным.

Режим холостого хода соответствует отсутствию тока в приемнике ($I = 0$) и осуществляется отключением приемника от источника. При этом

напряжение источника в режиме холостого хода равно его ЭДС
 E ($U_x = E$).

Режим короткого замыкания источника возникает тогда, когда сопротивление приемника равно нулю. При этом напряжение также равно нулю ($U = 0$). Ток в режиме короткого замыкания достигает максимального значения, он ограничен лишь внутренним сопротивлением R_{em} источника:

$$I_k = E/R_{em} = EG_{em}.$$

Обычно режим короткого замыкания в цепи является аварийным, так как возникающие при этом токи во много раз превышают номинальные значения, на которые рассчитаны элементы цепи.

Отметим, что, так же как напряжение в режиме холостого хода определяет ЭДС E идеального источника в последовательной схеме замещения, ток короткого замыкания определяет ток идеального источника тока в параллельной схеме замещения реального источника:

$$J = I_k = EG_{em}.$$

Согласованный режим работы источника и пассивного приемника соответствует максимальной активной мощности пассивного приемника.

В электрических цепях постоянного тока согласованный режим работы возникает в случае, когда внутреннее сопротивление источника равно сопротивлению приемника, т.е. при условии $R_{em} = R_n$. В этом можно убедиться, записав выражения для тока и мощности приемника с сопротивлением R_n :

$$I = E/(R_{em} + R_n); P_n = R_n I^2 = R_n E^2 / (R_{em} + R_n).$$

В режиме холостого хода эта мощность равна нулю, поскольку $I = 0$; в режиме короткого замыкания мощность P также равна нулю, так как $R_n = 0$. Таким образом, ясно, что при изменении R_n от 0 до ∞ функция $P_n(R_n)$ имеет экстремум (максимум). Для определения условия, при котором мощность достигает максимального значения, необходимо взять первую производную функции $P_n(R_n)$ по R_n и приравнять ее нулю:

$$\frac{dP_n}{dR_n} = \frac{E^2 (R_{em} + R_n)^2 - 2E^2 R_n (R_{em} + R_n)}{(R_{em} + R_n)^4} = 0.$$

Решением уравнения является равенство $R_n = R_{em}$. При этом мощность приемника равна половине мощности источника:

$$\frac{P}{n} =$$

$$UI = R_n I^2 = R_n \frac{E^2}{(R_n + R_{em})^2} = \frac{E^2}{4R_{em}},$$

Это означает, что половина энергии источника преобразуется в теплоту внутри него за счет внутреннего сопротивления R_{em} .

Эффективность передачи энергии, как известно, оценивается коэффициентом полезного действия (КПД). Для схемы замещения, изображенной на рис. 6, б, КПД определяется отношением мощностей приемника и источника:

$$\eta = \frac{P_n}{P_u} = \frac{R_n I^2}{(R_{em} + R_n) I^2} = \frac{R_n / R_{em}}{1 + R_n / R_{em}}$$

Из графика $\eta(R_n/R_{em})$, приведенного на рис. 8, видно, что КПД возрастает с увеличением сопротивления приемника. В согласованном режиме ($R_n/R_{em} = 1$) КПД достигает только 50%. На рис. 8 приведены также графики зависимостей мощностей приемника P_n и источника P_u от отношения R_n/R_{em} .

Номинальный режим соответствует режиму работы источников и приемников электрической энергии при тех значениях токов и напряжений, на которые они рассчитаны заводами-изготовителями. Номинальные значения токов, напряжений и мощностей указываются в каталогах и паспортах для всех источников и приемников электрической энергии. Соблюдение номинальных режимов обеспечивает эффективное и экономичное производство и потребление электрической энергии и гарантирует срок службы электротехнических устройств, указываемый заводом-изготовителем. Чаще всего номинальный

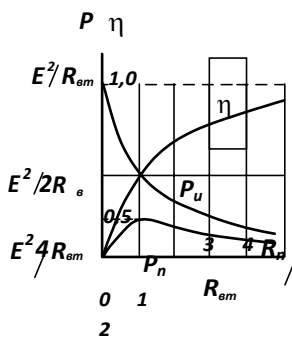


Рис. 8. Графики зависимостей мощностей источника P_u , приемника P_n и КПД η от соотношения R_n/R_{em}

режим работы соответствует случаю, когда сопротивление приемника много больше внутреннего сопротивления генератора ($R_n \gg R_{em}$). При этом КПД электрической цепи близок к единице, что

очень важно для силовых (мощных) электротехнических устройств и установок. Для некоторых маломощных электротехнических устройств, используемых в радиотехнике, электронике и автоматике, важным является достижение максимально возможной мощности приемника. В этих случаях стремятся обеспечить согласованный режим работы источников и приемников электрической энергии, который является для них номинальным режимом. Иногда встречаются случаи, например, в контрольно-

измерительной технике, когда в приемнике стремятся получить максимально возможный ток, значение которого практически не зависит от сопротивления приемника. При этом номинальный режим близок к режиму короткого замыкания, который обеспечивается при выполнении

условия $R_{em} \gg R_n$.

Топологические понятия теории электрических цепей. Основными топологическими понятиями теории электрических цепей являются ветвь, узел, контур, двухполюсник и четырехполюсник.

Ветвью называют участок электрической цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного пассивного или активного элемента, а также может представлять собой последовательное соединение нескольких элементов. На рис. 9

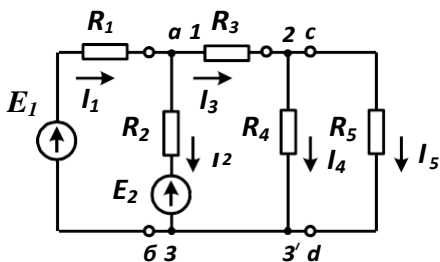


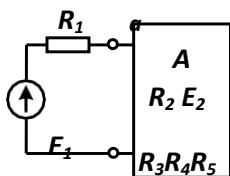
Рис. 9. Схема разветвленной электрической цепи

в качестве примера приведена

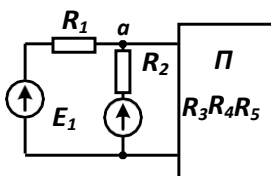
схема замещения разветвленной электрической цепи с пятью ветвями.

Узлом называют место соединения трех и более ветвей. Различают понятия геометрического и потенциального узлов.

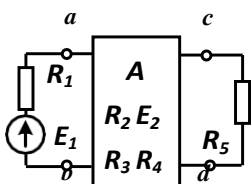
Так, на схеме рис. 9, имеется четыре геометрических и три потенциальных узла. Геометрические узлы 3 и 3', имеющие одинаковые потенциалы, могут быть объединены в один потенциальный узел.



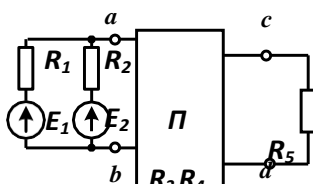
а



б



в



г

Рис. 10. Активный (а) и пассивный (б) двухполюсники, активный(в) и пассивный (г) четырехполюсники

Контуром называют замкнутый путь, проходящей через несколько ветвей и узлов разветвленной электрической цепи, например, контур l -

$R_3 - 2 - R_4 - 3' - 3 - E_1 - R_1$ на рис. 9.

Двухполюсником называют часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами-полюсами. В активном двухполюснике присутствуют активные элементы (рис. 10, а), в пассивном они отсутствуют (см. рис. 10, б).

Четырехполюсником называют часть электрической цепи, имеющую две пары зажимов, которые называются входными (а и б на рис. 10) и выходными (с и d на рис. 10). Так же, как и двухполюсники, четырехполюсники могут быть активными (см. рис. 10, в) и пассивными (см. рис. 10, г).

Особенности применения законов Ома и Кирхгофа для анализа электрических цепей постоянного тока

Закон Ома для пассивного участка цепи, не содержащего ЭДС: ток на участке цепи пропорционален напряжению на этом участке; например, I_5 схемы на рис. 9

$$I_5 = \frac{U_{cd}}{R_5} .$$

Закон Ома для активного участка цепи, содержащего источник ЭДС, в общем случае

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R} .$$

ЭДС и напряжение берут со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением тока, и со знаком минус, если их направления противоположны направлению тока, например, в схеме рис. 7, в

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{вн1} + R_{вн2}} .$$

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в любом узле заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать. Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum I = 0 .$$

При этом токи, направленные к узлу, следует записывать со знаком

плюс, а токи, направленные от узла, – со знаком минус, например, в схеме на рис. 9 для узла 1:

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

Второй закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии, в силу которого изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Изменение потенциала между двумя точками участка цепи характеризуется разностью потенциалов или напряжением. Поэтому согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений всех участков замкнутого контура равна нулю:

$$\sum U = 0.$$

Применительно к схемам замещения с источниками ЭДС, второй закон Кирхгофа можно формулировать таким образом: алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур:

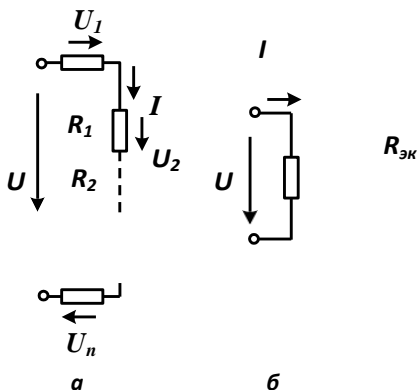
$$\sum RI = \sum E.$$

При составлении уравнений слагаемые записывают со знаком плюс в случае, когда направление обхода контура совпадает с направлением соответственно напряжения, тока или ЭДС, в противном случае слагаемые записывают со знаком минус.

Вторым законом Кирхгофа часто пользуются для определения напряжения между любой парой узлов электрической цепи. Определим, например, напряжение U_{13} схемы рис. 9:

$$U_{13} + R_1 I_1 = E_1 \text{ или } U_{13} = E_1 - R_1 I_1.$$

Преобразование пассивных участков электрической цепи.
Последовательное соединение элементов. Последовательным соединением элементов называют соединение, при котором ток в каждом элементе один и тот же. На рис. 11, а показана схема с последовательно со-



единенными резистивными элементами. Заменяем эти элементы одним эквивалентным (см. рис. 11, б) и запишем уравнения по второму

з
а
к
о
н
у

Кирхгофа для обеих схем:

$$R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I = U; \quad R_{\text{эк}} I = U.$$

Поскольку токи и напряжения источников заданной и эквивалентной схем должны быть одинаковыми, то можно заключить, что мощность электрической цепи не изменится, если последовательно соединенные

Рис. 11. Схема с последовательным соединением элементов (а) и ее эквивалентная схема (б)

элементы заменить одним элементом с сопротивлением $R_{эк}$, равным сумме сопротивлений отдельных элементов:

$$R_{эк} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i .$$

На основании этих уравнений отметим некоторые свойства последовательного соединения элементов:

1. Ток в цепи и напряжения на ее элементах зависят от сопротивления на ее элементах цепи. Если, например, сопротивление R_1 первого элемента увеличивается, ток в цепи и напряжения $U_2 \dots U_n$ уменьшаются ($I = U/R_{эк}$; $U_n = R_n I$), а напряжение U_1 возрастает ($U_1 = U - U_2 - \dots - U_n$). В пределе, когда сопротивление R_1 стремится к бесконечности (холостой ход), ток $I = 0$, а $U_1 = U$.

2. Напряжение на каждом из последовательно соединенных элементов всегда меньше входного ($U_i < U$) и, следовательно, последовательная цепь может служить делителем напряжения. Последовательное соединение приемников используют в том случае, когда их номинальные напряжения ниже напряжения сети (например, в елочных гирляндах). При работе двигателей постоянного тока последовательно с цепью якоря включают реостаты для ограничения пускового тока и регулирования частоты вращения. Последовательным включением добавочных резисторов к вольтметру расширяют его пределы измерения.

Параллельное соединение элементов. Параллельным называют соединение, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т.е. находятся под воздействием одного и того же напряжения. На рис. 12,а показана схема с n пассивными ветвями, присоединенными к одним и тем же узлам, разность потенциалов между которыми равна напряжению U источника. Поэтому ток в каждой ветви определяется этим

напряжением и сопротивлением R либо проводимостью G соответствующей ветви:

$$I_1 = U/R_1 = G_1 U;$$

$$I_2 = U/R_2 = G_2 U;$$

.....

$$I_n = U/R_n = G_n U.$$

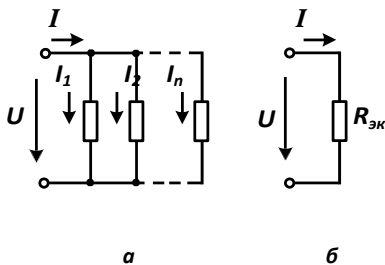


Рис. 12. Схема с параллельным соединением элементов (а) и ее эквивалентная схема (б)

Схема замещения с n параллельно включенными резистивными элементами может быть

заменена эквивалентной схемой с одним резистивным элементом (см. рис. 12, б). Условия эквивалентности будут соблюдены, если ток эквивалентной схемы будет равен току I в неразветвленной части цепи, т.е.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Подставляя в это уравнение значения токов, получим выражение

$$U/R_{\text{ЭК}} = U/R_1 + U/R_2 + \dots + U/R_n,$$

из которого можно получить формулу для эквивалентного сопротивления

$$1/R_{\text{ЭК}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n = \sum_{i=1}^n 1/R_i$$

или для эквивалентной проводимости

$$G_{\text{ЭК}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i .$$

Мощность электрической цепи не изменится, если параллельно соединенные элементы заменить одним эквивалентным с проводимостью $G_{\text{ЭК}}$, равной сумме проводимостей отдельных элементов.

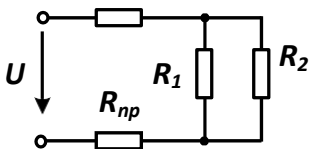
К основным свойствам параллельного соединения следует отнести следующие:

1. Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных элементов всегда меньше наименьшего из сопротивлений ветвей. При подключении нового приемника параллельно другим приемникам общая проводимость их увеличивается, а эквивалентное сопротивление уменьшается. Если параллельно соединены n ветвей с одинаковым сопротивлением R , то их эквивалентное сопротивление будет в n раз меньше сопротивления каждой ветви, т.е. $R_{\text{ЭК}} = R/n$.

При параллельном соединении двух пассивных элементов с сопротивлениями R_1 и R_2 эквивалентная проводимость

$R_{\text{нр}}$

$$G_{\text{ЭК}} = 1/R_{\text{ЭК}} = 1/R_1 + 1/R_2 = (R_1 + R_2)/R_1 R_2,$$



а эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{ЭК}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

2. Ток в каждой из ветвей всегда меньше тока источника (тока в нераз-

вет
вле
нно

Рис. 13. Схема с параллельным
подключением приемников

й части цепи) и, следовательно-

но, параллельная цепь может служить
делителем тока. Это свойство позволяет
расширить пределы измерения ампер-

метров.

Смешанное соединение элементов. Смешанным соединением элементов называют сочетание их последовательных и параллельных соединений. Наиболее простым и распространенным в практике смешанным соединением является цепь параллельного подключения приемников к источнику питания с помощью проводов, обладающих заметным сопротивлением. Схема замещения такой цепи представлена на рис. 13.

Эквивалентное сопротивление схемы запишется в виде

$$R_{\text{эк}} = 2R_{\text{пр}} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Анализ электрических цепей постоянного тока методом эквивалентных преобразований. Для определения токов и напряжений каждого элемента цепи с одним источником электрической энергии (рис. 14, а) можно использовать метод эквивалентных преобразований.

Для решения такой задачи отдельные участки электрической цепи с последовательно или параллельно соединенными элементами заменяют одним эквивалентным элементом. Постепенным преобразованием участков схему электрической цепи упрощают и приводят к простейшей схеме, состоящей из последовательно соединенных источника электрической энер-

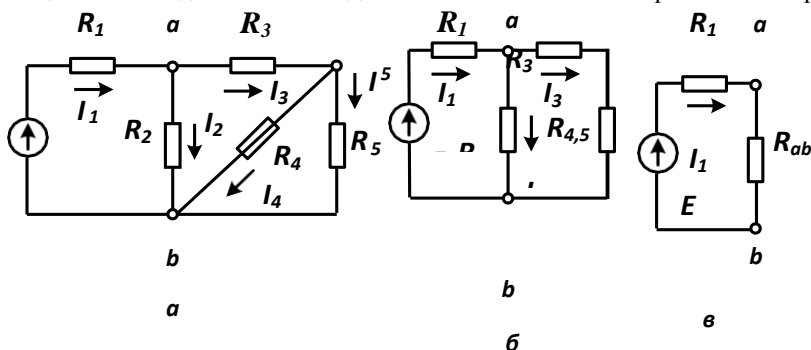


Рис. 14. Схема разветвленной цепи с одним источником (а) и упрощенные схемы (б и в)

гии и одного эквивалентного пассивного элемента. Для схемы рис. 14,а

вначале находят эквивалентное сопротивление участка, состоящего из двух параллельно соединенных ветвей с сопротивлениями R_4 и R_5 :

$$R_{4,5} = R_4 R_5 / (R_4 + R_5),$$

и получают схему рис. 14, б.

Затем находят эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов a и b

$$R_{ab} = \frac{R_2(R_3 + R_{4,5})}{R_2 + R_3 + R_{4,5}}$$

Таким образом, исходная разветвленная цепь рис. 14, а сведена к простейшей цепи рис. 14, в, для которой нетрудно определить ток в ветви источника ЭДС E с сопротивлением R_1 :

$$I_1 = E / (R_1 + R_{ab})$$

Зная ток I_1 , находят напряжение на зажимах ab двухполюсника $U_{ab} = R_{ab} I_1$ и токи в ветвях I_2, I_3 :

$$I_2 = U_{ab} / R_1; \quad I_3 = U_{ab} / (R_3 + R_{4,5})$$

Наконец, по известному току I_3 определяют токи I_4 и I_5 :

$$I_4 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} I_3; \quad I_5 = \frac{R_4}{R_4 + R_5} I_3$$

Анализ разветвленной цепи с помощью законов Кирхгофа.

Анализ и расчет любой электрической цепи можно провести на основании первого и второго законов Кирхгофа.

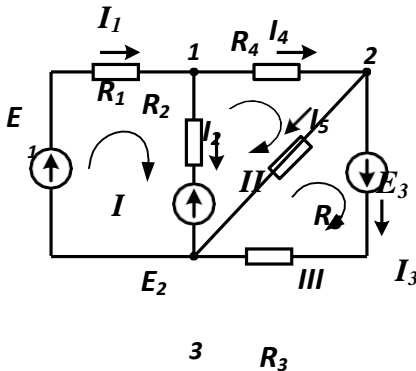


Рис. 15. Схема разветвленной цепи постоянного тока

Рекомендуется следующий порядок составления уравнений по законам Кирхгофа: определяют число ветвей, узлов и незави-

симых контуров, устанавливают число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа, остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа.

По первому закону Кирхгофа можно составить $y - 1$ независи-

мых уравнений, где y – количество узлов схемы. Использовать все y уравнений невозможно, так как одно из них обязательно будет зависимым.

Схема электрической цепи рис. 15 имеет пять ветвей и три узла, по-

этому по первому закону Кирхгофа для нее можно составить два независимых уравнения.

Количество уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, должно быть равно количеству независимых контуров. Независимым называют контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь.

Для схемы цепи рис. 15 надо составить три уравнения по второму закону Кирхгофа для трех независимых контуров. Выбираем произвольно

направления токов в ветвях. Примем направление обхода контура по часовой стрелке. Тогда система уравнений будет иметь вид:

1) для узла 1

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

2) для узла 2

$$-I_4 + I_5 = 0;$$

3) для контура I

4) для контура II

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 - E_2;$$

5) для контура III

$$-R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$R_3 I_3 - R_5 I_5 = E_3.$$

При составлении уравнений со знаком плюс записаны те слагаемые, в которых ток и ЭДС имеют направления, совпадающие с направлением обхода контура.

Решая систему уравнений, можно определить все пять неизвестных токов. Если в результате решения этих уравнений получаются отрицательные значения токов, то это означает, что истинные направления токов в ветвях цепи противоположны тем направлениям, для которых составлялись уравнения.

Правильность расчета токов в ветвях электрической цепи может быть проверена с помощью уравнения баланса мощностей источников и приемников электрической энергии

$$\Sigma P_u = \Sigma P_n,$$

в котором левая часть характеризует мощность источников (произведение EI для источника напряжения и JU для источника тока), а правая – мощность активных (произведение EI) и пассивных (произведение RI^2) приемников электрической энергии.

Для схемы рис. 15 уравнение баланса мощностей запишется в виде

$$E_1 I_1 + E_3 I_3 = E_2 I_2 + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2.$$

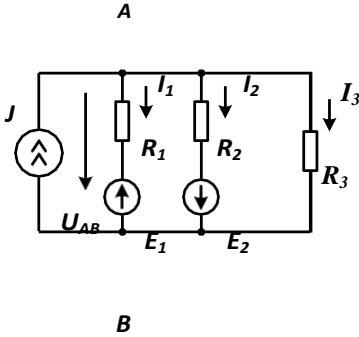
1 2 3 4 5

Метод межузлового напряжения. В реальных электрических цепях постоянного тока очень часто несколько источников и приемников электрической энергии включаются параллельно. Схема замещения такой цепи, содержащей активные и пассивные ветви, соединенные параллельно

но, имеет только два узла, например, узлы А и В схемы рис. 16. Считая положительными направления токов I_1 , I_2 и I_3 от узла А к узлу В, за- пишем выражения для этих токов, используя закон Ома для активной

ветви:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (-E + U_{AB}) / R_1; I_2 \\
 &= (E_2 + U_{AB}) / R_2; I_3 = \\
 &U_{AB} / R_3.
 \end{aligned}$$



Подставляя эти выражения в уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа:

$$-J + I_1 + I_2 + I_3 = 0,$$

находим напряжение между узлами A и B

$$\begin{aligned}
 U_{AB} &= \frac{E_1 / R_1 - E_2 / R_2 + J}{1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3}
 \end{aligned}$$

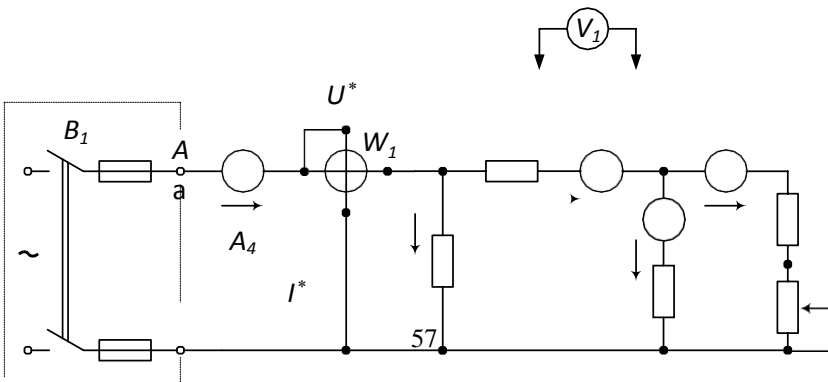
Рис. 16. Схема замещения цепи с двумя узлами

или

$$U_{AB} = \frac{E_1 G_1 - E_2 G_2 + J}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

2. Программа работы

1. Ознакомиться с оборудованием лабораторной установки. Определить цену деления измерительных приборов, используемых в данной работе.
2. Собрать исследуемую электрическую цепь по рис. 17.



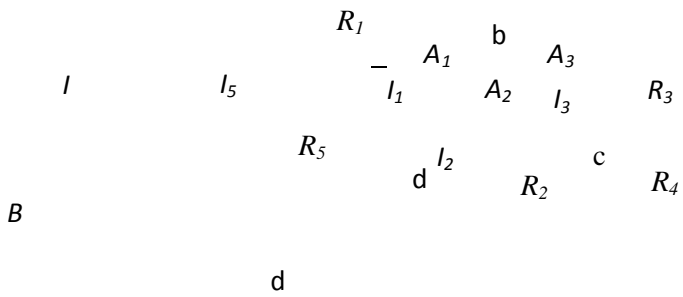


Рис. 17

3. После проверки схемы преподавателем подать на стенд напряжение. Измерить ток, напряжение и мощность на участках цепи. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

№ п/п	Измерено									
	I	I_1	I_2	I_3	U_{ad}	U_{ab}	U_{bd}	U_{bc}	U_{cd}	$P_{оп}$
	A_4	A_1	A_2	A_3	U_{R5}	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{R4}	W_1
	А	А	А	А	В	В	В	В	В	Вт
1										
2										
3										
4										

Таблица (продолжение)

№ п/п	Вычислено								
	I_5	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	$R_{эkv.оп}$	$R_{эkv.расч}$	$P_{расч}$
	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт
1									
2									
3									
4									

Падения напряжения на участках ad, ab, bd, bc, cd измеряют с помощью цифрового мультиметра V_1 . Мощность измеряется ваттметром W_1 . Измерения сделать для четырех положений реостата R_4 .

Правильность измерений проверить по законам Кирхгофа.

Например, для схемы рис. 17 по первому закону Кирхгофа для узла «b» выполняется равенство: $I_1 = I_2 + I_3$. По второму закону Кирхгофа для замкнутого контура: $U_{ad} = U_{ab} + U_{bd}$.

4. По результатам измерений выяснить влияние изменения сопротивления резистора R_4 на распределение токов, напряжений и мощностей исследуемой цепи.

Обработка результатов эксперимента

1. Ток I_5 определить по первому закону Кирхгофа: $I_5 = I - I_1$.
2. Определить сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 и опытное значение эквивалентного сопротивления всей цепи $R_{оп}$, используя закон Ома. Например, для схемы рис. 17:

$$R = \frac{U_{ab}}{I_1}, \quad R = \frac{U_{ad}}{I_{оп}}$$

Результаты расчетов занести в таблицу. Внутренним сопротивлением амперметров пренебречь.

3. Определить расчетное значение эквивалентного сопротивления всей цепи $R_{расч}$, используя метод преобразований последовательно и параллельно соединенных участков цепи. Результаты расчетов занести в таблицу. Сравнить полученные результаты с $R_{оп}$.

4. Рассчитать мощность потребления энергии всей цепи как сумму мощностей отдельных элементов:

$$P_{расч} = \sum_{k=1}^5 P_k = \sum_{k=1}^5 U_k I_k = \sum_{k=1}^5 R_k I_k^2,$$

где U_k, I_k, R_k – напряжение, ток и сопротивление k -го участка электрической цепи. Результаты расчетов занести в таблицу. Сравнить полученные результаты с мощностью, измеренной ваттметром W_1 .

5. По результатам измерений и вычислений на одном чертеже построить графики зависимости токов I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 от сопротивления резистора R_4 .

6. Построить зависимость мощности потребления энергии от сопротивления резистора R_4 : $P_W = f(R_4)$.

7. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под электрическим током?
2. Что понимается под ЭДС и напряжением?
3. Сформулируйте и объясните закон Ома.
4. Каковы факторы, влияющие на сопротивление постоянному току?
5. Что понимается под узлом, ветвью и контуров электрической цепи?
6. Как определяются эквивалентные сопротивления при последовательном, параллельном и смешанном сопротивлении резисторов?
7. По каким формулам определяется мощность и энергия потреби-

телей, подключенных к источнику постоянного тока?

8. Сформулируйте и объясните закон Джоуля-Ленца.
9. Сформулируйте и объясните первый и второй законы Кирхгофа.
10. Какие электрические цепи называются линейными?

Библиографический список

1. Электротехника: Учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 7-е изд. стер. – М: Высшая школа, 2003
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для студентов ВУЗов / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005 г.
3. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями: Учебное пособие / Г.Г. Рекус. – М.: Высшая школа, 2005 г.
4. Электрические и магнитные цепи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, О.И. Карандаева, Г.В. Шохина, Т.П. Ларина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 163 с.

Лабораторная работа № 2

Исследование линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока. Компенсация реактивной мощности.

Цель работы:

1. Изучение основных законов и методов расчета электрических цепей однофазного синусоидального тока.
2. Анализ однофазных синусоидальных цепей с помощью векторных диаграмм.
3. Изучение возможности компенсации реактивной мощности.

1. Теоретические сведения

Общие положения

Электрические цепи, в которых значения и направления ЭДС, напряжения и тока периодически изменяются во времени по синусоидальному закону, называются цепями синусоидального тока.

Выражение мгновенного значения синусоидального тока определяется тригонометрической функцией

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

График мгновенных значений тока $i(t)$ показан на рис. 1.

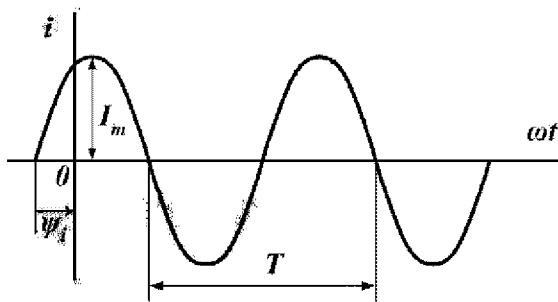


Рис. 1

Амплитуда I_m равна максимальному значению тока. Аргумент синуса ($\omega t + \psi_i$), измеряемый в радианах, определяет фазный угол синусоидальной функции тока в любой момент времени t и называется фазой, а величина ψ_i , равная фазному углу в момент начала отсчета времени $t = 0$, — начальной фазой. Величина ω определяет число радианов, на которое изменится фаза колебаний за секунду, и называется угловой частотой.

Через промежуток времени T , называемый периодом, фаза колебаний изменится на угол 2π , и цикл колебаний повторяется снова $i(t) = i(t + T)$, следовательно, период и угловая частота связаны соотношением $\omega T = 2\pi$. Длительность периода принято измерять в секундах. Величину, обратную периоду, называют частотой и обозначают f , измеряют в герцах $Гц$. Частота определяется количеством периодов в секунду

$$f = 1/T.$$

Очевидно, что

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f.$$

Все сказанное относительно тока справедливо также для синусоидально изменяющихся напряжений $u(t)$ и ЭДС $e(t)$.

При совместном рассмотрении нескольких синусоидальных величин одной частоты обычно интересуются разностью их фазовых углов, называемой углом сдвига фаз. Угол сдвига фаз определяется как разность начальных фаз синусоидальных функций. На рис. 2 представлены графики мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. Угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

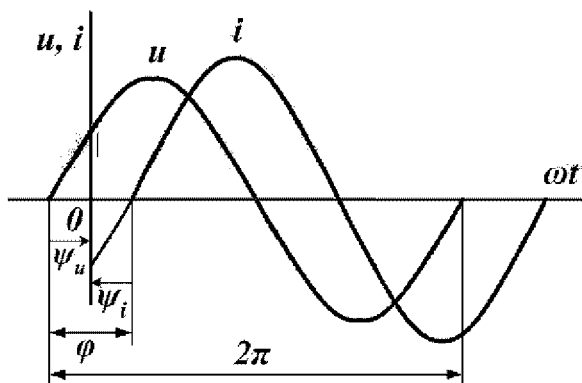


Рис. 2

Если $\psi_u > \psi_i$, то $\varphi > 0$, при этом говорят, что напряжение опережает ток по фазе или ток отстает от напряжения. В случае $\psi_u < \psi_i$, $\varphi < 0$, т.е. напряжение отстает по фазе от тока или ток опережает напряжение.

В практике применения переменных токов широко пользуются понятием действующего значения, электрической величины. Действующим значением называют среднее квадратичное значение переменной величины за период

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

Как известно из курса физики, тепловое и электромеханическое действия, тока пропорциональны квадрату его мгновенного значения, поэтому именно действующий ток I может служить количественной мерой их оценки за период.

Связь между амплитудой и действующим значением для синусоидальных величин, при $i = I_m \sin \omega t$

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T [(1 - \cos 2\omega t) / 2] dt = I_m^2 \frac{T}{2}.$$

Следовательно, в соответствии с определением (1) действующее значение тока

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

Для действующих значений синусоидально изменяющихся напряжения и ЭДС справедливы аналогичные выражения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Изображение синусоидальных функций времени

Электрическое состояние цепей переменного тока, так же как и цепей постоянного тока, описывается уравнениями Кирхгофа. Математический аппарат с тригонометрическими функциями громоздкий. Для упрощения решения используются две формы представления синусоидальных функций: радиус-вектор и комплексное число.

Из геометрии известно, что любая синусоидальная функция времени может быть условно изображена однозначно соответствующим ей радиус-вектором, вращающимся в плоскости декартовых координат. Длина вектора равна амплитудному значению синусоиды, а начальное положение относительно оси x определяется начальной фазой синусоиды. На рис. 3 представлен радиус-вектор, длина которого равна A_m .

Вектор вращается в плоскости декартовых координат $x - y$ против часовой стрелки с равномерной частотой ω и поворачивается за время одного оборота T на угол 2π , т.е. $\omega T = 2\pi$.

Проекция вектора на ось y определяется выражением

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi_a)$$

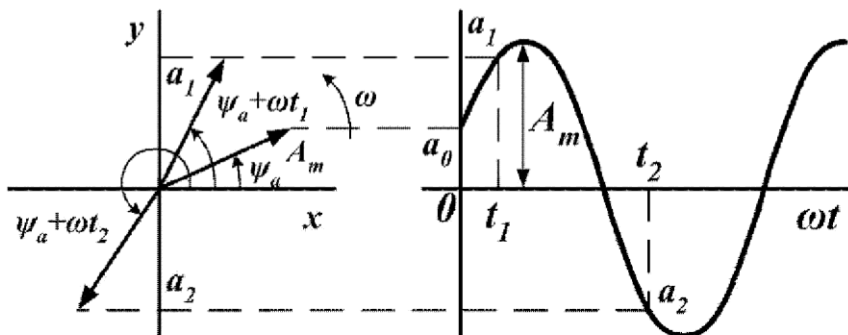


Рис. 3

Совокупность радиус-векторов, изображающих синусоидальные функции времени, называется *векторной диаграммой*. Векторная диаграмма на рис. 4 позволяет путем простейших геометрических построений провести суммирование, например, двух синусоидальных функций.

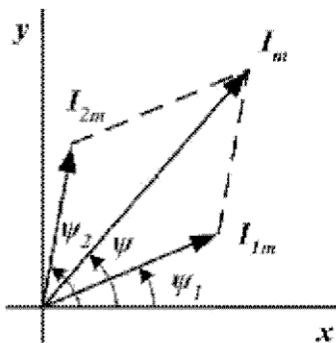


Рис. 4

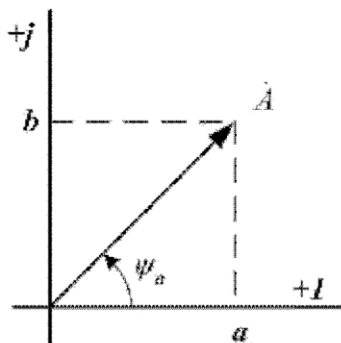


Рис. 5

Для расчетов используют *комплексное число*. Комплексные изображения синусоидальных функций позволяют совместить простоту и наглядность векторных диаграмм с возможностью проведения точных аналитических расчетов.

Радиус-вектор, изображающий синусоидальную функцию, может быть перенесен на плоскость комплексных чисел $+I$, $+j = \sqrt{-1}$. Из математики известно, что любому вектору \dot{A} на комплексной плоскости

однозначно соответствует комплексное число, которое может быть записано в трех формах:

– алгебраическая форма $\dot{A} = a + j b$,

где a и b – проекции вектора на оси действительных и мнимых чисел;

– тригонометрическая форма $\dot{A} = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a$,

где A – модуль, т.е. длина вектора; ψ_a – угол;

– показательная форма $\dot{A} = A e^{j \psi_a}$.

Все три формы записи в соответствии с формулой Эйлера равнозначны

$$\dot{A} = a + j b = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a = A e^{j \psi_a}.$$

Выбор той или иной формы определяется удобством осуществления нужной математической операции с комплексными числами. Суммирование и вычитание удобно проводить в алгебраической форме

$$\dot{A}_1 + \dot{A}_2 = (a_1 + j b_1) + (a_2 + j b_2) = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2) = c + j d.$$

Умножение и деление удобно производить в показательной форме:

$$\dot{A}_1 \cdot \dot{A}_2 = A_1 e^{j \psi_1} \cdot A_2 e^{j \psi_2} = A_1 \cdot A_2 e^{j(\psi_1 + \psi_2)} = B e^{j \psi}$$

или

$$\frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} = \frac{A_1 e^{j \psi_1}}{A_2 e^{j \psi_2}} = \frac{A_1}{A_2} e^{j(\psi_1 - \psi_2)} = B e^{j \varphi}.$$

Переход от одной формы записи числа к другой очевиден (рис. 5).

Модуль числа $A = \sqrt{a^2 + b^2}$; аргумент $\psi_a = \arctg \frac{b}{a}$; действительная часть комплексного числа $a = A \cos \psi_a$; мнимая часть

комплексного числа $b = A \sin \psi_a$.

Идеальные элементы в цепи однофазного синусоидального тона

Электромагнитные явления в цепях переменного тока оказываются более сложными, чем в цепях постоянного тока. В цепях переменного тока, так же как и в цепях постоянного тока, происходят необратимые преобразования электрической энергии в другие виды, однако процесс

сопровождается сложными явлениями переменного электромагнитного поля.

Из физики известны явления, происходящие в электрическом поле. В проводниках, разделенных диэлектриком, между которыми создана переменная ЭДС, будет накапливаться заряд q , а в окружающем их пространстве будет существовать электрическое поле. Электрическое поле приводит к поляризации диэлектрика, разделяющего проводники. Напряжение изменяется во времени, поэтому заряды на проводниках и поляризация будут также изменяться, при этом в диэлектрике возникает ток смещения

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt},$$

а в источнике - равный ему ток проводимости, т.е. и в отсутствие приемника источник нагружен током, значение которого определяется емкостью соединительных проводов.

Из физики также известны явления, происходящие в магнитном поле. Изменяющийся электрический ток создает в окружающем его пространстве переменное магнитное поле, которое в свою очередь индуцирует в катушке ЭДС самоиндукции e_L . Значение ЭДС e_L определяется скоростью изменения потокоцепления катушки ψ с магнитным полем

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Анализ цепей синусоидального тока значительно сложнее, чем цепей постоянного тока, так как на любом участке цепи осуществляются необратимые процессы преобразования электрической энергии и одновременно проявляются действия переменного электромагнитного поля, т.е. присутствуют токи смещения и ЭДС самоиндукции. Поэтому, при решении большинства электротехнических задач вводят допущения, которые упрощают анализ цепи переменного тока.

Например, процессы, происходящие в лампе накаливания, включенной в сеть переменного тока. Между витками нити накаливания существует емкость, нить обладает определенной индуктивностью. Однако, на промышленной частоте токи смещения в диэлектрике значительно меньше тока проводимости в металлической нити, ЭДС самоиндукции мала, ей можно пренебречь. При такой идеализации ($C = 0, L = 0$) лампа характеризуется только необратимым преобразованием электрической энергии в тепловую и лучистую. Лампу называют идеальным резистивным элементом цепи с сопротивлением R или R -элементом.

К идеальным резистивным элементам могут быть отнесены реостаты, электронагревательные приборы.

Другой идеальный элемент - конденсатор. Магнитным полем токов смещения конденсатора можно пренебречь вплоть до очень высоких частот, нагрев диэлектрика также мал. При таких допущениях конденсатор называют идеальным емкостным элементом или *C-элементом*.

Индуктивная катушка является примером идеального индуктивного элемента или *L-элементом*. На промышленной частоте токи смещения между витками несоизмеримо меньше токов проводимости в катушке, нагрев проводов также мал.

Введение *R, L, C*-элементов позволяет создать расчетные схемы замещения, т.е. математические модели любых реальных электротехнических устройств.

Наличие *C*-элементов в схеме замещения отражает наличие в рассматриваемой цепи явлений, происходящих в электрическом поле, связанных с поляризацией диэлектрика и возникновением токов смещения, которые характерны не только для конденсатора.

С помощью *R*-элемента учитывают необратимые преобразования энергии не только в тепловую, но и в другие виды, например в механическую.

Наличие *L*-элемента учитывает энергетические процессы, происходящие в магнитном поле.

Электрическая цепь с *R*-элементом (рис. 6,а)

Мгновенные значения тока и напряжения *R*-элемента связаны законом Ома

$$u = Ri.$$

Следовательно, при заданном синусоидальном напряжении источника ток в резистивном элементе также будет синусоидальным, той же частоты и совпадать по фазе.

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

$$U_m = RI_m; \quad \psi_i = \psi_u; \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = 0.$$

Графики мгновенных значений напряжения и тока для случая $\psi_u = 0$ показаны на рис. 6,б.

Для действующих значений закон Ома

$$U = RI.$$

Соотношения между напряжением и током R -элемента можно записать в комплексной форме.

Если $\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}$ и $\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i}$, то комплексное сопротивление

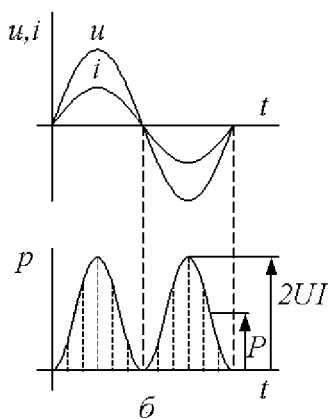
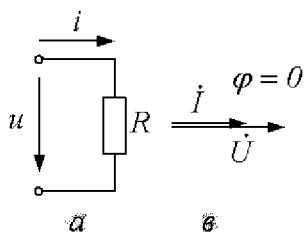


Рис. 6

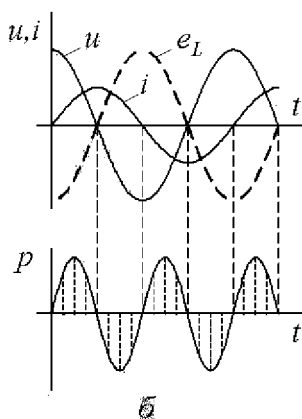
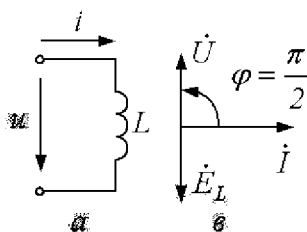


Рис. 7

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = R e^{j0} = R;$$

$$\dot{U}_m = R \dot{I}_m; \quad \dot{U} = R \dot{I}; \quad \underline{Z} = R.$$

На рис. 6, в представлена векторная диаграмма цепи, где вектор тока в R -элементе совпадает с вектором напряжения. Скорость поступления энергии, т.е. мощность p

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t).$$

Мощность колеблется с угловой частотой 2ω и в пределах от 0 до $2UI$. Мгновенная мощность всегда положительна, т.е. *R-элемент потребляет энергию от источника и необратимо преобразует ее в другие виды энергии.*

Среднее значение мощности за период называют *активной мощностью P*

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt = UI;$$

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

Электрическая цепь с L -элементом (рис. 7,а)

Индуктивный элемент подключен к источнику синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$.

При этом потокосцепление самоиндукции ψ также будет переменным $\psi = Li$. Изменяющееся потокосцепление наводит в катушке ЭДС самоиндукции e_L .

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i)$$

или

$$e_L = E_{Lm} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right), \text{ где } E_{Lm} = L\omega I_m.$$

ЭДС самоиндукции синусоидальна, но отстает от тока по фазе на $\pi/2$. В соответствии с правилом Ленца, в любой момент времени ЭДС e_L противодействует изменению тока, т.е. направлена против тока, когда он нарастает по модулю и совпадает с током по направлению, если ток убывает.

ЭДС самоиндукции определяет разность потенциалов на зажимах L -элемента. Тогда для напряжения, положительное направление которого совпадает с током, можно записать

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt}.$$

Следовательно,

$$u = L \frac{di}{dt} = L \omega I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

Напряжение на индуктивном элементе синусоидально, но опережает ток на $\pi/2$.

$$\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}, \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}.$$

Амплитудные значения тока и напряжения связаны соотношением

$$U_m = L \omega I_m.$$

Величину $L\omega$, имеющую размерность Ом, обозначают X_L и называют *индуктивным сопротивлением*. Тогда закон Ома для амплитудных и действующих значений

$$U_m = X_L I_m; \quad U = X_L I.$$

В комплексной форме

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = X_L e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_L.$$

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = X_L I_m e^{j\left(\psi_i + \frac{\pi}{2}\right)}; \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}.$$

Следовательно, $\dot{U}_m = jX_L \dot{I}_m$ и $\dot{U} = jX_L \dot{I}$.

Векторная диаграмма для индуктивного элемента представлена на рис. 7, в. Вектор напряжения на индуктивном элементе опережает ток на угол $\pi/2$.

Мгновенная мощность индуктивного элемента

$$p = ui = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin \omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Активная мощность P , характеризующая необратимые преобразования:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0$$

Таким образом, в цепи с идеальным индуктивным элементом не совершается работа, а происходит периодический обмен энерги-

ей между источником и магнитным полем. Интенсивность этого обмена характеризуется реактивной мощностью Q_L .

$$Q_L = UI = X_L I^2 = \frac{U^2}{X_L}.$$

Электрическая цепь с C -элементом (рис. 8,а)

Если C -элемент подключен к источнику синусоидального напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, то изменяющаяся разность потенциалов вызовет перераспределение заряда $q = Cu$ и, следовательно, в цепи возникнет ток i .

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C\omega U_m \cos(\omega t + \psi_u) \quad \text{или}$$

$$i = C\omega U_m \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где $I_m = C\omega U_m$.

Графики мгновенных значений u и i для случая $\psi_u = 0$ представлены на рис. 8,б. Ток в C -элементе синусоидален, но опережает напряжение на угол $\pi/2$, $\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}$ угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2}$.

Величину $\frac{I}{C\omega}$, имеющую размерность $Ом$, обозначают X_C и называют емкостным сопротивлением. Тогда закон Ома для амплитудных и действующих значений

$$U_m = X_C I_m; \quad U = X_C I.$$

В комплексной форме

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C = -j \frac{1}{\omega C}.$$

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}; \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i} = I_m e^{j\left(\varphi_u + \frac{\pi}{2}\right)}.$$

Следовательно, $\dot{U}_m = -jX_C \dot{I}_m$ и $\dot{U} = -jX_C \dot{I}$.

Векторная диаграмма для емкостного элемента представлена на рис.8,в. Вектор тока в емкостном элементе опережает вектор напряжения на угол $\pi/2$.

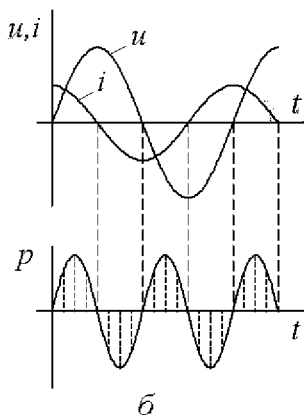
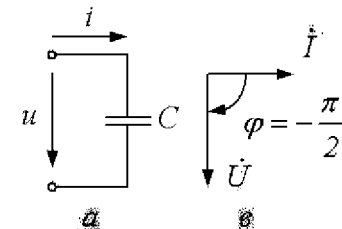


Рис. 8

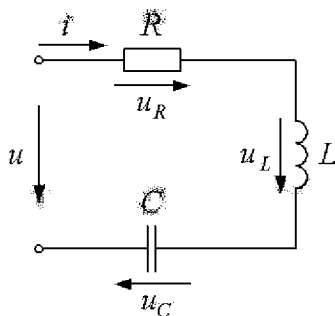


Рис. 9

Мгновенная мощность емкостного элемента

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t.$$

Активная мощность как средняя за период

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0$$

Таким образом, в цепи с идеальным емкостным элементом не совершается работа, а происходит только периодический обмен энергией между источником и электрическим полем. Интенсивность этого обмена характеризуется реактивной мощностью Q_C .

$$Q_C = UI = X_C I^2 = \frac{U^2}{X_C}.$$

Последовательное соединение элементов в цепи синусоидального тока

Для электрической цепи на рис. 9 уравнение по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений

$$u = u_R + u_L + u_C$$

В комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (2)$$

Учитывая, что $\dot{U}_R = R\dot{I}$; $\dot{U}_L = jX_L\dot{I}$; $\dot{U}_C = -jX_C\dot{I}$ и $\dot{U} = \underline{Z}\dot{I}$, где \underline{Z} - эквивалентное комплексное сопротивление цепи, получим

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}^*}{\dot{I}} = R + jX_L - jX_C.$$

При последовательном соединении элементов цепи эквивалентное комплексное сопротивление равно сумме комплексных сопротивлений, всех последовательно включенных элементов.

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi}; \quad X = X_L - X_C.$$

Индуктивное сопротивление X_L и емкостное X_C являются арифметическими величинами, зависящими только от параметров элементов и частоты:

$$X_L = L\omega; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Реактивное сопротивление X - величина алгебраическая, и его знак зависит от соотношения между индуктивными и емкостными сопротивлениями.

На рис. 10 сделаны построения, соответствующие комплексному выражению $\underline{Z} = R + jX$.

Заштрихованный прямоугольный треугольник на рис. 10 принято называть треугольником сопротивлений. Из треугольника очевидны соотношения:

модуль сопротивления $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$;

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}; \quad R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi.$$

Аргумент $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$.

На рис. 11 представлена векторная диаграмма цепи, если $\psi_i = 0$. Построение векторной диаграммы удобно начинать с вектора тока \dot{I} , который является одним и тем же для всех элементов цепи. Векторы напряжений \dot{U}_R , \dot{U}_L , и \dot{U}_C ориентированы по отношению к вектору тока в соответствии с фазовыми соотношениями для идеальных элементов, а вектор напряжения \dot{U} , найден в соответствии с уравнением (2). При построении учтено, что $X_L > X_C$ и соответственно $U_L > U_C$. Заштрихованный прямоугольный треугольник на рис. 11 принято называть треугольником напряжений.

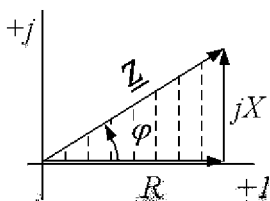


Рис. 10

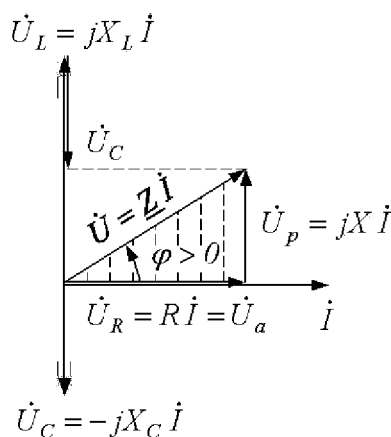


Рис.11

На рис. 12 и 13 представлены векторные диаграммы при условии $X_L < X_C$ и $X_L = X_C$.

На рис. 11 вектор напряжения \dot{U} опережает вектор тока \dot{I} , т.е. цепь носит индуктивный характер.

модуль напряжения $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$;

$$U_a = U \cos \varphi; U_p = U \sin \varphi.$$

Из треугольника напряжений несложно получить треугольник мощностей, умножив каждую сторону на ток, общий для всех элементов (рис.14).

Стороны треугольника мощностей соответственно означают:

$$P = U_R I = I^2 R - \text{активная мощность цепи};$$

$$Q = U_p I = (U_L - U_C) I = U_L I - U_C I = I^2 X_L - I^2 X_C = Q_L - Q_C$$

- реактивная мощность;

$$S = UI = I^2 Z - \text{полная мощность};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \lambda - \text{коэффициент мощности}.$$

Из треугольника мощностей можно установить следующие соотношения:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi;$$

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI.$$

За единицу активной мощности принят ватт (Вт) или киловатт (кВт), реактивной мощности - вольт-ампер реактивный (ВАр или кВАр); полной мощности - вольт-ампер (ВА или кВА).

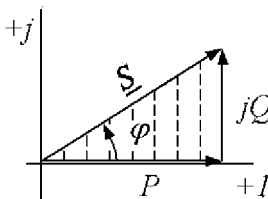


Рис. 14

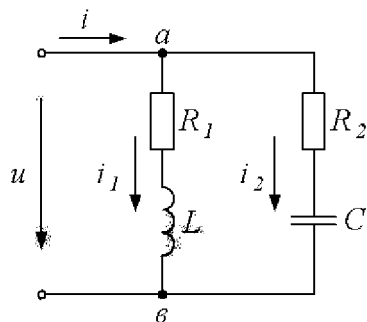


Рис. 15

На рис. 12 вектор напряжения \dot{U} отстает от вектора тока \dot{I} , т.е. цепь носит емкостный характер.

На рис. 13 вектор напряжения \dot{U} совпадает по фазе с вектором тока \dot{I} . Это явление называют резонансом напряжений. Условие резонанса напряжений

$$X_L = X_C \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

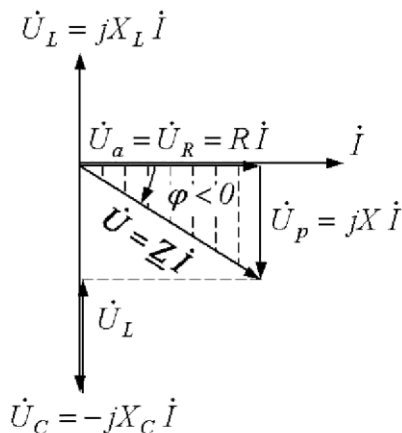


Рис. 12

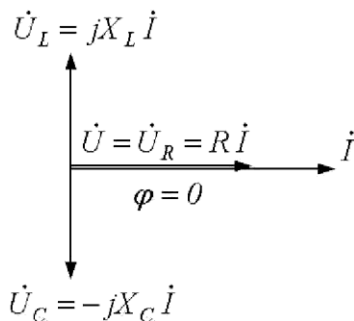


Рис. 13

Анализируя векторные диаграммы, нужно обратить внимание на большую роль фазовых соотношений. Так, например, именно потому, что напряжения на L - и C - элементах находятся в противофазе, в цепи с последовательным соединением элементов могут создаваться условия, невозможные для цепей постоянного тока, когда напряжения на отдельных участках цепи значительно превышают напряжения на входе (см. рис. 11).

Заштрихованный прямоугольный треугольник (см. рис. 12) называют треугольником напряжений. Проекцию вектора напряжения \dot{U} на вектор тока \dot{I} называют активной составляющей напряжения \dot{U}_a , проекцию на направление, перпендикулярное вектору тока, \dot{U}_p - реактивной составляющей.

Очевидны соотношения:

Активную, реактивную и полную мощности можно определить, пользуясь комплексным изображением напряжения и тока. Комплексное соотношение

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^*,$$

где \dot{U} - комплекс напряжения; \dot{I}^* - сопряженный комплекс тока.

Так как $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$; $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$; имеем

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi},$$

т.е. модуль S комплексного числа \underline{S} равен полной мощности. В тригонометрической форме

$$\underline{S} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ.$$

Следует обратить внимание, что комплексная мощность не является изображением синусоиды, поэтому над ее символом не ставят точку. Символ мощности, так же как символ комплексного сопротивления, подчеркивают.

Параллельное соединение элементов в цепи синусоидального тока

Для электрической цепи на рис. 15 для узла a . уравнение по первому закону Кирхгофа для мгновенных значений

$$i = i_1 + i_2.$$

Для комплексных изображений

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 по закону Ома $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1}$ и $\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2}$, где

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_L \quad \text{и} \quad \underline{Z}_2 = R_2 - jX_C.$$

Тогда $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \dot{U} \left(\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} \right)$.

Величина, обратная комплексному сопротивлению, называется комплексной проводимостью \underline{Y} :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = g + jb,$$

где q - активная проводимость; b - реактивная проводимость

$$\frac{1}{Z_1} = \underline{Y}_1; \quad \frac{1}{Z_2} = \underline{Y}_2;$$

$$\dot{I} = (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2)\dot{U} = \underline{Y}\dot{U} = (q + jb)\dot{U} = q\dot{U} + jb\dot{U}.$$

Активная и реактивная составляющая тока

$$\dot{I}_a = q\dot{U}, \quad \dot{I}_p = jb\dot{U},$$

для модулей справедливо

$$I_a = qU, \quad I_p = bU.$$

Анализ фазовых соотношений между током I и напряжением U удобно провести с помощью векторных диаграмм. Построение диаграммы удобно начинать с вектора напряжения U , которое является одним и тем же для обеих параллельных ветвей (рис. 16,а).

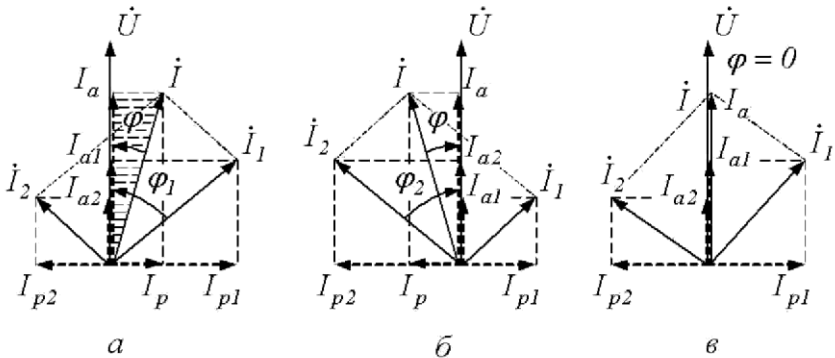


Рис. 16

Ток первой ветви \dot{I}_1 , содержащей индуктивный элемент, отстает по фазе от напряжения на угол φ_1 :

$$\varphi_1 = \text{arctg} \frac{X_L}{R_1}.$$

Ток второй ветви \dot{I}_2 , содержащий емкостный элемент, опережает напряжение на угол φ_2 :

$$\varphi_2 = \text{arctg} \frac{X_C}{R_2}.$$

Ток неразветвленного участка \dot{I} найден по первому закону Кирхгофа как сумма \dot{I}_1 и \dot{I}_2 .

Из простых геометрических построений видно, что модуль активной I_a и реактивной I_p составляющих тока неразветвленной цепи связаны с соответствующими составляющими токов ветвей соотношениями

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} \quad \text{и} \quad I_p = I_{p1} + I_{p2}.$$

Векторная диаграмма на рис. 16,а соответствует случаю, когда $I_{p1} > I_{p2}$. Поэтому ток неразветвленной части цепи отстает от вектора напряжения на угол φ , при этом говорят, что цепь носит индуктивный характер. Векторная диаграмма на рис. 16,б соответствует случаю $I_{p1} < I_{p2}$, т.е. цепь носит емкостный характер, ток неразветвленной части цепи опережает по фазе напряжение. Возможен случай, когда ток неразветвленного участка цепи совпадает по фазе с напряжением (рис. 16,в). Режим, при котором в цепи, содержащей параллельные ветви с индуктивным и емкостным элементами, ток неразветвленного участка цепи совпадает по фазе с напряжением ($\varphi = 0$), называют резонансом токов. При этом

$$I_{p1} = I_{p2} \quad \text{или} \quad I_{pL} = I_{pC}. \quad (3)$$

Учитывая, что

$$I_{p1} = I_{pL} = b_L U = b_L U \quad \text{или} \quad I_{p2} = I_{pC} = b_C U = b_C U,$$

условие резонанса токов

$$b_L = b_C.$$

Из заштрихованного треугольника токов (рис.16,а) очевидно, что $I_p = I \sin \varphi$; $I_a = I \cos \varphi$.

$$\text{Токи} \quad I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}}; \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}.$$

$$\text{Кроме того} \quad \sin \varphi_1 = \frac{X_L}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{X_C}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}.$$

Поэтому условие резонанса токов через параметры цепи R_L , R_C , L и C в соответствии с (3)

$$\frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}.$$

Следует обратить внимание, что условие резонанса токов определяется не только реактивными, но и активными сопротивлениями ветвей.

В рассмотренной электрической цепи фазовые соотношения могут приводить к условиям, невозможным для цепей постоянного тока. Так, например, ток неразветвленной части цепи может быть меньше токов ветвей. Это объясняется тем, что реактивные емкостные и индуктивные составляющие находятся в противофазе.

Суммирование токов в цепях синусоидального тока следует проводить с учетом фазовых соотношений, т.е. сдвигов по фазе, что осуществляется с помощью комплексных чисел или геометрических построений на комплексной плоскости. Активная мощность цепи равна арифметической сумме активных мощностей всех ветвей

$$P = P_1 + P_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

Реактивная мощность цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей всех ветвей, причем, реактивную индуктивную мощность берут со знаком плюс, а емкостную - со знаком минус.

$$Q = Q_L + Q_C = I_1^2 X_L - I_2^2 X_C.$$

Полная мощность цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

В комплексной форме

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ.$$

Технико-экономическое значение коэффициента мощности

Рассмотрим электрическую цепь на рис. 17, а, где к генератору электрической энергии G подключен один из самых распространенных приемников - асинхронный двигатель. Принцип действия асинхронного двигателя основан на силовом взаимодействии магнитного поля и проводников с током, т.е. преобразовании электрической энергии в механическую энергию посредством магнитного поля. Схема замещения такого приемника представлена индуктивным элементом L_{np} и активным R_{np} , который указывает, что в двигателе происходит необратимое преобразование электрической энергии в механическую, т.е. совершается работа.

Из схемы замещения видно, что ток

$$\dot{I}_{np} = \frac{\dot{U}}{R_{np} + jX_{Lnp}}.$$

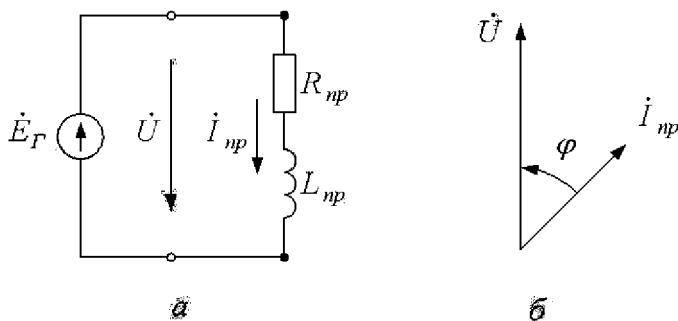


Рис. 17

Угол сдвига фаз φ между током \dot{I}_{np} и напряжением \dot{U} генератора, а, следовательно, коэффициент мощности генератора определяется параметрами двигателя

$$\cos \varphi = \frac{R_{np}}{\sqrt{R_{np}^2 + X_{np}^2}}.$$

Векторная диаграмма цепи показана на рис. 17, б.

В схеме рис. 17, а происходит обмен энергией между генератором и магнитным полем двигателя, т.е. реактивная мощность принципиально не может быть равна нулю. Поэтому генератор работает в условиях, когда $P < S_{ном}$.

Номинальная мощность $S_{ном} = U_{ном} I_{ном}$, соответствует паспортным данным генератора.

Очевидно, что генератор энергетически выгодно эксплуатировать так, чтобы совершаемая им работа была максимальной

$$P = P_{ном} = S_{ном} \cos \varphi = S_{ном}$$

Т.е. существует проблема повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$.

Рассмотрим схему на рис. 18, а, на которой параллельно двигателю включен емкостный элемент - конденсатор.

Подключение конденсатора никак не скажется на работе двигателя: напряжение на зажимах двигателя не изменилось и, следовательно, остался неизменным его ток, активная и реактивная мощности. Однако условия работы генератора отличаются, т.к. ток генератора I_G уже не равен току двигателя, а определяется соотношением

$$\dot{I}_G = \dot{I}_{np} + \dot{I}_C.$$

Векторная диаграмма приведена на рис. 18, б.

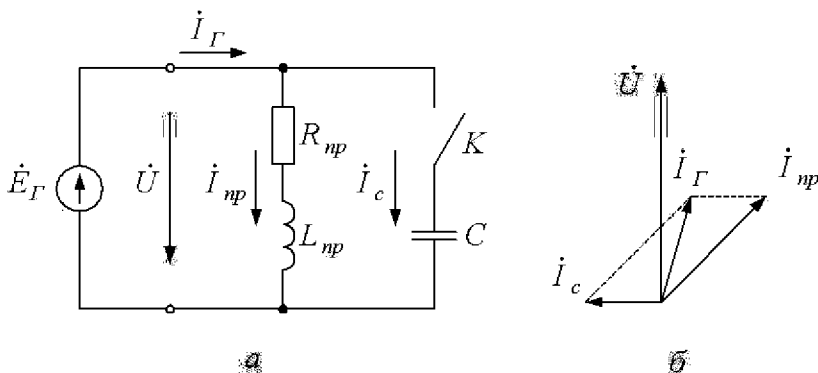


Рис. 18

При соответствующем подборе емкости конденсатора можно добиться резонансного режима, т.е. обеспечить работу генератора при максимальном значении коэффициента мощности. При этом будет происходить обмен энергией, запасаемой в магнитном поле двигателя, не с генератором, а с емкостным элементом.

Это дает энергетические преимущества. Во-первых, при неизменной работе, совершаемой двигателем, уменьшается ток генератора. Это означает, что в данной схеме может быть использован генератор меньшей мощности, или к нему могут быть подключены дополнительно другие потребители электрической энергии.

Во-вторых, подключение емкостного элемента снижает ток в линии электропередачи, соединяющей двигатель с генератором, что позволяет уменьшить сечение соединительных проводов, т.е. экономить электропроводящие материалы.

Рассмотренный способ повышения коэффициента мощности требует дополнительных затрат на установку конденсатора. Технико-экономические расчёты показывают, что в энергетических системах целесообразно осуществлять установку конденсаторов, емкость которых

позволяет повышать коэффициент мощности до значений, несколько меньших единицы.

В энергетических системах для повышения коэффициента мощности используют также синхронные двигатели, схемы, замещения которых при определенных условиях содержат емкостные элементы. Значение коэффициента мощности в энергосистемах зависит ещё, и от того, насколько грамотно эксплуатируют электротехнические установки. Например, коэффициент мощности асинхронного двигателя резко снижается, если двигатель работает в режиме холостого хода или недогружен до номинальной мощности и т.д.

2. Программа работы

1. Ознакомиться с оборудованием лабораторной установки. Определить цену деления измерительных приборов, используемых в данной работе.

Для исследования применяется электронный осциллограф типа Л0-70, который позволяет наблюдать синусоидальные кривые напряжений и тока, измерять их амплитуду и фазовый сдвиг.

2. Исследовать последовательное соединение идеальных элементов в цепи однофазного синусоидального тока. Для этого собрать электрическую цепь по рис. 19.

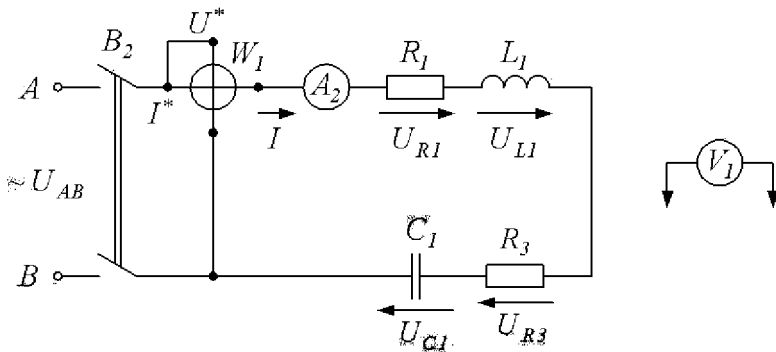


Рис. 19

3. После проверки схемы преподавателем подать на стенд напряжение. Измерить ток, мощность и напряжение на участках цепи. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Измерено						
I	P	U_{AB}	U_{R1}	U_{L1}	U_{R3}	U_{C1}
A	Bm	B	B	B	B	B

Таблица 1 (продолжение)

Вычислено									
Z	R_1	R_3	R_Σ	R_{L1}	Z_{L1}	X_{L1}	L_1	$\cos\varphi_{L1}$	φ_{L1}
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	-	эл.гр.

Таблица 1 (продолжение)

Вычислено							
X_{C1}	C_1	Q_{L1}	Q_C	Q	S	$\cos\varphi$	φ
Ом	мкФ	ВАр	ВАр	ВАр	ВА	-	эл.гр.

По результатам измерений убедиться, что в отличие от цепи постоянного тока, уравнение второго закона Кирхгофа для замкнутого контура справедливо в комплексной (векторной) форме, т.е.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{R3} + \dot{U}_{C1}$$

или

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{R3} + \bar{U}_{C1}.$$

Обратить внимание, что из-за фазовых сдвигов напряжение на отдельных элементах цепи может быть по модулю больше напряжения источника, что в цепях постоянного тока невозможно.

4. Проанализировать кривые тока и напряжений на участках цепи U_{AB} , U_{R1} , U_{L1} , U_{R3} , U_{C1} , наблюдая их на экране осциллографа. Для этого провода от осциллографа поочередно присоединять ко всем участкам цепи, обращая внимание на амплитуду и фазовый сдвиг напря-

жений. Ручку осциллографа "усиление" установить так, чтобы в дальнейшем положение ее оставалось неизменным. Зарисовать кривые напряжений с экрана осциллографа на кальку.

5. Исследовать параллельное соединение элементов в цепи однофазного синусоидального тока. Собрать электрическую цепь по рис. 20.

Измерить токи, напряжения, мощность в цепи. Результаты измерений занести в табл. 2.

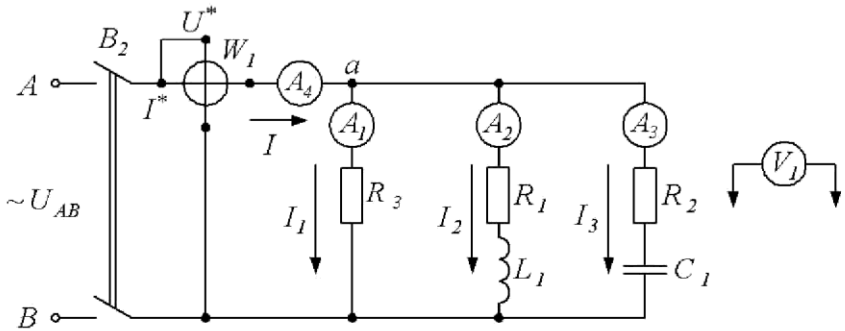


Рис. 20

Таблица 2

Измерено									
I	I_1	I_2	I_3	U_{AB}	U_{R1}	U_{L1}	U_{R2}	U_{C1}	P
A	A	A	A	B	B	B	B	B	Вт

Таблица 2 (продолжение)

Вычислено								
R_2	$P_{расч}$	Q	S	$\cos \varphi$	φ	φ_1	φ_2	φ_3
Ом	Вт	ВАр	ВА	-	эл.гр.	эл.гр.	эл.гр.	эл.гр.

Обратить внимание, что в отличие от электрической цепи постоянного тока, уравнение первого Закона Кирхгофа для узла "а" справедливо в комплексной или векторной форме, т.е.

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

или

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3.$$

Обратить внимание, что из-за фазовых сдвигов, токи в отдельных ветвях цепи могут быть по модулю больше тока источника, что в цепях постоянного тока невозможно.

6. Исследовать возможность компенсации реактивной мощности.

Большинство приемников электрической энергии (трансформаторы, асинхронные двигатели) имеют активно-индуктивный характер.

В лабораторной работе приемник электрической энергии представлен элементами R_1 и L_1 .

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой приемником из сети, параллельно ему включают конденсатор C_1 .

Собрать схему по рис. 21.

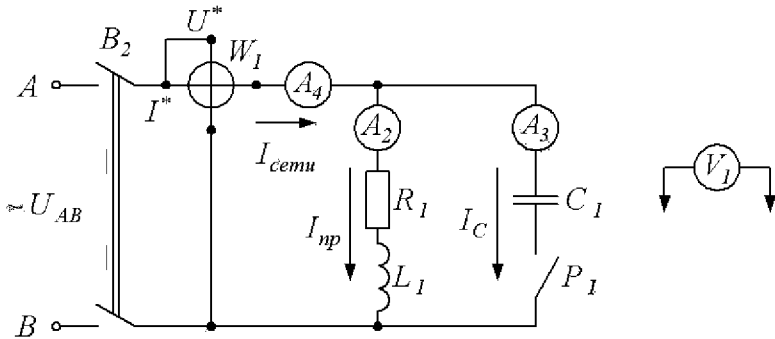


Рис. 21

Измерить токи, напряжения, мощность для разомкнутого и замкнутого положения рубильника. Результаты занести в табл.3. Обратить внимание, что подключение конденсатора C_1 параллельно приемнику уменьшает потребляемый из сети ток.

Таблица 3

Измерено								
P ₁ разомкнут				P ₁ замкнут				
U_{AB}	$I_{сети}$	I_{np}	P_W	U_{AB}	$I_{сети}$	I_{np}	I_C	P_W
<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Вт</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Вт</i>

Таблица 3 (продолжение)

Вычислено								
Z_{np}	$\cos \varphi_{np}$	φ_{np}	Q_{np}	Q_C	Q	S	$\cos \varphi$	φ
<i>Ом</i>	-	<i>эл.гр.</i>	<i>ВАр</i>	<i>ВАр</i>	<i>ВАр</i>	<i>ВА</i>	-	<i>эл.гр.</i>

Обработка результатов эксперимента

1. Определить модули сопротивлений элементов, и всей цепи (см. рис. 19).

$$Z = \frac{U_{AB}}{I}; \quad R_I = \frac{U_{RI}}{I}; \quad R_3 = \frac{U_{R3}}{I}; \quad Z_{LI} = \frac{U_L}{I}; \quad R_{\Sigma} = \frac{P}{I^2};$$

$$R_{LI} = R_{\Sigma} - (R_I + R_3); \quad X_{LI} = \sqrt{Z_{LI}^2 - R_{LI}^2}; \quad X_{CI} = \frac{U_{CI}}{I}.$$

2. Определить параметры элементов цепи (см. рис. 19).

$$L_I = \frac{X_{LI}}{2\pi f}; \quad C_I = \frac{1}{X_{CI} 2\pi f}; \quad \text{где } f = 50 \text{ Гц}.$$

3. Определить реактивную и полную мощности, потребляемые цепью (см. рис. 19).

Реактивная мощность может быть определена как сумма мощностей на реактивных элементах

$$Q_{LI} = I^2(X_{LI}); \quad Q_{CI} = I^2(-X_{CI}); \quad Q = Q_{LI} + Q_{CI}.$$

Полная мощность всей цепи

$$S = U_{AB} I .$$

4. Определить коэффициент мощности индуктивной катушки и всей цепи

$$\cos \varphi_{LI} = \frac{R_{LI}}{Z_{LI}}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{или} \quad \cos \varphi = \frac{R_{\Sigma}}{Z} .$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током в индуктивной катушке

$$\varphi_{LI} = \arccos \frac{R_{LI}}{Z_{LI}} \quad \text{или} \quad \varphi_{LI} = \arctg \frac{X_{LI}}{R_{LI}} .$$

Угол сдвига фаз между напряжением U_{AB} и током источника I

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P} \quad \text{или} \quad \varphi_{LI} = \arccos \frac{P}{S} .$$

5. По табл.1 построить векторную диаграмму напряжений для последовательного соединения элементов.

При построении векторной диаграммы обратить внимание на то, что индуктивная катушка обладает активным сопротивлением, поэтому напряжение U_{LI} опережает ток на угол φ_{LI} . Конденсатор - идеальный, поэтому напряжение U_{C1} отстает от тока на 90° . Удобный масштаб для построения векторной диаграммы:

$$m_i = 0,1 \text{ A / см}; \quad m_u = 20 \text{ B / см} .$$

По векторной диаграмме убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа для исследуемой цепи. Сравнить измеренное напряжение сети U_{AB} с вектором общего напряжения из диаграммы.

6. Определить параметры элементов для схемы (см. рис. 20)

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_3} .$$

Параметры R_1 , R_3 , R_{LI} , X_{LI} , X_{C1} взять из табл.1.

7. Активная мощность P определяется как сумма активных мощностей всех ветвей схемы

$$P_{\text{расч}} = I_1^2 R_3 + I_2^2 (R_{LI} + R_1) + I_3^2 R_2 .$$

Реактивная мощность Q всей цепи определяется как алгебраическая сумма реактивных мощностей

$$Q = I_2^2(X_{LI}) + I_3^2(-X_{CI})$$

Полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

8. Коэффициент мощности цепи и углы сдвига фаз между напряжением U_{AB} и токами отдельных ветвей I , I_1 , I_2 , I_3 :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \varphi = \arccos \frac{P}{S} \quad \text{или} \quad \varphi = \arctg \frac{Q}{P};$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0}{R_3} = 0; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{X_{LI}}{R_{LI} + R_I}; \quad \varphi_3 = \arctg \frac{-X_{CI}}{R_3}.$$

9. По табл.2 построить векторную диаграмму токов и напряжений. При построении учесть, что ток I_1 имеет активный характер и совпадает по фазе с напряжением U_{AB} , ток I_2 имеет индуктивный характер и отстает от напряжения U_{AB} на угол φ_2 . Ток I_3 имеет емкостный характер и опережает U_{AB} на угол φ_3 .

Показать на векторной диаграмме, что $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{R2} + \bar{U}_{CI}$ и $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{RI} + \bar{U}_{LI}$.

Удобный масштаб для построения векторной диаграммы:

$$m_i = 0,2 A / \text{см}; \quad m_u = 10 B / \text{см}.$$

10. Для схемы по рис. 21 определить коэффициент мощности приемника

$$\cos \varphi_{np} = \frac{R_{LI} + R_I}{Z_{np}}; \quad Z_{np} = \frac{U_{AB}}{I_{np}}.$$

Параметры R_I , R_{LI} , X_{LI} , X_{CI} взять из табл.1.

11. Реактивная мощность приемника

$$Q_{np} = I_{np}^2(X_{LI}).$$

Реактивная мощность конденсатора CI :

$$Q_{C1} = I_C^2(-X_{C1}).$$

Реактивная мощность всей цепи при замкнутом PI

$$Q = Q_{np} + Q_{C1}.$$

Полная мощность цепи при замкнутом PI

$$S = U_{AB} I_{сети}.$$

Угол сдвига фаз между напряжением источника U_{AB} током сети $I_{сети}$

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

12. По табл.3 построить векторную диаграмму токов для замкнутого положения PI . Убедиться, что подключение параллельно приемнику конденсатора $C1$ уменьшает реактивную составляющую общего тока $I_{сети}$. При этом уменьшается угол φ , повышается коэффициент мощности $\cos \varphi$ цепи при неизменной активной мощности приемника. Ток, потребляемый электрической цепью из сети, уменьшается.

13. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие основные особенности имеют электрические цепи синусоидального тока?
2. Что понимается под мгновенным и действующим значениями синусоидального напряжения и тока?
3. Как определить максимальное и действующее значения синусоидального напряжения и тока?
4. Какие процессы происходят в цепи с активным сопротивлением, питаемой синусоидальным током?
5. О чем свидетельствует то обстоятельство, что в цепи с активным сопротивлением мгновенная мощность всегда положительна?
6. Какие процессы, происходят в цепи с индуктивностью и в цепи с емкостью, питаемых синусоидальным током?
7. Какой сдвиг по фазе между напряжением и током в цепи с индуктивностью и в цепи с емкостью?
8. Какие процессы происходят в цепи с последовательным соединением резистора, катушки и конденсатора?

Лабораторная работа №4

Исследование трехфазной цепи при соединении приемников энергии звездой.

Цель работы:

1. Исследовать работу трехфазных приемников, соединенных звездой в различных режимах, включая аварийные.
2. Экспериментально установить соотношения между линейными и фазными напряжениями при симметричном и несимметричном режимах работы трехфазной электрической цепи при соединении приемников энергии звездой с нейтральным проводом, звездой без нейтрального провода.
3. Объяснить назначение нейтрального провода.
4. Овладеть методикой построения векторных диаграмм по экспериментальным данным.

1. Теоретические сведения

Трехфазные электрические цепи

В *трехфазной системе* электрических цепей действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.

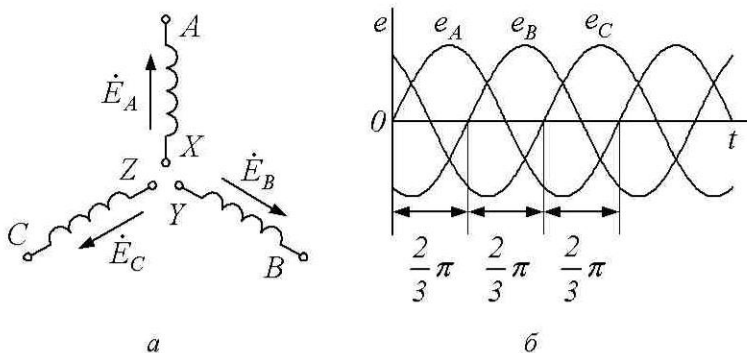


Рис. 1. Трехфазная система: *a* - условное обозначение обмоток генератора, *б* - временная диаграмма ЭДС

В качестве источника электрической энергии в трехфазных цепях используются синхронные генераторы, принцип действия и конструкция которых будет рассмотрена в разделе «Электрические машины».

В трех обмотках статора синхронного генератора индуцируются указанные три ЭДС.

При положительных направлениях ЭДС в обмотках синхронного генератора от концов X, Y, Z к началам A, B, C ЭДС изменяется в соответствии с выражениями:

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi / 3);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi / 3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi / 3).$$

Положительные направления (a) и графики (b) ЭДС синхронного генератора представлены на рис. 1.

В комплексной форме действующие значения ЭДС:

$$\dot{E}_A = E; \quad \dot{E}_B = E \cdot e^{-j2\pi/3}; \quad \dot{E}_C = E \cdot e^{j2\pi/3}.$$

Векторная диаграмма симметричной трехфазной системы для прямой (a) и обратной (b) последовательности фаз показана на рис. 2.

Из векторной диаграммы следует, что сумма ЭДС в любой момент времени равна нулю:

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

От последовательности чередования фаз зависит направление вращения асинхронного двигателя.

На практике, как правило, приемники подключаются не непосредственно к генератору, а к вторичным обмоткам трехфазных трансформаторов, в которых также действует симметричная система ЭДС.

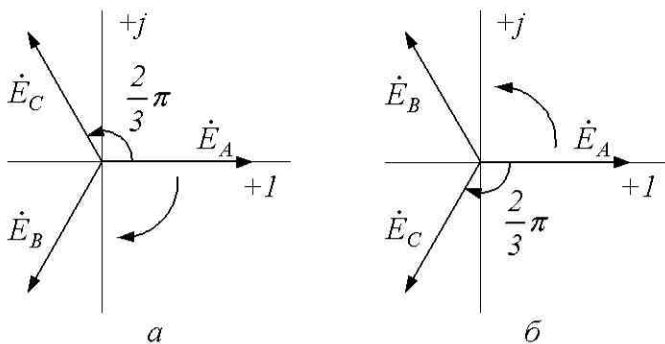


Рис. 2. Порядок чередования фаз: a – прямая последовательность; b – обратная последовательность

Соединение обмоток источника и фаз приемника звездой

В связанной системе ЭДС концы фаз X, Y, Z соединяются в один общий узел N , называемый *нейтральной точкой генератора*. Такое соединение обмоток называют соединением *звездой* (Y_0).

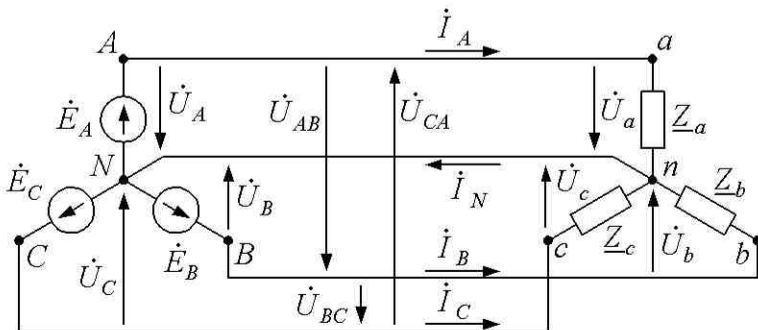


Рис. 3. Схема четырехпроводной трехфазной цепи

Концы фаз приемника, например, осветительные нагрузки Z_a, Z_b, Z_c также соединяем в одну точку звездой. Точки N и n называют нейтральными, а провод, их соединяющий, — *нейтральным*. Провода $A-a, B-b, C-c$, соединяющие начала фаз источника (трансформатора) и приемника, называют *линейными*.

Напряжение между началом и концом фазы называют *фазным*: U_A, U_B, U_C, U_ϕ . За условно положительное направление ЭДС источника принимают направление от конца к началу фазы.

Положительное направление тока в фазах совпадает с положительным направлением ЭДС, а положительное направление напряжения на фазе приемника совпадает с положительным направлением тока в фазе. Положительным направлением напряжения на фазе источника является направление от начала фазы к ее концу, т. е. противоположно положительному направлению ЭДС.

Напряжение между линейными проводами называют *линейным*: $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, U_L$. За положительное направление линейных напряжений принято направление от A к B , от B к C , от C к A .

Линейные напряжения определяют через фазные. Это соотношение можно получить из уравнения, написанного по второму закону Кирхгофа для контура, например, $A-N-B-A$, если принять направление обхода контура от точки A к точке N и т. д.:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{U}_B - \dot{U}_{AB} &= 0; & \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_B - \dot{U}_C - \dot{U}_{BC} &= 0; & \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_C - \dot{U}_A - \dot{U}_{CA} &= 0; & \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned}$$

Из топографической диаграммы напряжений, построенной в соответствии с этими уравнениями (рис. 4), можно определить как количественные, так и фазовые соотношения между фазными и линейными напряжениями симметричной системы. Векторы линейных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$ и опережают соответственно векторы фазных напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C на угол $\pi/6$. Из заштрихованного треугольника AOD следует, что:

$$\frac{U_L}{2} = U_\Phi \cdot \cos \pi/6 = U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{то есть} \quad U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi.$$

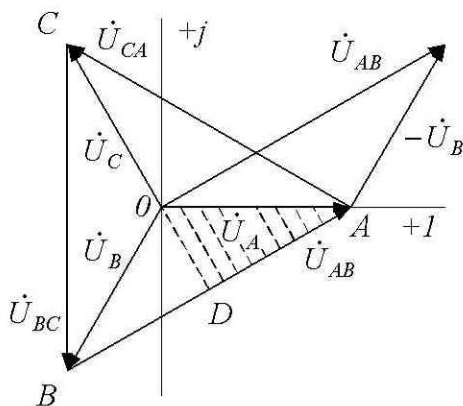


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений симметричного источника, соединенного звездой

Таким образом, если система напряжений симметрична, то при соединении звездой линейное напряжение в 1,73 раза больше фазного.

Применяемые на практике напряжения переменного тока отличаются друг от друга в 1,73 раза. Если $U_L = 220\text{В}$, то $U_\Phi = 127\text{В}$, что обозначают: $220/127$; $380/220$; $660/380\text{В}$.

Если комплексные сопротивления фаз трехфазного приемника равны между собой $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z \cdot e^{j\varphi}$, то его называют симметричным, например, обмотки трехфазного асинхронного двигателя.

Подобно фазам обмоток источника, фазы приемника соединяют звездой или треугольником, причем способ соединения фаз обмоток источника не предопределяет способа соединения приемников.

Если пренебречь сопротивлениями фазного и линейного проводов, то фазные напряжения приемника будут равны фазным напряжениям источника: $U_A = U_a$, $U_B = U_b$, $U_C = U_c$.

При подключении приемников к трехфазному источнику, обмотки которого соединены звездой, ток протекает по обмоткам источника, линейным проводам и фазам приемника. Ток в фазах источника или приемника называют фазным (I_ϕ), ток в линейных проводах — линейным (I_L).

Так как обмотка источника, линейный провод и приемник, принадлежащие одной фазе, включены последовательно, то при соединении звездой линейный ток равен фазному:

$$I_L = I_\phi.$$

В фазе приемника он определяется по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_c}.$$

Ток в нейтральном проводе I_N , определенный по первому закону Кирхгофа (для узла n):

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

равен геометрической сумме фазных токов.

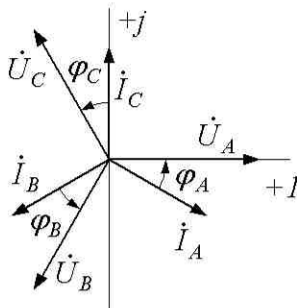


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений и токов симметричного приемника, соединенного звездой

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, т. е. когда $R_a = R_b = R_c$ и $X_a = X_b = X_c$ фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы:

$$I_A = I_B = I_C = I_\Phi, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \arctg \frac{X_\Phi}{R_\Phi}.$$

Фазные токи при симметричной нагрузке образуют симметричную систему, вследствие чего ток I_N в нейтральном проводе равен нулю (рис. 5). Это позволяет перейти к трехпроводной трехфазной цепи (рис. 6).

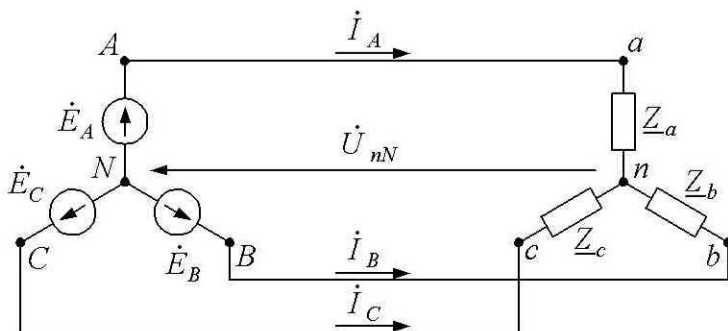


Рис. 6. Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой

Очевидно, для симметричных приемников справедливо ранее выведенное соотношение между фазными и линейными напряжениями, так как фазные и линейные напряжения приемника соответственно равны фазным и линейным напряжениям генератора, а фазные и линейные токи равны между собой.

Трехфазная цепь с несимметричным приемником

В ряде случаев реальные приемники являются несимметричными.

В осветительных нагрузках используют схему соединения звезда — звезда с нулевым проводом. Если в такую четырехпроводную звезду включить несимметричный приемник, то благодаря наличию нейтрального провода напряжения на каждой фазе приемника будут равны соответствующим фазным напряжениям источника, как по амплитуде, так и по фазе.

Но фазные токи будут разными. При этом фазные напряжения приемника остаются постоянными при любых нагрузках фаз, и ток каждой фазы зависит только от проводимости данной фазы. Нейтральный про-

вод, по которому протекает ток I_N , выравнивает фазные напряжения приемника.

При обрыве линейного провода ток в нейтральном проводе существует. При обрыве нейтрального провода между точками N и n может возникнуть напряжение. Тогда на фазах приемника появляются значительные перенапряжения. Поэтому в нейтральный провод не включают плавкие предохранители и выключатели.

При анализе трехпроводной несимметричной нагрузки, соединенной звездой (рис. 6), сначала определяют напряжение между нейтральными точками N и n (напряжение смещения нейтрали) по формуле межузлового напряжения:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \frac{1}{\underline{Z}_a} + \dot{U}_B \cdot \frac{1}{\underline{Z}_b} + \dot{U}_C \cdot \frac{1}{\underline{Z}_c}}{\frac{1}{\underline{Z}_a} + \frac{1}{\underline{Z}_b} + \frac{1}{\underline{Z}_c}}.$$

Далее определяют фазные напряжения приемника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN},$$

а по ним — фазные токи приемника:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Векторная диаграмма приведена на рис. 7.

Из диаграммы видно, что изменение положения нейтрали приводит к изменению фазных напряжений приемника, а значит, и токов в фазах.

В процессе работы трехфазных нагрузок возможны аварийные или эксплуатационные режимы, вызванные обрывом линейного (фазного) проводов или коротким замыканием в фазе. Пусть в исходном режиме нагрузка симметрична ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$). Система фазных токов симметрична, $U_{nN} = 0$ и система фазных напряжений приемника также симметрична. При обрыве фазы a приемника фазы b и c окажутся соединенными последовательно и будут подключены к линейному напряжению U_{BC} . Векторная диаграмма приведена на рис. 8, а.

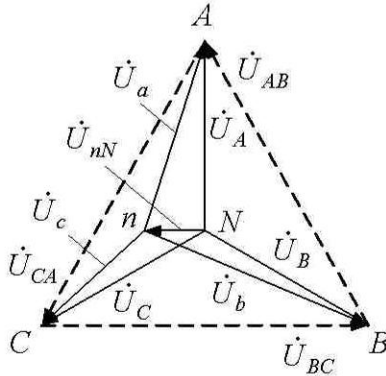


Рис. 7. Топографическая диаграмма напряжения трехпроводной несимметричной цепи, соединенной звездой

Напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_B \cdot \frac{1}{Z_b} + \dot{U}_C \cdot \frac{1}{Z_c}}{\frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c}} = -\frac{\dot{U}_A}{2}.$$

Вектор \dot{U}_{nN} на рис. 8,а определяет точку n , которая делит вектор \dot{U}_{BC} пополам. Фазное напряжение \dot{U}_a увеличивается в 1,5 раза, а напряжения \dot{U}_b и \dot{U}_c уменьшаются в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раза, так как становятся равными половине линейного напряжения.

Ток в фазе a равен нулю, а токи в фазах b и c уменьшаются в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раза. При активной нагрузке, углы $\varphi = 0$ и токи совпадают по фазе с фазными напряжениями.

При коротком замыкании фазы a потенциал нейтральной точки n приемника близок к потенциалу точки A источника. На векторной диаграмме рис. 8,б точка n совпадает с точкой A . Фазное напряжение $\dot{U}_a = 0$, а напряжения $\dot{U}_b = -\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_c = \dot{U}_{CA}$, т. е. увеличиваются

до линейных. По этой причине фазные токи \dot{I}_b и \dot{I}_c возрастают в $\sqrt{3}$ раз, совпадая по фазе со своими напряжениями. Ток $\dot{I}_a = -(\dot{I}_b + \dot{I}_c)$, как видно из диаграммы, в $\sqrt{3}$ раз больше этих токов и в 3 раза больше тока в исходном режиме.

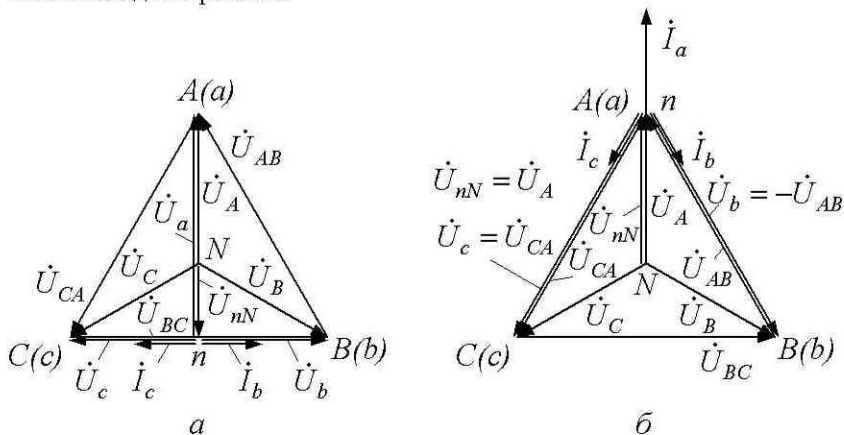


Рис. 8. Векторная диаграмма напряжений и токов при: а - обрыве фазы а приемника; б - коротком замыкании в фазе а приемника

Мощность в трехфазной системе

Активная мощность трехфазного приемника равна арифметической сумме активных мощностей фаз (для несимметричной системы: арифметической сумме активных мощностей фаз и нулевого провода).

При симметричной системе напряжений ($U_A = U_B = U_C = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_A = I_B = I_C = I_\phi$, и $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi$) фазные мощности равны $P_A = P_B = P_C = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.

Активная мощность трехфазного приемника:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi.$$

Реактивная мощность в трехфазной симметричной системе равна алгебраической сумме реактивных мощностей в каждой фазе:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3Q_\phi,$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi.$$

Полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

За номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, поэтому мощности удобнее выражать через линейные величины U_L и I_L .

При соединении фаз приемника звездой:

$$U_{\Phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}; \quad I_{\Phi} = I_L.$$

При соединении фаз приемника треугольником:

$$U_{\Phi} = U_L; \quad I_{\Phi} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}.$$

Поэтому независимо от схемы соединения фаз симметричного приемника мощности имеют вид:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_{\Phi},$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_{\Phi},$$

$$S = \sqrt{3} U_L I_L.$$

2. Программа работы

1. Выбрать необходимые для выполнения работы приборы и собрать электрическую схему в соответствии с рис. 9.
Определить цену деления приборов, используемых в работе.
2. После проверки схемы преподавателем подать на стенд напряжение и произвести необходимые измерения токов и напряжений для режимов указанных в таблице 1.
3. Включить рубильники $P1$ и $P2$. Установить с помощью реостатов R_{ax} , R_{by} , R_{cz} симметричную нагрузку в фазах, т. е. одинаковые токи:

$$I_A = I_B = I_C.$$

Линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} измеряются между клеммами « A » и « B », « B » и « C », « C » и « A » сети, а фазные -

U_a , U_b , U_c между клеммами «A» и «n», «B» и «n», «C» и «n», где «n» - нейтральная точка приемника энергии.

Напряжение смещения U_{nN} , измеряется между нейтральной точкой источника N и нейтральной точкой приемника «n».

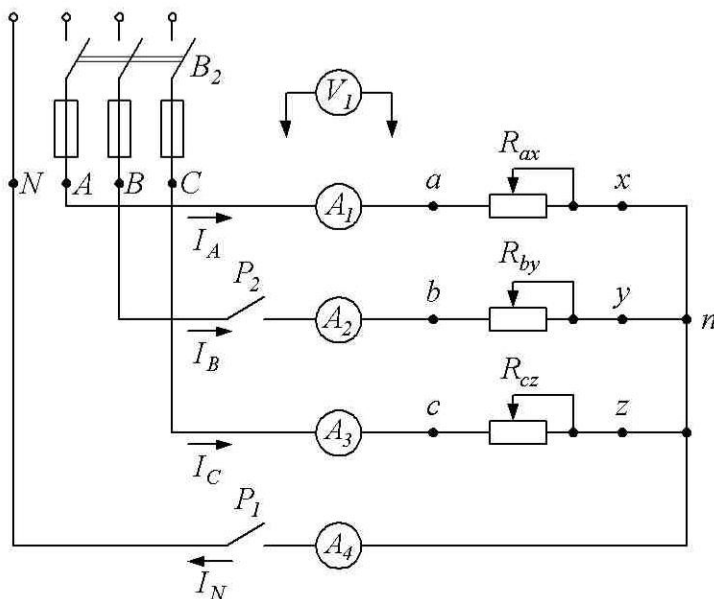


Рис. 9. Схема лабораторной установки, соединения приемников звездой

4. Убедиться, что в четырехпроводной цепи ($P1$ - замкнут) $I_N = 0$ только при симметричной нагрузке, а $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ при любой нагрузке.

5. Убедиться, что в трехпроводной цепи ($P1$ - разомкнут) $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ только при симметричной нагрузке, а изменение сопротивления в фазах или обрыв фазы изменяют напряжения и токи в других фазах.

Режим работы цепи	Положение рубильника		Измерено									
			U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_a	U_b	U_c	U_{nN}	I_A	I_B	
	P1	P2	B	B	B	B	B	B	B	A	A	
Симметричная нагрузка	Вкл.	Вкл.										
	Откл.	Вкл.										
Изменение тока в одной фазе	Вкл.	Вкл.										
	Откл.	Вкл.										
Изменение тока во всех фазах	Вкл.	Вкл.										
	Откл.	Вкл.										
Обрыв фазы «B»	Вкл.	Откл.										
	Откл.	Откл.										

3. Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого режима работы таблицы 1 построить топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов.

Примечания:

1) векторные диаграммы строятся в удобном масштабе, который выбирается отдельно для токов и для напряжения;

2) построение топографической диаграммы напряжения следует начинать с треугольника линейных напряжений, который остается неизменным при всех режимах работы цепи;

3) положение нейтральной точки приемника n на диаграмме напряжений определяется пересечением дуг окружностей, проведенных из вершин треугольника линейных напряжений радиусами, равными соответствующим фазным напряжениям (рис. 10);

4) векторы фазных токов I_A , I_B , I_C следует откладывать из нейтральной точки приемника n . Для активной нагрузки (что имеет место в данной работе) угол сдвига фаз между током и напряжением равен нулю, поэтому вектора фазных токов будут совпадать по направлению с векторами соответствующих фазных напряжений.

2. Проверить графическим построением соотношения:

1) для четырехпроводной цепи $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N$;

2) для трёхпроводной цепи $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$,

для чего векторную диаграмму токов вынести отдельно.

3. Вычислить соотношение между линейными и фазными напряжениями (только для симметричного режима работы)

$$\frac{U_L}{U_\Phi} = \frac{U_{AB}}{U_a} .$$

4. Определить сопротивления фаз приемника для всех режимов работы по закону Ома $R_{ax} = \frac{U_a}{I_A}$, $R_{by} = \frac{U_b}{I_B}$, $R_{cz} = \frac{U_c}{I_C}$.

5. Рассчитать активную мощность потребления энергии приемника, для всех режимов работы: $P = I_A^2 \cdot R_{ax} + I_B^2 \cdot R_{by} + I_C^2 \cdot R_{cz}$.

6. Сделать выводы по работе.

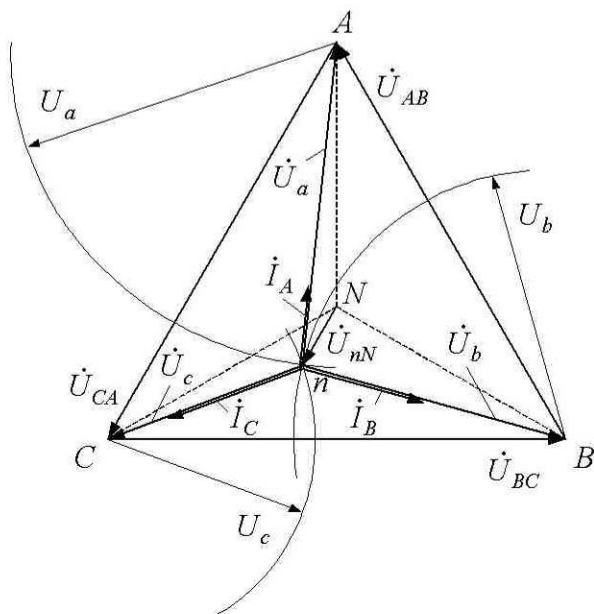


Рис. 10. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для трехпроводной несимметричной трехфазной нагрузки ($R_a > R_b > R_c$), построенная по экспериментальным данным.

4. Контрольные вопросы

1. Как соединить фазы приемника звездой?
2. Какие напряжения называются линейными и фазными?
3. Как измерить фазные и линейные напряжения?
4. Какая нагрузка называется симметричной?
5. Какая нагрузка называется активной?
6. Какова роль нейтрального провода?
7. Чему равен ток в нейтральном проводе:
 - а) для симметричной нагрузки?
 - б) для несимметричной нагрузки?
8. Какое напряжение называется напряжением смещения нейтрали?
9. Как рассчитать активную мощность P при симметричной и несимметричной нагрузке?
10. Какие приемники энергии включаются по четырехпроводной схеме звезда, какие по трехпроводной?
11. Чем объясняется появление напряжения смещения нейтрали?

Лабораторная работа № 21

Исследование однофазного трансформатора.

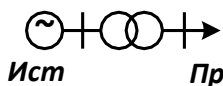
Цель работы:

1. Исследование работы однофазного трансформатора в режимах холостого хода и активной нагрузки.
2. Получение рабочих характеристик.
3. Оценка свойств однофазного трансформатора из анализа полученных результатов.

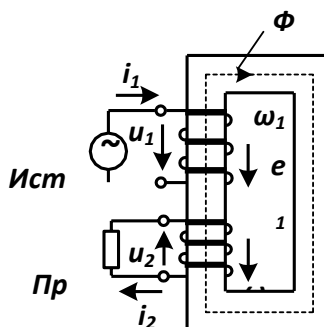
1. Теоретические сведения

Устройство, принцип действия и назначение трансформаторов.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте. Условное графическое обозначение и электромагнитная схема трансформатора изображены на рис. 1, а, б.



а



6

Рис. 1. Условное графическое обозначение (а)
и электромагнитная схема (б) трансформатора

На замкнутом магнитопроводе расположены две обмотки. К одной обмотке с числом витков W_1 которая носит название первичной, подводится электрическая энергия от источника питания *Ист*; от другой — вторичной обмотки с числом витков W_2 — энергия отводится к приемнику *Пр*. Все величины, относящиеся к этим обмоткам (токи, э. д. с. и т. д.),

называются первичными или вторичными и имеют соответствующие индексы 1 и 2. Под действием подведенного переменного напряжения u_1 в первичной обмотке возникает ток i_1 и возбуждается изменяющийся магнитный поток. Этот поток индуцирует э. д. с. e_1 и e_2 в обмотках трансформатора. Э.д.с. e_1 уравнивает основную часть напряжения источника u_1 , э.д.с. e_2 создает напряжение u_2 на выходных зажимах трансформатора. При замыкании вторичной цепи возникает ток i_2 , который образует собственный магнитный поток, накладывающийся на поток первичной обмотки. В результате создается общий поток Φ , сцепленный с витками обеих обмоток трансформатора и определяющий в них результирующие э.д.с. e_1 и e_2 . На схеме рис. 1 показаны условно-положительные направления всех физических величин, характеризующих электромагнитные процессы в трансформаторе. Стрелки напряжения u_1 и тока i_1 представляют первичную обмотку как приемник энергии. Положительное направление потока Φ связано с током i_1 правилом правого винта. То же правило определяет положительные направления потока Φ , э.д.с. e_1 и e_2 . Стрелки e_2 и i_2 вторичной обмотки соответствуют направлениям э. д. с. и тока источника электрической энергии. Стрелка напряжения u_2 на зажимах вторичной обмотки, равного напряжению на приемнике, должна совпадать по направлению со стрелкой тока i_2 . Только учитывая условно-положительные направления электрических величин, можно правильно записать уравнения электрического состояния трансформатора.

Помимо основного (рабочего) потока в магнитопроводе токи обмоток создают в окружающем пространстве магнитное поле рассеяния.

Трансформация напряжения. Уравнения электрического состояния обмоток идеализированного трансформатора имеют вид

$$u_1(t) = -e_1(t), \quad u_2(t) = e_2(t),$$

где

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

Отношение напряжений и э.д.с.

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{-u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{w_1}{w_2} = n,$$

называют коэффициентом трансформации.

В трансформаторе происходит «масштабное» преобразование переменного напряжения в n раз.

Трансформация токов. В трансформаторе происходит преобразование не только переменных напряжений, но и токов. Для составления уравнения, связывающего токи i_1 и i_2 первичной и вторичной обмоток трансформатора, воспользуемся законом полного тока. Для электромагнитной схемы рис. 1,б можно записать следующее уравнение магнитного состояния:

$$H_M l_M = w_1 i_1 + w_2 i_2,$$

где l_M — длина средней линии магнитопровода.

В современных трансформаторах применяют электротехническую холоднокатаную сталь, в которой магнитная индукция 1,7 Тл достигается уже при напряженности поля 400 А/м. Поэтому амплитуда магнитного напряжения $H_{mm} l_M$ на несколько порядков меньше амплитуд м.д.с.

$w_1 i_1$ и $w_2 i_2$ обмоток трансформатора при его нагрузке. Это позво-

ляет сделать еще один шаг в идеализации трансформатора, когда рассматривается его принцип действия. Примем, что

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 \approx 0.$$

Отсюда

$$-\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{n}.$$

Уравнение показывает, что кривые изменения токов $i_2(t)$ и $i_1(t)$

подобны. Действительное направление тока $i_2(t)$ противоположно на-

правлению тока $i_1(t)$ относительно одноименных выводов обмоток w_2 и w_1 . Поэтому м.д.с. первичной и вторичной обмоток действуют встречно и уравновешивают друг друга.

В идеализованном трансформаторе электрическая энергия передается полностью из первичной обмотки во вторичную и далее в приемник, хотя обмотки имеют только магнитную связь и отделены друг от друга электрической изоляцией.

Свойство саморегулирования тока i_1 при изменении нагрузки (тока i_2). При увеличении тока i_2 (активно-индуктивная нагрузка) м.д.с. вторичной обмотки $W_2 i_2$ также увеличивается. Эта м.д.с. стремится ослабить поток Φ . Уменьшение потока Φ приводит к уменьшению э.д.с. e_1 и нарушению электрического равновесия $e_1(t) = -u_1(t)$ и росту тока i_1 в первичной обмотке. Равенство $e_1(t) = -u_1(t)$ восстанавливается, когда

рост м.д.с. $W_1 i_1$ компенсирует рост м.д.с. $W_2 i_2$, т. е. при увеличении тока i_1 . Изменение нагрузки трансформатора, т. е. тока i_2 , приводит к соответствующему изменению тока i_1 , так что выполняется закон сохранения энергии и обеспечивается баланс мгновенных мощностей:

$$p_1(t) = p_2(t) \quad \text{или} \quad u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2.$$

Применение трансформаторов. Трансформаторы играют важную роль в электроэнергетических системах. Они осуществляют трансформацию токов и напряжений, обеспечивая экономичную передачу и распределение энергии. На гидро- и теплостанциях электрическая энергия вырабатывается генераторами с номинальным напряжением от 6,3 до 38,5 кВ. Электроэнергия передается потребителям по линиям электропередачи (ЛЭП) при напряжении 500, 750 или 1050 кВ. При этом достигается увеличение пропускной способности ЛЭП, уменьшение токов и потерь мощности в ее проводах. Номинальное напряжение большинства потребителей электроэнергии выбирают равным 220, 380 или 660 В. Мощные электродвигатели работают при напряжении 6 и 10 кВ. Ввод электроэнергии в города и на промышленные предприятия осуществляется ЛЭП с напряжением 220, 110 и 35 кВ. Поэтому снижение напряжения осуществляется в несколько ступеней.

Таким образом, возникает необходимость создания разветвленной системы повысительных и понизительных подстанций с множеством трансформаторов. Суммарная мощность всех трансформаторов, установленных на подстанциях, обычно в 6—7 раз больше суммарной мощности потребителей.

Трансформаторы в системах распределения электроэнергии называют силовыми. Они имеют номинальную мощность от 10 кВ·А до 1 млн. кВ·А.

В устройствах промышленной электроники применяют силовые трансформаторы малой мощности (1—1000 В·А) с несколькими вторичными обмотками, предназначенными для питания изолированных друг от друга цепей. Кроме того, в этих устройствах используют специальные импульсные и высокочастотные трансформаторы.

Свойство трансформации напряжений и токов используется также в измерительных трансформаторах. Включая амперметры или вольтметры во вторичную цепь измерительных трансформаторов, можно обезопасить обслуживающий персонал, так как эти цепи имеют небольшие напряжения и хорошее заземление.

При сварочных работах, при пользовании ручным электроинструментом с помощью трансформаторов можно снизить напряжение до

безопасного и технически оправданного уровня, что широко применяют на практике. Во всех случаях используют *важнейшее свойство транс-*

форматоров — возможность передачи энергии при отсутствии электрической связи между обмотками.

Уравнения электрического состояния обмоток трансформатора.

Реальное магнитное поле трансформатора несколько отличается от идеализированного. На рис. 2 показаны действительные направления мгновенных токов обмоток и несколько магнитных линий трансформатора, у которого первичная и вторичная обмотки расположены концентрически на среднем стержне магнитопровода. Рабочий поток Φ замыкается по боковым стержням. Такую конструкцию имеют большинство однофазных трансформаторов. Часть магнитных линий сцеплена только с первичной или только со вторичной обмоткой. Эти линии определяют дополнительные потокоцепления обмоток $\Psi_{1\text{рас}}$ и $\Psi_{2\text{рас}}$, которые называют потокоцеплениями рассеяния. Изменения потокоцеплений $\Psi_{1\text{рас}}$ и $\Psi_{2\text{рас}}$ вызывают э.д.с.

$$e_{1\text{рас}}(t) = - \frac{d\Psi_{1\text{рас}}}{dt}, \quad e_{2\text{рас}}(t) = - \frac{d\Psi_{2\text{рас}}}{dt}.$$

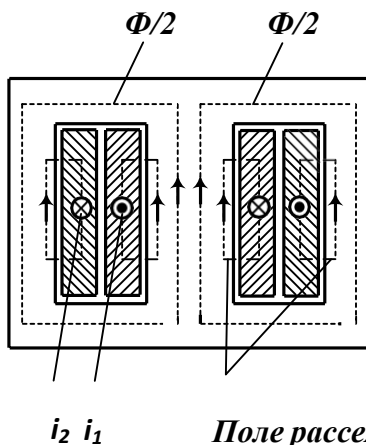


Рис. 2. Магнитное поле трансформатора

Как и во всякой индуктивной катушке, при синусоидальном изменении магнитного поля э.д.с. рассеяния можно заменить падением напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния. Тогда для комплексных величин получаем выражения:

$$E_1 = j \omega L_{\text{рас}1} I_1, \quad E_2 = j \omega L_{\text{рас}2} I_2$$

$$\begin{array}{c}
 \cdot \\
 jX_{1pac} I_1, \\
 \cdot \\
 = E_{2pac} \\
 \cdot \\
 j \\
 X \\
 \\
 2 \\
 p \\
 \\
 a \\
 c \\
 \\
 I \\
 \\
 2 \\
 \cdot
 \end{array}
 = -$$

Магнитные линии поля рассеяния частично проходят вне магнитопровода, по немагнитной среде, и сопротивления рассеяния X_{1pac} и X_{2pac}

можно считать постоянными.

При изучении эксплуатационных свойств трансформаторов следует также принимать во внимание активные сопротивления обмоток трансформатора R_1 и R_2 . С учетом этих обстоятельств полные уравнения электрического состояния обмоток трансформатора имеют вид

$$U_1 = -E_1 + jX_{1pac}I_1 + R_1I_1,$$

$$E_2 = U_2 + jX_{2pac}I_2 + R_2I_2,$$

где $E_1 = -j\omega W_1\Phi$ и $E_2 = -j\omega W_2\Phi$ - э. д. с, возбуждаемые рабочим

потокком Φ ; $U_2 = Z_{пр}I_2$ — напряжение на вторичной обмотке, равное U_2

падению напряжения на сопротивлении приемника $Z_{пр}$.

При отсутствии нагрузки ($Z_{пр} \rightarrow \infty$) ток вторичной обмотки равен нулю. В этом режиме — режиме холостого хода трансформатора — поток в магнитопроводе создается током первичной обмотки. Зависимость тока холостого хода $I_{1х}$ от напряжения на первичной обмотке U_1 называют характеристикой холостого хода (рис. 3). Она имеет такой же вид, как и вольт- амперная характеристика любой другой индуктивной катушки с магнитопроводом. По мере насыщения магнитопровода ток $I_{1х}$ быстро нарастает. Поэтому при проектировании трансформаторов амплитуду магнитной индукции B_m выбирают не более 1,6—1,7 Тл.

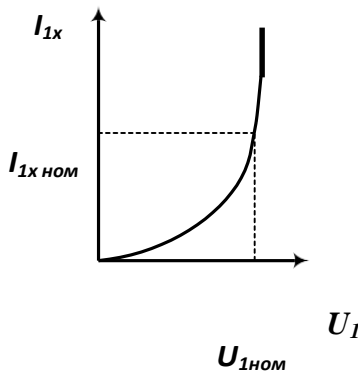


Рис. 3. Характеристика холостого хода трансформатора

При подключении приемника появляется ток I_2 и изменяется ток I_1 . Несмотря на изменения м.д.с. $w_1 i_1$ и $w_2 i_2$ первичной и вторичной обмоток, амплитуда потока Φ_m в магнитопроводе остается практически неизменной. Э.д.с. E_1 незначительно отличается от напряжения U_1 , так

как трансформатор стремятся проектировать со свойствами, по возможности близкими к идеализованному. Таким образом, и у реальных силовых трансформаторов

$$U_{1m} \approx E_{1m} = w_1 \omega \Phi_m.$$

При постоянном значении действующего напряжения $U_1 = \text{const}$ сохраняется постоянной амплитуда потока Φ_m в магнитопроводе.

Составляющая тока первичной обмотки I_{1x} , создающая магнитный поток в трансформаторе при холостом ходе, постоянна. Составляющая I_{12} , компенсирующая магнитное действие тока вторичной обмотки, зависит от нагрузки трансформатора.

Энергетические диаграммы. Передача энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную происходит посредством переменного магнитного поля в магнитопроводе. Интенсивность необратимой передачи энергии характеризуется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = E_1 I_1 \cos \varphi,$$

где φ — сдвиг фаз между э.д.с. и током.

Периодическое изменение магнитного поля в магнитопроводе сопровождается магнитными потерями, мощность этих потерь зависит от частоты и амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе, а также от материала последнего. При постоянном действующем напряжении U_1 на первичной обмотке магнитные потери постоянны и не зависят от нагрузки. В обмотках трансформатора также возникают тепловые потери

$$\Delta P_{э1} = R_1 I_1^2 \quad \Delta P_{э2} = R_2 I_2^2 \quad \text{которые пропорциональны квадратам}$$

токов в обмотках, т. е. квадрату коэффициента нагрузки

$$\beta = S / S_{ном},$$

где $S_{ном}$ — номинальная полная мощность трансформатора.

Активная мощность P_1 первичной обмотки трансформатора превышает активную мощность P_2 вторичной обмотки. Разность ($P_1 - P_2$) равна мощности потерь в обмотках $\Delta P_{э1}$ и $\Delta P_{э2}$, что в магнитопроводе

показано на энергетической диаграмме рис. 4,а. Реактивная мощность Q_2 , передаваемая в приемник, также отличается от реактивной мощности Q_1

первичной обмотки. Дело в том, что реактивная мощность связана с образованием рабочего поля в магнитопроводе ($Q_{\text{раб}}$), а также полей рассеяния ($Q_{1\text{рас}}$ и $Q_{2\text{рас}}$). Максимальная скорость обмена энергией между источником питания и переменным рабочим полем в магнитопроводе и

полями рассеяния характеризуется соответствующими реактивными мощностями. Баланс реактивных мощностей в трансформаторе отображен на диаграмме рис. 4, б.

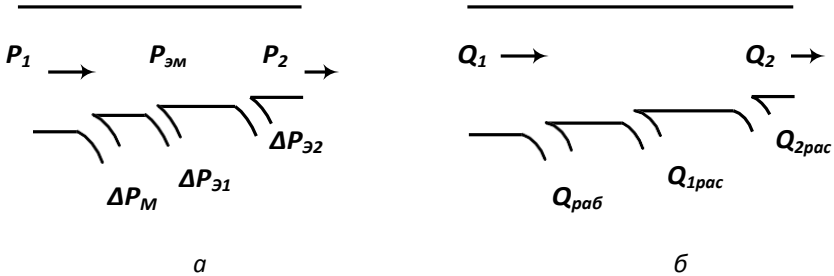


Рис. 4. Диаграмма активных (а) и реактивных (б) мощностей трансформатора

Коэффициент передачи полной мощности

$$K_S = \frac{S_2}{S_1} = \frac{S_2}{S_2 + \sqrt{(\Delta P_M + \Delta P_\Sigma)^2 + (Q_{раб} + Q_{рас})^2}} =$$

$$= \frac{\beta \cdot S_{2ном}}{\beta \cdot S_{2ном} + \sqrt{\Delta P + \Delta P_\Sigma)^2 + (Q_{раб} + Q_{рас})^2}}$$

При номинальной нагрузке силовых трансформаторов $K_{Sном} = 0,95$ $0,995$ (в зависимости от номинальной мощности трансформатора). При уменьшении коэффициента нагрузки β значение $K_{Sном}$ падает. Если трансформатор передает в приемники только активную мощность, то можно говорить о его коэффициенте полезного действия $\eta = P_2/P_1$.

При отсутствии нагрузки ($S_2 = 0$) $K_{Sном}$ и η равны нулю, так как сохраняются неизменными реактивная мощность $Q_{раб}$ и потери в магнитопроводе ΔP_M . Несмотря на высокий коэффициент передачи, абсолютное значение тепловых потерь в мощных трансформаторах может быть значительным. Например, у трансформатора мощностью $S_{ном} = 2500$ кВА, $\Delta P_M = 6,5$ кВт и $\Delta P_\Sigma = 22$ кВт (при полной нагрузке).

В трансформаторе образуются тепловые потоки, направленные от внутренних частей к внешней поверхности, от которой теплота отводится непосредственно в окружающую среду. Температура перегрева внешней

поверхности трансформатора относительно окружающей среды определяется допустимой температурой нагрева изоляции обмоток. Обычная лаковая и хлопчатобумажная изоляция проводов и каркаса обмоток рас-

считана на верхний предел температуры, равный 100—130°C. Превышение ее на несколько десятков градусов во много раз сокращает срок службы изоляции. При высокой температуре органические вещества, входящие в состав изоляции, теряют механическую и электрическую прочность, вследствие чего возникает электрический пробой изоляции и короткое замыкание витков обмоток. Поэтому конструкция трансформатора должна обеспечивать достаточное охлаждение всех его частей.

С ростом номинальной мощности трансформаторов возрастают потери в обмотках и магнитопроводе из-за увеличения их объема, однако естественная поверхность охлаждения расширяется в меньшей степени. Поэтому приходится снижать потери в обмотках путем уменьшения плотности тока в проводах, т. е. увеличивать площадь поперечного сечения провода. Уже при мощности в несколько тысяч вольт-ампер эта мера становится недостаточной, и магнитопровод с обмотками погружают в бак, заполненный минеральным (трансформаторным) маслом. В баке устанавливается конвекционный процесс передачи теплоты маслом от внутренних сильно нагретых частей к стенкам; с другой стороны, стенки охлаждаются естественной циркуляцией воздуха.

Внешняя характеристика трансформатора. Вместе с промышленной сетью, к которой подключена первичная обмотка, трансформатор является источником питания для приемников, подключенных к вторичной обмотке. Поэтому трансформатор можно рассматривать как активный двухполюсник A относительно выводов вторичной обмотки (рис. 5,а). Важнейшая характеристика активного двухполюсника — внешняя вольт-амперная характеристика, представляющая собой зависимость напряжения U_2 на выходе от тока I_2 при $U_1 = \text{const}$.

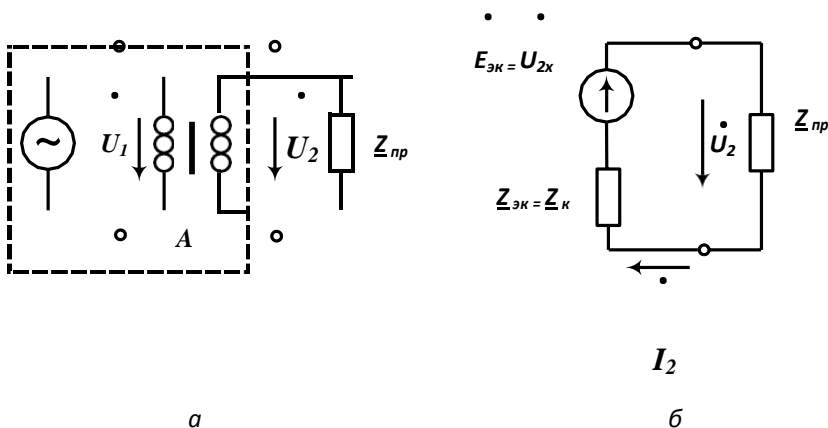


Рис. 5. Трансформатор как активный двухполюсник (*а*)
и его схема замещения (*б*)

У идеализированного трансформатора $U_2 = U_1/n = \text{const}$, т.е. напряжение U_2 не зависит от нагрузки. Поэтому его внешняя характеристика идет параллельно оси I_2 , напряжение U_2 равно напряжению холостого хода U_{2x} (рис. 6).

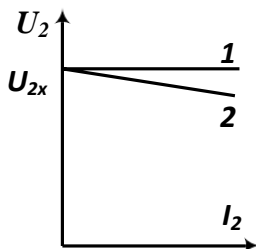


Рис. 6. Внешние характеристики идеализированного (1) и реального (2) трансформаторов

У реального трансформатора существуют э.д.с. от полей рассеяния и падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток. При обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается с ростом тока I_2 , и внешняя характеристика имеет вид наклонной прямой. Чем больше сопротивления R_1 и $X_{1рас}$, R_2 и $X_{2рас}$, тем больше отличаются идеальные напряжения от реальных $U_{1ид}$ от U_1 и $U_{2ид}$ от U_2 . Изменение вторичного напряжения $\Delta U_2 = U_{2x} - U_2$.

У силовых трансформаторов при номинальном токе $I_{2ном}$ отношение $\Delta U_2 / U_{2x}$ имеет порядок 5—10%. Трансформаторы проектируют так,

чтобы напряжение холостого хода U_{2x} было на 5% больше номинального напряжения его приемников. Кроме того, предусмотрена возможность изменения числа витков одной из обмоток, т. е. величины

$$n = w_1/w_2 \approx U_1/U_{2x}.$$

В трансформаторах, работающих при постоянном значении первичного напряжения U_1 изменяют число витков w_2 ; в сетях с колебаниями напряжения U_1 предпочитают изменять w_1 . Изменение числа витков производят встроенным переключателем с ручным приводом, выведенным

наружу. Выпускаются также трансформаторы с автоматическим регулированием числа витков под нагрузкой. При временной недогрузке трансформатора уменьшают U_{2x} . При питании приемника через длинную линию значение U_{2x} увеличивают, чтобы скомпенсировать падение на-

пряжения в линии.

У сварочных трансформаторов, которыми комплектуют сварочные агрегаты, внешняя характеристика должна быть крутопадающей: напряжение возникновения дуги должно быть много больше напряжения горения. Увеличения $\Delta U_2 / U_{2x}$ достигают с помощью сопротивлений $X_{1рас}$ и $X_{2рас}$, размещая первичную и вторичную обмотки на различных стержнях магнитопровода.

Для расчета изменения вторичного напряжения ΔU_2 удобно рассматривать трансформатор как двухполюсник и использовать метод эквивалентного генератора. Э.д.с. эквивалентного генератора равна напряжению U_{2x} холостого хода:

$$E_{ЭК} = \dot{U}_{2x} = -\dot{U}_{1НОМ} / n.$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора можно определить, как у обычного источника питания, по данным режимов холостого хода и короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора:

$$Z_{ЭК} = \frac{U_{2x}}{I} = -\frac{U_{1НОМ}}{nI_{2К}}.$$

Однако измерения в режиме короткого замыкания невозможны из-за перегрева обмоток трансформатора. Поэтому опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении U_1 так, чтобы ток вторичной обмотки был равен номинальному току $I_{2НОМ}$. Такую величину U_1 принято называть напряжением короткого замыкания и обозначать $U_{1К}$. Величина $Z_{ЭК}$ названа в теории трансформатора сопротивлением короткого замыкания, ее обозначают Z_K . Модуль сопротивления

$$Z_{ЭК} = Z_K = \frac{U_{1К}}{nI_{2НОМ}}.$$

Аргумент комплексного сопротивления $\underline{Z}_K = Z_K e^{j\varphi}$ определяют по активной мощности P_K потерь в режиме короткого замыкания:

$$\cos \varphi_K = P_K / (U_{1К} I_{1К}).$$

Заметим, что опыты холостого хода и короткого замыкания проводят на

заводе-изготовителе при испытании трансформатора. Величины P_k и U_{1k} вносят в паспорт трансформатора, причем U_{1k} выражают в процентах от $U_{1ном}$. Величину $U_{1k}/U_{1ном}$ $U_{k*}\%$ называют относительным

напряжением короткого замыкания. Согласно схеме замещения рис. 5,б.

$$U_2 = E_{\text{ЭК}} \cdot Z_{\text{ЭК}} \cdot I_2 = U_{2\text{X}} \cdot Z_{\text{К}} \cdot I_2.$$

Относительное изменение вторичного напряжения $\Delta U_{2*} = \Delta U_2 / U_{2\text{X}} = (U_{2\text{X}} - U_2) / U_{2\text{X}} \approx Z_{\text{К}} I_2 / U_{2\text{X}}$ зависит от коэффициента нагрузки $\beta = S / S_{\text{НОМ}} = I_2 / I_{2\text{НОМ}}$:

$$\Delta U_{2*} = \beta \cdot \frac{Z_{\text{К}} I_{2\text{НОМ}}}{U_{2\text{X}}}$$

Учитывая, что $U_{1\text{К}} / n = Z_{\text{К}} I_{2\text{НОМ}}$, а $U_{2\text{X}} = U_1 / n$, тогда

$$\Delta U_2 \approx \beta U_{1\text{К}} / U_1 = \beta U_{\text{К}*}.$$

Изменение вторичного напряжения пропорционально коэффициенту нагрузки. При номинальной нагрузке $\Delta U_{2*} = U_{\text{К}*}$.

2. Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном стенде. Электрические схемы лабораторной установки показаны на рис. 7. и 8. Схемы собираются последовательно, с проведением соответствующих замеров и заполнением опытными данными таблиц.

При снятии внешней характеристики нагрузкой трансформатора является активное сопротивление $R_{\text{Н}}$ (рис. 8). Выключатель $B_{\text{Н}}$ должен быть замкнут, изменяя $R_{\text{Н}}$ можно получить 4 значений сопротивления нагрузки.

3. Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторным стендом, выбрать необходимые приборы для выполнения работы в соответствии с электрической схемой.
2. Собрать электрическую схему опыта холостого хода по рис. 7.
3. После проверки схемы преподавателем включить выключатель ВЗ. Увеличивая ЛАТРОМ напряжение на первичной обмотке U_1 от 0 до $(1,1 \dots 1,2)U_{1\text{НОМ}}$, записать 8 - 12 значений показания приборов в табл. 1.

(Паспортные данные трансформатора указаны на стенде.)

4. Провести опыт холостого хода при номинальном напряжении на первичной обмотке $U_1 = U_{1\text{ном}}$. Результаты измерений записать в табл. 2.

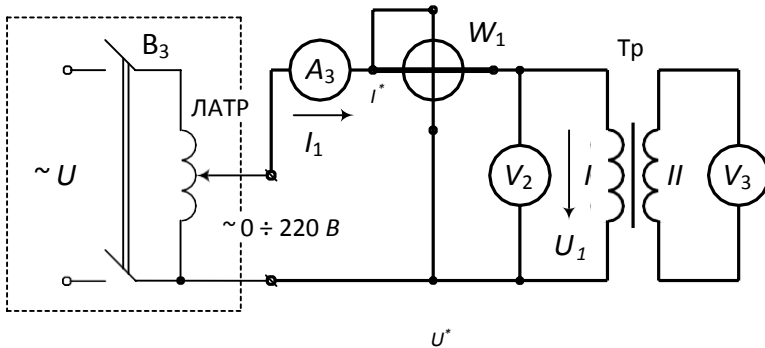


Рис. 7. Схема опыта холостого хода

5. Собрать электрическую схему по рис. 8 для исследования трансформатора в нагрузочном режиме. Изменяя нагрузку трансформатора R_H , снять внешнюю и рабочие характеристики при $U_1 = U_{1\text{ном}}$. Результаты занести в табл. 3. Первую запись показаний провести при отключенной нагрузке. Обратить особое внимание на изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 .

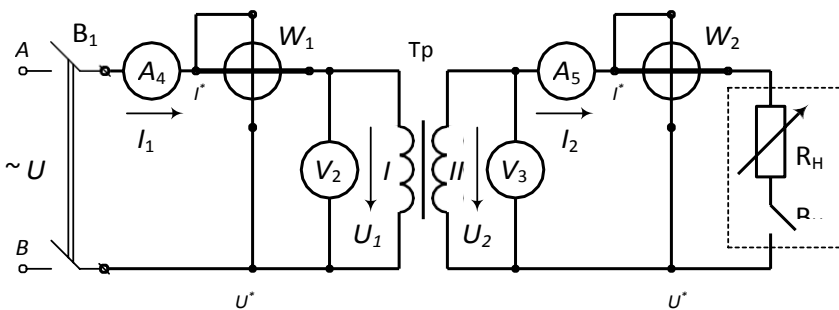


Рис. 8. Электрическая схема для исследования трансформатора в нагрузочном режиме

Таблица 1

Экспериментальные данные опыта холостого хода

$I_1, \text{мА}$	0									
$U_1, \text{В}$	0									

Таблица 2

Данные характеристики холостого хода

Измерено				Вычислено		
$U_{1\text{ном}}$	$I_{1\text{х}}$	$P_{\text{х}}$	$U_{2\text{х}}$	n	$I_{1\text{х}}/I_{1\text{ном}}$	$\cos\varphi_{\text{х}}$
В	А	Вт	В	-	-	-

Таблица 3

Данные нагрузочного режима

№	Измерено						Вычислено		
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	β	η	$\cos\varphi_1$
	В	А	Вт	В	А	Вт			
1									
2									
3									
4									
5									

4. Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 построить характеристику холостого хода трансформатора $U_1 = f(I_1)$. Отметить точку номинального напряжения $U_1 = U_{1\text{ном}}$.

2. По данным табл. 2 вычислить коэффициент трансформации: $n = U_{1\text{м}} / U_{2\text{д}}$. Коэффициент мощности трансформатора при холо-

$$\text{стом ходе } \cos\varphi_{\text{х}} = \frac{P_{\text{д}}}{U_{1\text{м}} \cdot I_{1\text{д}}}$$

грузки:

$$\beta^3 = \frac{P_2}{P_1} \cdot \cos \varphi_1$$

Коэффициент полезного действия $\frac{P_2}{P_1}$
Коэффициент

д
а
н
н
ы

мощности трансформатора: $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$

4. По данным табл.3. построить на одном чертеже рабочие характеристики трансформатора $U_2(\beta)$, $I_1(\beta)$, $\eta(\beta)$, $\cos \varphi_1(\beta)$. При построении для каждой величины показать свою ось ординат и масштаб. Все характеристики строить в равномерном масштабе, не прерывая осей.

6
л
л

5. Сделать вывод по результатам работы, дать анализ полученных характеристик.

3

Контрольные вопросы

1. Для какой цели предназначен трансформатор?
- о
п
р
е
л
т
к
о
ф
и
ц
е
н
т
н
а
2. Почему в режиме холостого хода нагревается сердечник трансформатора, а первичная и вторичная обмотки не нагреваются?
3. Каково влияние режима работы трансформатора на результирующий магнитный поток в магнитопроводе?
4. Как проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания и с какой целью?
5. Что понимается под номинальным режимом работы трансформатора, какими номинальными величинами он характеризуется?
6. Назовите причины снижения напряжения U_2 при работе трансформатора под нагрузкой. Как оценивают снижение напряжения на практике?
7. Какие потери имеют место в трансформаторе и как они зависят от нагрузки?

Лабораторная работа № 22

Исследование генератора постоянного тока независимого возбужде-

Цель работы:

1. Изучение основных свойств генератора постоянного тока независимого возбуждения.
2. Умение анализировать полученные характеристики генератора.

1. Теоретические сведения

Назначение и устройство машин постоянного тока. Машины постоянного тока используют в качестве генераторов и двигателей. Электрическая энергия постоянного тока, вырабатываемая генераторами, служит для питания двигателей постоянного тока, электролитических ванн, электромагнитов различного назначения, аппаратуры управления и контроля и т. д. В настоящее время генераторы постоянного тока во многих установках заменяют полупроводниковыми преобразователями переменного тока в постоянный.

Двигатели постоянного тока применяют на транспорте, для привода некоторых металлорежущих станков, прокатных станов, подъемно-транспортных машин, экскаваторов и т. д. Одной из главнейших причин применения двигателей постоянного тока вместо наиболее широко распространенных асинхронных двигателей является возможность плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне и получения желаемых механических характеристик.

Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. неподвижная часть машины, называемая статором (рис. 1,а), состоит из массивного стального корпуса 1 , к которому прикреплены главные полюсы 2 и дополнительные полюсы $б$. Исходя из технологических и других соображений главные полюсы изготовляют чаще из отдельных стальных листов; иногда их изготовляют сплошными. Из отдельных листов либо сплошными изготовляют и дополнительные полюсы. Перечисленные детали статора являются также и деталями его магнитопровода. На главных полюсах размещают катушки одной или нескольких обмоток возбуждения 3 , на дополнительных полюсах — катушки 7 обмотки дополнительных полюсов.

В подшипниковых щитах, прикрепленных с торцевых сторон к корпусу, расположены подшипники, несущие вал 4 вращающейся части машины, называемой якорем (рис. 1,а и б). На валу закреплен цилиндрический сердечник якоря 5 , который для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов набирают из стальных лис-

тов. В пазах, расположенных по поверхности якоря, уложена обмотка якоря 8. Так же, как обмотку возбуждения и обмотку дополнительных полюсов, ее изготавливают из медного изолированного провода. Выводы от обмотки якоря присоединяют к расположенному на валу коллектору 9. Последний представляет собой цилиндр, состоящий из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллектору с помощью пружин прижимаются графитные, угольно-графитные или металлографитные щетки 10. Щетки расположены в специальных щеткодержателях 11. Щетки расположены в специальных щеткодержателях 12.

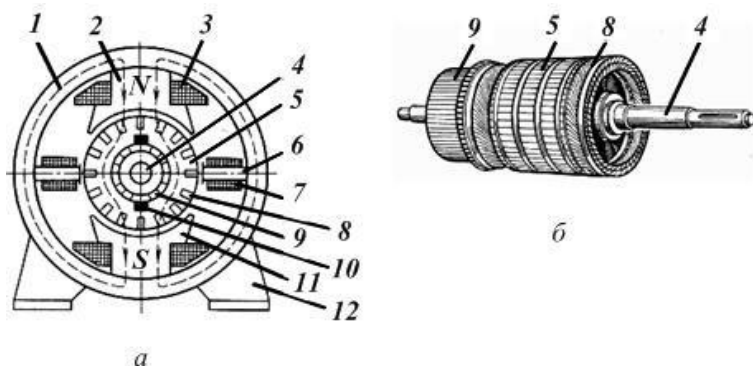


Рис. 1. Устройство (а) и якорь (б) машины постоянного тока Обмотка

возбуждения машины питается постоянным током и служит для создания основного магнитного поля. Главные полюсы имеют полюсные наконечники 11, служащие для получения по большей части окружности якоря одного и того же воздушного зазора между сердечником якоря и главными полюсами. Это необходимо для получения на большей части окружности якоря одной и той же магнитной индукции, а в проводниках обмотки якоря — постоянной по значению ЭДС. Дополнительные полюсы предназначены, для уменьшения искрения под щетками.

С помощью коллектора и щеток вращающаяся обмотка якоря соединяется с внешней электрической цепью.

На рис. 1,а показана машина постоянного тока с двумя главными полюсами. В зависимости от мощности и напряжения машины могут иметь и большее число полюсов. При этом соответственно увеличиваются число комплектов щеток и дополнительных полюсов. Крепление машины к фундаменту, специальным салазкам или металлоконструкции осуществляется с помощью лап 12. Корпус некоторых машин снабжается для крепления специальными фланцами.

Благодаря полюсным наконечникам магнитная индукция в воздушном зазоре распределяется примерно по трапециoidalному закону

(рис. 2,а и б). У поверхности якоря при $\alpha = 0$ магнитная индукция $B = 0$; с увеличением α магнитная индукция сначала возрастает, под большей частью северного полюса имеет постоянное значение, а при $\alpha = 180^\circ$ уменьшается до нуля. В пределах от $\alpha = 180^\circ$ до 360° магнитная индукция изменяется по такому же закону, но условно считается отрицательной.

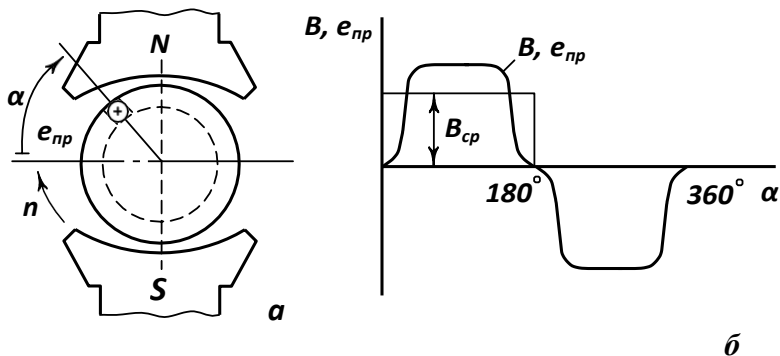


Рис. 2. К вопросу распределения магнитной индукции в воздушном зазоре и характер изменения ЭДС проводника

Направление ЭДС проводника, находящегося в пазу магнитопровода якоря, определяется по правилу правой руки, а ее значение по формуле

$$e_{np} = Blv,$$

где B – магнитная индукция, Тл; l – длина проводника, м; v – скорость перемещения проводника, м/с.

Очевидно, при $v = const$ $e_{np} \sim B$ и график $B(\alpha)$ в другом масштабе представляет собой график $e_{np}(\alpha)$. Изменение знака ЭДС e_{np} означает изменение ее направления по сравнению с положительным направлением, показанным на рис. 2,а.

Устройство обмоток якорей. Обмотки якорей машин постоянного тока состоят из отдельных секций, имеющих одинаковые числа витков. Каждая секция размещается в двух пазах магнитопровода якоря, находящихся под разными полюсами. Часть секции, расположенная в одном пазу, называется секционной стороной. Выводы каждой секции присоединяются к двум коллекторным пластинам, к каждой из которых присоединяется еще по одному выводу от других секций.

В зависимости от номинальных значений мощности, напряжения и частоты вращения находят применение различные типы обмоток якорей.

Простейшими из них являются петлевая и волновая обмотки. Двухвитковые секции указанных обмоток показаны соответственно на рис. 3. Петлевая рис. 3,а и волновая рис. 3,б обмотки отличаются порядком соединения с коллекторными пластинами и друг с другом. Щетки делят обмотку на две параллельные ветви.

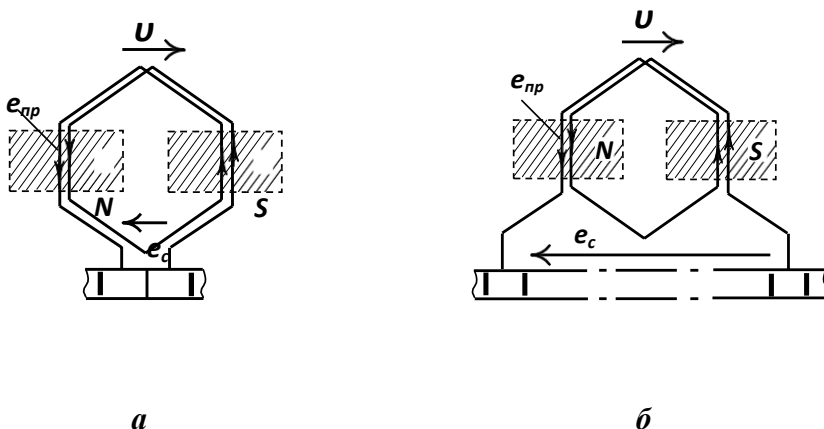


Рис. 3. Секция петлевой (а) и волновой (б) обмотки якоря

Принцип действия генератора. Напомним, что генератором называется электрическая машина, преобразующая подводимую к ней механическую мощность в электрическую мощность.

Простейший генератор можно представить в виде медного витка, равномерно вращающегося в постоянном магнитном поле (рис. 4). Заметим, что виток представляет собой одну секцию обмотки якоря, а магнитное поле создается главными полюсами. Концы такого витка выведены на две пластины (полукольца) коллектора. К этим коллекторным пластинам прижимаются две неподвижные щетки, к которым подключается внешняя цепь с потребителем электроэнергии сопротивлением R_n .

Пусть виток приводится в равномерное вращение со скоростью n от внешнего источника механической мощности, например какого-либо приводного двигателя *ПД*. Активные стороны витка пересекают силовые линии постоянного магнитного поля и в них по закону электромагнитной индукции наводятся ЭДС e_1 и e_2 направление которых определяется по правилу правой руки. При вращении витка по направлению движения часовой стрелки в его верхней активной стороне, находящейся под северным магнитным полюсом N , наведенная ЭДС направлена от нас, а в нижней активной стороне витка, находящейся под южным магнитным полюсом S - к нам. По ходу витка эти ЭДС складываются, и ре-

зультурующая ЭДС всего витка $E = e_1 + e_2$. Если внешняя цепь замк-

нута, то в ней потечет ток I , направленный от нижней щетки к потребителю и от него — к верхней щетке. Нижняя щетка оказывается положительным выводом генератора, а верхняя — отрицательным. При повороте витка на 180° его активные стороны из зоны одного магнитного полюса переходят в зону другого магнитного полюса и направления ЭДС в них изменяется на обратное. Однако одновременно с этим верхняя коллекторная пластина выходит из контакта с верхней щеткой и входит в контакт с нижней щеткой, а нижняя коллекторная пластина входит в контакт с верхней щеткой. Такая синхронная смена зон магнитных полюсов активными сторонами рамки и щеток коллекторными пластинами не изменяет направление тока во внешней цепи. Таким образом, вращающиеся с витком коллекторные пластины и неподвижные щетки не только обеспечивают электрическое соединение витка с внешней цепью, но и являются специальным переключающим устройством, выполняющим роль механического выпрямителя тока.

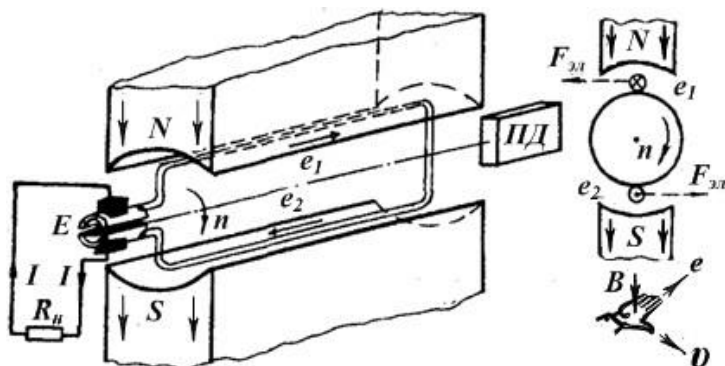


Рис. 4. Работа машины постоянного тока генератором

Будучи постоянными по направлению, ток и ЭДС на щетках и во внешней цепи оказываются переменными по величине, т. е. пульсирующими. Это связано с изменением положения витка в магнитном поле при его вращении и, как следствие, изменение угла между векторами мгновенной скорости и магнитной индукции. Отмеченную пульсацию тока и ЭДС можно сгладить путем увеличения числа витков, вращающихся в магнитном поле, и соответствующего увеличения числа коллекторных пластин, что, и имеет место в реальных машинах (рис. 5).

Рассмотренный нами виток представлял собой, как было отмечено, одну секцию обмотки якоря. В реальных же машинах обмотка якоря состоит из большого количества таких секций, в которых происходят те же

самые процессы, лишь сдвинутые по времени. Причем каждая секция может состоять не из одного, из нескольких витков. Активные стороны секций укладываются в пазы сердечника якоря таким образом, чтобы одна сторона располагалась под магнитным полюсом одной полярности, а другая — под полюсом другой полярности. Лишь при соблюдении этого условия наводимые в сторонах витка ЭДС будут складываться. Все секции обмотки якоря соединяются между собой через коллекторные пластины.

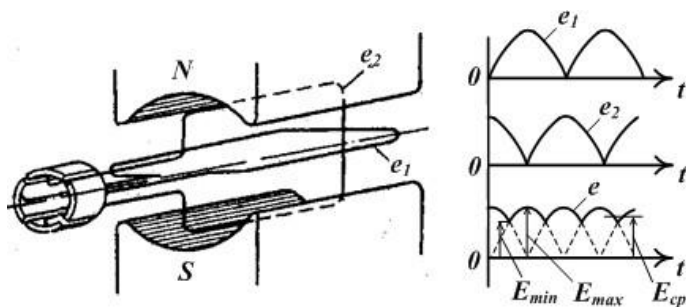


Рис. 5. Сглаживание пульсации ЭДС на щётках

Рассмотрим явления, сопутствующие описанному режиму работы машины постоянного тока генератором. Во-первых, при подключении к щеткам генератора внешней нагрузки R_H по этой нагрузке и по обмотке якоря, имеющей сопротивление $R_я$, потечет ток I . С появлением тока в обмотке якоря, находящейся в магнитном поле, на активные стороны ее витков (секций) начнут действовать электромагнитные силы $F_{эм}$. Поскольку токи в сторонах витков якоря будут направлены в ту же сторону, что и вызвавшие их ЭДС, то найденные по правилу левой руки направления этих сил создают момент $M_{пр}$, противодействующий вращению якоря. Если скорость вращения якоря n постоянна, то вращающий момент $M_{вр}$ приводного двигателя ПД должен быть равен противодействующему электромагнитному моменту $M_{пр}$ генератора: $M_{вр} = M_{пр}$. Таким образом, для вращения якоря и производства электрической энергии необходимо подводить к генератору и затрачивать механическую энергию и тем большую, чем больше ток якоря. Во-вторых, в соответствии со схемой замещения цепи якоря генератора постоянного тока (рис. 6) можно записать по 2-му закону Кирхгофа уравнение ее электрического состояния:

$$E = IR_H + IR_я.$$

Но $IR_H = U$, т. е. напряжению на нагрузке или на выходных зажимах генератора. Тогда уравнение относительно напряжения на зажимах генератора:

$$U = E - IR_{я.}$$

Это выражение, называемое уравнением напряжений генератора, указывает, что напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС E , индуцированной (наведенной) в обмотке якоря машины, на величину внутреннего падения напряжения в ней $IR_{я.}$

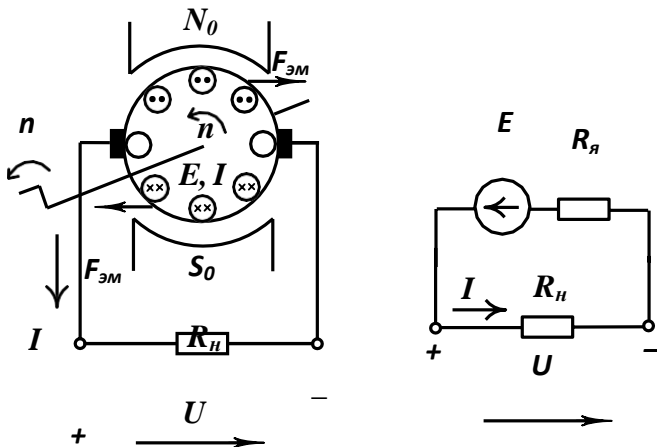


Рис. 6. Схема замещения якоря генератора

От уравнения напряжений легко перейти к уравнению баланса мощностей цепи якоря, умножив для этого обе части уравнения на одно и то же значение тока I :

$$UI = EI - I^2R_{я.}$$

Это уравнение говорит о том, что электрическая мощность на зажимах генератора и отдаваемая потребителю $P = UI$ равняется электромагнитной мощности преобразования $P_{эм} = EI$, развиваемой генератором из получаемой от приводного двигателя такой же по величине механической мощности $P_{мех} = M_{вп} \omega$, минус мощность электрических потерь на активном сопротивлении обмотки якоря $P_{эл} = I^2R_{я.}$

Генераторы постоянного тока. Способы возбуждения генераторов. Возбуждение магнитного поля в генераторах производится или ток от независимого источника (рис. 7,а), постоянными магнитами или от якоря

самого генератора — самовозбуждением (рис. 7,б, в, г). В самовозбуждающихся генераторах обмотки возбуждения могут быть включе-

ны параллельно якорю (рис. 7,б), последовательное ним (рис. 7,в) либо параллельно и последовательно (рис. 7,г). В соответствии с этим различают генераторы независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Чтобы создать необходимую МДС возбуждения $w_B I_B$ и уменьшить потребление энергии обмоткой при независимом и параллельном возбуждении, уменьшают ток возбуждения I_B , увеличивая число витков w обмотки. Обмотка выполняется из сравнительно тонкого провода и имеет большое сопротивление (сотни Ом). Ток возбуждения составляет 1—5% от номинального тока якоря.

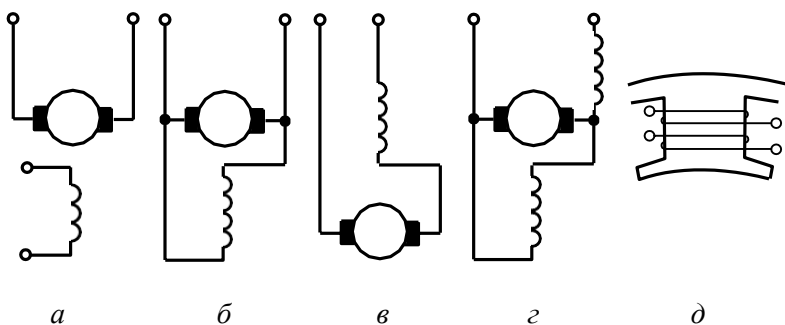


Рис. 7. Схемы возбуждения генераторов

Через обмотку последовательного возбуждения проходит полный ток якоря. Число витков катушек возбуждения невелико, их выполняют из проводов большого сечения, сопротивление обмотки незначительно.

В машинах смешанного возбуждения на основных полюсах имеется по две катушки: одна принадлежит параллельной обмотке, другая — последовательной (рис. 7, г, д).

МДС обмоток возбуждения создают магнитные потоки полюсов. Зависимость потока полюса Φ от МДС возбуждения или от тока возбуждения определяют на основании закона полного тока или экспериментально и называют магнитной характеристикой машины. Она представляет собой узкую петлю гистерезиса, так как магнитная цепь машины выполнена из магнитомягкого материала. Приблизительно ее представляют одной кривой (рис. 8). Поскольку при $\omega = const$ ЭДС якоря пропорциональна потоку полюса: $E = c\omega\Phi$, зависимость $\Phi(I_B)$ подобна зависимости $E(I_B)$, называемой характеристикой холостого хода генератора.

Вначале поток Φ и ЭДС E возрастают почти пропорционально току возбуждения I_B . С увеличением I_B кривая $\Phi(I_B)$ плавно загибается

и рост магнитного потока и ЭДС резко замедляется — наступает магнитное насыщение.

Магнитная цепь машины рассчитана так, что ее состояние при $I_B = I_{B.ном}$ соответствует точке $\Phi_{ном}$ на середине «колена» кривой $\Phi(I_B)$.

При отсутствии тока в обмотке возбуждения в якоре наводится небольшая ЭДС (3—5% от $E_{ном}$) за счет остаточной намагниченности (гистерезиса) магнитной системы машины. Этот малый остаточный поток $\Phi_{ост}$ обеспечивает самовозбуждение генераторов.

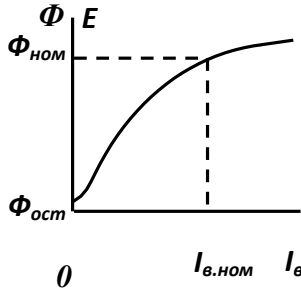


Рис. 8. Магнитная характеристика машины $\Phi(I_B)$ или характеристика холостого хода генератора $E(I_B)$

Рассмотрим процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения при холостом ходе.

При вращении якоря с номинальной частотой в слабом магнитном поле $\Phi_{ост}$, созданном остаточной намагниченностью, в обмотке якоря наводится небольшая ЭДС. Она создает небольшой ток в цепи возбуждения (приемник отключен), который увеличивает магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_{ост} + \Phi_B$. Наводимая в якоре ЭДС возрастает, что приводит к дальнейшему увеличению тока возбуждения, потока и ЭДС — происходит процесс самовозбуждения. Но с насыщением магнитной цепи рост ЭДС E от тока I_B замедляется.

Очевидно, для самовозбуждения необходимо выполнение определенных условий, прежде всего наличие остаточного потока $\Phi_{ост}$. Во-вторых, подключение обмотки к якору должно быть таким, чтобы направление возбуждаемого и остаточного потоков совпадало. В-третьих, сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического, а частота вращения якоря — номинальной. Процесс самовозбуждения заканчивается через 1—2 с, после чего к генератору подключают приемник.

Эксплуатационные характеристики генераторов Практический интерес представляют два основных качества генератора как источника электропитания: степень постоянства напряжения при увеличении тока нагрузки и возможность плавного регулирования этого напряжения.

Рассмотрим эксплуатационные особенности **генератора независимого возбуждения**. Схема генератора независимого возбуждения приведена на рис. 9,а. Реостат возбуждения здесь включают по схеме потенциометра с выводом средней точки, чтобы изменять не только значение, но и направление тока возбуждения и тем самым изменять направление ЭДС якоря и полярность напряжения на его зажимах.

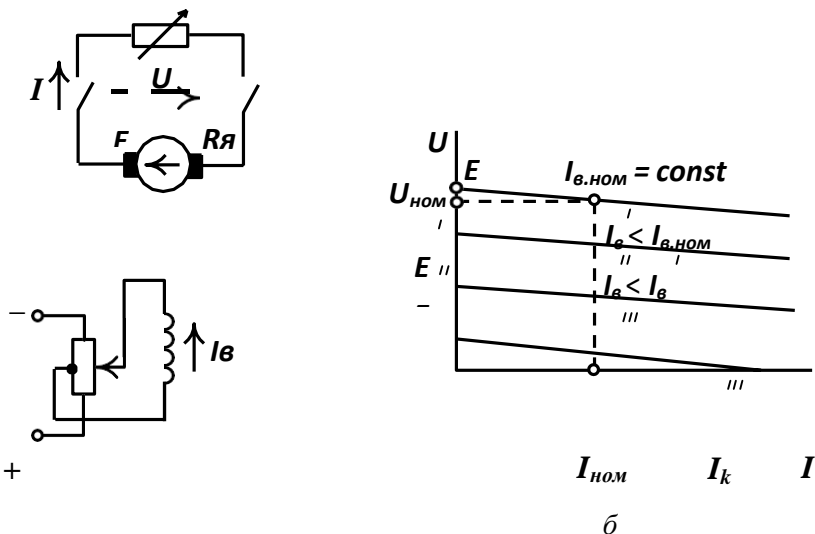


Рис. 9. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора независимого возбуждения

Внешнюю характеристику этого генератора снимают при $I_{e, ном} = const$. Она представляет (рис. 9,б) слегка наклонную прямую. Из уравнения $U = E - R_f I$ следует, что напряжение нерегулируемого генератора $E = const$ с увеличением тока нагрузки снижается из-за падения напряжения в якоре. Снижение напряжения от холостого хода $U_x = E$ до номинального $U_{ном}$ составляет 6—12% от U_x . При коротком замыкании во внешней цепи якоря ток превышает номинальный в десятки раз: $U=0, I_k = E_{ном}/R_f = 10 \div 20 I_{ном}$ (точка I_k выходит за пределы графика). Такой ток опасен для коллектора, щеток, обмотки. Электрическую машину защищают от токов короткого замыкания быстродействующими реле и контакторами.

Перегрузка током ($2-2,5$) $I_{ном}$ допускается лишь кратковременно (несколько секунд), когда нагрев машины не успевает достичь опасных значений, а искрение неинтенсивно.

Если устанавливать различные значения $I_g = const$, например $I_g < I_{г. ном}$ значения ЭДС E будут другими. При этом получают семейство внешних характеристик (см. рис. 9,б). Из этого рисунка видно, что генератор независимого возбуждения позволяет плавно регулировать током возбуждения напряжение от нуля до номинального. Такой генератор используют, например, для плавного регулирования частоты и направления вращения двигателей постоянного тока в системах автоматического управления, приводах прокатных станков, экскаваторов, локомотивов и других механизмов.

Постоянство напряжения генератора также поддерживают регулированием тока возбуждения и, следовательно, ЭДС E . Это делается с помощью автоматических регуляторов.

Независимое возбуждение имеют также генераторы высокого напряжения, низкого напряжения, но больших токов (для электролиза) и тахогенераторы.

Тахогенератор — микромашина, в которой создаётся постоянный магнитный поток (с помощью постоянных магнитов). При этом его ЭДС пропорциональна частоте вращения. Тахогенератор служит для измерения частоты вращения и датчиком скорости в системах автоматического регулирования.

Необходимость в дополнительном источнике питания цепи возбуждения генератора представляет определенное неудобство, особенно при автономной работе. От него свободны генераторы с самовозбуждением.

Внешняя характеристика **генератора параллельного возбуждения** (рис. 10,а) (кривая 2 на рис. 10,б) отличается от характеристики при независимом возбуждении (прямая 1) более резким спадом напряжения с увеличением тока нагрузки. При номинальном токе нагрузки снижение составляет 10—20%. Это следствие непрерывного уменьшения тока возбуждения $I_g = U/R_g$, магнитного потока Φ и ЭДС E при уменьшении напряжения U на якоре, питающего обмотку возбуждения. При достижении током значений $2,5-3I_{ном}$ напряжение падает так быстро, что генератор «размагничивается», «сбрасывая нагрузку».

Внезапное короткое замыкание также опасно, так как ток КЗ создается в течение некоторого времени ЭДС, близкой к номинальному значению.

Для получения неизменного напряжения при увеличении тока нагрузки нужно увеличивать поток возбуждения Φ . Это делается автома-

тически либо регулятором тока возбуждения, либо с помощью добавочной обмотки при смешанном возбуждении машины.

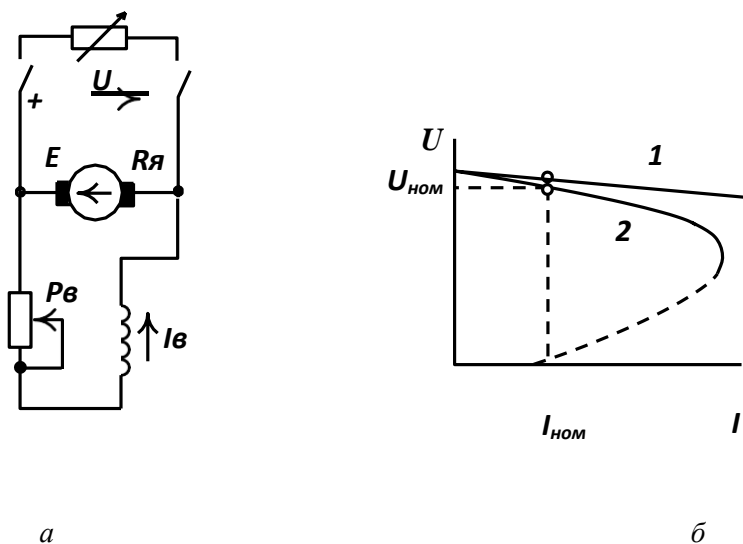


Рис. 10. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора параллельного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения имеет и параллельную и последовательную обмотки (рис. 11,а). При холостом ходе этот генератор обладает всеми качествами генератора параллельного возбуждения $\Phi = \Phi_g$. С увеличением тока нагрузки возрастает и магнитный поток $\Phi(I)$, создаваемый последовательной обмоткой, увеличиваются результирующие потоки полюсов $\Phi = \Phi_g + \Phi(I)$, а вместе с тем — ЭДС и напряжение на нагрузке. Число витков последовательной обмотки можно выбрать так, чтобы напряжение с ростом нагрузки оставалось практически неизменным (кривая 1 на рис. 11,б).

Конечно, включение обеих обмоток при этом должно быть согласным, чтобы их потоки складывались. При встречном включении обмоток напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко падает (кривая 2 на рис. 11,б). Такая внешняя характеристика необходима, например, при электродуговой сварке для постоянства тока при колебаниях сопротивления цепи вследствие изменения длины дуги.

Большинство выпускаемых машин имеет смешанное возбуждение.

Генераторы последовательного возбуждения имеют внешнюю характеристику, сходную с характеристикой холостого хода. Их применяют лишь в особых случаях.

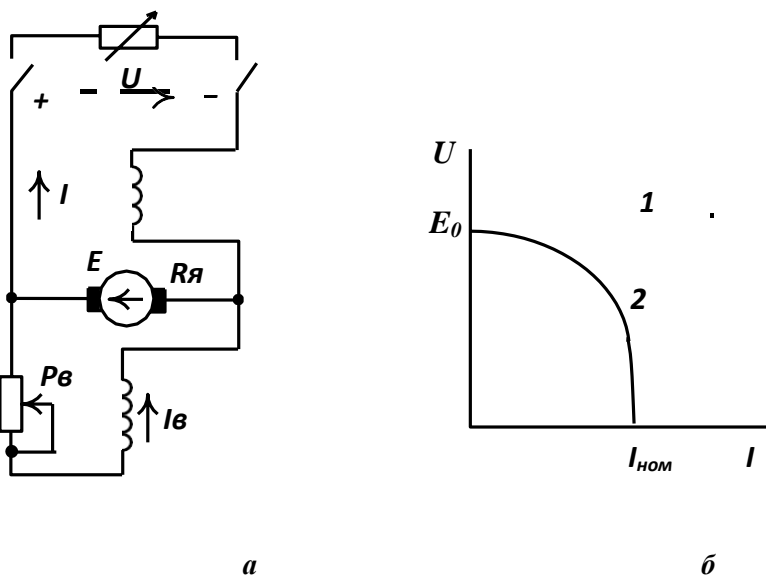


Рис. 11. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора смешанного возбуждения

2. Программа работы

1. Собрать электрическую цепь лабораторной установки для исследования генератора независимого возбуждения в соответствии со схемой, приведенной на рис. 12.

2. После проверки схемы преподавателем установить реостат R_d в цепи ротора приводного асинхронного двигателя в положение 1 (сопротивление R_d полностью введено). Включить асинхронный двигатель, замкнув выключатель B_1 , затем (универсальным переключателем УП) постепенно переводя R_d из положения 1 в положение 4, вывести сопротивление из цепи ротора.

3. Снять характеристику холостого ход генератора $U = f(I_e)$ при $I_a=0$, $\omega = \omega_{ном}$ (разомкнуть выключатель в цепи нагрузки).

Измерить величину остаточной ЭДС E_0 на зажимах генератора при разомкнутой цепи возбуждения (B_3 - отключен). Данные занести в табл. 1.

Замкнуть цепь возбуждения генератора выключателем B_3 и измерить U_r , I_e , плавно увеличивая ток возбуждения с помощью ЛАТРа до

наибольшего значения 6–7 точек восходящей ветви характеристики. Данные занести в табл. 1.

Уменьшая ток возбуждения, записать данные 6–7 точек нисходящей ветви характеристики. Последнюю точку нисходящей ветви характеристики снять при отключенном автомате B_3 .

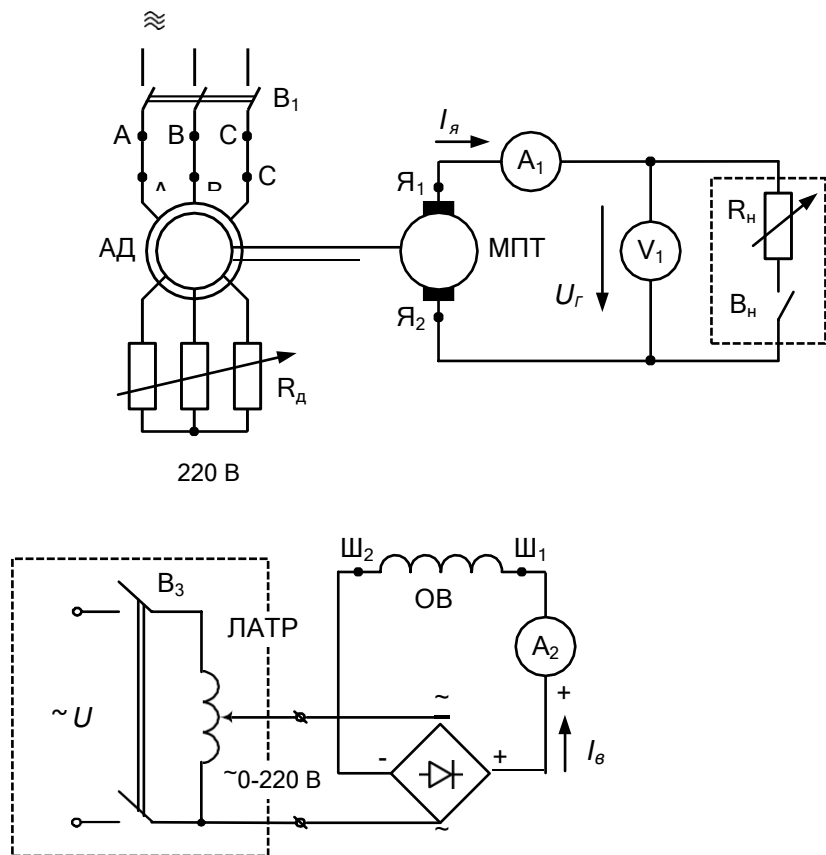


Рис. 12. Электрическая схема генератора независимого возбуждения

4. Снять внешнюю характеристику генератора $U = f(I_r)$ при $I_B = I_{B, \text{ном}}$, $\omega = \omega_{\text{ном}}$. Для этого ЛАТРОм установить номинальный ток возбуждения генератора согласно таблице номинальных данных. Установить максимальную нагрузку генератора, переведя переключатель на грузки

R_H в положение 4. Уменьшая нагрузку генератора переключателем R_H записать ток якоря и напряжение генератора в табл.2. Последней снять точку холостого хода (выключатель B_H разомкнут).

5. Снять регулировочную характеристику $I_{\epsilon} = f(I_{\gamma})$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$. Для этого установить номинальную нагрузку генератора ($R_{\text{н}}$ в 4-е положение). Записать I_{ϵ} и I_{γ} в табл.3. Уменьшать нагрузку генератора. При этом напряжение генератора будет возрастать. Для поддержания его неизменным необходимо уменьшать ток возбуждения с помощью ЛАТРа. Последней снимается точка холостого хода при $I_{\gamma}=0$ (выключатель нагрузки $B_{\text{н}}$ отключен). Результаты занести в табл. 3.

Таблица 1
Данные характеристики холостого хода генератора

	Восходящая ветвь					Нисходящая ветвь				
U_{Γ} , В										
I_{ϵ} , А										

Таблица 2
Экспериментальные данные внешней характеристики

U_{Γ} , В					
I_{γ} , А					

Таблица 3
Данные регулировочной характеристики

I_{γ} , А					
I_{ϵ} , А					

3. Обработка результатов работы

1. По данным табл. 1 построить характеристику холостого хода генератора $U = f(I_{\epsilon})$ при $I_{\gamma}=0$, $\omega = \omega_{\text{ном}}$. Отметить на ней точку $U_{\text{ном}}$. Сделать выводы о возможности плавного регулирования напряжения генератора.

2. По данным табл. 2 построить внешнюю характеристику генератора $U_{\Gamma} = f(I_{\gamma})$ при $I_{\epsilon \text{ ном}}$, $\omega_{\text{ном}}$. Сделать вывод о свойствах генератора как источника электропитания, о степени постоянства напряжения при увеличении тока нагрузки.

3. По данным табл. 3 построить регулировочную характеристику генератора $I_{\epsilon} = f(I_{\gamma})$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$. Сделать вывод о том, как нужно

изменять ток возбуждения, чтобы с изменением тока нагрузки напряжение генератора поддерживать постоянным.

4. Контрольные вопросы

1. Изложите принцип работы генератора постоянного тока.
2. Опишите устройство промышленного генератора постоянного тока.
3. Какую роль играет коллектор в машинах постоянного тока?
4. От чего зависят ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока.
5. Перечислите способы возбуждения генераторов постоянного тока и нарисуйте соответствующие схемы включения.
6. Запишите и поясните уравнение баланса мощностей цепей якоря генератора и двигателя.
7. Что такое реакция якоря и ее роль в машинах постоянного тока?
8. Каким образом осуществляется процесс самовозбуждения генераторов параллельного возбуждения?
9. Какой генератор применяют для плавного регулирования напряжения?
10. Каким образом можно получить напряжение генератора, которое бы мало зависело от тока нагрузки?
11. Что такое обратимость машин постоянного тока?

Лабораторная работа №24

Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

1. Цель работы

- Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором.
- Ознакомиться со способами пуска.
- Установить влияние добавочного сопротивления в цепи ротора на вид механических характеристик двигателя.
- Оценить свойства двигателя из анализа полученных рабочих и механических характеристик

2. Теоретическая часть

Назначение и области применения асинхронных машин

Асинхронные машины относятся к электрическим машинам переменного тока, и как любой электромеханический преобразователь, обладают свойствами обратимости, т. е. служат для взаимного преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию или наоборот, механической энергии в электрическую.

Магнитное поле асинхронной машины создается трехфазным, двухфазным или однофазным источником переменного напряжения. В соответствии с этим различают трех-, двух- или однофазные асинхронные машины.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность специальных асинхронных двигателей - несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватт. Электрические машины общего назначения выпускаются в виде серий, охватывающих определенный диапазон мощностей, частот вращения и напряжений. Машины одной серии обладают общностью конструктивных решений и технологии их изготовления, а также однотипностью применяемых материалов.

В настоящее время наиболее распространенной серией асинхронных двигателей является серия 4А, охватывающая ряд машин мощностью от 0,06 до 400 кВт. Кроме основного исполнения имеется ряд модификаций двигателей с повышенным пусковым моментом, многоскоростные, малошумные и т. д. Выпускаются также асинхронные двигатели новой серии АИ, которые имеют улучшенные массогабаритные показатели и характеристики, охватывая диапазон мощностей от 0,025 до 400 кВт.

Устройство асинхронных машин

Асинхронные машины состоят из двух частей: неподвижной - статора и вращающейся - ротора.

Магнитопровод или сердечник статора представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных колец (рис. 1) изготовленных из листов электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм, причем эти кольца электрически изолируют друг от друга оксидированием или лакировкой. При сборке магнитопровода - пакетировании, кольца, полученные штамповкой, ориентируют так, чтобы выштампованные пазы образовывали каналы для укладки проводников обмотки.

Собранный пакет колец статора запрессован в корпус - станину, который имеет соединительные элементы (лапы, торцовый фланец и т. д.) для крепления к неподвижному жесткому основанию. Обмотку статора выполняют в виде многовитковых катушек, имеющих, как правило, одинаковые размеры.

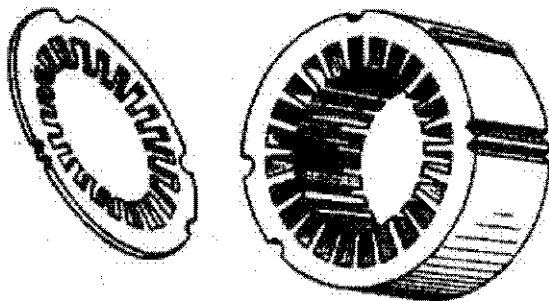


Рис.1. Пакет штампованных листов статора

Лобовые части катушек отгибают и они проходят вдоль торцовой поверхности пакета статорных колец (рис. 2).

Ротор асинхронной машины набирают из штампованных дисков, изготовленных также из листов электротехнической стали, которые запрессовывают на вал, входящий при сборке машины в боковые подшипниковые щиты.

По конструкции роторной обмотки асинхронные машины делятся на два основных типа: с короткозамкнутым и фазным ротором.

Обмотки короткозамкнутых роторов выполняются литыми чаще всего из алюминия или его сплавов. При заливке одновременно отливаются стержни, лежащие в пазах и короткозамыкающие кольца с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками (рис. 3). Этот тип обмотки называют часто «белчьим колесом» (рис. 4).

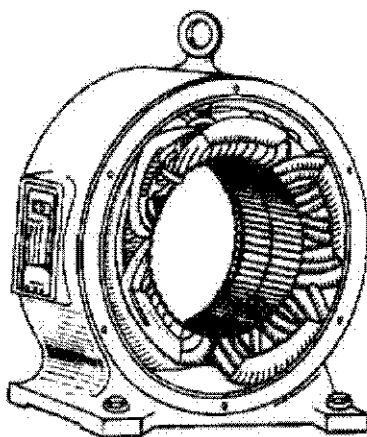


Рис. 2. Внешний вид статора со стороны лобовой части трехфазной обмотки

Короткозамкнутые роторы крупных машин и специальных машин с улучшенными пусковыми характеристиками выполняются сварными. Стержни ротора из меди или латуни привариваются к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляются стержни обмотки.

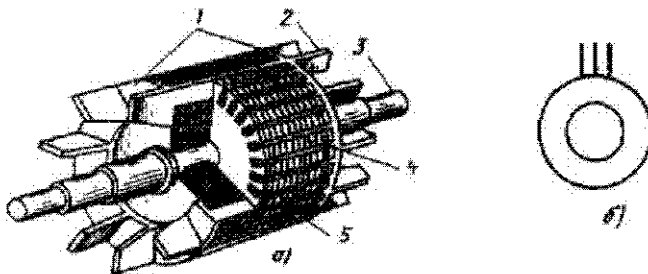


Рис. 3. Конструкция (а) и условное графическое обозначение (б) ротора с короткозамкнутой обмоткой; 1 - замыкающие кольца; 2 - вентиляционные лопасти; 3 - вал; 4 - пакет ротора; 5 - стержни обмотки

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку, которая выполняется так же, как и обмотка статора. Трехфазная обмотка соединяется звездой, выводы ее присоединены к контактным кольцам (рис. 5), поэтому асинхронную машину с фазным ротором также называют асинхронной машиной с контактными кольцами.

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку, которая выполняется так же, как и обмотка статора. Трехфазная обмотка соединяется звездой, выводы ее присоединены к контактным кольцам (рис. 5), поэтому асинхронную машину с фазным ротором также называют асинхронной машиной с контактными кольцами.

Контактные кольца, опрессованные пластмассой, насаживаются на вал двигателя, они выполняются чугунными или медными. Выводные концы обмотки ротора подводятся к трем кольцам через внутреннее отверстие вала ротора.

Токосъемное устройство состоит из щеток и щеткодержателей. Щеткодержатели укреплены на изолированной части пальца, металлический конец которого ввинчен в прилив подшипникового щита.

Кольца с помощью щеток подключают к трехфазному реостату для улучшения пусковых характеристик или для регулирования частоты вращения ротора. В некоторых сложных электрических приводах к кольцам ротора подводят регулируемое напряжение от неподвижного источника питания, что также позволяет изменять по желанию частоту вращения ротора асинхронной машины. Обычно в рабочем режиме асинхронного двигателя кольца фазного ротора замыкают накоротко.

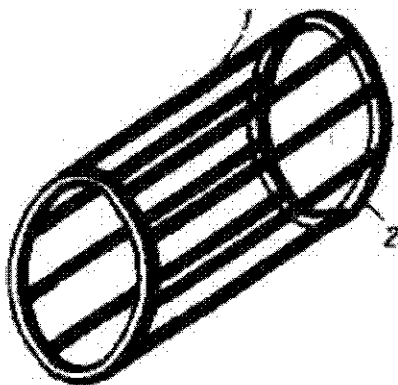


Рис. 4. Короткозамкнутая обмотка типа «беличье колесо»: 1 — стержни обмотки; 2 — замыкающее кольцо

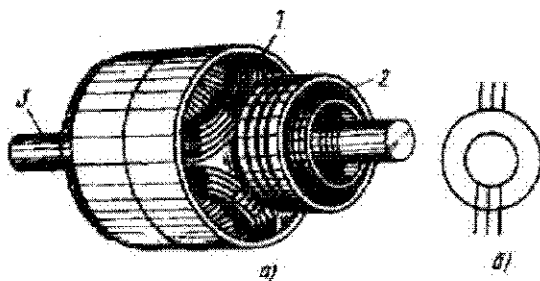


Рис. 5. Внешний вид ротора (а) и условное графическое обозначение (б) асинхронного двигателя с контактными кольцами: 1 - обмотка; 2 - контактные кольца; 3 - вал

Наибольшее распространение получили двигатели с короткозамкнутым ротором, которые дешевле в изготовлении и надежнее в эксплуатации.

В основе работы электрических машин переменного тока, в том числе и асинхронных машин, лежит использование вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора.

Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки

Рассмотрим создание вращающегося магнитного поля на упрощенной модели статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя (рис. 6, а). В пазах статора уложены три катушки, каждая из которых является фазой трехфазной обмотки и представлена одним витком. Катушки соединены между собой по схеме звезды (или треугольника) и подключены к трехфазной сети (рис. 6, б). Катушки совершенно идентичны и расположены симметрично, поэтому векторная диаграмма токов, будет также симметрична (рис. 6, в).

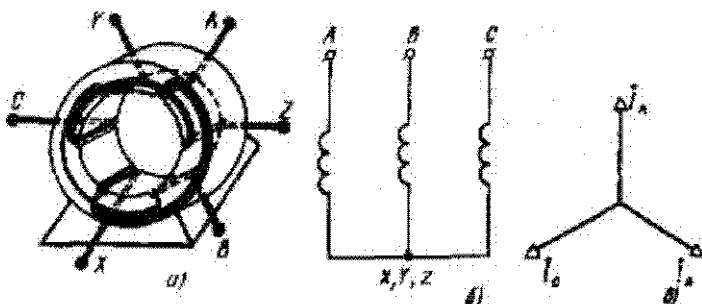


Рис. 6. Упрощенная модель статорной обмотки (а), схема соединения катушек (б) и векторная диаграмма токов (в)

На рис. 7, а показаны графики мгновенных значений токов обмотки статора. На рис. 7, б — г изображены поперечные сечения асинхронной машины для упрощенной модели трехфазной обмотки рис. 6, а.

Эффект вращения магнитного поля трехфазной обмотки можно наглядно показать на примере картин результирующего магнитного поля этой обмотки для нескольких моментов времени, например, при максимуме фазных токов i_A , i_B и i_C . Условимся за положительное направление тока принимать ток, направленный от начала обмотки к ее концу, таким образом в момент времени t_1 ток в катушке А-Х достигает положительного максимума (рис. 7, а) и направлен от зажима А к зажиму Х (рис. 7, б). В тот же момент времени токи в двух других катушках отрицательны, т. е. направлены от концов катушки (Y и Z) к их началам (B и C). Направления токов в проводниках обмотки показаны на рис. 7, б-г знаками креста

и точки. Силовые линии магнитного поля охватывают проводники с одинаковым направлением тока. В момент времени t_1 две магнитные линии этого поля изображены на рис. 7, б пунктиром, а ось симметрии результирующего магнитного поля совпадает с осью симметрии катушки $A-X$. Рассмотрим направления токов в катушках в два последующих момента времени t_2 и t_3 , соответствующих максимумам токов в катушках $B-Y$ и $C-Z$ (рис. 7, в, г).

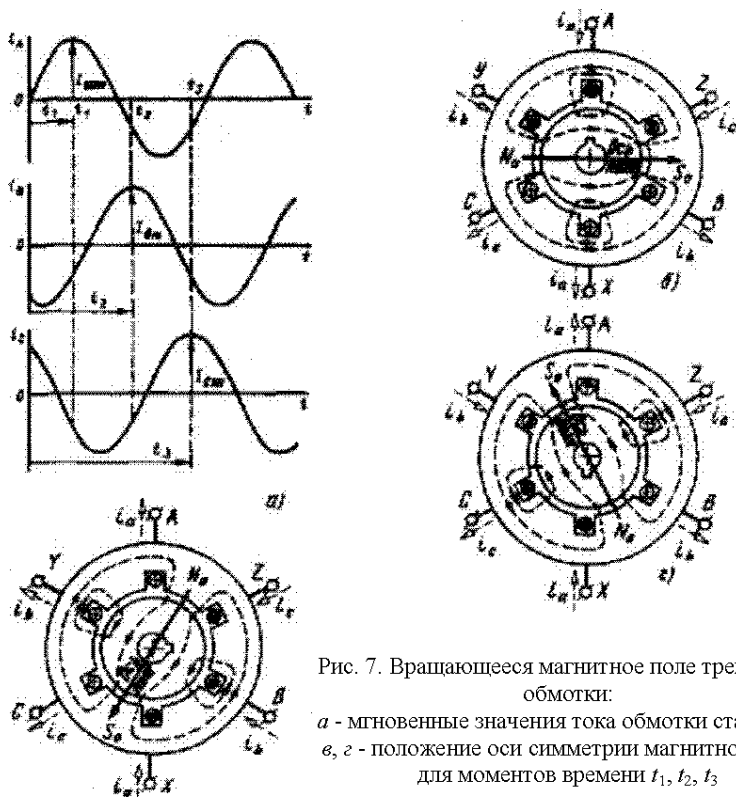


Рис. 7. Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки:
 а - мгновенные значения тока обмотки статора; б, в, г - положение оси симметрии магнитного поля для моментов времени t_1, t_2, t_3

Выяснив направление токов, легко провести ось симметрии результирующего магнитного поля катушек. Сопоставление магнитных полей на рис. 7, б-г указывает на вращение оси симметрии и всей картины магнитного поля. За один период T изменения токов магнитное поле делает полный оборот.

Реверсирование магнитного поля (изменение направления вращения) осуществляется переключением на зажимах источника питания двух выводов трехфазной обмотки (например, B и C). При этом фазы B и C об-

мотки как бы меняются местами, т. е. изменяется направление вращения магнитного поля.

На рис. 7 ось симметрии магнитного поля вращается по часовой стрелке, при переключении фаз *B* и *C* вращение будет против часовой стрелки.

При проектировании обмотки асинхронных машин добиваются того, чтобы закон распределения магнитной индукции *B* вдоль воздушного зазора между статором и ротором был близок к синусоидальному, поэтому вращающееся магнитное поле, созданное статором, принято упрощенно изображать в виде эпюры, показанной на рис. 8, *a*.

Рассмотренное магнитное поле имеет одну пару полюсов ($p = 1$).

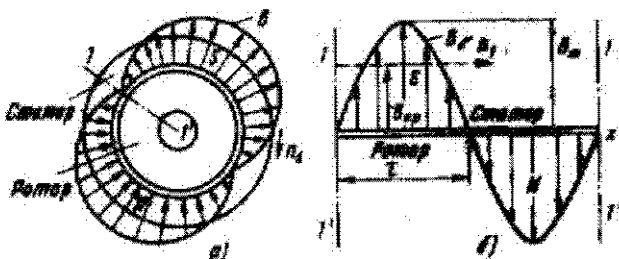


Рис. 8. Магнитное поле однофазной обмотки:

a - картина магнитного поля двухполюсной обмотки; *b* - опора распределения магнитного поля в воздушном зазоре на линейной развертке

Нетрудно определить частоту вращения магнитного поля: полный оборот совершается за время, равное периоду изменения токов статорной обмотки T ; за одну секунду число оборотов равно $1/T$, с учетом того, что $T = 1/f_1$ (f_1 - частота токов статора), частота вращения магнитного поля n_1 , об/мин, определяется формулой

$$n_1 = 60 f_1.$$

Видоизменив обмотку статора, можно получить вращающееся магнитное поле с несколькими парами полюсов. Схематически устройство обмоток для случая $p = 2$ показано на рис. 9, *a*.

Число пар полюсов можно сделать любым, при этом формула для частоты вращения магнитного поля будет иметь вид

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$

Условимся, что в обозначениях величин индекс *1* относится к статору, а *2* - к ротору. Допустимо не ставить индекс для величины, отношение к статору или ротору которой очевидно. Например, частота сети f , частота вращения ротора n или угловая скорость ротора Ω .

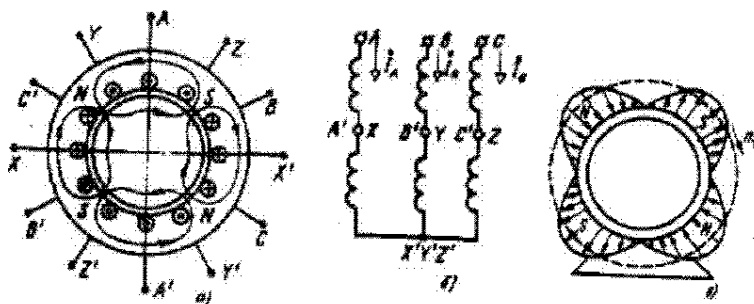


Рис. 9. Эшора вращающегося магнитного поля:
a - распределение тока по проводникам обмотки статора;
б - схема соединения катушек обмотки статора; *в* — эшора магнитного поля двухполюсной машины

Принцип действия асинхронных двигателей

Принцип действия асинхронных двигателей основан на силовом взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами, возникающими в обмотке ротора под действием наведенной в ней ЭДС.

На рис. 10, *a* показан один из проводников обмотки ротора, расположенный во вращающемся магнитном поле, созданном токами статорной обмотки. Линии магнитной индукции пересекают проводник, индуцируя в нем ЭДС. Направление ЭДС определено по правилу правой руки, при этом учтено, что относительное движение проводника в магнитном поле направлено против часовой стрелки.

Возникновение ЭДС в роторной обмотке возможно только в случае, если ротор и магнитное поле статора вращаются с разными скоростями, т. е. относительная скорость движения проводника в магнитном поле отлична от нуля.

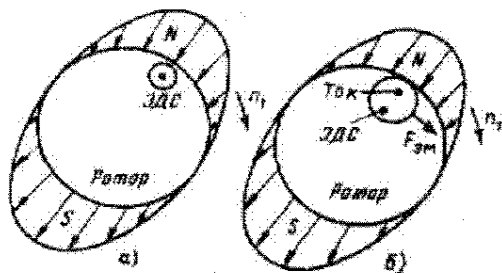


Рис. 10. Проводник ротора во вращающемся магнитном поле статора: *a* - наведение ЭДС в проводнике ротора; *б* - возникновение электромагнитных сил

Это обстоятельство определяет название электрической машины - асинхронная (несинхронная), в отличие от синхронной, у которой ротор

вращается со скоростью магнитного поля, созданного статорной обмоткой.

На проводник с током, находящийся в магнитном поле статорной обмотки, будет действовать электромагнитная сила F , направление которой определено по правилу левой руки. Под действием электромагнитных сил ротор будет вращаться в направлении вращения магнитного поля, при этом уменьшается относительная скорость движения проводника в поле, следовательно, изменяются ЭДС, ток и электромагнитные силы.

Установившийся режим наступит при такой постоянной частоте вращения ротора $n_2 = const$, когда электромагнитные силы будут уравновешены механическими силами торможения (сопротивления).

Скольжение

В теории асинхронных машин используется понятие скольжения

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Скольжение - безразмерная величина, которую выражают и в процентах

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

В режимах, близких к номинальному, разница в частотах вращения ротора и магнитного поля статора невелика и колеблется в пределах нескольких процентов.

Скольжение может выражаться и через угловую скорость ротора и вращающего магнитного поля статора, измеряемую в радианах в секунду

$$\omega = 2\pi n/60, \quad s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}.$$

Электродвижущие силы обмоток статора и ротора

В отличие от машин постоянного тока, в которых ЭДС наводится только во вращающейся обмотке, в асинхронных машинах ЭДС создается и во вращающейся и в неподвижной обмотках. Мгновенное значение ЭДС, наводимой вращающимся магнитным полем машины в проводнике, может быть определено по закону электромагнитной индукции

$$e(x) = l v_{отн} B_x,$$

где l — активная длина проводника, $v_{отн}$ — относительная скорость движения проводника в магнитном поле с магнитной индукцией B_x .

Частота ЭДС обмотки статора равна частоте напряжения сети. Частота вращения магнитного поля относительно вращающихся проводников

ротора, называется частотой скольжения n_s , она определяется разностью частот вращения магнитного поля и ротора

$$n_s = n_1 - n_2 = sn_1.$$

Следовательно, частота ЭДС обмотки ротора

$$f_2 = sf_1.$$

Частота ЭДС обмотки ротора прямо пропорциональна частоте сети и скольжению. Для неподвижного ротора $s=1, f_2=f_1$.

Действующее значение ЭДС в обмотке статора

$$E_1 = 4,44f_1W_1\Phi_mk_{01},$$

где k_{01} — обмоточный коэффициент, учитывающий, что каждая фаза статора состоит секций, сдвинутый в пространстве относительно друг друга, f_1 — частота тока статора, W_1 -число витков фазы, Φ_m -амплитуда магнитного потока.

Для неподвижного ротора ЭДС будет выражаться аналогичной формулой

$$E_2 = 4,44f_1W_2\Phi_mk_{02}.$$

Для вращающегося ротора относительная скорость проводника в магнитном поле будет определяться скольжением и, следовательно, ЭДС вращающегося ротора будет прямо пропорциональна скольжению. Условимся далее все электрические величины, характеризующие работу вращающегося ротора и зависящие от скольжения, обозначать индексом “s”

$$E_{2s} = 4,44sf_1W_2\Phi_mk_{02}.$$

Помимо ЭДС, индуцированных вращающимся магнитным полем, учитываются также ЭДС магнитного поля рассеяния, которое в асинхронной машине имеет специфическую топографию.

Уравнения электрического состояния обмоток

Уравнение электрического состояния фазы обмотки статора имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1\dot{I}_1 + jX_1\dot{I}_1.$$

Как и в трансформаторе, при токе \dot{I}_1 в фазе обмотки статора, не больше номинального, напряжение \dot{U}_1 этой фазы уравновешено главным образом основной ЭДС E_1 , так как слагаемые R_1I_1 и X_1I_1 , учитывающие нагрев обмотки и рассеяние магнитного потока статора малы по сравнению с основной ЭДС:

$$E_1 \approx U_1.$$

Обмотка ротора обычно замкнута накоротко ($U_2 = 0$), и ЭДС уравновешивается только падением напряжения на внутренних сопротивле-

ниях этой обмотки, учитывающих потери на нагрев обмотки ротора и рассеяние магнитного потока

$$\dot{E}_{2s} = R_2 \dot{I}_{2s} + jX_{2s} \dot{I}_{2s}.$$

Уравнения обмоток асинхронного двигателя тождественны аналогичным уравнениям для первичной и вторичной обмоток

Очевидна зависимость от скольжения и действующего значения тока

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}.$$

Таким образом, вместе с изменением нагрузки, сопровождающимся изменением частоты вращения ротора, в его обмотке (происходит одновременно изменение амплитуд ЭДС и тока, их частоты и угла сдвига фаз. Для двигательного режима работы асинхронной машины перечисленные величины достигают наибольшего значения при неподвижном роторе ($n_2 = 0$), когда $s=1$ (в момент пуска).

Преобразование энергии в асинхронном двигателе

При работе асинхронного двигателя происходит процесс преобразования электрической энергии в механическую энергию вращательного движения. Этот процесс сопровождается бесполезным расходом части энергии источника питания на нагрев машины, который характеризуют мощностями электрических, магнитных и механических потерь.

Мощностью электрических потерь характеризуют нагрев обмоток статора и ротора, обладающих активными сопротивлениями R_1 и R_2 . По закону Джоуля-Ленца, она, как известно, пропорциональна квадрату тока в обмотке.

Мощностью магнитных потерь характеризуют нагрев пакетов магнитопровода, вызванный гистерезисом и вихревыми токами.

Механические потери слагаются из потерь механической энергии на трение в подшипниках и контактных кольцах, а также на вентиляцию машины.

Процесс преобразования электрической энергии в полезную механическую энергию, развиваемую асинхронным двигателем, может быть описан уравнением баланса активной мощности. На основании закона сохранения и преобразования энергии можно записать:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \\ = P_2 + \Delta P_{I_2} + \Delta P_{1\text{магн}} + \Delta P_{2\sigma} + \Delta P_{2\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{2\sigma},$$

где P_1 — мощность потребления электрической энергии; ΔP_{I_2} — мощность электрических потерь в обмотке статора; $\Delta P_{1\text{магн}}$ — мощность магнитных потерь в пакете магнитопровода статора; $\Delta P_{2\sigma}$ — мощность электрических потерь в обмотке ротора; $\Delta P_{2\text{магн}}$ — мощность магнитных потерь в пакете

магнитопровода ротора; $\Delta P_{\text{мех}}$ — мощность механических потерь; P_2 — полезная механическая мощность двигателя.

Из диаграммы рис. 11 следует, что мощность $P_{\text{эм}}$ передачи энергии со статора на ротор, осуществляемой посредством вращающегося магнитного поля, всегда меньше активной мощности двигателя на значение мощности электрических и магнитных потерь в статоре:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (\Delta P_{1\sigma} + \Delta P_{1\text{магн}}).$$

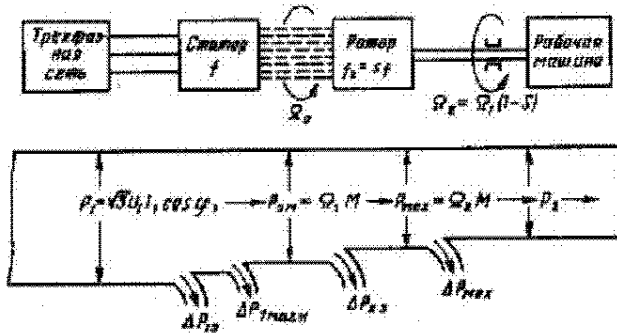


Рис. 11. Диаграмма преобразования энергии в асинхронном двигателе

Мощность $P_{\text{эм}}$, называемую электромагнитной мощностью, можно выразить также через механические величины — угловую скорость Ω_1 магнитного поля и электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, создаваемый двигателем вследствие силового взаимодействия вращающегося магнитного поля с токами роторной обмотки.

$$P_{\text{эм}} = \Omega_1 M_{\text{эм}}.$$

Аналогично выражается механическая мощность $P_{\text{мех}}$ ротора, вращающегося со скоростью Ω_2 :

$$P_{\text{мех}} = \Omega_2 M_{\text{эм}}.$$

Разность электромагнитной и механической мощностей равна мощности потерь в роторе машины. Поскольку мощность магнитных потерь в роторе мала по сравнению с мощностью электрических потерь (так как мала частота перемагничивания пакета ротора), ею пренебрегают и считают

$$P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = \Delta P_{2\sigma}$$

Последнее равенство позволяет получить весьма важное для анализа работы асинхронных двигателей соотношение:

$$\Delta P_{2\sigma} = \omega_1 M_{\text{эм}} - \omega_2 M_{\text{эм}} = s P_{\text{эм}}.$$

Итак, мощность электрических потерь в роторе асинхронного двигателя пропорциональна скольжению.

Для ограничения электрических потерь в роторе двигателя его рассчитывают и конструируют таким образом, чтобы при номинальной нагрузке частота вращения ротора незначительно отличалась от частоты вращения магнитного поля и, как уже отмечалось выше, номинальное скольжение бывает равно нескольким процентам.

Полезная механическая мощность P_2 двигателя меньше механической мощности $P_{мех}$ ротора на значение мощности механических потерь

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех}$$

Поэтому полезный момент на валу двигателя немного меньше электромагнитного момента развиваемого ротором, т.е. $M_{эм} = M_{сп}$.

Для установившегося режима работы, как и для двигателя постоянного тока, вращающий момент $M_{сп}$ равен моменту нагрузки, т.е. моменту сопротивления M_c и в этом случае возможно обозначение момента без всякого индекса: $M = M_{эм} = M_c$.

Следует иметь в виду, что в паспорте асинхронного двигателя, так же как и других электрических двигателей, в качестве номинальной мощности всегда указывается его полезная механическая мощность P_2 , а не мощность потребления электрической энергии P_1 . Отношение этих мощностей определяет коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2/P_1.$$

Электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронного двигателя

Выражение для электромагнитного момента можно получить из мощности электрических потерь:

$$M = \frac{\Delta P_2 \vartheta}{s \omega_1}.$$

Так как при постоянстве напряжения сети магнитный поток полюса Φ_n не зависит от нагрузки на валу, получаем важный вывод: электромагнитный момент, развиваемый на валу двигателя, пропорционален активной составляющей тока ротора, т.е. зависит от скольжения.

Приравнявая нулю производную функции $M(s)$ находим точку максимума момента $M_{макс}$:

$$M_{макс} = \frac{1}{2} C_m \Phi_n E_2 / X_2.$$

Значение скольжения, соответствующее $M_{макс}$, называют критическим

$$s_{кр} = R_2/X_2.$$

Зависимость $M(s)$

$$M = C_m \Phi_n \frac{E_2}{X_2} \cdot \frac{1}{s / s_{кр} + s_{кр} / s}$$

Выражение $C_m \Phi_n E_2 / X_2$ является константой, если неизменно напряжение сети и определяет максимальное значение момента $M_{макс}$ при $s = s_{кр}$.

Максимальный электромагнитный момент зависит от напряжения на статорной обмотке; эта зависимость непосредственно не видна из полученной формулы, но ее легко найти. Напряжение U_1 определяет значение, магнитного потока полюса Φ_n . В свою очередь, ЭДС E_2 также пропорциональна потоку Φ_n . Тогда легко установить, что

$$M_{макс} \sim U_1^2.$$

Зависимость $M(s)$ показана на рис. 12, а.

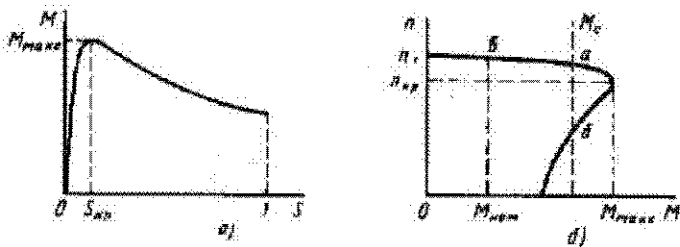


Рис. 12. Зависимость электромагнитного момента от скольжения (а) и механическая характеристика асинхронного двигателя (б)

Большинство асинхронных двигателей проектируют так, что точка максимального момента соответствует $s_{кр} \sim 0,1$. Зависимость $M(s)$ удобна для анализа физических процессов, происходящих в машине при пуске или при изменении нагрузки на валу. При анализе электромеханических процессов, связанных с эксплуатацией двигателя, удобнее пользоваться зависимостями частоты вращения ротора от момента на валу $n(M)$ механическими характеристиками двигателя.

На основании характеристики $M(s)$, показанной на рис. 12, а легко построить механическую характеристику, если вспомнить, что при $s=1$ $n_2=0$, а при $s=0$ $n_2=n_1$ (рис. 12, б).

Рассмотрим вопрос устойчивости работы двигателя при нагрузке на валу, не зависящей от частоты вращения $M_c = const$. В точках а и б (рис. 12, б) двигатель развивает одинаковый электромагнитный момент, но устойчивой работа двигателя может быть только в точке а, где проявляется свойство саморегулирования. Действительно, предположим, что при работе в точке а нагрузочный момент на валу в силу каких-то обстоятельств несколько возрос и двигатель начал замедляться, как видно из механической характеристики это вызывает одновременное увеличе-

ние электромагнитного момента, двигатель перейдет в новое устойчивое положение, когда при несколько сниженной частоте вращения, будет существовать равенство момента вращающего и момента сопротивления.

При работе в точке *б* ситуация иная. Любое малое положительное приращение тормозного момента опять, как и в точке *а*, приведет к замедлению вращения двигателя, однако это замедление вызовет уменьшение вращающего момента, двигатель продолжит торможение и остановится.

Частота вращения, соответствующая максимуму момента, называется критической ($n_{кр}$) — двигатель работает устойчиво при частоте вращения большей критической ($n_2 > n_{кр}$).

На рис. 12, б показано ориентировочное положение точки, соответствующей номинальному режиму работы двигателя (точка *в*). Отношение $M_{макс}/M_{ном}$ всегда больше единицы, что обеспечивает запас устойчивости и предотвращает внезапные остановки двигателя при случайных колебаниях напряжения сети или тормозного момента на валу.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками двигателя называют зависимости угловой скорости Ω_2 , или частоты вращения вала n_2 , электромагнитного момента M , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД двигателя от мощности нагрузки P_2 , при неизменном напряжении на статорной обмотке. Примерный вид характеристик показан на рис. 13 где зависимости для коэффициента мощности и КПД приведены в абсолютных значениях, а все остальные - в относительных единицах. Частота вращения вала в номинальном режиме меньше частоты вращения магнитного поля всего на несколько процентов, характери-

стика $\frac{\Omega_2}{\Omega_1}(P_2)$ близка к линейной. В

соответствии с соотношением $P_2 = \Omega_2 M$, при практически неизменной частоте вращения вала, электромагнитный момент возрастает с ростом мощности P_2 по закону также близкому к линейному.

Зависимость тока I_1 , от мощности на валу аналогично зависимости тока первичной обмотки трансформатора от мощности нагрузки - с ростом мощности увеличивается ток ротора, при этом возрастает также и ток статора, компенсируя размагничивающее действие тока ротора, при этом обеспечивается неизменность

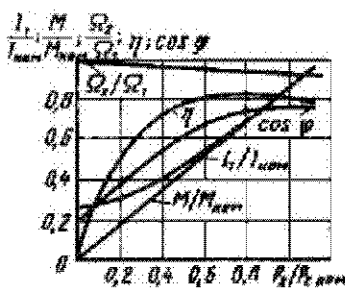


Рис. 13. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

магнитного потока вращающегося магнитного поля. В отличие от трансформатора, у которого значение тока холостого хода составляет несколько процентов от значения номинального тока, в асинхронном двигателе ток холостого хода может достигать 50% номинального значения. Объясняется это тем, что в магнитной цепи двигателя имеется воздушный зазор, существенно увеличивающий ее магнитное сопротивление.

Как известно, коэффициент мощности оценивает соотношение между активной P_1 и реактивной Q_1 мощностями двигателя и численно равен косинусу угла φ_1 сдвига фазы тока в обмотке статора по отношению к напряжению:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}.$$

При изменении нагрузки двигателя от холостого хода до номинального режима реактивная мощность остается практически неизменной, так как ее значение определяется обратимыми процессами периодического изменения запаса энергии магнитного поля машины, магнитный поток которого поддерживается практически неизменным.

В режиме холостого хода, когда необратимые процессы преобразования энергии определяются только потерями на нагрев, и, следовательно, активная мощность мала, значение коэффициента мощности также мало и составляет 0,06 — 0,2. При возрастании нагрузки на валу активная мощность увеличивается, и при неизменном значении реактивной мощности возрастает коэффициент мощности, который в режиме, близком к I_1 умноминальному, достигает своего наибольшего значения (0,7—0,95). Дальнейшее увеличение момента сопротивления на валу ведет к некоторому снижению коэффициента мощности, так как рост токов в обмотках приводит к насыщению машины, к значительным полям рассеяния, а обменные энергетические процессы в этих магнитных полях вызывают соответствующее возрастание реактивной мощности и соответственно шаю уменьшение коэффициента мощности.

Пренебрегая трением, выражение коэффициента полезного действия можно записать в виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{магн}}},$$

где $\Delta P_{\text{э}}$ — потери в обмотке статора и ротора; $\Delta P_{\text{магн}}$ — потери в магнитопроводе машины.

При анализе зависимости КПД двигателя от мощности на валу нужно учитывать, что магнитные потери не зависят от нагрузки на валу, так как при неизменном напряжении питания, магнитный поток вращающегося магнитного поля постоянен, а электрические потери пропорциональны квадрату тока.

естественная, которую имеет двигатель при замкнутых накоротко щетках. Механические характеристики рис. 14, б построены с учетом того, что частота вращения магнитного поля и значение максимального электрического момента M_{max} не зависят от активного сопротивления роторной цепи, а значение критической частоты вращения $n_{кр}$ обратно пропорционально этому сопротивлению.

Как видно из семейства механических характеристик, начальный пусковой момент M_n асинхронного двигателя зависит от активного сопротивления фазы обмотки ротора: увеличение активного сопротивления приводит к увеличению пускового момента. Он может быть даже равен максимальному, если общее сопротивление роторной цепи будет таким, при котором критическое скольжение станет равно единице.

Дальнейшее увеличение активного сопротивления фазы обмотки ротора приводит вновь к ослаблению начального пускового момента (характеристика 4 на рис. 14, б).

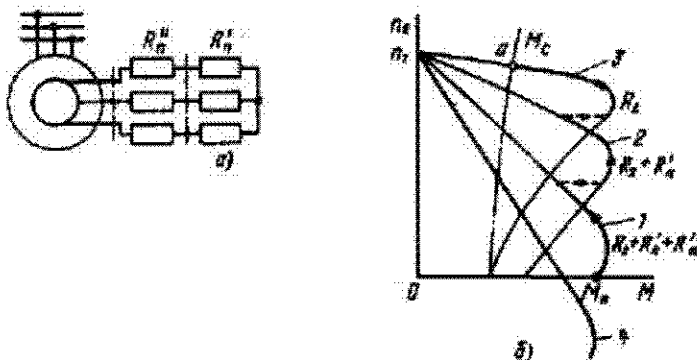


Рис. 14. Схема включения асинхронного двигателя с контактными кольцами (а) и его механические характеристики при разных значениях сопротивления реостата, включенного в цепь ротора (б)

Пуск двигателя происходит с момента включения обмотки статора в сеть. При этом в ротор вводят все секции пускового реостата, благодаря чему начальный пусковой момент значительно увеличивается (характеристика 1), а пусковой ток уменьшается. По мере разгона двигателя токи ротора и статора уменьшаются и часть пускового реостата R''_n закорачивают. Рабочая точка перемещается на новую характеристику 2, соответствующую сопротивлению $(R_2 + R'_n)$. Затем закорачивают весь пусковой реостат и рабочая точка перемещается по естественной механической характеристике до точки, в которой электромагнитный момент двигателя не станет равным моменту сопротивления (точка а на рис. 14, б).

Обычно реостат разбивают на 5—10 ступеней, которые автоматически закорачиваются по мере разгона ротора.

Применение двигателей с контактными кольцами обеспечивает уменьшение времени пуска.

Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором

Для улучшения пусковых свойств двигателей с короткозамкнутым ротором их выполняют специальной конструкции, например, алюминиевые стержни «беличьего колеса» заливают в глубокие пазы.

Благодаря эффекту вытеснения тока двигатель с глубоким пазом на роторе имеет условия пуска, аналогичные двигателю с фазным ротором, так как «автоматически» плавно уменьшается активное сопротивление ротора по мере его разгона. Такие двигатели имеют повышенный пусковой момент, т. е. сокращенное время разгона.

Регулирование частоты вращения

Полюсное регулирование

Этот способ регулирования основан на изменении числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора, т. е. на изменении частоты вращения магнитного поля $n_1 = 60f_1/p$.

Регулирование скорости путем переключения числа полюсов p - ступенчатое.

Следует иметь в виду, что частоты вращения при частоте сети 50 Гц и $p = 1$ и 2 соответственно 3000 и 1500 об/мин, а при $p = 5$ и 6 - 600 и 500 об/мин. При большем числе полюсов разница между частотами вращения уменьшается.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются многоскоростными. Промышленностью выпускаются двигатели на две, три и четыре скорости.

Частотное регулирование

В последние годы все большее распространение получает регулирование скорости двигателя посредством изменения частоты напряжения на статорной обмотке. При регулировании частоты скорость можно плавно изменять так, что ее максимальное значение будет в десятки или сотни раз превышать минимальное.

При осуществлении частотного регулирования учитывается, что значение максимального электрического момента M_{max} пропорционально квадрату магнитного потока полюса вращающегося поля. Магнитный поток полюса Φ_{Γ} в свою очередь, определяется действующим значением и частотой фазного напряжения статора. Поэтому, если при регулировании частоты вращения ротора желательно, например, сохранить неизменным значение максимального электромагнитного момента, то нужно обеспечить выполнение условия $U_1/f_1 = const$ - одновременно с регулиро-

ванием частоты должно изменяться и действующее значение напряжения.

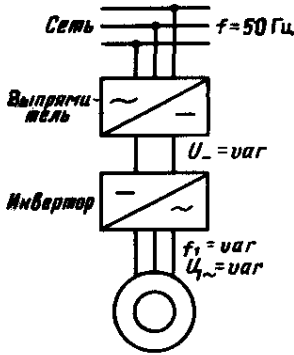


Рис. 15. Схема включения асинхронного двигателя с частотным регулированием скорости

Эту сложную задачу решают с помощью современных электронных устройств, которые включают между промышленной сетью и асинхронным двигателем (рис. 15). Как следует из приведенной упрощенной схемы, при частотном регулировании осуществляется двукратное преобразование электрической энергии: вначале напряжение трехфазной сети выпрямляется, а затем инвертор преобразует выпрямленное напряжение в трехфазную систему напряжений нужной частоты. В системе преобразования предусмотрено автоматическое согласование значений U_1 и f_1 , обеспечивающее требуемое значение максимального электромагнитного момента.

Семейство механических характеристик двигателя с частотным регулированием частоты вращения изображено на рис. 16. Логика работы тиристорного преобразователя зависит от того в какую сторону от $n_{ном}$ требуется осуществлять регулирование. Если нужно обеспечить $n < n_{ном}$, преобразователь автоматически создает условия неизменности максимального момента двигателя - одновременно с заданным снижением значения f_1 соответственно уменьшается и значение U_1 . Для случая $n > n_{ном}$ соблюдение условия

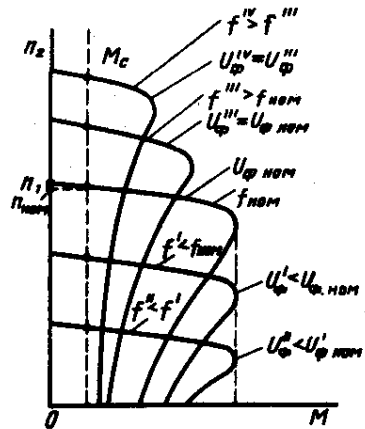


Рис. 16. Механические характеристики двигателя с частотным регулированием скорости

постоянства M_{\max} уже не выполняется, так как требует регулирования напряжения U_1 выше номинального, кроме того, во избежание перегрузки двигателя по мощности, его длительная работа при частотах вращения, превышающих номинальную, допустима только при соответствующем снижении момента сопротивления на валу. Частотное регулирование экономично, однако габариты преобразователя частоты превышают габариты двигателя. Кроме того, надежность работы преобразователей пока еще недостаточна.

Реостатное регулирование

Реостатное регулирование частоты вращения ротора трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами осуществляется при помощи трехфазного реостата, включаемого в цепь обмотки ротора так же, как и пусковой реостат (см. рис. 14, а). В отличие от пускового реостата его рассчитывают на длительный режим работы и называют регулировочным реостатом. Семейство механических характеристик двигателя с регулировочным реостатом ничем не отличается от характеристик с пусковым реостатом (см. рис. 14, б). Они свидетельствуют о том, что с увеличением сопротивления регулировочного реостата частота вращения ротора снижается.

Если момент сопротивления нагрузки неизменен, то амплитуды токов в обмотке ротора при реостатном регулировании сохраняются почти неизменными. Это означает, что с увеличением сопротивления регулировочного реостата мощность потерь в нем возрастает. Номинальная мощность регулировочного реостата обычно соизмерима с мощностью двигателя и, как следствие этого, он имеет большие габариты. Поэтому реостатный способ регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является неэкономичным. Однако он прост и обеспечивает плавное

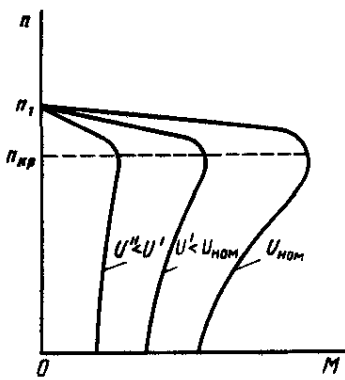


Рис. 17. Регулирование частоты вращения изменением напряжения питания

изменение частоты вращения в широких пределах. Его иногда применяют для регулирования частоты вращения двигателей средней мощности.

Существует еще несколько возможных методов регулирования. При изменении напряжения, подводимого к статору машины, механические характеристики изменяются так, как показано на рис. 17: максимальный момент изменяется пропорционально квадрату напряжения, а критическое скольжение остается неизменным. Критическое

скольжение, как правило, не превышает нескольких процентов, поэтому диапазон регулирования частоты вращения узкий. Снижение максимального момента уменьшает запас по устойчивости работы двигателя.

Иногда находит применение комбинированный способ регулирования, когда изменяются подводимое к двигателю напряжение и активное сопротивление ротора. Возможно регулирование частоты введением ЭДС в цепь ротора. Такие машины получили название асинхронных двигателей двойного питания.

В заключение отметим, что по сравнению с двигателями постоянного тока в настоящее время асинхронные двигатели имеют меньшие возможности по экономичному, надежному и плавному регулированию частоты вращения в широком диапазоне, что является их основным недостатком.

3. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде, где установлены необходимые приборы и оборудование. Электрическая схема лабораторной установки представлена на рис. 18.

В работе используется трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором АД, включаемый в сеть с помощью автомата B_1 и универсального переключателя УП. Для изменения сопротивления в цепи ротора служит переключатель R_d . В качестве нагрузки для АД используется машина постоянного тока МПТ, работающая в режиме генератора независимого возбуждения. Нагрузкой генератора служит реостат R_H , состоящий из четырех секций, переключаемых с помощью универсального переключателя.

Обмотка независимого возбуждения имеет выводы, обозначенные на стенде Ш1 и Ш2. Для регулирования тока возбуждения предназначен реостат R_{OB} .

Для определения частоты вращения двигателя служит тахогенератор (ТГ), соединенный с таховольтметром (V_T) за стендом.

4. Программа работы

1. Ознакомиться с оборудованием стенда и измерительными приборами. Определить цены деления приборов.
2. Собрать электрическую схему лабораторной установки на рис. 18.
3. После проверки схемы преподавателем, подать на стенд постоянное напряжение с помощью выключателя B_2 . Установить номинальный ток возбуждения МПТ (см. паспортные данные стенда).
4. Установить реостат R_d в положение “1” ($R_d = \max$), включить выключатель B_1 и поворотом ручки универсального переключателя (УП) в положение «вкл», запустить асинхронный двигатель.
5. Вывести сопротивление в цепи ротора асинхронного двигателя, по-

следовательно переключая реостат R_D из положения "1" ($R_D = \max$) в положение "4" ($R_D = 0$).

6. Снять данные для построения естественной и рабочих характеристик двигателя (при $R_D = 0$), изменяя нагрузку с помощью сопротивления R_H . Результаты измерений занести в табл. 1.
7. Снять данные для построения искусственных механических характеристик для двух значений сопротивления в цепи ротора $R_{Д1} > 0$, $R_{Д2} > R_{Д1}$. Результаты измерений занести в табл. 2.

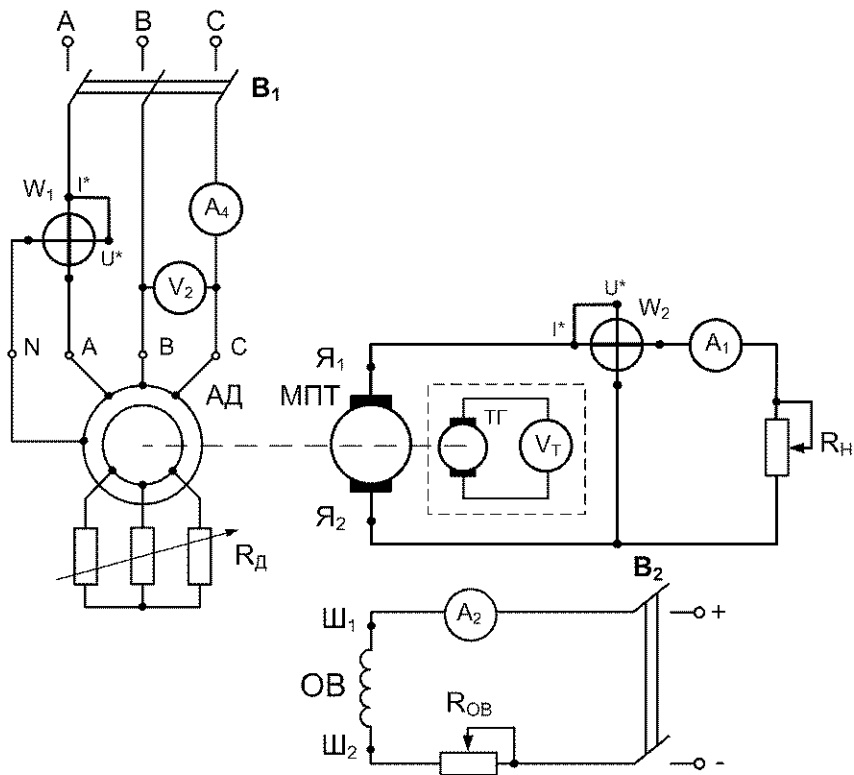


Рис. 18. Электрическая схема лабораторной установки

Таблица 1

Данные для построения естественной и рабочей характеристики

№ п/п	Измерено					Вычислено			
	ω	P_1	U_1	I_1	P_r	M_r	η	$\cos \varphi$	s
	c^{-1}	Вт	В	А	Вт	Н·м	%		
1									
2									
3									
4									
5									

Примечание: показания W_1 необходимо утраивать.

Таблица 2

Данные для построения искусственных механических характеристик

№ п/п	$R_{д1} > 0$				$R_{д2} > R_{д1}$			
	Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
	ω	P_r	M_r	s	ω	P_r	M_r	s
	c^{-1}	Вт	Н·м		c^{-1}	Вт	Н·м	
1								
2								
3								
4								
5								

5. Обработка результатов эксперимента

1. Мощность на валу асинхронного двигателя (потери в генераторе пренебрегаем)

$$P_2 = P_r.$$

Момент на валу генератора

$$M_r = \frac{P_2}{\omega}.$$

(момент на валу асинхронного двигателя принимаем равным моменту на валу генератора $M = M_r$).

Коэффициент мощности асинхронного двигателя

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1},$$

где P_1 – мощность, потребляемая трехфазной обмоткой статора из сети, $P_2 = 3P_w$;

Коэффициент полезного действия асинхронной машины

$$\eta = P_2 / P_1,$$

Скольжение ротора

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

где ω_0 - синхронная скорость $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}$; p - число пар полюсов,

определяется из паспортных данных асинхронного двигателя. Например у асинхронного двигателя А1-12-4 число полюсов равно 4 (на это указывает последняя цифра), тогда число пар полюсов $p = 2$ (в два раза меньше), $f_1 = 50 \text{ Гц}$.

2. На основании данных табл.1 построить рабочие характеристики асинхронного двигателя ω , S , η , M , $I_1(P_2)$ на одном чертеже.

3. По данным табл.1 и 2 построить на одном чертеже естественную и две искусственных механические характеристики асинхронного двигателя $\omega(M)$.

4. Сделать вывод по работе, обратив внимание на особенности пуска асинхронного двигателя с фазным ротором и возможности регулирования частоты вращения.

6. Контрольные вопросы

1. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
2. Каков принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
3. Объясните создание вращающегося магнитного поля трехфазной обмоткой машины переменного тока.
4. От чего зависит скорость вращения n_1 вращающегося магнитного поля?
5. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
6. Как электромагнитный момент зависит от скольжения?
7. Как производится реверсирование асинхронного двигателя?
8. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором?
9. Как производится пуск трехфазных асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором?
10. Перечислите виды потерь в асинхронном двигателе.
11. Как влияет изменение питающего напряжения на вращающий момент двигателя?

Лабораторная работа № 1

Исследование линейной электрической цепи постоянного тока.

Цель работы:

3. Изучение основных законов линейных электрических цепей постоянного тока и методов их расчета.
4. Исследование распределения токов, напряжений и мощностей в разветвленной электрической цепи постоянного тока.

1. Теоретические сведения

Электрической цепью называют совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий ЭДС, тока и напряжения.

Генерирующие устройства преобразуют химическую, механическую, тепловую и световую энергии в электрическую. Это источники электрической энергии. На зажимах источников в процессе преобразования неэлектрической энергии в электрическую за счет действия сторонних сил создается ЭДС E . На рис. 1 приведены условные обозначения гальванического элемента (*a*), генератора постоянного тока (*б*), термопары (*в*) и фотоэлемента (*г*), преобразующих указанные виды энергии в электрическую.

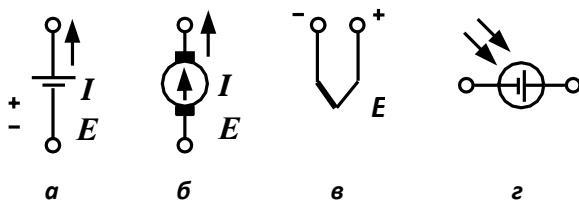


Рис. 1. Обозначения источников постоянного тока на схемах: *a* – гальванический элемент и аккумулятор; *б* – генератор постоянного тока; *в* – термопара; *г* – фотоэлемент

В приемниках происходят необратимые преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Например, аккумулятор становится приемником в процессе его зарядки, когда электрическая энергия преобразуется в

химическую (рис. 2, а). В электрической машине, работающей в режиме двигателя, электрическая энергия превращается в механическую (см. рис. 2, б); в электрической печи (см. рис. 2, в) или резисторе (см. рис. 2, г) – в тепловую; в лампе накаливания (см. рис. 2, д) – в световую.

В электрической цепи источники и приемники соединяются проводниками, которые обеспечивают передачу электрической энергии от источников к приемникам.

В электрические цепи часто включают вспомогательные и измери-

тельные устройства. Вспомогательные элементы служат для управления режимом электрической цепи (например, коммутаторы), защиты от перенапряжений или недопустимого значения тока (реле, предохранители).

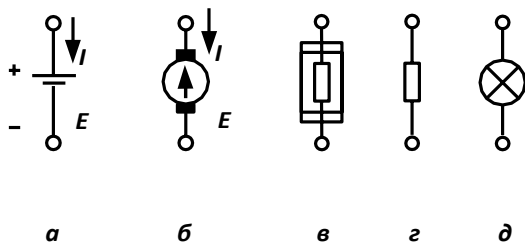
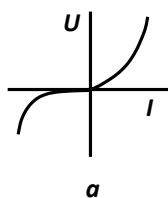


Рис. 2. Обозначения приемников на схемах: а – аккумулятор при зарядке; б – двигатель постоянного тока; в – электрическая печь; г – резистор; д – лампа накаливания

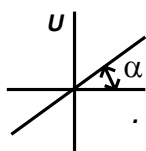
Основными характеристиками элементов электрических цепей являются зависимости их напряжения от тока. Такие зависимости называют вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

Элементы электрической цепи делятся на активные и пассивные. Все источники электрической энергии являются активными элементами, они характеризуются определенным значением ЭДС E . Приемники электрической энергии могут быть как пассивными, так и активными.

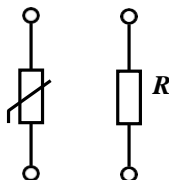
Пассивными называются приемники, в которых не возникает ЭДС. ВАХ пассивных элементов проходят через начало координат – в отсутствие напряжения ток этих элементов равен нулю. Пассивные элементы характеризуются электрическим сопротивлением R , которое у одних приемников зависит от приложенного напряжения, а у других не зависит. В первом случае приемники имеют нелинейные ВАХ (рис. 3, а), поэтому их называют нелинейными элементами (выпрямительные диоды, стабилитроны и др.).



а



б



в



Линейные пассивные элементы имеют линейную ВАХ, показанную на рис. 3, б. Сопротивление линейных элементов не зависит от напряже-

Рис. 3. Нелинейная (а) и линейная (б) ВАХ приемников, условные обозначения нелинейного (в) и линейного (г) резистивных элементов

ния. Условные графические обозначения нелинейного и линейного резистивных элементов приведены соответственно

на рис. 3, в, г.

ВАХ источников электрической энергии, которые часто называют внешними характеристиками, также могут быть нелинейными и линейными (рис. 4). У большинства источников электрической энергии напряжение на их зажимах с ростом тока уменьшается за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении R_{em} .

$$U = E - R_{em}I.$$

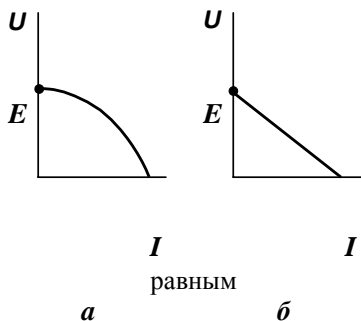


Рис. 4. Нелинейная (а) и линейная (б) внешние характеристики источников электрической энергии

Если внутреннее сопротивление источника много меньше сопротивления приемника ($R_{em} \ll R_n$), то при определенных изменениях тока напряжение U практически остается неизменным и

ЭДС E . Такой источник электрической энергии называют идеальным источником ЭДС. ВАХ идеального источника ЭДС приведена на рис.5, а, а его условное графическое

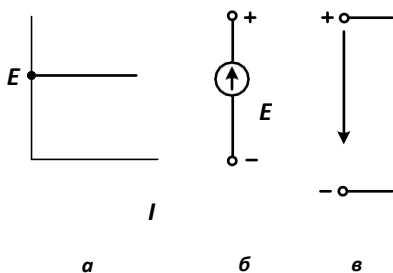


Рис. 5. ВАХ (а), условное обозначение (б), зажимы (полюса) (в) идеального источника ЭДС

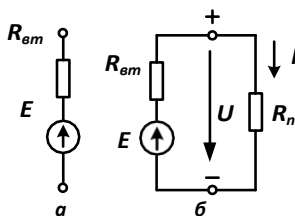


Рис. 6. Схема замещения реального источника (а) и схема замещения цепи, состоящей из источника и пассивного приемника (б)

обозначение – на рис. 5, б. Поскольку напряжение источника в этом случае является неизменным ($U = E$), на схемах вместо источника ЭДС часто показывают зажимы, к которым приложено напряжение U (см. рис. 5, в).

Если к источнику электрической энергии подключен пассивный приемник с сопротивлением R_n , то электрическую цепь можно представить ее схемой замещения, состоящей из идеального источника ЭДС E и двух резистивных элементов с сопротивлениями R_{em} и R_n (см. рис. 6, б).

Для однозначности описания процессов, происходящих в цепи, необходимо знать не только значения токов и напряжений, но также их направления. Стрелки, поставленные на схемах, указывают направления ЭДС, напряжений и токов, для которых значения обозначенных величин

положительны. Из физики известно, что за положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов, за положительное направление ЭДС – направление действия сторонних сил на положительный заряд, за положительное направление напряжения – направление убывания потенциала. Так как положительные заряды внутри источника движутся в направлении сторонних сил, то положительные направления тока и ЭДС совпадают. В приемнике положительные заряды движутся в направлении убывания потенциала, следовательно, положительные направления тока и напряжения приемника совпадают.

В схеме замещения неразветвленной электрической цепи (см. рис. 6, б) ЭДС E , направленная внутри источника от «минуса» к «плюсу», создает ток I того же направления, который определяется по закону Ома для всей цепи:

$$I = E / (R_{em} + R_n).$$

При этом напряжение $U = R_n I = \frac{R_n}{R_n + R_{em}} E$, а мощность приемни-

$$\text{ка } P_n = R_n I^2 = R_n \left(\frac{U}{R_n} \right)^2 = \frac{U^2}{R_n}.$$

Для активного приемника (рис. 7, в) ток

$$I = (E_1 - E_2) / (R_{em1} + R_{em2}).$$

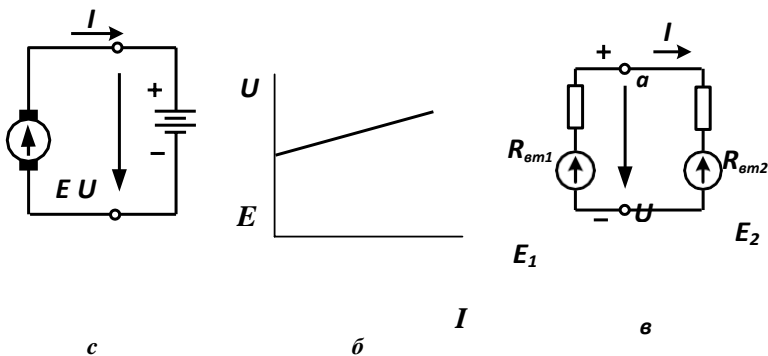


Рис. 7. Схема цепи, состоящей из генератора и аккумулятора (а), ВАХ активного приемника (б) и схема замещения цепи (в)

Режимы работы источников постоянного тока. Рассмотрим простейшую цепь, содержащую источник электрической энергии и пассивный приемник. Схема замещения такой цепи приведена на рис. 6, б.

Работа этой цепи характеризуется режимами холостого хода, короткого замыкания, согласованным и номинальным.

Режим холостого хода соответствует отсутствию тока в приемнике ($I = 0$) и осуществляется отключением приемника от источника. При этом

напряжение источника в режиме холостого хода равно его ЭДС
 $E (U_x = E)$.

Режим короткого замыкания источника возникает тогда, когда сопротивление приемника равно нулю. При этом напряжение также равно нулю ($U = 0$). Ток в режиме короткого замыкания достигает максимального значения, он ограничен лишь внутренним сопротивлением R_{em} источника:

$$I_k = E/R_{em} = EG_{em}$$

Обычно режим короткого замыкания в цепи является аварийным, так как возникающие при этом токи во много раз превышают номинальные значения, на которые рассчитаны элементы цепи.

Отметим, что, так же как напряжение в режиме холостого хода определяет ЭДС E идеального источника в последовательной схеме замещения, ток короткого замыкания определяет ток идеального источника тока в параллельной схеме замещения реального источника:

$$J = I_k = EG_{em}$$

Согласованный режим работы источника и пассивного приемника соответствует максимальной активной мощности пассивного приемника.

В электрических цепях постоянного тока согласованный режим работы возникает в случае, когда внутреннее сопротивление источника равно сопротивлению приемника, т.е. при условии $R_{em} = R_n$. В этом можно убедиться, записав выражения для тока и мощности приемника с сопротивлением R_n :

$$I = E/(R_{em} + R_n); P_n = R_n I^2 = R_n E^2 / (R_{em} + R_n)$$

В режиме холостого хода эта мощность равна нулю, поскольку $I = 0$; в режиме короткого замыкания мощность P также равна нулю, так как $R_n = 0$. Таким образом, ясно, что при изменении R_n от 0 до ∞ функция $P_n(R_n)$ имеет экстремум (максимум). Для определения условия, при котором мощность достигает максимального значения, необходимо взять первую производную функции $P_n(R_n)$ по R_n и приравнять ее нулю:

$$\frac{dP_n}{dR_n} = \frac{E^2 (R_{em} + R_n)^2 - 2E^2 R_n (R_{em} + R_n)}{(R_{em} + R_n)^4} = 0$$

Решением уравнения является равенство $R_n = R_{em}$. При этом мощность приемника равна половине мощности источника:

$$\frac{P}{n} =$$

$$UI = R_n I^2 = R_n \frac{E^2}{(R_n + R_{em})^2} = \frac{E^2}{4R_{em}},$$

Это означает, что половина энергии источника преобразуется в теплоту внутри него за счет внутреннего сопротивления R_{em} .

Эффективность передачи энергии, как известно, оценивается коэффициентом полезного действия (КПД). Для схемы замещения, изображенной на рис. 6, б, КПД определяется отношением мощностей приемника и источника:

$$\eta = \frac{P_n}{P_u} = \frac{R_n I^2}{(R_{em} + R_n) I^2} = \frac{R_n / R_{em}}{1 + R_n / R_{em}}$$

Из графика $\eta(R_n/R_{em})$, приведенного на рис. 8, видно, что КПД возрастает с увеличением сопротивления приемника. В согласованном режиме ($R_n/R_{em} = 1$) КПД достигает только 50%. На рис. 8 приведены также графики зависимостей мощностей приемника P_n и источника P_u от отношения R_n/R_{em} .

Номинальный режим соответствует режиму работы источников и приемников электрической энергии при тех значениях токов и напряжений, на которые они рассчитаны заводами-изготовителями. Номинальные значения токов, напряжений и мощностей указываются в каталогах и паспортах для всех источников и приемников электрической энергии. Соблюдение номинальных режимов обеспечивает эффективное и экономичное производство и потребление электрической энергии и гарантирует срок службы электротехнических устройств, указываемый заводом-изготовителем. Чаще всего номинальный

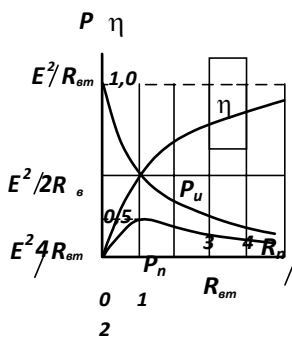


Рис. 8. Графики зависимостей мощностей источника P_u , приемника P_n и КПД η от соотношения R_n/R_{em}

режим работы соответствует случаю, когда сопротивление приемника много больше внутреннего сопротивления генератора ($R_n \gg R_{em}$). При этом КПД электрической цепи близок к единице, что

очень важно для силовых (мощных) электротехнических устройств и установок. Для некоторых маломощных электротехнических устройств, используемых в радиотехнике, электронике и автоматике, важным является достижение максимально возможной мощности приемника. В этих случаях стремятся обеспечить согласованный режим работы источников и приемников электрической энергии, который является для них номинальным режимом. Иногда встречаются случаи, например, в контрольно-

измерительной технике, когда в приемнике стремятся получить максимально возможный ток, значение которого практически не зависит от сопротивления приемника. При этом номинальный режим близок к режиму короткого замыкания, который обеспечивается при выполнении

условия $R_{em} \gg R_n$.

Топологические понятия теории электрических цепей. Основными топологическими понятиями теории электрических цепей являются ветвь, узел, контур, двухполюсник и четырехполюсник.

Ветвью называют участок электрической цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного пассивного или активного элемента, а также может представлять собой последовательное соединение нескольких элементов. На рис. 9

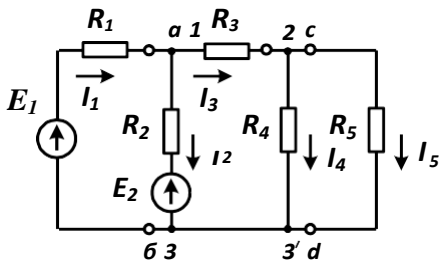


Рис. 9. Схема разветвленной электрической цепи

в качестве примера приведена

схема замещения разветвленной электрической цепи с пятью ветвями.

Узлом называют место соединения трех и более ветвей. Различают понятия геометрического и потенциального узлов.

Так, на схеме рис. 9, имеется четыре геометрических и три потенциальных узла. Геометрические узлы 3 и 3', имеющие одинаковые потенциалы, могут быть объединены в один потенциальный узел.

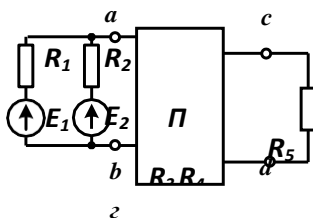
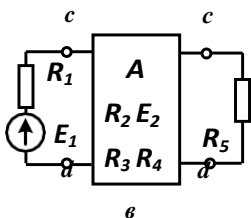
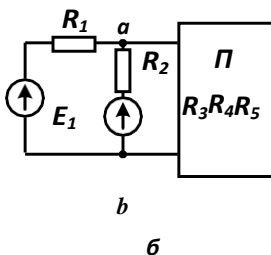
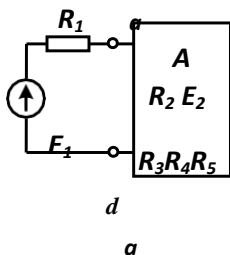


Рис. 10. Активный (а) и пассивный (б) двухполюсники, активный(в) и пассивный (г) четырехполюсники

Контуром называют замкнутый путь, проходящей через несколько ветвей и узлов разветвленной электрической цепи, например, контур l -

$R_3 - 2 - R_4 - 3' - 3 - E_1 - R_1$ на рис. 9.

Двухполюсником называют часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами-полюсами. В активном двухполюснике присутствуют активные элементы (рис. 10, а), в пассивном они отсутствуют (см. рис. 10, б).

Четырехполюсником называют часть электрической цепи, имеющую две пары зажимов, которые называются входными (а и б на рис. 10) и выходными (с и d на рис. 10). Так же, как и двухполюсники, четырехполюсники могут быть активными (см. рис. 10, в) и пассивными (см. рис. 10, г).

Особенности применения законов Ома и Кирхгофа для анализа электрических цепей постоянного тока

Закон Ома для пассивного участка цепи, не содержащего ЭДС: ток на участке цепи пропорционален напряжению на этом участке; например, I_5 схемы на рис. 9

$$I = \frac{U_{cd}}{R}$$

Закон Ома для активного участка цепи, содержащего источник ЭДС, в общем случае

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R}$$

ЭДС и напряжение берут со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением тока, и со знаком минус, если их направления противоположны направлению тока, например, в схеме рис. 7, в

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{вн1} + R_{вн2}}$$

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в любом узле заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать. Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

При этом токи, направленные к узлу, следует записывать со знаком

плюс, а токи, направленные от узла, – со знаком минус, например, в схеме на рис. 9 для узла 1:

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

Второй закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии, в силу которого изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Изменение потенциала между двумя точками участка цепи характеризуется разностью потенциалов или напряжением. Поэтому согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений всех участков замкнутого контура равна нулю:

$$\sum U = 0.$$

Применительно к схемам замещения с источниками ЭДС, второй закон Кирхгофа можно формулировать таким образом: алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур:

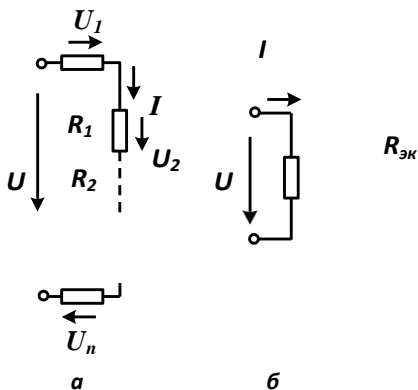
$$\sum RI = \sum E.$$

При составлении уравнений слагаемые записывают со знаком плюс в случае, когда направление обхода контура совпадает с направлением соответственно напряжения, тока или ЭДС, в противном случае слагаемые записывают со знаком минус.

Вторым законом Кирхгофа часто пользуются для определения напряжения между любой парой узлов электрической цепи. Определим, например, напряжение U_{13} схемы рис. 9:

$$U_{13} + R_1 I_1 = E_1 \text{ или } U_{13} = E_1 - R_1 I_1.$$

Преобразование пассивных участков электрической цепи.
Последовательное соединение элементов. Последовательным соединением элементов называют соединение, при котором ток в каждом элементе один и тот же. На рис. 11, а показана схема с последовательно со-



единенными резистивными элементами. Заменяем эти элементы одним эквивалентным (см. рис. 11, б) и запишем уравнения по второму

з
а
к
о
н
у

Кирхгофа для обеих схем:

$$R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I = U; \quad R_{эк} I = U.$$

Поскольку токи и напряжения источников заданной и эквивалентной схем должны быть одинаковыми, то можно заключить, что мощность электрической цепи не изменится, если последовательно соединенные

Рис. 11. Схема с последовательным соединением элементов (а) и ее эквивалентная схема (б)

элементы заменить одним элементом с сопротивлением $R_{эк}$, равным сумме сопротивлений отдельных элементов:

$$R_{эк} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i .$$

На основании этих уравнений отметим некоторые свойства последовательного соединения элементов:

3. Ток в цепи и напряжения на ее элементах зависят от сопротивления на ее элементах. Если, например, сопротивление R_1 первого элемента увеличивается, ток в цепи и напряжения $U_2 \dots U_n$ уменьшаются ($I = U/R_{эк}$; $U_n = R_n I$), а напряжение U_1 возрастает ($U_1 = U - U_2 - \dots - U_n$). В пределе, когда сопротивление R_1 стремится к бесконечности (холостой ход), ток $I = 0$, а $U_1 = U$.

4. Напряжение на каждом из последовательно соединенных элементов всегда меньше входного ($U_i < U$) и, следовательно, последовательная цепь может служить делителем напряжения. Последовательное соединение приемников используют в том случае, когда их номинальные напряжения ниже напряжения сети (например, в елочных гирляндах). При работе двигателей постоянного тока последовательно с цепью якоря включают реостаты для ограничения пускового тока и регулирования частоты вращения. Последовательным включением добавочных резисторов к вольтметру расширяют его пределы измерения.

Параллельное соединение элементов. Параллельным называют соединение, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т.е. находятся под воздействием одного и того же напряжения. На рис. 12,а показана схема с n пассивными ветвями, присоединенными к одним и тем же узлам, разность потенциалов между которыми равна напряжению U источника. Поэтому ток в каждой ветви определяется этим

напряжением и сопротивлением R либо проводимостью G соответствующей ветви:

$$I_1 = U/R_1 = G_1 U;$$

$$I_2 = U/R_2 = G_2 U;$$

.....

$$I_n = U/R_n = G_n U.$$

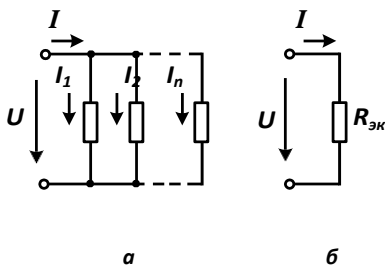


Рис. 12. Схема с параллельным соединением элементов (а) и ее эквивалентная схема (б)

Схема замещения с n параллельно включенными резистивными элементами может быть

заменена эквивалентной схемой с одним резистивным элементом (см. рис. 12, б). Условия эквивалентности будут соблюдены, если ток эквивалентной схемы будет равен току I в неразветвленной части цепи, т.е.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Подставляя в это уравнение значения токов, получим выражение

$$U/R_{\text{ЭК}} = U/R_1 + U/R_2 + \dots + U/R_n,$$

из которого можно получить формулу для эквивалентного сопротивления

$$1/R_{\text{ЭК}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n = \sum_{i=1}^n 1/R_i$$

или для эквивалентной проводимости

$$G_{\text{ЭК}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i .$$

Мощность электрической цепи не изменится, если параллельно соединенные элементы заменить одним эквивалентным с проводимостью $G_{\text{ЭК}}$, равной сумме проводимостей отдельных элементов.

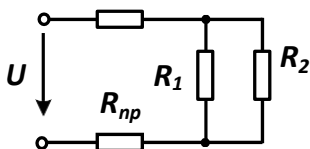
К основным свойствам параллельного соединения следует отнести следующие:

3. Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных элементов всегда меньше наименьшего из сопротивлений ветвей. При подключении нового приемника параллельно другим приемникам общая проводимость их увеличивается, а эквивалентное сопротивление уменьшается. Если параллельно соединены n ветвей с одинаковым сопротивлением R , то их эквивалентное сопротивление будет в n раз меньше сопротивления каждой ветви, т.е. $R_{\text{ЭК}} = R/n$.

При параллельном соединении двух пассивных элементов с сопротивлениями R_1 и R_2 эквивалентная проводимость

$R_{\text{нр}}$

$$G_{\text{ЭК}} = 1/R_{\text{ЭК}} = 1/R_1 + 1/R_2 = (R_1 + R_2)/R_1 R_2,$$



а эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{ЭК}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

4. Ток в каждой из ветвей всегда меньше тока источника (тока в нераз-

вет
вле
нно

Рис. 13. Схема с параллельным
подключением приемников

й части цепи) и, следовательно-

но, параллельная цепь может служить
делителем тока. Это свойство позволяет
расширить пределы измерения ампер-

метров.

Смешанное соединение элементов. Смешанным соединением элементов называют сочетание их последовательных и параллельных соединений. Наиболее простым и распространенным в практике смешанным соединением является цепь параллельного подключения приемников к источнику питания с помощью проводов, обладающих заметным сопротивлением. Схема замещения такой цепи представлена на рис. 13.

Эквивалентное сопротивление схемы запишется в виде

$$R_{\text{эк}} = 2R_{\text{пр}} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Анализ электрических цепей постоянного тока методом эквивалентных преобразований. Для определения токов и напряжений каждого элемента цепи с одним источником электрической энергии (рис. 14, а) можно использовать метод эквивалентных преобразований.

Для решения такой задачи отдельные участки электрической цепи с последовательно или параллельно соединенными элементами заменяют одним эквивалентным элементом. Постепенным преобразованием участков схему электрической цепи упрощают и приводят к простейшей схеме, состоящей из последовательно соединенных источника электрической энер-

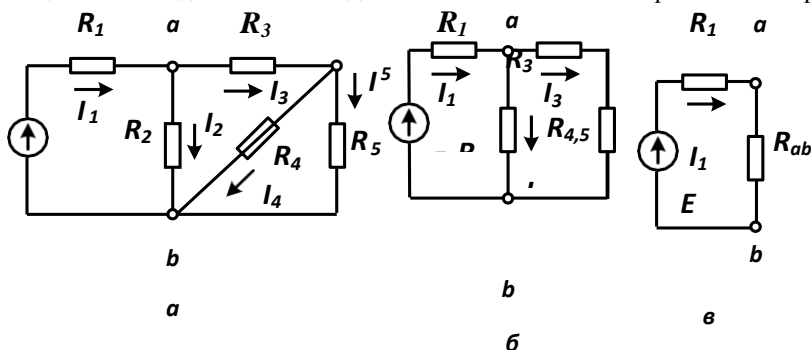


Рис. 14. Схема разветвленной цепи с одним источником (а) и упрощенные схемы (б и в)

гии и одного эквивалентного пассивного элемента. Для схемы рис. 14,а

вначале находят эквивалентное сопротивление участка, состоящего из двух параллельно соединенных ветвей с сопротивлениями R_4 и R_5 :

$$R_{4,5} = R_4 R_5 / (R_4 + R_5),$$

и получают схему рис. 14, б.

Затем находят эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов a и b

$$R_{ab} = \frac{R_2(R_3 + R_{4,5})}{R_2 + R_3 + R_{4,5}}$$

Таким образом, исходная разветвленная цепь рис. 14, а сведена к простейшей цепи рис. 14, в, для которой нетрудно определить ток в ветви источника ЭДС E с сопротивлением R_1 :

$$I_1 = E / (R_1 + R_{ab})$$

Зная ток I_1 , находят напряжение на зажимах ab двухполюсника $U_{ab} = R_{ab} I_1$ и токи в ветвях I_2, I_3 :

$$I_2 = U_{ab} / R_1; \quad I_3 = U_{ab} / (R_3 + R_{4,5})$$

Наконец, по известному току I_3 определяют токи I_4 и I_5 :

$$I_4 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} I_3; \quad I_5 = \frac{R_4}{R_4 + R_5} I_3$$

Анализ разветвленной цепи с помощью законов Кирхгофа.

Анализ и расчет любой электрической цепи можно провести на основании первого и второго законов Кирхгофа.

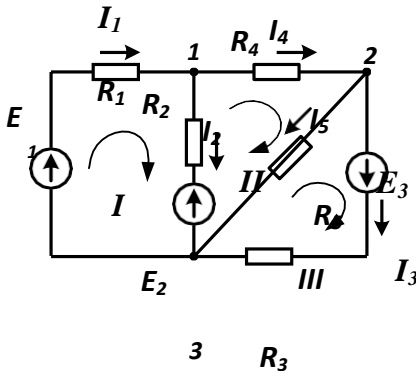


Рис. 15. Схема разветвленной цепи постоянного тока

Рекомендуется следующий порядок составления уравнений по законам Кирхгофа: определяют число ветвей, узлов и незави-

симых контуров, устанавливают число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа, остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа.

По первому закону Кирхгофа можно составить $y - 1$ независи-

мых уравнений, где y – количество узлов схемы. Использовать все y уравнений невозможно, так как одно из них обязательно будет зависимым.

Схема электрической цепи рис. 15 имеет пять ветвей и три узла, по-

этому по первому закону Кирхгофа для нее можно составить два независимых уравнения.

Количество уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, должно быть равно количеству независимых контуров. Независимым называют контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь.

Для схемы цепи рис. 15 надо составить три уравнения по второму закону Кирхгофа для трех независимых контуров. Выбираем произвольно

направления токов в ветвях. Примем направление обхода контура по часовой стрелке. Тогда система уравнений будет иметь вид:

6) для узла 1

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

7) для узла 2

$$-I_4 + I_5 = 0;$$

8) для контура I

9) для контура II

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 - E_2;$$

10) для контура III

$$-R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$R_3 I_3 - R_5 I_5 = E_3.$$

При составлении уравнений со знаком плюс записаны те слагаемые, в которых ток и ЭДС имеют направления, совпадающие с направлением обхода контура.

Решая систему уравнений, можно определить все пять неизвестных токов. Если в результате решения этих уравнений получаются отрицательные значения токов, то это означает, что истинные направления токов в ветвях цепи противоположны тем направлениям, для которых составлялись уравнения.

Правильность расчета токов в ветвях электрической цепи может быть проверена с помощью уравнения баланса мощностей источников и приемников электрической энергии

$$\Sigma P_u = \Sigma P_n,$$

в котором левая часть характеризует мощность источников (произведение EI для источника напряжения и JU для источника тока), а правая – мощность активных (произведение EI) и пассивных (произведение RI^2) приемников электрической энергии.

Для схемы рис. 15 уравнение баланса мощностей запишется в виде

$$E_1 I_1 + E_3 I_3 = E_2 I_2 + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2.$$

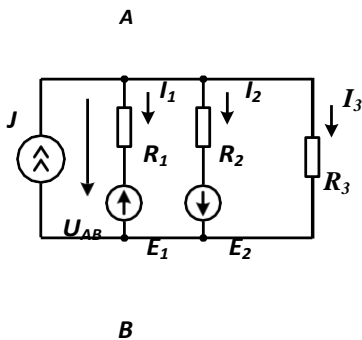
1 2 3 4 5

Метод межузлового напряжения. В реальных электрических цепях постоянного тока очень часто несколько источников и приемников электрической энергии включаются параллельно. Схема замещения такой цепи, содержащей активные и пассивные ветви, соединенные параллельно

но, имеет только два узла, например, узлы А и В схемы рис. 16. Считая положительными направления токов I_1 , I_2 и I_3 от узла А к узлу В, за- пишем выражения для этих токов, используя закон Ома для активной

ветви:

$$I_1 = (-E + U_{AB}) / R_1; I_2 = (E_2 + U_{AB}) / R_2; I_3 = U_{AB} / R_3.$$



Подставляя эти выражения в уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа:

$$-J + I_1 + I_2 + I_3 = 0,$$

находим напряжение между узлами A и B

$$U_{AB} = \frac{E_1 / R_1 - E_2 / R_2 + J}{1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3}$$

Рис. 16. Схема замещения цепи с или

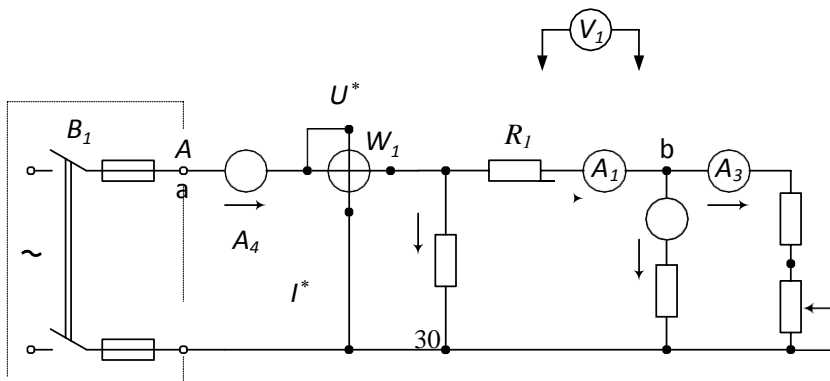
двумя узлами

$$U_{AB} = \frac{E_1 G_1 - E_2 G_2 + J}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

2. Программа работы

5. Ознакомиться с оборудованием лабораторной установки. Определить цену деления измерительных приборов, используемых в данной работе.

6. Собрать исследуемую электрическую цепь по рис. 17.



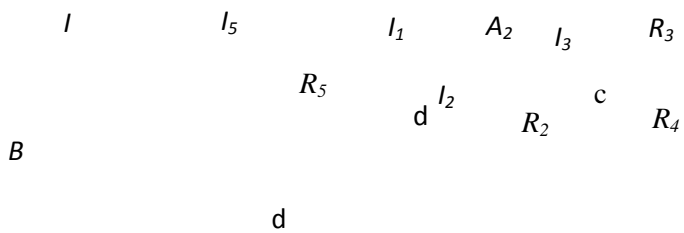


Рис. 17

7. После проверки схемы преподавателем подать на стенд напряжение. Измерить ток, напряжение и мощность на участках цепи. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

№ п/п	Измерено									
	I	I_1	I_2	I_3	U_{ad}	U_{ab}	U_{bd}	U_{bc}	U_{cd}	$P_{оп}$
	A_4	A_1	A_2	A_3	U_{R5}	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{R4}	W_1
	А	А	А	А	В	В	В	В	В	Вт
1										
2										
3										
4										

Таблица (продолжение)

№ п/п	Вычислено								
	I_5	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	$R_{эkv.оп}$	$R_{эkv.расч}$	$P_{расч}$
	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт
1									
2									
3									
4									

Падения напряжения на участках ad, ab, bd, bc, cd измеряют с помощью цифрового мультиметра V_1 . Мощность измеряется ваттметром W_1 . Измерения сделать для четырех положений реостата R_4 .

Правильность измерений проверить по законам Кирхгофа.

Например, для схемы рис. 17 по первому закону Кирхгофа для узла «b» выполняется равенство: $I_1 = I_2 + I_3$. По второму закону Кирхгофа для замкнутого контура: $U_{ad} = U_{ab} + U_{bd}$.

8. По результатам измерений выяснить влияние изменения сопротивления резистора R_4 на распределение токов, напряжений и мощностей исследуемой цепи.

Обработка результатов эксперимента

8. Ток I_5 определить по первому закону Кирхгофа: $I_5 = I - I_1$.

9. Определить сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 и опытное значение эквивалентного сопротивления всей цепи $R_{оп}$, используя закон Ома. Например, для схемы рис. 17:

$$R = \frac{U_{ab}}{I_1}, \quad R = \frac{U_{ad}}{I_{оп}}$$

Результаты расчетов занести в таблицу. Внутренним сопротивлением амперметров пренебречь.

10. Определить расчетное значение эквивалентного сопротивления всей цепи $R_{расч}$, используя метод преобразований последовательно и параллельно соединенных участков цепи. Результаты расчетов занести в таблицу. Сравнить полученные результаты с $R_{оп}$.

11. Рассчитать мощность потребления энергии всей цепи как сумму мощностей отдельных элементов:

$$P_{расч} = \sum_{k=1}^5 P_k = \sum_{k=1}^5 U_k I_k = \sum_{k=1}^5 R_k I_k^2,$$

где U_k, I_k, R_k – напряжение, ток и сопротивление k -го участка электрической цепи. Результаты расчетов занести в таблицу. Сравнить полученные результаты с мощностью, измеренной ваттметром W_1 .

12. По результатам измерений и вычислений на одном чертеже построить графики зависимости токов I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 от сопротивления резистора R_4 .

13. Построить зависимость мощности потребления энергии от сопротивления резистора R_4 : $P_W = f(R_4)$.

14. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

11. Что понимается под электрическим током?
12. Что понимается под ЭДС и напряжением?
13. Сформулируйте и объясните закон Ома.
14. Каковы факторы, влияющие на сопротивление постоянному току?
15. Что понимается под узлом, ветвью и контуром электрической цепи?
16. Как определяются эквивалентные сопротивления при последовательном, параллельном и смешанном сопротивлении резисторов?
17. По каким формулам определяется мощность и энергия потреби-

телей, подключенных к источнику постоянного тока?

18. Сформулируйте и объясните закон Джоуля-Ленца.
19. Сформулируйте и объясните первый и второй законы Кирхгофа.
20. Какие электрические цепи называются линейными?

Библиографический список

5. Электротехника: Учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 7-е изд. стер. – М: Высшая школа, 2003
6. Электротехника и электроника: Учебное пособие для студентов ВУЗов / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005 г.
7. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями: Учебное пособие / Г.Г. Рекус. – М.: Высшая школа, 2005 г.
8. Электрические и магнитные цепи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, О.И. Карандаева, Г.В. Шохина, Т.П. Ларина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 163 с.

Лабораторная работа № 2

Исследование линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока. Компенсация реактивной мощности.

Цель работы:

1. Изучение основных законов и методов расчета электрических цепей однофазного синусоидального тока.
2. Анализ однофазных синусоидальных цепей с помощью векторных диаграмм.
3. Изучение возможности компенсации реактивной мощности.

1. Теоретические сведения

Общие положения

Электрические цепи, в которых значения и направления ЭДС, напряжения и тока периодически изменяются во времени по синусоидальному закону, называются цепями синусоидального тока.

Выражение мгновенного значения синусоидального тока определяется тригонометрической функцией

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

График мгновенных значений тока $i(t)$ показан на рис. 1.

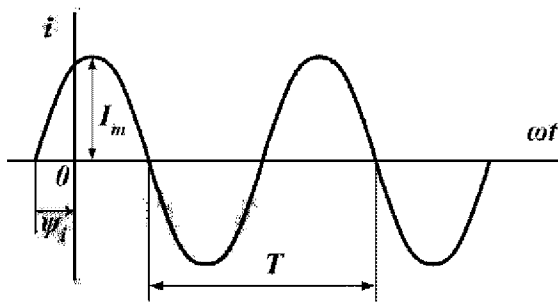


Рис. 1

Амплитуда I_m равна максимальному значению тока. Аргумент синуса $(\omega t + \psi_i)$, измеряемый в радианах, определяет фазный угол синусоидальной функции тока в любой момент времени t и называется фазой, а величина ψ_i , равная фазному углу в момент начала отсчета времени $t = 0$, — начальной фазой. Величина ω определяет число радианов, на которое изменится фаза колебаний за секунду, и называется угловой частотой.

Через промежуток времени T , называемый периодом, фаза колебаний изменится на угол 2π , и цикл колебаний повторяется снова $i(t) = i(t + T)$, следовательно, период и угловая частота связаны соотношением $\omega T = 2\pi$. Длительность периода принято измерять в секундах. Величину, обратную периоду, называют частотой и обозначают f , измеряют в герцах $Гц$. Частота определяется количеством периодов в секунду

$$f = 1/T.$$

Очевидно, что

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f.$$

Все сказанное относительно тока справедливо также для синусоидально изменяющихся напряжений $u(t)$ и ЭДС $e(t)$.

При совместном рассмотрении нескольких синусоидальных величин одной частоты обычно интересуются разностью их фазовых углов, называемой углом сдвига фаз. Угол сдвига фаз определяется как разность начальных фаз синусоидальных функций. На рис. 2 представлены графики мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. Угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

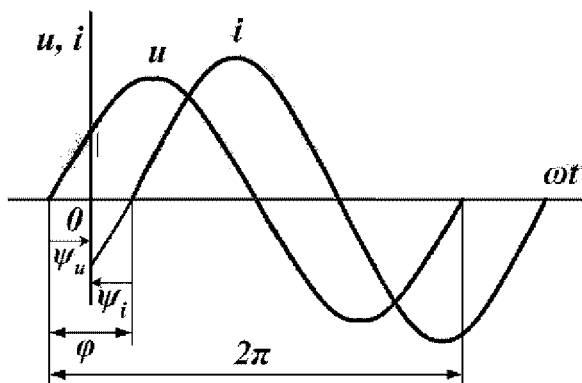


Рис. 2

Если $\psi_u > \psi_i$, то $\varphi > 0$, при этом говорят, что напряжение опережает ток по фазе или ток отстает от напряжения. В случае $\psi_u < \psi_i$, $\varphi < 0$, т.е. напряжение отстает по фазе от тока или ток опережает напряжение.

В практике применения переменных токов широко пользуются понятием действующего значения, электрической величины. Действующим значением называют среднее квадратичное значение переменной величины за период

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

Как известно из курса физики, тепловое и электромеханическое действия, тока пропорциональны квадрату его мгновенного значения, поэтому именно действующий ток I может служить количественной мерой их оценки за период.

Связь между амплитудой и действующим значением для синусоидальных величин, при $i = I_m \sin \omega t$

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T [(1 - \cos 2\omega t) / 2] dt = I_m^2 \frac{T}{2}.$$

Следовательно, в соответствии с определением (1) действующее значение тока

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

Для действующих значений синусоидально изменяющихся напряжения и ЭДС справедливы аналогичные выражения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Изображение синусоидальных функций времени

Электрическое состояние цепей переменного тока, так же как и цепей постоянного тока, описывается уравнениями Кирхгофа. Математический аппарат с тригонометрическими функциями громоздкий. Для упрощения решения используются две формы представления синусоидальных функций: радиус-вектор и комплексное число.

Из геометрии известно, что любая синусоидальная функция времени может быть условно изображена однозначно соответствующим ей радиус-вектором, вращающимся в плоскости декартовых координат. Длина вектора равна амплитудному значению синусоиды, а начальное положение относительно оси x определяется начальной фазой синусоиды. На рис. 3 представлен радиус-вектор, длина которого равна A_m .

Вектор вращается в плоскости декартовых координат $x - y$ против часовой стрелки с равномерной частотой ω и поворачивается за время одного оборота T на угол 2π , т.е. $\omega T = 2\pi$.

Проекция вектора на ось y определяется выражением

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi_a)$$

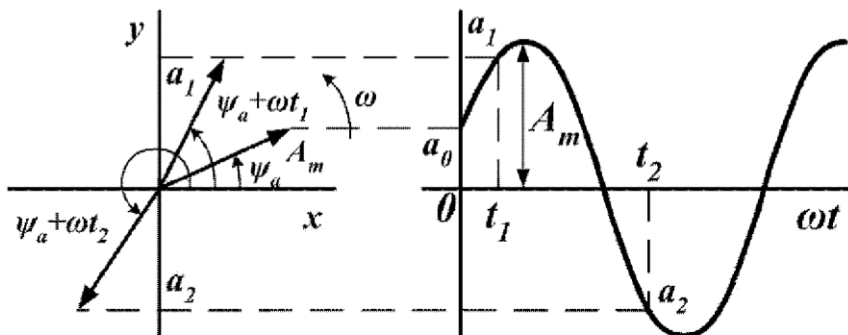


Рис. 3

Совокупность радиус-векторов, изображающих синусоидальные функции времени, называется *векторной диаграммой*. Векторная диаграмма на рис. 4 позволяет путем простейших геометрических построений провести суммирование, например, двух синусоидальных функций.

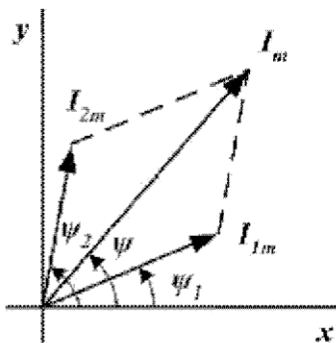


Рис. 4

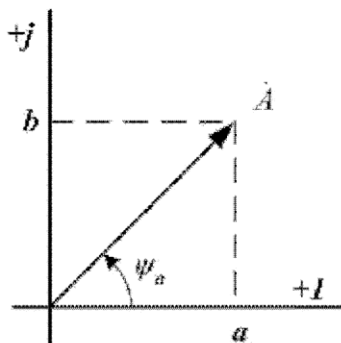


Рис. 5

Для расчетов используют *комплексное число*. Комплексные изображения синусоидальных функций позволяют совместить простоту и наглядность векторных диаграмм с возможностью проведения точных аналитических расчетов.

Радиус-вектор, изображающий синусоидальную функцию, может быть перенесен на плоскость комплексных чисел $+I$, $+j = \sqrt{-1}$. Из математики известно, что любому вектору \dot{A} на комплексной плоскости

однозначно соответствует комплексное число, которое может быть записано в трех формах:

– алгебраическая форма $\dot{A} = a + j b$,

где a и b – проекции вектора на оси действительных и мнимых чисел;

– тригонометрическая форма $\dot{A} = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a$,

где A – модуль, т.е. длина вектора; ψ_a – угол;

– показательная форма $\dot{A} = A e^{j \psi_a}$.

Все три формы записи в соответствии с формулой Эйлера равнозначны

$$\dot{A} = a + j b = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a = A e^{j \psi_a}.$$

Выбор той или иной формы определяется удобством осуществления нужной математической операции с комплексными числами. Суммирование и вычитание удобно проводить в алгебраической форме

$$\dot{A}_1 + \dot{A}_2 = (a_1 + j b_1) + (a_2 + j b_2) = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2) = c + j d.$$

Умножение и деление удобно производить в показательной форме:

$$\dot{A}_1 \cdot \dot{A}_2 = A_1 e^{j \psi_1} \cdot A_2 e^{j \psi_2} = A_1 \cdot A_2 e^{j(\psi_1 + \psi_2)} = B e^{j \psi}$$

или

$$\frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} = \frac{A_1 e^{j \psi_1}}{A_2 e^{j \psi_2}} = \frac{A_1}{A_2} e^{j(\psi_1 - \psi_2)} = B e^{j \varphi}.$$

Переход от одной формы записи числа к другой очевиден (рис. 5).

Модуль числа $A = \sqrt{a^2 + b^2}$; аргумент $\psi_a = \arctg \frac{b}{a}$; действительная часть комплексного числа $a = A \cos \psi_a$; мнимая часть

комплексного числа $b = A \sin \psi_a$.

Идеальные элементы в цепи однофазного синусоидального тона

Электромагнитные явления в цепях переменного тока оказываются более сложными, чем в цепях постоянного тока. В цепях переменного тока, так же как и в цепях постоянного тока, происходят необратимые преобразования электрической энергии в другие виды, однако процесс

сопровождается сложными явлениями переменного электромагнитного поля.

Из физики известны явления, происходящие в электрическом поле. В проводниках, разделенных диэлектриком, между которыми создана переменная ЭДС, будет накапливаться заряд q , а в окружающем их пространстве будет существовать электрическое поле. Электрическое поле приводит к поляризации диэлектрика, разделяющего проводники. Напряжение изменяется во времени, поэтому заряды на проводниках и поляризация будут также изменяться, при этом в диэлектрике возникает ток смещения

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt},$$

а в источнике - равный ему ток проводимости, т.е. и в отсутствие приемника источник нагружен током, значение которого определяется емкостью соединительных проводов.

Из физики также известны явления, происходящие в магнитном поле. Изменяющийся электрический ток создает в окружающем его пространстве переменное магнитное поле, которое в свою очередь индуцирует в катушке ЭДС самоиндукции e_L . Значение ЭДС e_L определяется скоростью изменения потокосцепления катушки ψ с магнитным полем

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Анализ цепей синусоидального тока значительно сложнее, чем цепей постоянного тока, так как на любом участке цепи осуществляются необратимые процессы преобразования электрической энергии и одновременно проявляются действия переменного электромагнитного поля, т.е. присутствуют токи смещения и ЭДС самоиндукции. Поэтому, при решении большинства электротехнических задач вводят допущения, которые упрощают анализ цепи переменного тока.

Например, процессы, происходящие в лампе накаливания, включенной в сеть переменного тока. Между витками нити накаливания существует емкость, нить обладает определенной индуктивностью. Однако, на промышленной частоте токи смещения в диэлектрике значительно меньше тока проводимости в металлической нити, ЭДС самоиндукции мала, ей можно пренебречь. При такой идеализации ($C = 0, L = 0$) лампа характеризуется только необратимым преобразованием электрической энергии в тепловую и лучистую. Лампу называют идеальным резистивным элементом цепи с сопротивлением R или R -элементом.

К идеальным резистивным элементам могут быть отнесены реостаты, электронагревательные приборы.

Другой идеальный элемент - конденсатор. Магнитным полем токов смещения конденсатора можно пренебречь вплоть до очень высоких частот, нагрев диэлектрика также мал. При таких допущениях конденсатор называют идеальным емкостным элементом или C-элементом.

Индуктивная катушка является примером идеального индуктивного элемента или L-элементом. На промышленной частоте токи смещения между витками несоизмеримо меньше токов проводимости в катушке, нагрев проводов также мал.

Введение R , L , C -элементов позволяет создать расчетные схемы замещения, т.е. математические модели любых реальных электротехнических устройств.

Наличие C -элементов в схеме замещения отражает наличие в рассматриваемой цепи явлений, происходящих в электрическом поле, связанных с поляризацией диэлектрика и возникновением токов смещения, которые характерны не только для конденсатора.

С помощью R -элемента учитывают необратимые преобразования энергии не только в тепловую, но и в другие виды, например в механическую.

Наличие L -элемента учитывает энергетические процессы, происходящие в магнитном поле.

Электрическая цепь с R -элементом (рис. 6,а)

Мгновенные значения тока и напряжения R -элемента связаны законом Ома

$$u = Ri.$$

Следовательно, при заданном синусоидальном напряжении источника ток в резистивном элементе также будет синусоидальным, той же частоты и совпадать по фазе.

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

$$U_m = RI_m; \quad \psi_i = \psi_u; \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = 0.$$

Графики мгновенных значений напряжения и тока для случая $\psi_u = 0$ показаны на рис. 6,б.

Для действующих значений закон Ома

$$U = RI.$$

Соотношения между напряжением и током R -элемента можно записать в комплексной форме.

Если $\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}$ и $\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i}$, то комплексное сопротивление

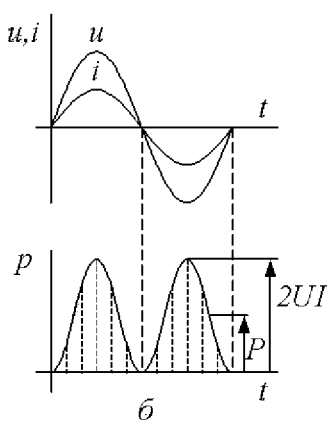
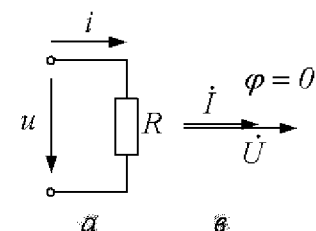


Рис. 6

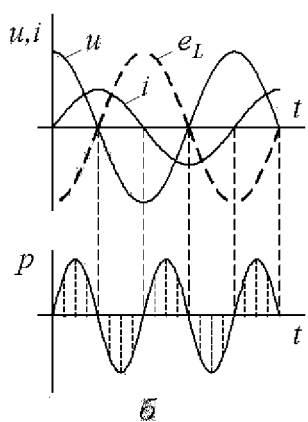
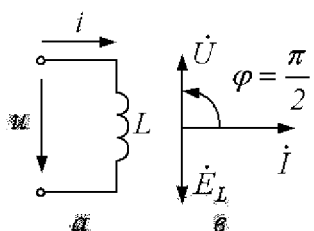


Рис. 7

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = R e^{j0} = R;$$

$$\dot{U}_m = R \dot{I}_m; \quad \dot{U} = R \dot{I}; \quad \underline{Z} = R.$$

На рис. 6, в представлена векторная диаграмма цепи, где вектор тока в R -элементе совпадает с вектором напряжения. Скорость поступления энергии, т.е. мощность p

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t).$$

Мощность колеблется с угловой частотой 2ω и в пределах от 0 до $2UI$. Мгновенная мощность всегда положительна, т.е. *R-элемент потребляет энергию от источника и необратимо преобразует ее в другие виды энергии.*

Среднее значение мощности за период называют *активной мощностью P*

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt = UI;$$

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

Электрическая цепь с L -элементом (рис. 7,а)

Индуктивный элемент подключен к источнику синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$.

При этом потокосцепление самоиндукции ψ также будет переменным $\psi = Li$. Изменяющееся потокосцепление наводит в катушке ЭДС самоиндукции e_L .

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i)$$

или

$$e_L = E_{Lm} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right), \text{ где } E_{Lm} = L\omega I_m.$$

ЭДС самоиндукции синусоидальна, но отстает от тока по фазе на $\pi/2$. В соответствии с правилом Ленца, в любой момент времени ЭДС e_L противодействует изменению тока, т.е. направлена против тока, когда он нарастает по модулю и совпадает с током по направлению, если ток убывает.

ЭДС самоиндукции определяет разность потенциалов на зажимах L -элемента. Тогда для напряжения, положительное направление которого совпадает с током, можно записать

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt}.$$

Следовательно,

$$u = L \frac{di}{dt} = L \omega I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

Напряжение на индуктивном элементе синусоидально, но опережает ток на $\pi/2$.

$$\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}, \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}.$$

Амплитудные значения тока и напряжения связаны соотношением

$$U_m = L \omega I_m.$$

Величину $L\omega$, имеющую размерность Ω , обозначают X_L и называют *индуктивным сопротивлением*. Тогда закон Ома для амплитудных и действующих значений

$$U_m = X_L I_m; \quad U = X_L I.$$

В комплексной форме

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = X_L e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_L.$$

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = X_L I_m e^{j\left(\psi_i + \frac{\pi}{2}\right)}; \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}.$$

Следовательно, $\dot{U}_m = jX_L \dot{I}_m$ и $\dot{U} = jX_L \dot{I}$.

Векторная диаграмма для индуктивного элемента представлена на рис. 7,в. Вектор напряжения на индуктивном элементе опережает ток на угол $\pi/2$.

Мгновенная мощность индуктивного элемента

$$p = ui = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin \omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Активная мощность P , характеризующая необратимые преобразования:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0$$

Таким образом, в цепи с идеальным индуктивным элементом не совершается работа, а происходит периодический обмен энерги-

ей между источником и магнитным полем. Интенсивность этого обмена характеризуется реактивной мощностью Q_L .

$$Q_L = UI = X_L I^2 = \frac{U^2}{X_L}.$$

Электрическая цепь с C -элементом (рис. 8,а)

Если C -элемент подключен к источнику синусоидального напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, то изменяющаяся разность потенциалов вызовет перераспределение заряда $q = Cu$ и, следовательно, в цепи возникнет ток i .

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C\omega U_m \cos(\omega t + \psi_u) \quad \text{или}$$

$$i = C\omega U_m \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где $I_m = C\omega U_m$.

Графики мгновенных значений u и i для случая $\psi_u = 0$ представлены на рис. 8,б. Ток в C -элементе синусоидален, но опережает напряжение на угол $\pi/2$, $\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}$ угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2}$.

Величину $\frac{I}{C\omega}$, имеющую размерность $Ом$, обозначают X_C и называют емкостным сопротивлением. Тогда закон Ома для амплитудных и действующих значений

$$U_m = X_C I_m; \quad U = X_C I.$$

В комплексной форме

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C = -j \frac{1}{\omega C}.$$

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}; \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i} = I_m e^{j\left(\varphi_u + \frac{\pi}{2}\right)}.$$

Следовательно, $\dot{U}_m = -jX_C \dot{I}_m$ и $\dot{U} = -jX_C \dot{I}$.

Векторная диаграмма для емкостного элемента представлена на рис.8,в. Вектор тока в емкостном элементе опережает вектор напряжения на угол $\pi/2$.

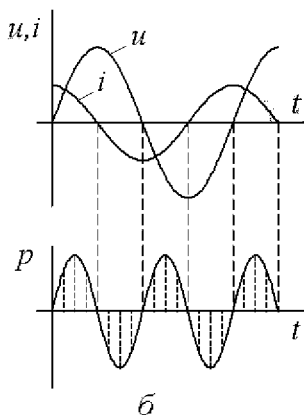
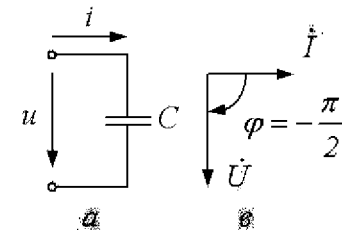


Рис. 8

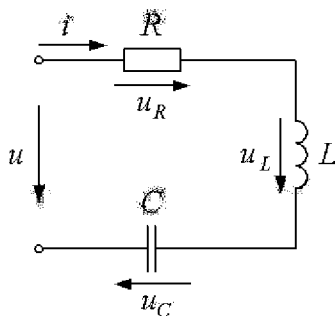


Рис. 9

Мгновенная мощность емкостного элемента

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t.$$

Активная мощность как средняя за период

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0$$

Таким образом, в цепи с идеальным емкостным элементом не совершается работа, а происходит только периодический обмен энергией между источником и электрическим полем. Интенсивность этого обмена характеризуется реактивной мощностью Q_C .

$$Q_C = UI = X_C I^2 = \frac{U^2}{X_C}.$$

Последовательное соединение элементов в цепи синусоидального тока

Для электрической цепи на рис. 9 уравнение по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений

$$u = u_R + u_L + u_C$$

В комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (2)$$

Учитывая, что $\dot{U}_R = R\dot{I}$; $\dot{U}_L = jX_L\dot{I}$; $\dot{U}_C = -jX_C\dot{I}$ и $\dot{U} = \underline{Z}\dot{I}$, где \underline{Z} - эквивалентное комплексное сопротивление цепи, получим

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}^*}{\dot{I}} = R + jX_L - jX_C.$$

При последовательном соединении элементов цепи эквивалентное комплексное сопротивление равно сумме комплексных сопротивлений, всех последовательно включенных элементов.

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi}; \quad X = X_L - X_C.$$

Индуктивное сопротивление X_L и емкостное X_C являются арифметическими величинами, зависящими только от параметров элементов и частоты:

$$X_L = L\omega; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Реактивное сопротивление X - величина алгебраическая, и его знак зависит от соотношения между индуктивными и емкостными сопротивлениями.

На рис. 10 сделаны построения, соответствующие комплексному выражению $\underline{Z} = R + jX$.

Заштрихованный прямоугольный треугольник на рис. 10 принято называть треугольником сопротивлений. Из треугольника очевидны соотношения:

модуль сопротивления $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$;

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}; \quad R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi.$$

Аргумент $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$.

На рис. 11 представлена векторная диаграмма цепи, если $\psi_i = 0$. Построение векторной диаграммы удобно начинать с вектора тока \dot{I} , который является одним и тем же для всех элементов цепи. Векторы напряжений \dot{U}_R , \dot{U}_L , и \dot{U}_C ориентированы по отношению к вектору тока в соответствии с фазовыми соотношениями для идеальных элементов, а вектор напряжения \dot{U} , найден в соответствии с уравнением (2). При построении учтено, что $X_L > X_C$ и соответственно $U_L > U_C$. Заштрихованный прямоугольный треугольник на рис. 11 принято называть треугольником напряжений.

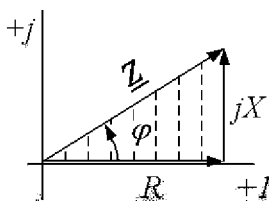


Рис. 10

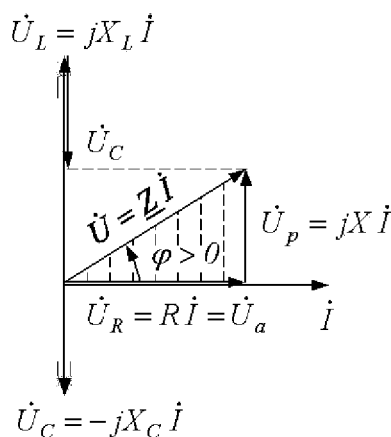


Рис.11

На рис. 12 и 13 представлены векторные диаграммы при условии $X_L < X_C$ и $X_L = X_C$.

На рис. 11 вектор напряжения \dot{U} опережает вектор тока \dot{I} , т.е. цепь носит индуктивный характер.

модуль напряжения $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$;

$$U_a = U \cos \varphi; U_p = U \sin \varphi.$$

Из треугольника напряжений несложно получить треугольник мощностей, умножив каждую сторону на ток, общий для всех элементов (рис.14).

Стороны треугольника мощностей соответственно означают:

$$P = U_R I = I^2 R - \text{активная мощность цепи};$$

$$Q = U_p I = (U_L - U_C) I = U_L I - U_C I = I^2 X_L - I^2 X_C = Q_L - Q_C$$

- реактивная мощность;

$$S = UI = I^2 Z - \text{полная мощность};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \lambda - \text{коэффициент мощности}.$$

Из треугольника мощностей можно установить следующие соотношения:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi;$$

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI.$$

За единицу активной мощности принят ватт (Вт) или киловатт (кВт), реактивной мощности - вольт-ампер реактивный (ВАр или кВАр); полной мощности - вольт-ампер (ВА или кВА).

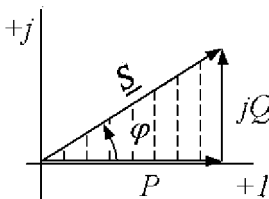


Рис. 14

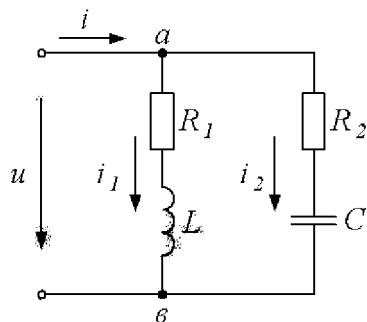


Рис. 15

На рис. 12 вектор напряжения \dot{U} отстает от вектора тока \dot{I} , т.е. цепь носит емкостный характер.

На рис. 13 вектор напряжения \dot{U} совпадает по фазе с вектором тока \dot{I} . Это явление называют резонансом напряжений. Условие резонанса напряжений

$$X_L = X_C \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

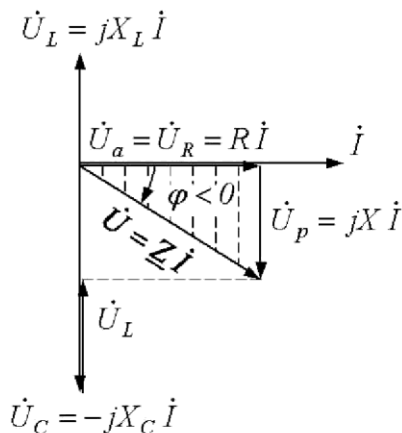


Рис. 12

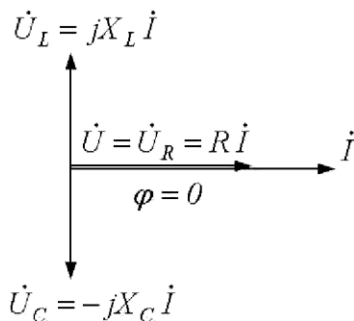


Рис. 13

Анализируя векторные диаграммы, нужно обратить внимание на большую роль фазовых соотношений. Так, например, именно потому, что напряжения на L - и C - элементах находятся в противофазе, в цепи с последовательным соединением элементов могут создаваться условия, невозможные для цепей постоянного тока, когда напряжения на отдельных участках цепи значительно превышают напряжения на входе (см. рис. 11).

Заштрихованный прямоугольный треугольник (см. рис. 12) называют треугольником напряжений. Проекцию вектора напряжения \dot{U} на вектор тока \dot{I} называют активной составляющей напряжения \dot{U}_a , проекцию на направление, перпендикулярное вектору тока, \dot{U}_p - реактивной составляющей.

Очевидны соотношения:

Активную, реактивную и полную мощности можно определить, пользуясь комплексным изображением напряжения и тока. Комплексное соотношение

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^*,$$

где \dot{U} - комплекс напряжения; \dot{I}^* - сопряженный комплекс тока.

Так как $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$; $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$; имеем

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi},$$

т.е. модуль S комплексного числа \underline{S} равен полной мощности. В тригонометрической форме

$$\underline{S} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ.$$

Следует обратить внимание, что комплексная мощность не является изображением синусоиды, поэтому над ее символом не ставят точку. Символ мощности, так же как символ комплексного сопротивления, подчеркивают.

Параллельное соединение элементов в цепи синусоидального тока

Для электрической цепи на рис. 15 для узла a . уравнение по первому закону Кирхгофа для мгновенных значений

$$i = i_1 + i_2.$$

Для комплексных изображений

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 по закону Ома $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1}$ и $\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2}$, где

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_L \quad \text{и} \quad \underline{Z}_2 = R_2 - jX_C.$$

Тогда $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \dot{U} \left(\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} \right)$.

Величина, обратная комплексному сопротивлению, называется комплексной проводимостью \underline{Y} :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = g + jb,$$

где q - активная проводимость; b - реактивная проводимость

$$\frac{1}{Z_1} = \underline{Y}_1; \quad \frac{1}{Z_2} = \underline{Y}_2;$$

$$\dot{I} = (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2)\dot{U} = \underline{Y}\dot{U} = (q + jb)\dot{U} = q\dot{U} + jb\dot{U}.$$

Активная и реактивная составляющая тока

$$\dot{I}_a = q\dot{U}, \quad \dot{I}_p = jb\dot{U},$$

для модулей справедливо

$$I_a = qU, \quad I_p = bU.$$

Анализ фазовых соотношений между током I и напряжением U удобно провести с помощью векторных диаграмм. Построение диаграммы удобно начинать с вектора напряжения U , которое является одним и тем же для обеих параллельных ветвей (рис. 16,а).

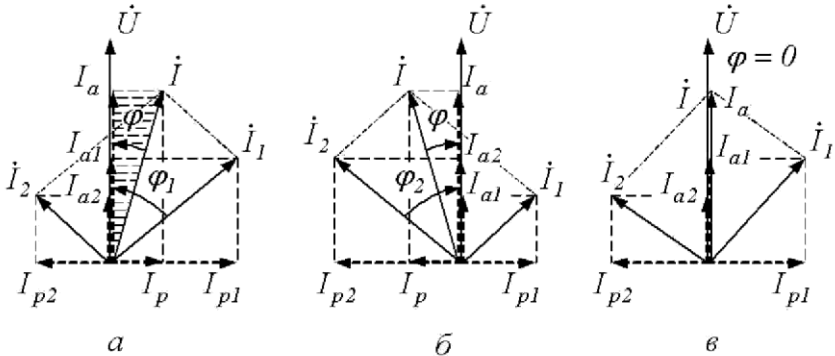


Рис. 16

Ток первой ветви \dot{I}_1 , содержащей индуктивный элемент, отстает по фазе от напряжения на угол φ_1 :

$$\varphi_1 = \text{arctg} \frac{X_L}{R_1}.$$

Ток второй ветви \dot{I}_2 , содержащий емкостный элемент, опережает напряжение на угол φ_2 :

$$\varphi_2 = \text{arctg} \frac{X_C}{R_2}.$$

Ток неразветвленного участка \dot{I} найден по первому закону Кирхгофа как сумма \dot{I}_1 и \dot{I}_2 .

Из простых геометрических построений видно, что модуль активной I_a и реактивной I_p составляющих тока неразветвленной цепи связаны с соответствующими составляющими токов ветвей соотношениями

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} \quad \text{и} \quad I_p = I_{p1} + I_{p2}.$$

Векторная диаграмма на рис. 16,а соответствует случаю, когда $I_{p1} > I_{p2}$. Поэтому ток неразветвленной части цепи отстает от вектора напряжения на угол φ , при этом говорят, что цепь носит индуктивный характер. Векторная диаграмма на рис. 16,б соответствует случаю $I_{p1} < I_{p2}$, т.е. цепь носит емкостный характер, ток неразветвленной части цепи опережает по фазе напряжение. Возможен случай, когда ток неразветвленного участка цепи совпадает по фазе с напряжением (рис. 16,в). Режим, при котором в цепи, содержащей параллельные ветви с индуктивным и емкостным элементами, ток неразветвленного участка цепи совпадает по фазе с напряжением ($\varphi = 0$), называют резонансом токов. При этом

$$I_{p1} = I_{p2} \quad \text{или} \quad I_{pL} = I_{pC}. \quad (3)$$

Учитывая, что

$$I_{p1} = I_{pL} = b_L U = b_L U \quad \text{или} \quad I_{p2} = I_{pC} = b_C U = b_C U,$$

условие резонанса токов

$$b_L = b_C.$$

Из заштрихованного треугольника токов (рис.16,а) очевидно, что $I_p = I \sin \varphi$; $I_a = I \cos \varphi$.

$$\text{Токи} \quad I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}}; \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}.$$

$$\text{Кроме того} \quad \sin \varphi_1 = \frac{X_L}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{X_C}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}.$$

Поэтому условие резонанса токов через параметры цепи R_L , R_C , L и C в соответствии с (3)

$$\frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}.$$

Следует обратить внимание, что условие резонанса токов определяется не только реактивными, но и активными сопротивлениями ветвей.

В рассмотренной электрической цепи фазовые соотношения могут приводить к условиям, невозможным для цепей постоянного тока. Так, например, ток неразветвленной части цепи может быть меньше токов ветвей. Это объясняется тем, что реактивные емкостные и индуктивные составляющие находятся в противофазе.

Суммирование токов в цепях синусоидального тока следует проводить с учетом фазовых соотношений, т.е. сдвигов по фазе, что осуществляется с помощью комплексных чисел или геометрических построений на комплексной плоскости. Активная мощность цепи равна арифметической сумме активных мощностей всех ветвей

$$P = P_1 + P_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

Реактивная мощность цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей всех ветвей, причем, реактивную индуктивную мощность берут со знаком плюс, а емкостную - со знаком минус.

$$Q = Q_L + Q_C = I_1^2 X_L - I_2^2 X_C.$$

Полная мощность цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

В комплексной форме

$$\underline{S} = \dot{U} \overset{*}{I} = P + jQ.$$

Технико-экономическое значение коэффициента мощности

Рассмотрим электрическую цепь на рис. 17, а, где к генератору электрической энергии G подключен один из самых распространенных приемников - асинхронный двигатель. Принцип действия асинхронного двигателя основан на силовом взаимодействии магнитного поля и проводников с током, т.е. преобразовании электрической энергии в механическую энергию посредством магнитного поля. Схема замещения такого приемника представлена индуктивным элементом L_{np} и активным R_{np} , который указывает, что в двигателе происходит необратимое преобразование электрической энергии в механическую, т.е. совершается работа.

Из схемы замещения видно, что ток

$$\dot{I}_{np} = \frac{\dot{U}}{R_{np} + jX_{Lnp}}.$$

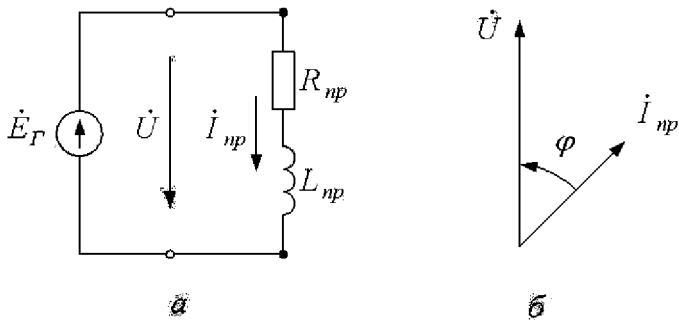


Рис. 17

Угол сдвига фаз φ между током \dot{I}_{np} и напряжением \dot{U} генератора, а, следовательно, коэффициент мощности генератора определяется параметрами двигателя

$$\cos \varphi = \frac{R_{np}}{\sqrt{R_{np}^2 + X_{np}^2}}.$$

Векторная диаграмма цепи показана на рис. 17, б.

В схеме рис. 17, а происходит обмен энергией между генератором и магнитным полем двигателя, т.е. реактивная мощность принципиально не может быть равна нулю. Поэтому генератор работает в условиях, когда $P < S_{ном}$.

Номинальная мощность $S_{ном} = U_{ном} I_{ном}$, соответствует паспортным данным генератора.

Очевидно, что генератор энергетически выгодно эксплуатировать так, чтобы совершаемая им работа была максимальной

$$P = P_{ном} = S_{ном} \cos \varphi = S_{ном}$$

Т.е. существует проблема повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$.

Рассмотрим схему на рис. 18, а, на которой параллельно двигателю включен емкостный элемент - конденсатор.

Подключение конденсатора никак не скажется на работе двигателя: напряжение на зажимах двигателя не изменилось и, следовательно, остался неизменным его ток, активная и реактивная мощности. Однако условия работы генератора отличаются, т.к. ток генератора I_G уже не равен току двигателя, а определяется соотношением

$$\dot{I}_G = \dot{I}_{np} + \dot{I}_C.$$

Векторная диаграмма приведена на рис. 18, б.

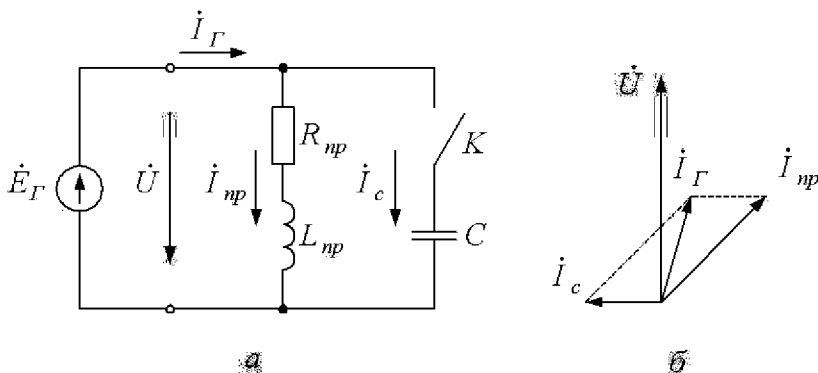


Рис. 18

При соответствующем подборе емкости конденсатора можно добиться резонансного режима, т.е. обеспечить работу генератора при максимальном значении коэффициента мощности. При этом будет происходить обмен энергией, запасаемой в магнитном поле двигателя, не с генератором, а с емкостным элементом.

Это дает энергетические преимущества. Во-первых, при неизменной работе, совершаемой двигателем, уменьшается ток генератора. Это означает, что в данной схеме может быть использован генератор меньшей мощности, или к нему могут быть подключены дополнительно другие потребители электрической энергии.

Во-вторых, подключение емкостного элемента снижает ток в линии электропередачи, соединяющей двигатель с генератором, что позволяет уменьшить сечение соединительных проводов, т.е. экономить электропроводящие материалы.

Рассмотренный способ повышения коэффициента мощности требует дополнительных затрат на установку конденсатора. Технико-экономические расчёты показывают, что в энергетических системах целесообразно осуществлять установку конденсаторов, емкость которых

позволяет повышать коэффициент мощности до значений, несколько меньших единицы.

В энергетических системах для повышения коэффициента мощности используют также синхронные двигатели, схемы, замещения которых при определенных условиях содержат емкостные элементы. Значение коэффициента мощности в энергосистемах зависит ещё, и от того, насколько грамотно эксплуатируют электротехнические установки. Например, коэффициент мощности асинхронного двигателя резко снижается, если двигатель работает в режиме холостого хода или недогружен до номинальной мощности и т.д.

2. Программа работы

1. Ознакомиться с оборудованием лабораторной установки. Определить цену деления измерительных приборов, используемых в данной работе.

Для исследования применяется электронный осциллограф типа Л0-70, который позволяет наблюдать синусоидальные кривые напряжений и тока, измерять их амплитуду и фазовый сдвиг.

2. Исследовать последовательное соединение идеальных элементов в цепи однофазного синусоидального тока. Для этого собрать электрическую цепь по рис. 19.

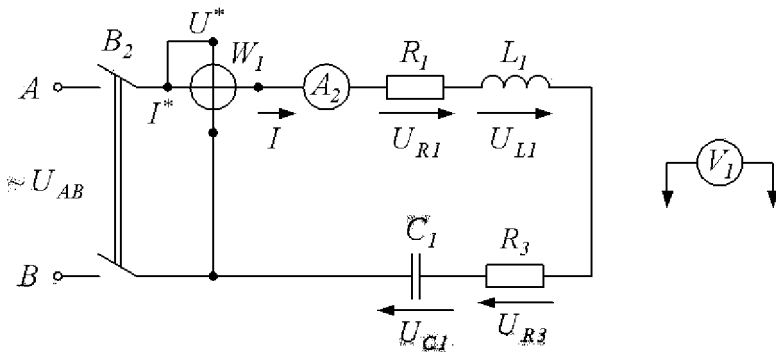


Рис. 19

3. После проверки схемы преподавателем подать на стенд напряжение. Измерить ток, мощность и напряжение на участках цепи. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Измерено						
I	P	U_{AB}	U_{R1}	U_{L1}	U_{R3}	U_{C1}
A	Bm	B	B	B	B	B

Таблица 1 (продолжение)

Вычислено									
Z	R_1	R_3	R_Σ	R_{L1}	Z_{L1}	X_{L1}	L_1	$\cos\varphi_{L1}$	φ_{L1}
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	-	эл.гр.

Таблица 1 (продолжение)

Вычислено							
X_{C1}	C_1	Q_{L1}	Q_C	Q	S	$\cos\varphi$	φ
Ом	мкФ	ВАр	ВАр	ВАр	ВА	-	эл.гр.

По результатам измерений убедиться, что в отличие от цепи постоянного тока, уравнение второго закона Кирхгофа для замкнутого контура справедливо в комплексной (векторной) форме, т.е.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{R3} + \dot{U}_{C1}$$

или

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{R3} + \bar{U}_{C1}.$$

Обратить внимание, что из-за фазовых сдвигов напряжение на отдельных элементах цепи может быть по модулю больше напряжения источника, что в цепях постоянного тока невозможно.

4. Проанализировать кривые тока и напряжений на участках цепи U_{AB} , U_{R1} , U_{L1} , U_{R3} , U_{C1} , наблюдая их на экране осциллографа. Для этого провода от осциллографа поочередно присоединять ко всем участкам цепи, обращая внимание на амплитуду и фазовый сдвиг напря-

жений. Ручку осциллографа "усиление" установить так, чтобы в дальнейшем положение ее оставалось неизменным. Зарисовать кривые напряжений с экрана осциллографа на кальку.

5. Исследовать параллельное соединение элементов в цепи однофазного синусоидального тока. Собрать электрическую цепь по рис. 20.

Измерить токи, напряжения, мощность в цепи. Результаты измерений занести в табл. 2.

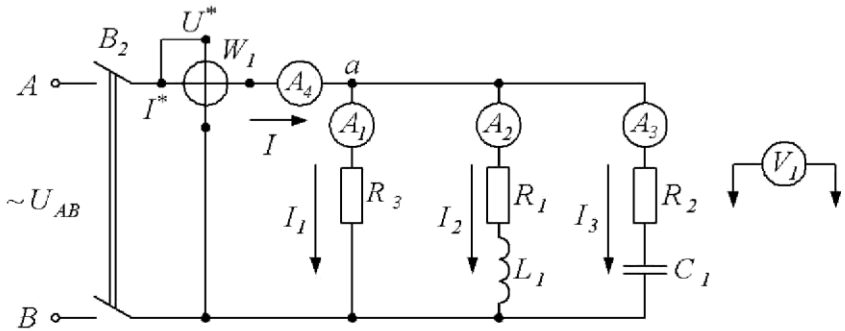


Рис. 20

Таблица 2

Измерено									
I	I_1	I_2	I_3	U_{AB}	U_{R1}	U_{L1}	U_{R2}	U_{C1}	P
A	A	A	A	B	B	B	B	B	Вт

Таблица 2 (продолжение)

Вычислено								
R_2	$P_{расч}$	Q	S	$\cos \varphi$	φ	φ_1	φ_2	φ_3
Ом	Вт	ВАр	ВА	-	эл.гр.	эл.гр.	эл.гр.	эл.гр.

Обратить внимание, что в отличие от электрической цепи постоянного тока, уравнение первого Закона Кирхгофа для узла "а" справедливо в комплексной или векторной форме, т.е.

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

или

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3.$$

Обратить внимание, что из-за фазовых сдвигов, токи в отдельных ветвях цепи могут быть по модулю больше тока источника, что в цепях постоянного тока невозможно.

6. Исследовать возможность компенсации реактивной мощности.

Большинство приемников электрической энергии (трансформаторы, асинхронные двигатели) имеют активно-индуктивный характер.

В лабораторной работе приемник электрической энергии представлен элементами R_1 и L_1 .

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой приемником из сети, параллельно ему включают конденсатор C_1 .

Собрать схему по рис. 21.

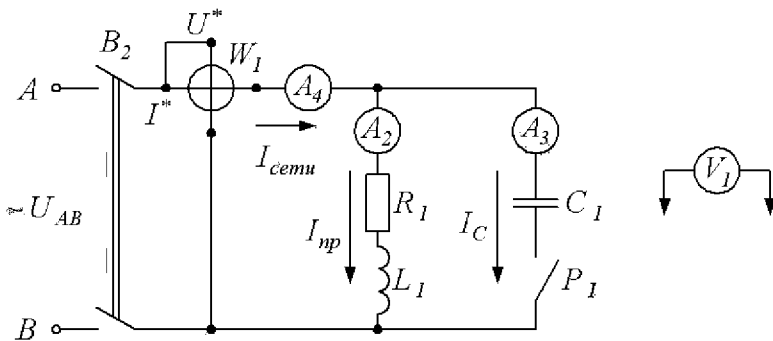


Рис. 21

Измерить токи, напряжения, мощность для разомкнутого и замкнутого положения рубильника. Результаты занести в табл.3. Обратить внимание, что подключение конденсатора C_1 параллельно приемнику уменьшает потребляемый из сети ток.

Таблица 3

Измерено								
P ₁ разомкнут				P ₁ замкнут				
U_{AB}	$I_{сети}$	I_{np}	P_W	U_{AB}	$I_{сети}$	I_{np}	I_C	P_W
<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Вт</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Вт</i>

Таблица 3 (продолжение)

Вычислено								
Z_{np}	$\cos \varphi_{np}$	φ_{np}	Q_{np}	Q_C	Q	S	$\cos \varphi$	φ
<i>Ом</i>	-	<i>эл.гр.</i>	<i>ВАр</i>	<i>ВАр</i>	<i>ВАр</i>	<i>ВА</i>	-	<i>эл.гр.</i>

Обработка результатов эксперимента

1. Определить модули сопротивлений элементов, и всей цепи (см. рис. 19).

$$Z = \frac{U_{AB}}{I}; \quad R_I = \frac{U_{RI}}{I}; \quad R_3 = \frac{U_{R3}}{I}; \quad Z_{LI} = \frac{U_L}{I}; \quad R_{\Sigma} = \frac{P}{I^2};$$

$$R_{LI} = R_{\Sigma} - (R_I + R_3); \quad X_{LI} = \sqrt{Z_{LI}^2 - R_{LI}^2}; \quad X_{CI} = \frac{U_{CI}}{I}.$$

2. Определить параметры элементов цепи (см. рис. 19).

$$L_I = \frac{X_{LI}}{2\pi f}; \quad C_I = \frac{1}{X_{CI} 2\pi f}; \quad \text{где } f = 50 \text{ Гц}.$$

3. Определить реактивную и полную мощности, потребляемые цепью (см. рис. 19).

Реактивная мощность может быть определена как сумма мощностей на реактивных элементах

$$Q_{LI} = I^2(X_{LI}); \quad Q_{CI} = I^2(-X_{CI}); \quad Q = Q_{LI} + Q_{CI}.$$

Полная мощность всей цепи

$$S = U_{AB} I .$$

4. Определить коэффициент мощности индуктивной катушки и всей цепи

$$\cos \varphi_{LI} = \frac{R_{LI}}{Z_{LI}}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{или} \quad \cos \varphi = \frac{R_{\Sigma}}{Z} .$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током в индуктивной катушке

$$\varphi_{LI} = \arccos \frac{R_{LI}}{Z_{LI}} \quad \text{или} \quad \varphi_{LI} = \arctg \frac{X_{LI}}{R_{LI}} .$$

Угол сдвига фаз между напряжением U_{AB} и током источника I

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P} \quad \text{или} \quad \varphi_{LI} = \arccos \frac{P}{S} .$$

5. По табл.1 построить векторную диаграмму напряжений для последовательного соединения элементов.

При построении векторной диаграммы обратить внимание на то, что индуктивная катушка обладает активным сопротивлением, поэтому напряжение U_{LI} опережает ток на угол φ_{LI} . Конденсатор - идеальный, поэтому напряжение U_{C1} отстает от тока на 90° . Удобный масштаб для построения векторной диаграммы:

$$m_i = 0,1 \text{ A / см}; \quad m_u = 20 \text{ B / см} .$$

По векторной диаграмме убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа для исследуемой цепи. Сравнить измеренное напряжение сети U_{AB} с вектором общего напряжения из диаграммы.

6. Определить параметры элементов для схемы (см. рис. 20)

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_3} .$$

Параметры R_1 , R_3 , R_{LI} , X_{LI} , X_{C1} взять из табл.1.

7. Активная мощность P определяется как сумма активных мощностей всех ветвей схемы

$$P_{\text{расч}} = I_1^2 R_3 + I_2^2 (R_{LI} + R_1) + I_3^2 R_2 .$$

Реактивная мощность Q всей цепи определяется как алгебраическая сумма реактивных мощностей

$$Q = I_2^2(X_{LI}) + I_3^2(-X_{CI})$$

Полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

8. Коэффициент мощности цепи и углы сдвига фаз между напряжением U_{AB} и токами отдельных ветвей I , I_1 , I_2 , I_3 :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \varphi = \arccos \frac{P}{S} \quad \text{или} \quad \varphi = \arctg \frac{Q}{P};$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0}{R_3} = 0; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{X_{LI}}{R_{LI} + R_1}; \quad \varphi_3 = \arctg \frac{-X_{CI}}{R_2}.$$

9. По табл.2 построить векторную диаграмму токов и напряжений. При построении учесть, что ток I_1 имеет активный характер и совпадает по фазе с напряжением U_{AB} , ток I_2 имеет индуктивный характер и отстает от напряжения U_{AB} на угол φ_2 . Ток I_3 имеет емкостный характер и опережает U_{AB} на угол φ_3 .

Показать на векторной диаграмме, что $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{R2} + \bar{U}_{CI}$ и $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{LI}$.

Удобный масштаб для построения векторной диаграммы:

$$m_i = 0,2 A / \text{см}; \quad m_u = 10 B / \text{см}.$$

10. Для схемы по рис. 21 определить коэффициент мощности приемника

$$\cos \varphi_{np} = \frac{R_{LI} + R_1}{Z_{np}}; \quad Z_{np} = \frac{U_{AB}}{I_{np}}.$$

Параметры R_1 , R_{LI} , X_{LI} , X_{CI} взять из табл.1.

11. Реактивная мощность приемника

$$Q_{np} = I_{np}^2(X_{LI}).$$

Реактивная мощность конденсатора CI :

$$Q_{C1} = I_C^2(-X_{C1}).$$

Реактивная мощность всей цепи при замкнутом PI

$$Q = Q_{np} + Q_{C1}.$$

Полная мощность цепи при замкнутом PI

$$S = U_{AB} I_{сети}.$$

Угол сдвига фаз между напряжением источника U_{AB} током сети $I_{сети}$

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

12. По табл.3 построить векторную диаграмму токов для замкнутого положения PI . Убедиться, что подключение параллельно приемнику конденсатора $C1$ уменьшает реактивную составляющую общего тока $I_{сети}$. При этом уменьшается угол φ , повышается коэффициент мощности $\cos \varphi$ цепи при неизменной активной мощности приемника. Ток, потребляемый электрической цепью из сети, уменьшается.

13. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие основные особенности имеют электрические цепи синусоидального тока?
2. Что понимается под мгновенным и действующим значениями синусоидального напряжения и тока?
3. Как определить максимальное и действующее значения синусоидального напряжения и тока?
4. Какие процессы происходят в цепи с активным сопротивлением, питаемой синусоидальным током?
5. О чем свидетельствует то обстоятельство, что в цепи с активным сопротивлением мгновенная мощность всегда положительна?
6. Какие процессы, происходят в цепи с индуктивностью и в цепи с емкостью, питаемых синусоидальным током?
7. Какой сдвиг по фазе между напряжением и током в цепи с индуктивностью и в цепи с емкостью?
8. Какие процессы происходят в цепи с последовательным соединением резистора, катушки и конденсатора?

Лабораторная работа №4

Исследование трехфазной цепи при соединении приемников энергии звездой.

Цель работы:

1. Исследовать работу трехфазных приемников, соединенных звездой в различных режимах, включая аварийные.
2. Экспериментально установить соотношения между линейными и фазными напряжениями при симметричном и несимметричном режимах работы трехфазной электрической цепи при соединении приемников энергии звездой с нейтральным проводом, звездой без нейтрального провода.
3. Объяснить назначение нейтрального провода.
4. Овладеть методикой построения векторных диаграмм по экспериментальным данным.

1. Теоретические сведения

Трехфазные электрические цепи

В *трехфазной системе* электрических цепей действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.

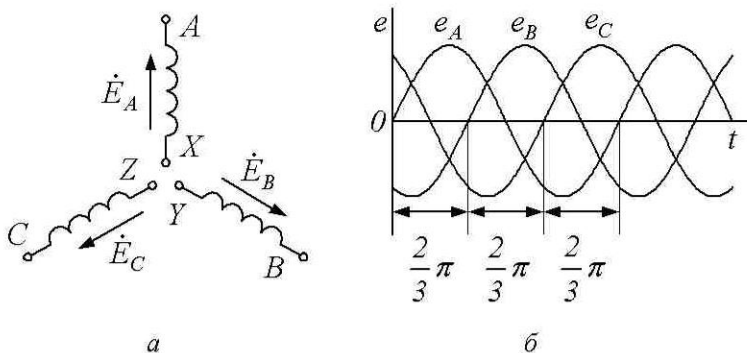


Рис. 1. Трехфазная система: *a* - условное обозначение обмоток генератора, *б* - временная диаграмма ЭДС

В качестве источника электрической энергии в трехфазных цепях используются синхронные генераторы, принцип действия и конструкция которых будет рассмотрена в разделе «Электрические машины».

В трех обмотках статора синхронного генератора индуцируются указанные три ЭДС.

При положительных направлениях ЭДС в обмотках синхронного генератора от концов X, Y, Z к началам A, B, C ЭДС изменяется в соответствии с выражениями:

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi / 3);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi / 3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi / 3).$$

Положительные направления (a) и графики (b) ЭДС синхронного генератора представлены на рис. 1.

В комплексной форме действующие значения ЭДС:

$$\dot{E}_A = E; \quad \dot{E}_B = E \cdot e^{-j2\pi/3}; \quad \dot{E}_C = E \cdot e^{j2\pi/3}.$$

Векторная диаграмма симметричной трехфазной системы для прямой (a) и обратной (b) последовательности фаз показана на рис. 2.

Из векторной диаграммы следует, что сумма ЭДС в любой момент времени равна нулю:

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

От последовательности чередования фаз зависит направление вращения асинхронного двигателя.

На практике, как правило, приемники подключаются не непосредственно к генератору, а к вторичным обмоткам трехфазных трансформаторов, в которых также действует симметричная система ЭДС.

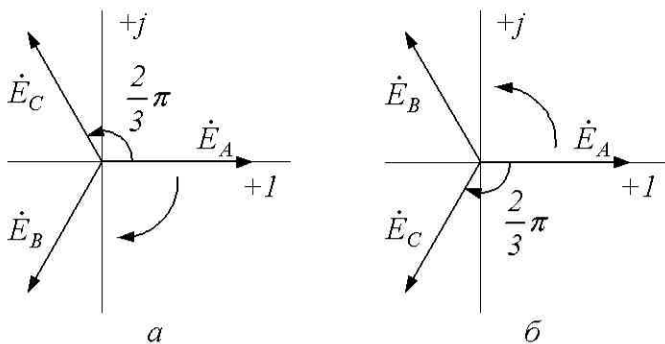


Рис. 2. Порядок чередования фаз: a – прямая последовательность; b – обратная последовательность

Соединение обмоток источника и фаз приемника звездой

В связанной системе ЭДС концы фаз X, Y, Z соединяются в один общий узел N , называемый *нейтральной точкой генератора*. Такое соединение обмоток называют соединением *звездой* (Y_0).

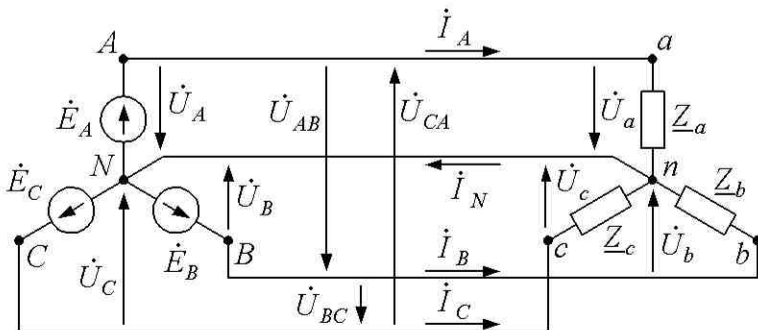


Рис. 3. Схема четырехпроводной трехфазной цепи

Концы фаз приемника, например, осветительные нагрузки Z_a, Z_b, Z_c также соединяем в одну точку звездой. Точки N и n называют нейтральными, а провод, их соединяющий, — *нейтральным*. Провода $A-a, B-b, C-c$, соединяющие начала фаз источника (трансформатора) и приемника, называют *линейными*.

Напряжение между началом и концом фазы называют *фазным*: U_A, U_B, U_C, U_ϕ . За условно положительное направление ЭДС источника принимают направление от конца к началу фазы.

Положительное направление тока в фазах совпадает с положительным направлением ЭДС, а положительное направление напряжения на фазе приемника совпадает с положительным направлением тока в фазе. Положительным направлением напряжения на фазе источника является направление от начала фазы к ее концу, т. е. противоположно положительному направлению ЭДС.

Напряжение между линейными проводами называют *линейным*: $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, U_L$. За положительное направление линейных напряжений принято направление от A к B , от B к C , от C к A .

Линейные напряжения определяют через фазные. Это соотношение можно получить из уравнения, написанного по второму закону Кирхгофа для контура, например, $A-N-B-A$, если принять направление обхода контура от точки A к точке N и т. д.:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A - \dot{U}_B - \dot{U}_{AB} &= 0; & \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_B - \dot{U}_C - \dot{U}_{BC} &= 0; & \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_C - \dot{U}_A - \dot{U}_{CA} &= 0; & \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}$$

Из топографической диаграммы напряжений, построенной в соответствии с этими уравнениями (рис. 4), можно определить как количественные, так и фазовые соотношения между фазными и линейными напряжениями симметричной системы. Векторы линейных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$ и опережают соответственно векторы фазных напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C на угол $\pi/6$. Из заштрихованного треугольника AOD следует, что:

$$\frac{U_L}{2} = U_\Phi \cdot \cos \pi/6 = U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{то есть} \quad U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi.$$

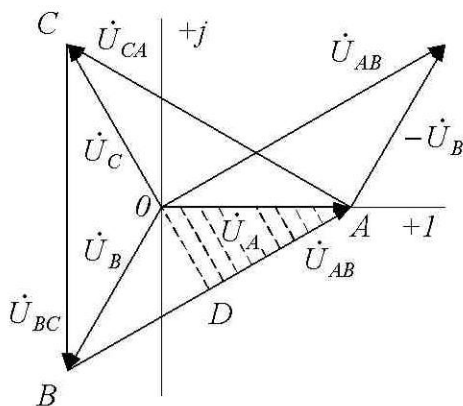


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений симметричного источника, соединенного звездой

Таким образом, если система напряжений симметрична, то при соединении звездой линейное напряжение в 1,73 раза больше фазного.

Применяемые на практике напряжения переменного тока отличаются друг от друга в 1,73 раза. Если $U_L = 220\text{В}$, то $U_\Phi = 127\text{В}$, что обозначают: $220/127$; $380/220$; $660/380\text{В}$.

Если комплексные сопротивления фаз трехфазного приемника равны между собой $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z \cdot e^{j\varphi}$, то его называют симметричным, например, обмотки трехфазного асинхронного двигателя.

Подобно фазам обмоток источника, фазы приемника соединяют звездой или треугольником, причем способ соединения фаз обмоток источника не предопределяет способа соединения приемников.

Если пренебречь сопротивлениями фазного и линейного проводов, то фазные напряжения приемника будут равны фазным напряжениям источника: $U_A = U_a$, $U_B = U_b$, $U_C = U_c$.

При подключении приемников к трехфазному источнику, обмотки которого соединены звездой, ток протекает по обмоткам источника, линейным проводам и фазам приемника. Ток в фазах источника или приемника называют фазным (I_Φ), ток в линейных проводах — линейным (I_L).

Так как обмотка источника, линейный провод и приемник, принадлежащие одной фазе, включены последовательно, то при соединении звездой линейный ток равен фазному:

$$I_L = I_\Phi.$$

В фазе приемника он определяется по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_c}.$$

Ток в нейтральном проводе I_N , определенный по первому закону Кирхгофа (для узла n):

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

равен геометрической сумме фазных токов.

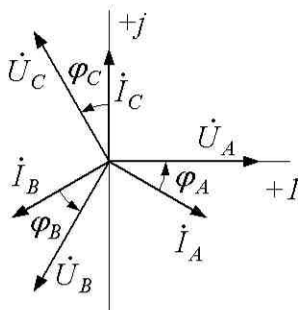


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений и токов симметричного приемника, соединенного звездой

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, т. е. когда $R_a = R_b = R_c$ и $X_a = X_b = X_c$ фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы:

$$I_A = I_B = I_C = I_\Phi, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \arctg \frac{X_\Phi}{R_\Phi}.$$

Фазные токи при симметричной нагрузке образуют симметричную систему, вследствие чего ток I_N в нейтральном проводе равен нулю (рис. 5). Это позволяет перейти к трехпроводной трехфазной цепи (рис. 6).

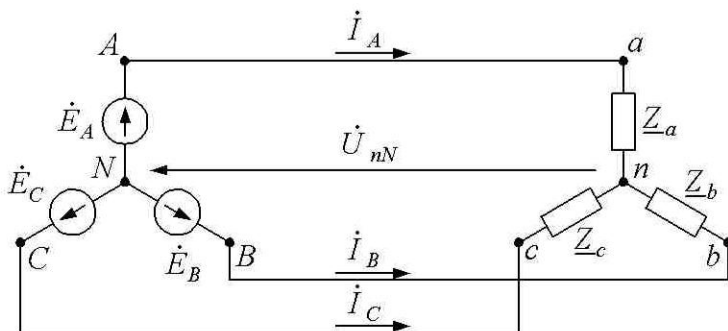


Рис. 6. Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой

Очевидно, для симметричных приемников справедливо ранее выведенное соотношение между фазными и линейными напряжениями, так как фазные и линейные напряжения приемника соответственно равны фазным и линейным напряжениям генератора, а фазные и линейные токи равны между собой.

Трехфазная цепь с несимметричным приемником

В ряде случаев реальные приемники являются несимметричными.

В осветительных нагрузках используют схему соединения звезда — звезда с нулевым проводом. Если в такую четырехпроводную звезду включить несимметричный приемник, то благодаря наличию нейтрального провода напряжения на каждой фазе приемника будут равны соответствующим фазным напряжениям источника, как по амплитуде, так и по фазе.

Но фазные токи будут разными. При этом фазные напряжения приемника остаются постоянными при любых нагрузках фаз, и ток каждой фазы зависит только от проводимости данной фазы. Нейтральный про-

вод, по которому протекает ток I_N , выравнивает фазные напряжения приемника.

При обрыве линейного провода ток в нейтральном проводе существует. При обрыве нейтрального провода между точками N и n может возникнуть напряжение. Тогда на фазах приемника появляются значительные перенапряжения. Поэтому в нейтральный провод не включают плавкие предохранители и выключатели.

При анализе трехпроводной несимметричной нагрузки, соединенной звездой (рис. 6), сначала определяют напряжение между нейтральными точками N и n (напряжение смещения нейтрали) по формуле межузлового напряжения:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \frac{1}{Z_a} + \dot{U}_B \cdot \frac{1}{Z_b} + \dot{U}_C \cdot \frac{1}{Z_c}}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c}}.$$

Далее определяют фазные напряжения приемника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN},$$

а по ним — фазные токи приемника:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}.$$

Векторная диаграмма приведена на рис. 7.

Из диаграммы видно, что изменение положения нейтрали приводит к изменению фазных напряжений приемника, а значит, и токов в фазах.

В процессе работы трехфазных нагрузок возможны аварийные или эксплуатационные режимы, вызванные обрывом линейного (фазного) проводов или коротким замыканием в фазе. Пусть в исходном режиме нагрузка симметрична ($Z_a = Z_b = Z_c$). Система фазных токов симметрична, $U_{nN} = 0$ и система фазных напряжений приемника также симметрична. При обрыве фазы a приемника фазы b и c окажутся соединенными последовательно и будут подключены к линейному напряжению U_{BC} . Векторная диаграмма приведена на рис. 8, а.

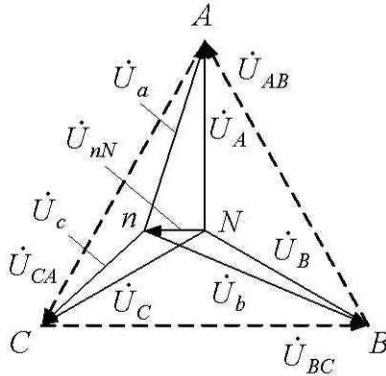


Рис. 7. Топографическая диаграмма напряжения трехпроводной несимметричной цепи, соединенной звездой

Напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_B \cdot \frac{1}{Z_b} + \dot{U}_C \cdot \frac{1}{Z_c}}{\frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c}} = -\frac{\dot{U}_A}{2}.$$

Вектор \dot{U}_{nN} на рис. 8,а определяет точку n , которая делит вектор \dot{U}_{BC} пополам. Фазное напряжение \dot{U}_a увеличивается в 1,5 раза, а напряжения \dot{U}_b и \dot{U}_c уменьшаются в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раза, так как становятся равными половине линейного напряжения.

Ток в фазе a равен нулю, а токи в фазах b и c уменьшаются в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раза. При активной нагрузке, углы $\varphi = 0$ и токи совпадают по фазе с фазными напряжениями.

При коротком замыкании фазы a потенциал нейтральной точки n приемника близок к потенциалу точки A источника. На векторной диаграмме рис. 8,б точка n совпадает с точкой A . Фазное напряжение $\dot{U}_a = 0$, а напряжения $\dot{U}_b = -\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_c = \dot{U}_{CA}$, т. е. увеличиваются

до линейных. По этой причине фазные токи \dot{I}_b и \dot{I}_c возрастают в $\sqrt{3}$ раз, совпадая по фазе со своими напряжениями. Ток $\dot{I}_a = -(\dot{I}_b + \dot{I}_c)$, как видно из диаграммы, в $\sqrt{3}$ раз больше этих токов и в 3 раза больше тока в исходном режиме.

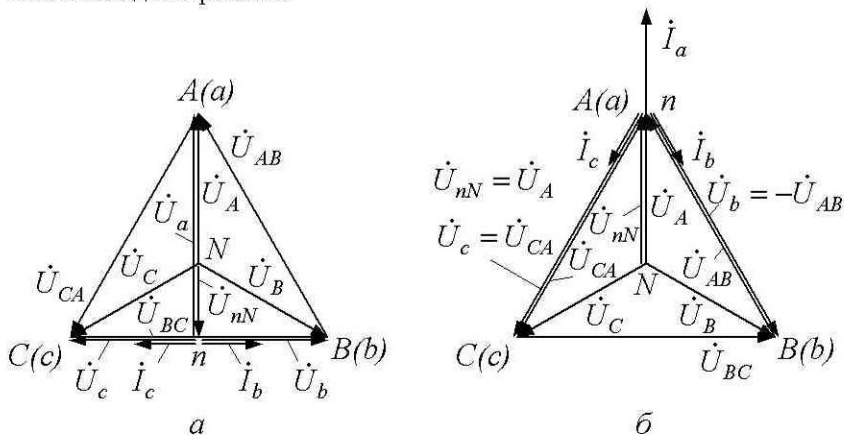


Рис. 8. Векторная диаграмма напряжений и токов при: а - обрыве фазы а приемника; б - коротком замыкании в фазе а приемника

Мощность в трехфазной системе

Активная мощность трехфазного приемника равна арифметической сумме активных мощностей фаз (для несимметричной системы: арифметической сумме активных мощностей фаз и нулевого провода).

При симметричной системе напряжений ($U_A = U_B = U_C = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_A = I_B = I_C = I_\phi$, и $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi$) фазные мощности равны $P_A = P_B = P_C = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.

Активная мощность трехфазного приемника:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi.$$

Реактивная мощность в трехфазной симметричной системе равна алгебраической сумме реактивных мощностей в каждой фазе:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3Q_\phi,$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi.$$

Полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

За номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, поэтому мощности удобнее выражать через линейные величины U_L и I_L .

При соединении фаз приемника звездой:

$$U_{\Phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}; \quad I_{\Phi} = I_L.$$

При соединении фаз приемника треугольником:

$$U_{\Phi} = U_L; \quad I_{\Phi} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}.$$

Поэтому независимо от схемы соединения фаз симметричного приемника мощности имеют вид:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_{\Phi},$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_{\Phi},$$

$$S = \sqrt{3} U_L I_L.$$

2. Программа работы

1. Выбрать необходимые для выполнения работы приборы и собрать электрическую схему в соответствии с рис. 9.
Определить цену деления приборов, используемых в работе.
2. После проверки схемы преподавателем подать на стенд напряжение и произвести необходимые измерения токов и напряжений для режимов указанных в таблице 1.
3. Включить рубильники $P1$ и $P2$. Установить с помощью реостатов R_{ax} , R_{by} , R_{cz} симметричную нагрузку в фазах, т. е. одинаковые токи:

$$I_A = I_B = I_C.$$

Линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} измеряются между клеммами « A » и « B », « B » и « C », « C » и « A » сети, а фазные -

U_a , U_b , U_c между клеммами «A» и «n», «B» и «n», «C» и «n», где «n» - нейтральная точка приемника энергии.

Напряжение смещения U_{nN} , измеряется между нейтральной точкой источника N и нейтральной точкой приемника «n».

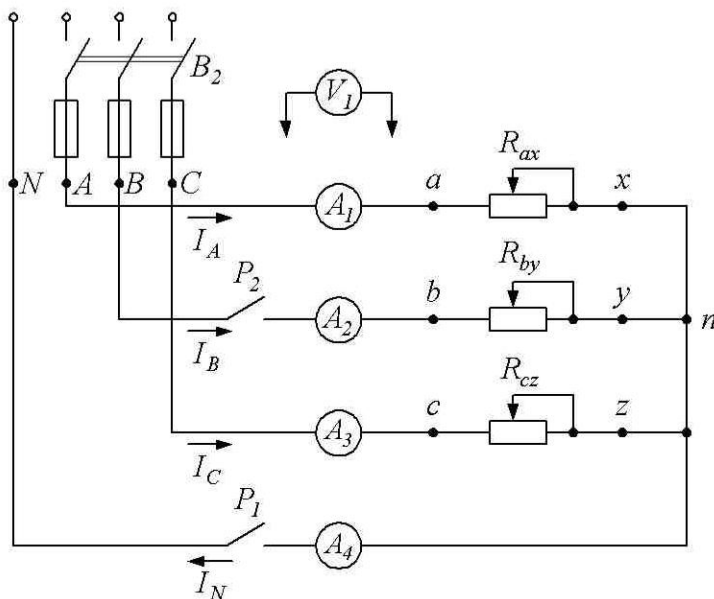


Рис. 9. Схема лабораторной установки, соединения приемников звездой

4. Убедиться, что в четырехпроводной цепи ($P1$ - замкнут) $I_N = 0$ только при симметричной нагрузке, а $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ при любой нагрузке.

5. Убедиться, что в трехпроводной цепи ($P1$ - разомкнут) $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ только при симметричной нагрузке, а изменение сопротивления в фазах или обрыв фазы изменяют напряжения и токи в других фазах.

Режим работы цепи	Положение рубильника		Измерено									
			U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_a	U_b	U_c	U_{nN}	I_A	I_B	
	P1	P2	B	B	B	B	B	B	B	A	A	
Симметричная нагрузка	Вкл.	Вкл.										
	Откл.	Вкл.										
Изменение тока в одной фазе	Вкл.	Вкл.										
	Откл.	Вкл.										
Изменение тока во всех фазах	Вкл.	Вкл.										
	Откл.	Вкл.										
Обрыв фазы «B»	Вкл.	Откл.										
	Откл.	Откл.										

3. Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого режима работы таблицы 1 построить топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов.

Примечания:

1) векторные диаграммы строятся в удобном масштабе, который выбирается отдельно для токов и для напряжения;

2) построение топографической диаграммы напряжения следует начинать с треугольника линейных напряжений, который остается неизменным при всех режимах работы цепи;

3) положение нейтральной точки приемника n на диаграмме напряжений определяется пересечением дуг окружностей, проведенных из вершин треугольника линейных напряжений радиусами, равными соответствующим фазным напряжениям (рис. 10);

4) векторы фазных токов I_A , I_B , I_C следует откладывать из нейтральной точки приемника n . Для активной нагрузки (что имеет место в данной работе) угол сдвига фаз между током и напряжением равен нулю, поэтому вектора фазных токов будут совпадать по направлению с векторами соответствующих фазных напряжений.

2. Проверить графическим построением соотношения:

1) для четырехпроводной цепи $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N$;

2) для трёхпроводной цепи $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$,

для чего векторную диаграмму токов вынести отдельно.

3. Вычислить соотношение между линейными и фазными напряжениями (только для симметричного режима работы)

$$\frac{U_L}{U_\Phi} = \frac{U_{AB}}{U_a} .$$

4. Определить сопротивления фаз приемника для всех режимов работы по закону Ома $R_{ax} = \frac{U_a}{I_A}$, $R_{by} = \frac{U_b}{I_B}$, $R_{cz} = \frac{U_c}{I_C}$.

5. Рассчитать активную мощность потребления энергии приемника, для всех режимов работы: $P = I_A^2 \cdot R_{ax} + I_B^2 \cdot R_{by} + I_C^2 \cdot R_{cz}$.

6. Сделать выводы по работе.

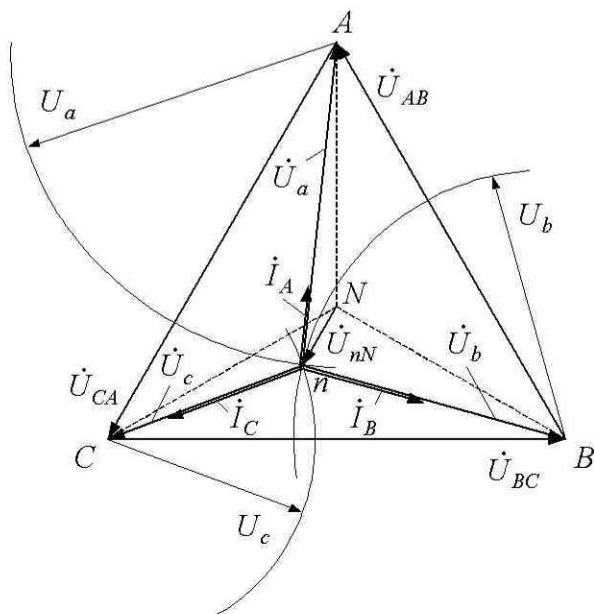


Рис. 10. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для трехпроводной несимметричной трехфазной нагрузки ($R_a > R_b > R_c$), построенная по экспериментальным данным.

4. Контрольные вопросы

1. Как соединить фазы приемника звездой?
2. Какие напряжения называются линейными и фазными?
3. Как измерить фазные и линейные напряжения?
4. Какая нагрузка называется симметричной?
5. Какая нагрузка называется активной?
6. Какова роль нейтрального провода?
7. Чему равен ток в нейтральном проводе:
 - а) для симметричной нагрузки?
 - б) для несимметричной нагрузки?
8. Какое напряжение называется напряжением смещения нейтрали?
9. Как рассчитать активную мощность P при симметричной и несимметричной нагрузке?
10. Какие приемники энергии включаются по четырехпроводной схеме звезда, какие по трехпроводной?
11. Чем объясняется появление напряжения смещения нейтрали?

Лабораторная работа № 21

Исследование однофазного трансформатора.

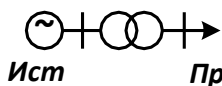
Цель работы:

4. Исследование работы однофазного трансформатора в режимах холостого хода и активной нагрузки.
5. Получение рабочих характеристик.
6. Оценка свойств однофазного трансформатора из анализа полученных результатов.

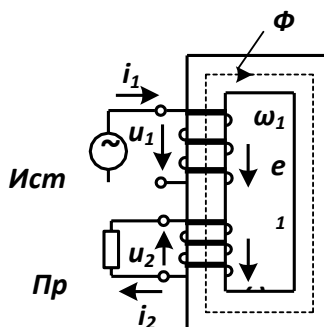
1. Теоретические сведения

Устройство, принцип действия и назначение трансформаторов.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте. Условное графическое обозначение и электромагнитная схема трансформатора изображены на рис. 1, а, б.



а



6

Рис. 1. Условное графическое обозначение (а)
и электромагнитная схема (б) трансформатора

На замкнутом магнитопроводе расположены две обмотки. К одной обмотке с числом витков W_1 которая носит название первичной, подводится электрическая энергия от источника питания *Ист*; от другой — вторичной обмотки с числом витков W_2 — энергия отводится к приемнику *Пр*. Все величины, относящиеся к этим обмоткам (токи, э. д. с. и т. д.),

называются первичными или вторичными и имеют соответствующие индексы 1 и 2. Под действием подведенного переменного напряжения u_1 в первичной обмотке возникает ток i_1 и возбуждается изменяющийся магнитный поток. Этот поток индуцирует э. д. с. e_1 и e_2 в обмотках трансформатора. Э.д.с. e_1 уравнивает основную часть напряжения источника u_1 , э.д.с. e_2 создает напряжение u_2 на выходных зажимах трансформатора. При замыкании вторичной цепи возникает ток i_2 , который образует собственный магнитный поток, накладывающийся на поток первичной обмотки. В результате создается общий поток Φ , сцепленный с витками обеих обмоток трансформатора и определяющий в них результирующие э.д.с. e_1 и e_2 . На схеме рис. 1 показаны условно-положительные направления всех физических величин, характеризующих электромагнитные процессы в трансформаторе. Стрелки напряжения u_1 и тока i_1 представляют первичную обмотку как приемник энергии. Положительное направление потока Φ связано с током i_1 правилом правого винта. То же правило определяет положительные направления потока Φ , э.д.с. e_1 и e_2 . Стрелки e_2 и i_2 вторичной обмотки соответствуют направлениям э. д. с. и тока источника электрической энергии. Стрелка напряжения u_2 на зажимах вторичной обмотки, равного напряжению на приемнике, должна совпадать по направлению со стрелкой тока i_2 . Только учитывая условно-положительные направления электрических величин, можно правильно записать уравнения электрического состояния трансформатора.

Помимо основного (рабочего) потока в магнитопроводе токи обмоток создают в окружающем пространстве магнитное поле рассеяния.

Трансформация напряжения. Уравнения электрического состояния обмоток идеализированного трансформатора имеют вид

$$u_1(t) = -e_1(t), \quad u_2(t) = e_2(t),$$

где

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

Отношение напряжений и э.д.с.

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{-u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{w_1}{w_2} = n,$$

называют коэффициентом трансформации.

В трансформаторе происходит «масштабное» преобразование переменного напряжения в n раз.

Трансформация токов. В трансформаторе происходит преобразование не только переменных напряжений, но и токов. Для составления уравнения, связывающего токи i_1 и i_2 первичной и вторичной обмоток трансформатора, воспользуемся законом полного тока. Для электромагнитной схемы рис. 1,б можно записать следующее уравнение магнитного состояния:

$$H_M l_M = w_1 i_1 + w_2 i_2,$$

где l_M — длина средней линии магнитопровода.

В современных трансформаторах применяют электротехническую холоднокатаную сталь, в которой магнитная индукция 1,7 Тл достигается уже при напряженности поля 400 А/м. Поэтому амплитуда магнитного напряжения $H_{mm} l_M$ на несколько порядков меньше амплитуд м.д.с.

$w_1 i_1$ и $w_2 i_2$ обмоток трансформатора при его нагрузке. Это позво-

ляет сделать еще один шаг в идеализации трансформатора, когда рассматривается его принцип действия. Примем, что

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 \approx 0.$$

Отсюда

$$-\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{n}.$$

Уравнение показывает, что кривые изменения токов $i_2(t)$ и $i_1(t)$

подобны. Действительное направление тока $i_2(t)$ противоположно на-

правлению тока $i_1(t)$ относительно одноименных выводов обмоток w_2 и w_1 . Поэтому м.д.с. первичной и вторичной обмоток действуют встречно и уравновешивают друг друга.

В идеализованном трансформаторе электрическая энергия передается полностью из первичной обмотки во вторичную и далее в приемник, хотя обмотки имеют только магнитную связь и отделены друг от друга электрической изоляцией.

Свойство саморегулирования тока i_1 при изменении нагрузки (тока i_2). При увеличении тока i_2 (активно-индуктивная нагрузка) м.д.с. вторичной обмотки $W_2 i_2$ также увеличивается. Эта м.д.с. стремится ослабить поток Φ . Уменьшение потока Φ приводит к уменьшению э.д.с. e_1 и нарушению электрического равновесия $e_1(t) = -u_1(t)$ и росту тока i_1 в первичной обмотке. Равенство $e_1(t) = -u_1(t)$ восстанавливается, когда

рост м.д.с. $W_1 i_1$ компенсирует рост м.д.с. $W_2 i_2$, т. е. при увеличении тока i_1 . Изменение нагрузки трансформатора, т. е. тока i_2 , приводит к соответствующему изменению тока i_1 , так что выполняется закон сохранения энергии и обеспечивается баланс мгновенных мощностей:

$$p_1(t) = p_2(t) \quad \text{или} \quad u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2.$$

Применение трансформаторов. Трансформаторы играют важную роль в электроэнергетических системах. Они осуществляют трансформацию токов и напряжений, обеспечивая экономичную передачу и распределение энергии. На гидро- и теплостанциях электрическая энергия вырабатывается генераторами с номинальным напряжением от 6,3 до 38,5 кВ. Электроэнергия передается потребителям по линиям электропередачи (ЛЭП) при напряжении 500, 750 или 1050 кВ. При этом достигается увеличение пропускной способности ЛЭП, уменьшение токов и потерь мощности в ее проводах. Номинальное напряжение большинства потребителей электроэнергии выбирают равным 220, 380 или 660 В. Мощные электродвигатели работают при напряжении 6 и 10 кВ. Ввод электроэнергии в города и на промышленные предприятия осуществляется ЛЭП с напряжением 220, 110 и 35 кВ. Поэтому снижение напряжения осуществляется в несколько ступеней.

Таким образом, возникает необходимость создания разветвленной системы повысительных и понизительных подстанций с множеством трансформаторов. Суммарная мощность всех трансформаторов, установленных на подстанциях, обычно в 6—7 раз больше суммарной мощности потребителей.

Трансформаторы в системах распределения электроэнергии называют силовыми. Они имеют номинальную мощность от 10 кВ·А до 1 млн. кВ·А.

В устройствах промышленной электроники применяют силовые трансформаторы малой мощности (1—1000 В·А) с несколькими вторичными обмотками, предназначенными для питания изолированных друг от друга цепей. Кроме того, в этих устройствах используют специальные импульсные и высокочастотные трансформаторы.

Свойство трансформации напряжений и токов используется также в измерительных трансформаторах. Включая амперметры или вольтметры во вторичную цепь измерительных трансформаторов, можно обезопасить обслуживающий персонал, так как эти цепи имеют небольшие напряжения и хорошее заземление.

При сварочных работах, при пользовании ручным электроинструментом с помощью трансформаторов можно снизить напряжение до

безопасного и технически оправданного уровня, что широко применяют на практике. Во всех случаях используют *важнейшее свойство транс-*

форматоров — возможность передачи энергии при отсутствии электрической связи между обмотками.

Уравнения электрического состояния обмоток трансформатора.

Реальное магнитное поле трансформатора несколько отличается от идеализированного. На рис. 2 показаны действительные направления мгновенных токов обмоток и несколько магнитных линий трансформатора, у которого первичная и вторичная обмотки расположены концентрически на среднем стержне магнитопровода. Рабочий поток Φ замыкается по боковым стержням. Такую конструкцию имеют большинство однофазных трансформаторов. Часть магнитных линий сцеплена только с первичной или только со вторичной обмоткой. Эти линии определяют дополнительные потокоцепления обмоток $\Psi_{1\text{рас}}$ и $\Psi_{2\text{рас}}$, которые называют потокоцеплениями рассеяния. Изменения потокоцеплений $\Psi_{1\text{рас}}$ и $\Psi_{2\text{рас}}$ вызывают э.д.с.

$$e_{1\text{рас}}(t) = - \frac{d\Psi_{1\text{рас}}}{dt}, \quad e_{2\text{рас}}(t) = - \frac{d\Psi_{2\text{рас}}}{dt}.$$

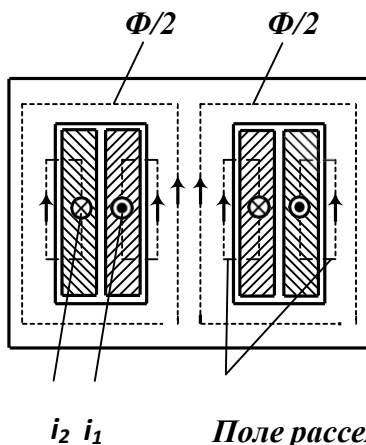


Рис. 2. Магнитное поле трансформатора

Как и во всякой индуктивной катушке, при синусоидальном изменении магнитного поля э.д.с. рассеяния можно заменить падением напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния. Тогда для комплексных величин получаем выражения:

$$E_1 = j \omega L_{\text{рас}1} I_1, \quad E_2 = j \omega L_{\text{рас}2} I_2$$

$$\begin{array}{c}
 \cdot \\
 jX_{1pac} I_1, \\
 \cdot \\
 = E_{2pac} \\
 \cdot \\
 j \\
 X \\
 \\
 2 \\
 p \\
 \\
 a \\
 c \\
 \\
 I \\
 \\
 2 \\
 \cdot
 \end{array}
 = -$$

Магнитные линии поля рассеяния частично проходят вне магнитопровода, по немагнитной среде, и сопротивления рассеяния X_{1pac} и X_{2pac}

можно считать постоянными.

При изучении эксплуатационных свойств трансформаторов следует также принимать во внимание активные сопротивления обмоток трансформатора R_1 и R_2 . С учетом этих обстоятельств полные уравнения электрического состояния обмоток трансформатора имеют вид

$$U_1 = -E_1 + jX_{1pac}I_1 + R_1I_1,$$

$$E_2 = U_2 + jX_{2pac}I_2 + R_2I_2,$$

где $E_1 = -j\omega W_1\Phi$ и $E_2 = -j\omega W_2\Phi$ - э. д. с, возбуждаемые рабочим

потоком Φ ; $U_2 = Z_{пр}I_2$ — напряжение на вторичной обмотке, равное U_2

падению напряжения на сопротивлении приемника $Z_{пр}$.

При отсутствии нагрузки ($Z_{пр} \rightarrow \infty$) ток вторичной обмотки равен нулю. В этом режиме — режиме холостого хода трансформатора — поток в магнитопроводе создается током первичной обмотки. Зависимость тока холостого хода $I_{1х}$ от напряжения на первичной обмотке U_1 называют характеристикой холостого хода (рис. 3). Она имеет такой же вид, как и вольт- амперная характеристика любой другой индуктивной катушки с магнитопроводом. По мере насыщения магнитопровода ток $I_{1х}$ быстро нарастает. Поэтому при проектировании трансформаторов амплитуду магнитной индукции B_m выбирают не более 1,6—1,7 Тл.

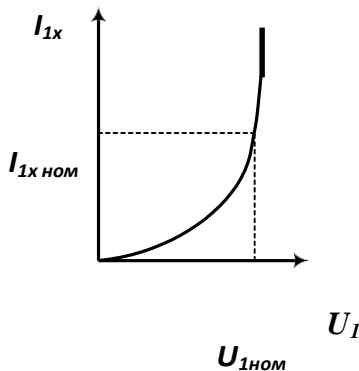


Рис. 3. Характеристика холостого хода трансформатора

При подключении приемника появляется ток I_2 и изменяется ток I_1 . Несмотря на изменения м.д.с. $w_1 i_1$ и $w_2 i_2$ первичной и вторичной обмоток, амплитуда потока Φ_m в магнитопроводе остается практически неизменной. Э.д.с. E_1 незначительно отличается от напряжения U_1 , так

как трансформатор стремятся проектировать со свойствами, по возможности близкими к идеализированному. Таким образом, и у реальных силовых трансформаторов

$$U_{1m} \approx E_{1m} = w_1 \omega \Phi_m.$$

При постоянном значении действующего напряжения $U_1 = \text{const}$ сохраняется постоянной амплитуда потока Φ_m в магнитопроводе.

Составляющая тока первичной обмотки I_{1x} , создающая магнитный поток в трансформаторе при холостом ходе, постоянна. Составляющая I_{12} , компенсирующая магнитное действие тока вторичной обмотки, зависит от нагрузки трансформатора.

Энергетические диаграммы. Передача энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную происходит посредством переменного магнитного поля в магнитопроводе. Интенсивность необратимой передачи энергии характеризуется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = E_1 I_1 \cos \varphi,$$

где φ — сдвиг фаз между э.д.с. и током.

Периодическое изменение магнитного поля в магнитопроводе сопровождается магнитными потерями, мощность этих потерь зависит от частоты и амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе, а также от материала последнего. При постоянном действующем напряжении U_1 на первичной обмотке магнитные потери постоянны и не зависят от нагрузки. В обмотках трансформатора также возникают тепловые потери

$$\Delta P_{\varepsilon 1} = R_1 I_1^2 \quad \Delta P_{\varepsilon 2} = R_2 I_2^2 \quad \text{которые пропорциональны квадратам}$$

токов в обмотках, т. е. квадрату коэффициента нагрузки

$$\beta = S / S_{ном},$$

где $S_{ном}$ — номинальная полная мощность трансформатора.

Активная мощность P_1 первичной обмотки трансформатора превышает активную мощность P_2 вторичной обмотки. Разность ($P_1 - P_2$) равна мощности потерь в обмотках ΔP_{ε} и ΔP_m , что магнитопроводе

показано на энергетической диаграмме рис. 4,а. Реактивная мощность Q_2 , передаваемая в приемник, также отличается от реактивной мощности Q_1

первичной обмотки. Дело в том, что реактивная мощность связана с образованием рабочего поля в магнитопроводе ($Q_{\text{раб}}$), а также полей рассеяния ($Q_{1\text{рас}}$ и $Q_{2\text{рас}}$). Максимальная скорость обмена энергией между источником питания и переменным рабочим полем в магнитопроводе и

полями рассеяния характеризуется соответствующими реактивными мощностями. Баланс реактивных мощностей в трансформаторе отображен на диаграмме рис. 4, б.

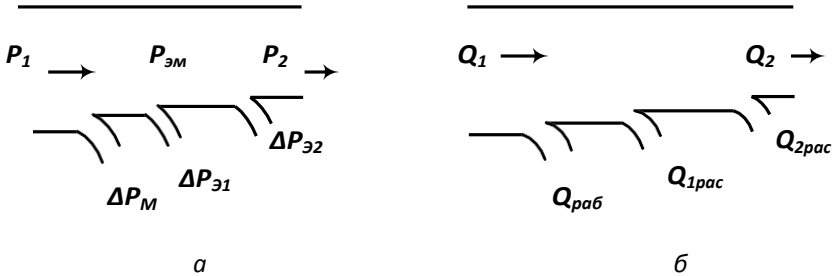


Рис. 4. Диаграмма активных (а) и реактивных (б) мощностей трансформатора

Коэффициент передачи полной мощности

$$K_S = \frac{S_2}{S_1} = \frac{S_2}{S_2 + \sqrt{(\Delta P_M + \Delta P_\Sigma)^2 + (Q_{раб} + Q_{рас})^2}} =$$

$$= \frac{\beta \cdot S_{2ном}}{\beta \cdot S_{2ном} + \sqrt{\Delta P + \Delta P_\Sigma)^2 + (Q_{раб} + Q_{рас})^2}}$$

При номинальной нагрузке силовых трансформаторов $K_{Sном} = 0,95 \dots 0,995$ (в зависимости от номинальной мощности трансформатора). При уменьшении коэффициента нагрузки β значение $K_{Sном}$ падает. Если трансформатор передает в приемники только активную мощность, то можно говорить о его коэффициенте полезного действия $\eta = P_2/P_1$.

При отсутствии нагрузки ($S_2 = 0$) $K_{Sном}$ и η равны нулю, так как сохраняются неизменными реактивная мощность $Q_{раб}$ и потери в магнитопроводе ΔP_M . Несмотря на высокий коэффициент передачи, абсолютное значение тепловых потерь в мощных трансформаторах может быть значительным. Например, у трансформатора мощностью $S_{ном} = 2500$ кВА, $\Delta P_M = 6,5$ кВт и $\Delta P_\Sigma = 22$ кВт (при полной нагрузке).

В трансформаторе образуются тепловые потоки, направленные от внутренних частей к внешней поверхности, от которой теплота отводится непосредственно в окружающую среду. Температура перегрева внешней

поверхности трансформатора относительно окружающей среды определяется допустимой температурой нагрева изоляции обмоток. Обычная лаковая и хлопчатобумажная изоляция проводов и каркаса обмоток рас-

считана на верхний предел температуры, равный 100—130°C. Превышение ее на несколько десятков градусов во много раз сокращает срок службы изоляции. При высокой температуре органические вещества, входящие в состав изоляции, теряют механическую и электрическую прочность, вследствие чего возникает электрический пробой изоляции и короткое замыкание витков обмоток. Поэтому конструкция трансформатора должна обеспечивать достаточное охлаждение всех его частей.

С ростом номинальной мощности трансформаторов возрастают потери в обмотках и магнитопроводе из-за увеличения их объема, однако естественная поверхность охлаждения расширяется в меньшей степени. Поэтому приходится снижать потери в обмотках путем уменьшения плотности тока в проводах, т. е. увеличивать площадь поперечного сечения провода. Уже при мощности в несколько тысяч вольт-ампер эта мера становится недостаточной, и магнитопровод с обмотками погружают в бак, заполненный минеральным (трансформаторным) маслом. В баке устанавливается конвекционный процесс передачи теплоты маслом от внутренних сильно нагретых частей к стенкам; с другой стороны, стенки охлаждаются естественной циркуляцией воздуха.

Внешняя характеристика трансформатора. Вместе с промышленной сетью, к которой подключена первичная обмотка, трансформатор является источником питания для приемников, подключенных к вторичной обмотке. Поэтому трансформатор можно рассматривать как активный двухполюсник A относительно выводов вторичной обмотки (рис. 5,а). Важнейшая характеристика активного двухполюсника — внешняя вольт-амперная характеристика, представляющая собой зависимость напряжения U_2 на выходе от тока I_2 при $U_1 = \text{const}$.

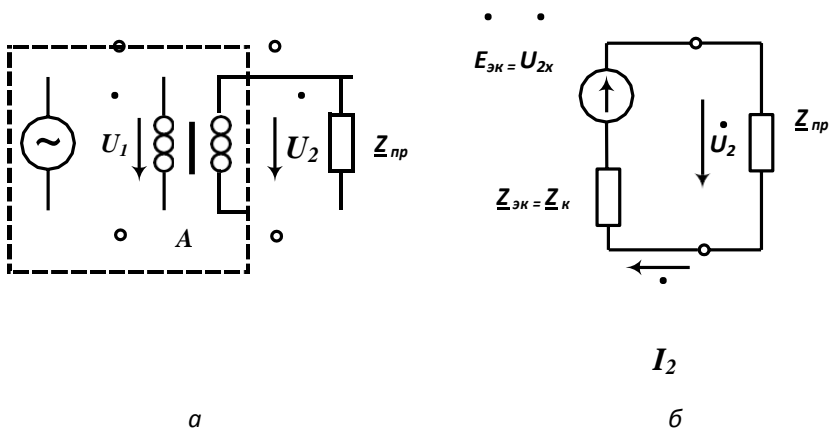


Рис. 5. Трансформатор как активный двухполюсник (*а*)
и его схема замещения (*б*)

У идеализированного трансформатора $U_2 = U_1/n = \text{const}$, т.е. напряжение U_2 не зависит от нагрузки. Поэтому его внешняя характеристика идет параллельно оси I_2 , напряжение U_2 равно напряжению холостого хода U_{2x} (рис. 6).

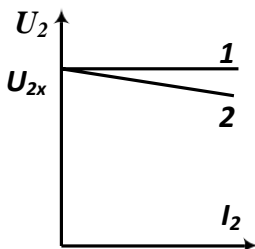


Рис. 6. Внешние характеристики идеализированного (1) и реального (2) трансформаторов

У реального трансформатора существуют э.д.с. от полей рассеяния и падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток. При обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается с ростом тока I_2 , и внешняя характеристика имеет вид наклонной прямой. Чем больше сопротивления R_1 и $X_{1рас}$, R_2 и $X_{2рас}$, тем больше отличаются идеальные напряжения от реальных $U_{1ид}$ от U_1 и $U_{2ид}$ от U_2 . Изменение вторичного напряжения $\Delta U_2 = U_{2x} - U_2$.

У силовых трансформаторов при номинальном токе $I_{2ном}$ отношение $\Delta U_2 / U_{2x}$ имеет порядок 5—10%. Трансформаторы проектируют так,

чтобы напряжение холостого хода U_{2x} было на 5% больше номинального напряжения его приемников. Кроме того, предусмотрена возможность изменения числа витков одной из обмоток, т. е. величины

$$n = w_1/w_2 \approx U_1/U_{2x}.$$

В трансформаторах, работающих при постоянном значении первичного напряжения U_1 изменяют число витков w_2 ; в сетях с колебаниями напряжения U_1 предпочитают изменять w_1 . Изменение числа витков производят встроенным переключателем с ручным приводом, выведенным

наружу. Выпускаются также трансформаторы с автоматическим регулированием числа витков под нагрузкой. При временной недогрузке трансформатора уменьшают U_{2x} . При питании приемника через длинную линию значение U_{2x} увеличивают, чтобы скомпенсировать падение на-

пряжения в линии.

У сварочных трансформаторов, которыми комплектуют сварочные агрегаты, внешняя характеристика должна быть крутопадающей: напряжение возникновения дуги должно быть много больше напряжения горения. Увеличения $\Delta U_2 / U_{2x}$ достигают с помощью сопротивлений $X_{1рас}$ и $X_{2рас}$, размещая первичную и вторичную обмотки на различных стержнях магнитопровода.

Для расчета изменения вторичного напряжения ΔU_2 удобно рассматривать трансформатор как двухполюсник и использовать метод эквивалентного генератора. Э.д.с. эквивалентного генератора равна напряжению U_{2x} холостого хода:

$$E_{ЭК} = \dot{U}_{2x} = -\dot{U}_{1НОМ} / n.$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора можно определить, как у обычного источника питания, по данным режимов холостого хода и короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора:

$$Z_{ЭК} = \frac{U_{2x}}{I} = -\frac{U_{1НОМ}}{nI_{2К}}.$$

Однако измерения в режиме короткого замыкания невозможны из-за перегрева обмоток трансформатора. Поэтому опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении U_1 так, чтобы ток вторичной обмотки был равен номинальному току $I_{2НОМ}$. Такую величину U_1 принято называть напряжением короткого замыкания и обозначать $U_{1К}$. Величина $Z_{ЭК}$ названа в теории трансформатора сопротивлением короткого замыкания, ее обозначают Z_K . Модуль сопротивления

$$Z_{ЭК} = Z_K = \frac{U_{1К}}{nI_{2НОМ}}.$$

Аргумент комплексного сопротивления $\underline{Z}_K = Z_K e^{j\varphi}$ определяют по активной мощности P_K потерь в режиме короткого замыкания:

$$\cos \varphi_K = P_K / (U_{1К} I_{1К}).$$

Заметим, что опыты холостого хода и короткого замыкания проводят на

заводе-изготовителе при испытании трансформатора. Величины P_k и U_{1k} вносят в паспорт трансформатора, причем U_{1k} выражают в процентах от $U_{1ном}$. Величину $U_{1k}/U_{1ном}$ $U_{k*}\%$ называют относительным напряжением короткого замыкания. Согласно схеме замещения рис. 5,б.

$$U_2 = E_{\text{ЭК}} \cdot Z_{\text{ЭК}} \cdot I_2 = U_{2\text{Х}} \cdot Z_{\text{К}} \cdot I_2.$$

Относительное изменение вторичного напряжения $\Delta U_{2*} = \Delta U_2 / U_{2\text{Х}} = (U_{2\text{Х}} - U_2) / U_{2\text{Х}} \approx Z_{\text{К}} I_2 / U_{2\text{Х}}$ зависит от коэффициента нагрузки $\beta = S / S_{\text{НОМ}} = I_2 / I_{2\text{НОМ}}$:

$$\Delta U_{2*} = \beta \cdot \frac{Z_{\text{К}} I_{2\text{НОМ}}}{U_{2\text{Х}}}$$

Учитывая, что $U_{1\text{К}} / n = Z_{\text{К}} I_{2\text{НОМ}}$, а $U_{2\text{Х}} = U_1 / n$, тогда

$$\Delta U_2 \approx \beta U_{1\text{К}} / U_1 = \beta U_{\text{К}*}.$$

Изменение вторичного напряжения пропорционально коэффициенту нагрузки. При номинальной нагрузке $\Delta U_{2*} = U_{\text{К}*}$.

2. Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном стенде. Электрические схемы лабораторной установки показаны на рис. 7. и 8. Схемы собираются последовательно, с проведением соответствующих замеров и заполнением опытными данными таблиц.

При снятии внешней характеристики нагрузкой трансформатора является активное сопротивление $R_{\text{Н}}$ (рис. 8). Выключатель $B_{\text{Н}}$ должен быть замкнут, изменяя $R_{\text{Н}}$ можно получить 4 значений сопротивления нагрузки.

3. Программа работы

6. Ознакомиться с лабораторным стендом, выбрать необходимые приборы для выполнения работы в соответствии с электрической схемой.

7. Собрать электрическую схему опыта холостого хода по рис. 7.

8. После проверки схемы преподавателем включить выключатель ВЗ. Увеличивая ЛАТРОМ напряжение на первичной обмотке U_1 от 0 до $(1,1 \dots 1,2)U_{1\text{НОМ}}$, записать 8 - 12 значений показания приборов в табл. 1.

(Паспортные данные трансформатора указаны на стенде.)

9. Провести опыт холостого хода при номинальном напряжении на первичной обмотке $U_1 = U_{1\text{ном}}$. Результаты измерений записать в табл. 2.

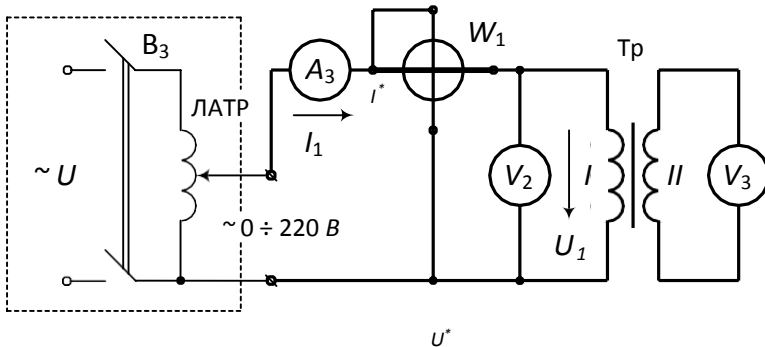


Рис. 7. Схема опыта холостого хода

10. Собрать электрическую схему по рис. 8 для исследования трансформатора в нагрузочном режиме. Изменяя нагрузку трансформатора R_H , снять внешнюю и рабочие характеристики при $U_1 = U_{1\text{ном}}$. Результаты занести в табл. 3. Первую запись показаний провести при отключенной нагрузке. Обратить особое внимание на изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 .

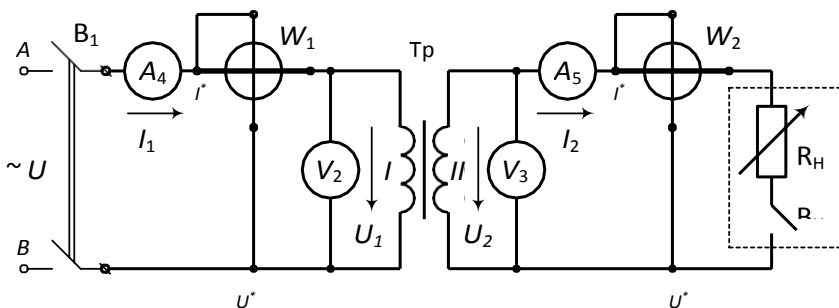


Рис. 8. Электрическая схема для исследования трансформатора в нагрузочном режиме

Таблица 1

Экспериментальные данные опыта холостого хода

$I_1, \text{мА}$	0									
$U_1, \text{В}$	0									

Таблица 2

Данные характеристики холостого хода

Измерено				Вычислено		
$U_{1\text{ном}}$	$I_{1\text{х}}$	$P_{\text{х}}$	$U_{2\text{х}}$	n	$I_{1\text{х}}/I_{1\text{ном}}$	$\cos\varphi_{\text{х}}$
В	А	Вт	В	-	-	-

Таблица 3

Данные нагрузочного режима

№	Измерено						Вычислено		
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	β	η	$\cos\varphi_1$
	В	А	Вт	В	А	Вт			
1									
2									
3									
4									
5									

4. Обработка результатов эксперимента

6. По данным табл. 1 построить характеристику холостого хода трансформатора $U_1 = f(I_1)$. Отметить точку номинального напряжения $U_1 = U_{1\text{ном}}$.

7. По данным табл. 2 вычислить коэффициент трансформации: $n = U_{1\text{н}} / U_{2\text{н}}$. Коэффициент мощности трансформатора при холо-

$$\text{стом ходе } \cos\varphi_{\text{х}} = \frac{P_{\text{х}}}{U_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{н}}}$$

грузки:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} \cdot \cos \varphi_1$$

Коэффициент полезного действия
Коэффициент

д
а
н
н
ы

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$$

мощности трансформатора:

9. По данным табл.3. построить на одном чертеже рабочие характеристики трансформатора $U_2(\beta)$, $I_1(\beta)$, $\eta(\beta)$, $\cos \varphi_1(\beta)$. При построении для каждой величины показать свою ось ординат и масштаб. Все характеристики строить в равномерном масштабе, не прерывая осей.

10. Сделать вывод по результатам работы, дать анализ полученных характеристик.

Контрольные вопросы

8. Для какой цели предназначен трансформатор?
9. Почему в режиме холостого хода нагревается сердечник трансформатора, а первичная и вторичная обмотки не нагреваются?
10. Каково влияние режима работы трансформатора на результирующий магнитный поток в магнитопроводе?
11. Как проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания и с какой целью?
12. Что понимается под номинальным режимом работы трансформатора, какими номинальными величинами он характеризуется?
13. Назовите причины снижения напряжения U_2 при работе трансформатора под нагрузкой. Как оценивают снижение напряжения на практике?
14. Какие потери имеют место в трансформаторе и как они зависят от нагрузки?

Лабораторная работа № 22

Исследование генератора постоянного тока независимого возбужде-

Цель работы:

3. Изучение основных свойств генератора постоянного тока независимого возбуждения.
4. Умение анализировать полученные характеристики генератора.

1. Теоретические сведения

Назначение и устройство машин постоянного тока. Машины постоянного тока используют в качестве генераторов и двигателей. Электрическая энергия постоянного тока, вырабатываемая генераторами, служит для питания двигателей постоянного тока, электролитических ванн, электромагнитов различного назначения, аппаратуры управления и контроля и т. д. В настоящее время генераторы постоянного тока во многих установках заменяют полупроводниковыми преобразователями переменного тока в постоянный.

Двигатели постоянного тока применяют на транспорте, для привода некоторых металлорежущих станков, прокатных станов, подъемно-транспортных машин, экскаваторов и т. д. Одной из главнейших причин применения двигателей постоянного тока вместо наиболее широко распространенных асинхронных двигателей является возможность плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне и получения желаемых механических характеристик.

Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. Неподвижная часть машины, называемая статором (рис. 1,а), состоит из массивного стального корпуса 1 , к которому прикреплены главные полюсы 2 и дополнительные полюсы $б$. Исходя из технологических и других соображений главные полюсы изготовляют чаще из отдельных стальных листов; иногда их изготовляют сплошными. Из отдельных листов либо сплошными изготовляют и дополнительные полюсы. Перечисленные детали статора являются также и деталями его магнитопровода. На главных полюсах размещают катушки одной или нескольких обмоток возбуждения 3 , на дополнительных полюсах — катушки 7 обмотки дополнительных полюсов.

В подшипниковых щитах, прикрепленных с торцевых сторон к корпусу, расположены подшипники, несущие вал 4 вращающейся части машины, называемой якорем (рис. 1,а и б). На валу закреплен цилиндрический сердечник якоря 5 , который для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов набирают из стальных лис-

тов. В пазах, расположенных по поверхности якоря, уложена обмотка якоря 8. Так же, как обмотку возбуждения и обмотку дополнительных полюсов, ее изготавливают из медного изолированного провода. Выводы от обмотки якоря присоединяют к расположенному на валу коллектору 9. Последний представляет собой цилиндр, состоящий из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллектору с помощью пружин прижимаются графитные, угольно-графитные или металлографитные щетки 10. Щетки расположены в специальных щеткодержателях.

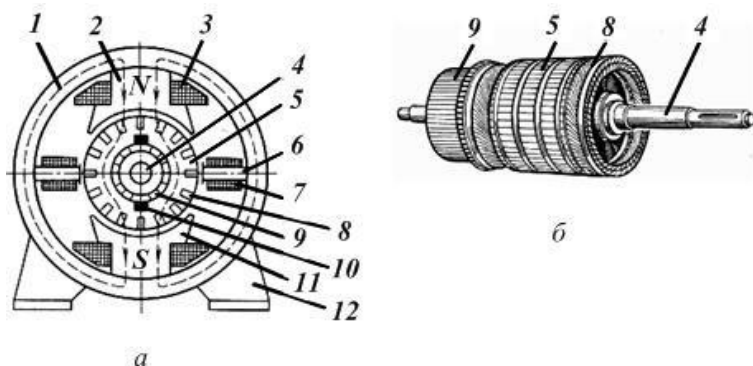


Рис. 1. Устройство (а) и якорь (б) машины постоянного тока Обмотка

возбуждения машины питается постоянным током и служит для создания основного магнитного поля. Главные полюсы имеют полюсные наконечники 11, служащие для получения по большей части окружности якоря одного и того же воздушного зазора между сердечником якоря и главными полюсами. Это необходимо для получения на большей части окружности якоря одной и той же магнитной индукции, а в проводниках обмотки якоря — постоянной по значению ЭДС. Дополнительные полюсы предназначены, для уменьшения искрения под щетками.

С помощью коллектора и щеток вращающаяся обмотка якоря соединяется с внешней электрической цепью.

На рис. 1,а показана машина постоянного тока с двумя главными полюсами. В зависимости от мощности и напряжения машины могут иметь и большее число полюсов. При этом соответственно увеличиваются число комплектов щеток и дополнительных полюсов. Крепление машины к фундаменту, специальным салазкам или металлоконструкции осуществляется с помощью лап 12. Корпус некоторых машин снабжается для крепления специальными фланцами.

Благодаря полюсным наконечникам магнитная индукция в воздушном зазоре распределяется примерно по трапециoidalному закону

(рис. 2,а и б). У поверхности якоря при $\alpha = 0$ магнитная индукция $B = 0$; с увеличением α магнитная индукция сначала возрастает, под большей частью северного полюса имеет постоянное значение, а при $\alpha = 180^\circ$ уменьшается до нуля. В пределах от $\alpha = 180^\circ$ до 360° магнитная индукция изменяется по такому же закону, но условно считается отрицательной.

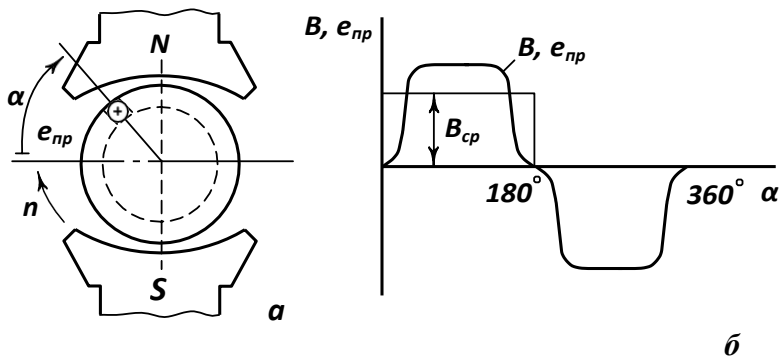


Рис. 2. К вопросу распределения магнитной индукции в воздушномзазоре и характер изменения ЭДС проводника

Направление ЭДС проводника, находящегося в пазу магнитопровода якоря, определяется по правилу правой руки, а ее значение по формуле

$$e_{np} = Blv,$$

где B – магнитная индукция, Тл; l – длина проводника, м; v – скорость перемещения проводника, м/с.

Очевидно, при $v = const$ $e_{np} \sim B$ и график $B(\alpha)$ в другом масштабе представляет собой график $e_{np}(\alpha)$. Изменение знака ЭДС e_{np} означает изменение ее направления по сравнению с положительным направлением, показанным на рис. 2,а.

Устройство обмоток якорей. Обмотки якорей машин постоянного тока состоят из отдельных секций, имеющих одинаковые числа витков. Каждая секция размещается в двух пазах магнитопровода якоря, находящихся под разными полюсами. Часть секции, расположенная в одном пазу, называется секционной стороной. Выводы каждой секции присоединяются к двум коллекторным пластинам, к каждой из которых присоединяется еще по одному выводу от других секций.

В зависимости от номинальных значений мощности, напряжения и частоты вращения находят применение различные типы обмоток якорей.

Простейшими из них являются петлевая и волновая обмотки. Двухвитковые секции указанных обмоток показаны соответственно на рис. 3. Петлевая рис. 3,а и волновая рис. 3,б обмотки отличаются порядком соединения с коллекторными пластинами и друг с другом. Щетки делят обмотку на две параллельные ветви.

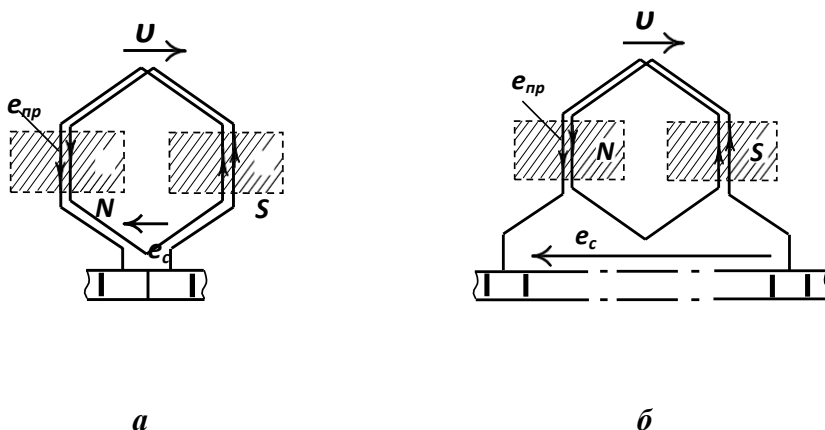


Рис. 3. Секция петлевой (а) и волновой (б) обмотки якоря

Принцип действия генератора. Напомним, что генератором называется электрическая машина, преобразующая подводимую к ней механическую мощность в электрическую мощность.

Простейший генератор можно представить в виде медного витка, равномерно вращающегося в постоянном магнитном поле (рис. 4). Заметим, что виток представляет собой одну секцию обмотки якоря, а магнитное поле создается главными полюсами. Концы такого витка выведены на две пластины (полукольца) коллектора. К этим коллекторным пластинам прижимаются две неподвижные щетки, к которым подключается внешняя цепь с потребителем электроэнергии сопротивлением R_H .

Пусть виток приводится в равномерное вращение со скоростью n от внешнего источника механической мощности, например какого-либо приводного двигателя *ПД*. Активные стороны витка пересекают силовые линии постоянного магнитного поля и в них по закону электромагнитной индукции наводятся ЭДС e_1 и e_2 направление которых определяется по правилу правой руки. При вращении витка по направлению движения часовой стрелки в его верхней активной стороне, находящейся под северным магнитным полюсом N , наведенная ЭДС направлена от нас, а в нижней активной стороне витка, находящейся под южным магнитным полюсом S - к нам. По ходу витка эти ЭДС складываются, и ре-

зультурующая ЭДС всего витка $E = e_1 + e_2$. Если внешняя цепь замк-

нута, то в ней потечет ток I , направленный от нижней щетки к потребителю и от него — к верхней щетке. Нижняя щетка оказывается положительным выводом генератора, а верхняя — отрицательным. При повороте витка на 180° его активные стороны из зоны одного магнитного полюса переходят в зону другого магнитного полюса и направления ЭДС в них изменяется на обратное. Однако одновременно с этим верхняя коллекторная пластина выходит из контакта с верхней щеткой и входит в контакт с нижней щеткой, а нижняя коллекторная пластина входит в контакт с верхней щеткой. Такая синхронная смена зон магнитных полюсов активными сторонами рамки и щеток коллекторными пластинами не изменяет направление тока во внешней цепи. Таким образом, вращающиеся с витком коллекторные пластины и неподвижные щетки не только обеспечивают электрическое соединение витка с внешней цепью, но и являются специальным переключающим устройством, выполняющим роль механического выпрямителя тока.

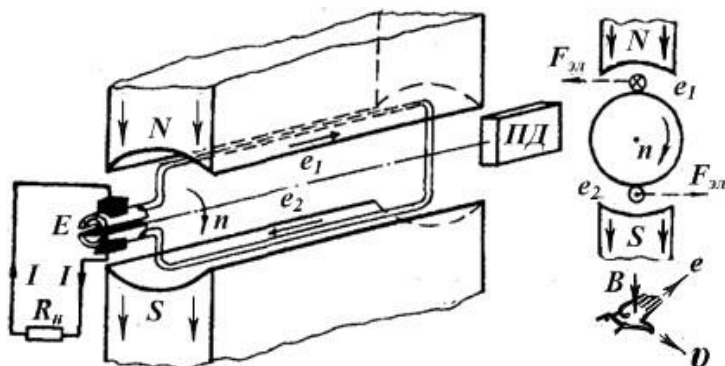


Рис. 4. Работа машины постоянного тока генератором

Будучи постоянными по направлению, ток и ЭДС на щетках и во внешней цепи оказываются переменными по величине, т. е. пульсирующими. Это связано с изменением положения витка в магнитном поле при его вращении и, как следствие, изменение угла между векторами мгновенной скорости и магнитной индукции. Отмеченную пульсацию тока и ЭДС можно сгладить путем увеличения числа витков, вращающихся в магнитном поле, и соответствующего увеличения числа коллекторных пластин, что, и имеет место в реальных машинах (рис. 5).

Рассмотренный нами виток представлял собой, как было отмечено, одну секцию обмотки якоря. В реальных же машинах обмотка якоря состоит из большого количества таких секций, в которых происходят те же

самые процессы, лишь сдвинутые по времени. Причем каждая секция может состоять не из одного, из нескольких витков. Активные стороны секций укладываются в пазы сердечника якоря таким образом, чтобы одна сторона располагалась под магнитным полюсом одной полярности, а другая — под полюсом другой полярности. Лишь при соблюдении этого условия наводимые в сторонах витка ЭДС будут складываться. Все секции обмотки якоря соединяются между собой через коллекторные пластины.

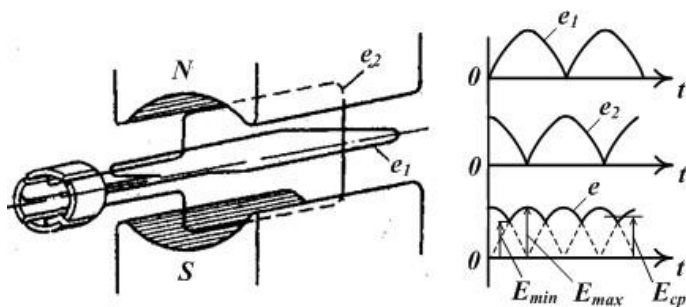


Рис. 5. Сглаживание пульсации ЭДС на щётках

Рассмотрим явления, сопутствующие описанному режиму работы машины постоянного тока генератором. Во-первых, при подключении к щеткам генератора внешней нагрузки R_H по этой нагрузке и по обмотке якоря, имеющей сопротивление $R_я$, потечет ток I . С появлением тока в обмотке якоря, находящейся в магнитном поле, на активные стороны ее витков (секций) начнут действовать электромагнитные силы $F_{эм}$. Поскольку токи в сторонах витков якоря будут направлены в ту же сторону, что и вызвавшие их ЭДС, то найденные по правилу левой руки направления этих сил создают момент $M_{пр}$, противодействующий вращению якоря. Если скорость вращения якоря n постоянна, то вращающий момент $M_{вр}$ приводного двигателя ПД должен быть равен противодействующему электромагнитному моменту $M_{пр}$ генератора: $M_{вр} = M_{пр}$. Таким образом, для вращения якоря и производства электрической энергии необходимо подводить к генератору и затрачивать механическую энергию и тем большую, чем больше ток якоря. Во-вторых, в соответствии со схемой замещения цепи якоря генератора постоянного тока (рис. 6) можно записать по 2-му закону Кирхгофа уравнение ее электрического состояния:

$$E = IR_H + IR_я.$$

Но $IR_H = U$, т. е. напряжению на нагрузке или на выходных зажимах генератора. Тогда уравнение относительно напряжения на зажимах генератора:

$$U = E - IR_{я.}$$

Это выражение, называемое уравнением напряжений генератора, указывает, что напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС E , индуцированной (наведенной) в обмотке якоря машины, на величину внутреннего падения напряжения в ней $IR_{я.}$

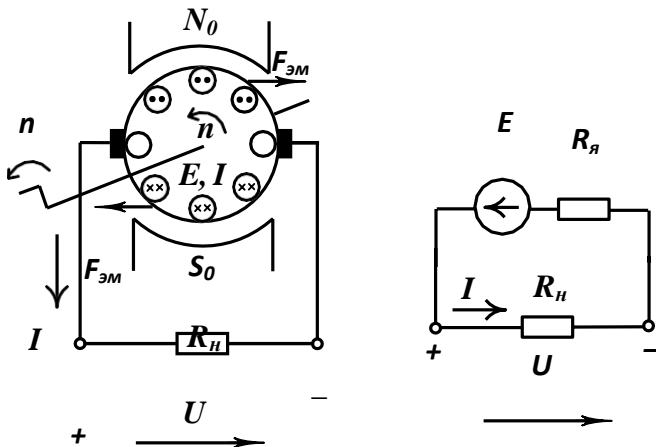


Рис. 6. Схема замещения якоря генератора

От уравнения напряжений легко перейти к уравнению баланса мощностей цепи якоря, умножив для этого обе части уравнения на одно и то же значение тока I :

$$UI = EI - I^2R_{я.}$$

Это уравнение говорит о том, что электрическая мощность на зажимах генератора и отдаваемая потребителю $P = UI$ равняется электромагнитной мощности преобразования $P_{эм} = EI$, развиваемой генератором из получаемой от приводного двигателя такой же по величине механической мощности $P_{мех} = M_{вр} \omega$, минус мощность электрических потерь на активном сопротивлении обмотки якоря $P_{эл} = I^2R_{я.}$

Генераторы постоянного тока. Способы возбуждения генераторов. Возбуждение магнитного поля в генераторах производится или ток от независимого источника (рис. 7,а), постоянными магнитами или от якоря

самого генератора — самовозбуждением (рис. 7,б, в, г). В самовозбуждающихся генераторах обмотки возбуждения могут быть включе-

ны параллельно якорю (рис. 7,б), последовательное ним (рис. 7,в) либо параллельно и последовательно (рис. 7,г). В соответствии с этим различают генераторы независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Чтобы создать необходимую МДС возбуждения $w_B I_B$ и уменьшить потребление энергии обмоткой при независимом и параллельном возбуждении, уменьшают ток возбуждения I_B , увеличивая число витков w обмотки. Обмотка выполняется из сравнительно тонкого провода и имеет большое сопротивление (сотни Ом). Ток возбуждения составляет 1—5% от номинального тока якоря.

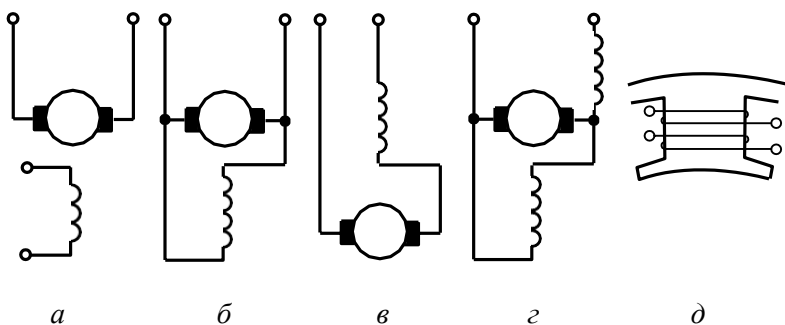


Рис. 7. Схемы возбуждения генераторов

Через обмотку последовательного возбуждения проходит полный ток якоря. Число витков катушек возбуждения невелико, их выполняют из проводов большого сечения, сопротивление обмотки незначительно.

В машинах смешанного возбуждения на основных полюсах имеется по две катушки: одна принадлежит параллельной обмотке, другая — последовательной (рис. 7, г, д).

МДС обмоток возбуждения создают магнитные потоки полюсов. Зависимость потока полюса Φ от МДС возбуждения или от тока возбуждения определяют на основании закона полного тока или экспериментально и называют магнитной характеристикой машины. Она представляет собой узкую петлю гистерезиса, так как магнитная цепь машины выполнена из магнитомягкого материала. Приблизительно ее представляют одной кривой (рис. 8). Поскольку при $\omega = const$ ЭДС якоря пропорциональна потоку полюса: $E = c\omega\Phi$, зависимость $\Phi(I_B)$ подобна зависимости $E(I_B)$, называемой характеристикой холостого хода генератора.

Вначале поток Φ и ЭДС E возрастают почти пропорционально току возбуждения I_B . С увеличением I_B кривая $\Phi(I_B)$ плавно загибается

и рост магнитного потока и ЭДС резко замедляется — наступает магнитное насыщение.

Магнитная цепь машины рассчитана так, что ее состояние при $I_B = I_{B.ном}$ соответствует точке $\Phi_{ном}$ на середине «колена» кривой $\Phi(I_B)$.

При отсутствии тока в обмотке возбуждения в якоре наводится небольшая ЭДС (3—5% от $E_{ном}$) за счет остаточной намагниченности (гистерезиса) магнитной системы машины. Этот малый остаточный поток $\Phi_{ост}$ обеспечивает самовозбуждение генераторов.

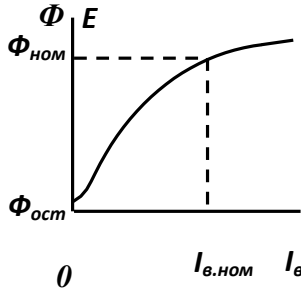


Рис. 8. Магнитная характеристика машины $\Phi(I_B)$ или характеристика холостого хода генератора $E(I_B)$

Рассмотрим процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения при холостом ходе.

При вращении якоря с номинальной частотой в слабом магнитном поле $\Phi_{ост}$, созданном остаточной намагниченностью, в обмотке якоря наводится небольшая ЭДС. Она создает небольшой ток в цепи возбуждения (приемник отключен), который увеличивает магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_{ост} + \Phi_B$. Наводимая в якоре ЭДС возрастает, что приводит к дальнейшему увеличению тока возбуждения, потока и ЭДС — происходит процесс самовозбуждения. Но с насыщением магнитной цепи рост ЭДС E от тока I_B замедляется.

Очевидно, для самовозбуждения необходимо выполнение определенных условий, прежде всего наличие остаточного потока $\Phi_{ост}$. Во-вторых, подключение обмотки к якору должно быть таким, чтобы направление возбуждаемого и остаточного потоков совпадало. В-третьих, сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического, а частота вращения якоря — номинальной. Процесс самовозбуждения заканчивается через 1—2 с, после чего к генератору подключают приемник.

Эксплуатационные характеристики генераторов Практический интерес представляют два основных качества генератора как источника электропитания: степень постоянства напряжения при увеличении тока нагрузки и возможность плавного регулирования этого напряжения.

Рассмотрим эксплуатационные особенности **генератора независимого возбуждения**. Схема генератора независимого возбуждения приведена на рис. 9,а. Реостат возбуждения здесь включают по схеме потенциометра с выводом средней точки, чтобы изменять не только значение, но и направление тока возбуждения и тем самым изменять направление ЭДС якоря и полярность напряжения на его зажимах.

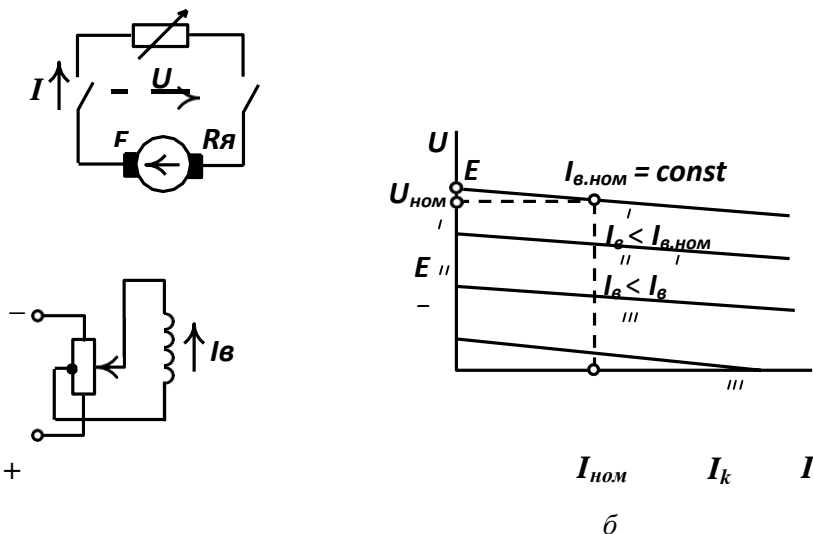


Рис. 9. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора независимого возбуждения

Внешнюю характеристику этого генератора снимают при $I_{e, ном} = const$. Она представляет (рис. 9,б) слегка наклонную прямую. Из уравнения $U = E - R_f I$ следует, что напряжение нерегулируемого генератора $E = const$ с увеличением тока нагрузки снижается из-за падения напряжения в якоре. Снижение напряжения от холостого хода $U_x = E$ до номинального $U_{ном}$ составляет 6—12% от U_x . При коротком замыкании во внешней цепи якоря ток превышает номинальный в десятки раз: $U=0, I_k = E_{ном}/R_f = 10 \div 20 I_{ном}$ (точка I_k выходит за пределы графика). Такой ток опасен для коллектора, щеток, обмотки. Электрическую машину защищают от токов короткого замыкания быстродействующими реле и контакторами.

Перегрузка током ($2-2,5$) $I_{ном}$ допускается лишь кратковременно (несколько секунд), когда нагрев машины не успевает достичь опасных значений, а искрение неинтенсивно.

Если устанавливать различные значения $I_g = const$, например $I_g < I_{г. ном}$ значения ЭДС E будут другими. При этом получают семейство внешних характеристик (см. рис. 9,б). Из этого рисунка видно, что генератор независимого возбуждения позволяет плавно регулировать током возбуждения напряжение от нуля до номинального. Такой генератор используют, например, для плавного регулирования частоты и направления вращения двигателей постоянного тока в системах автоматического управления, приводах прокатных станков, экскаваторов, локомотивов и других механизмов.

Постоянство напряжения генератора также поддерживают регулированием тока возбуждения и, следовательно, ЭДС E . Это делается с помощью автоматических регуляторов.

Независимое возбуждение имеют также генераторы высокого напряжения, низкого напряжения, но больших токов (для электролиза) и тахогенераторы.

Тахогенератор — микромашина, в которой создаётся постоянный магнитный поток (с помощью постоянных магнитов). При этом его ЭДС пропорциональна частоте вращения. Тахогенератор служит для измерения частоты вращения и датчиком скорости в системах автоматического регулирования.

Необходимость в дополнительном источнике питания цепи возбуждения генератора представляет определенное неудобство, особенно при автономной работе. От него свободны генераторы с самовозбуждением.

Внешняя характеристика **генератора параллельного возбуждения** (рис. 10,а) (кривая 2 на рис. 10,б) отличается от характеристики при независимом возбуждении (прямая 1) более резким спадом напряжения с увеличением тока нагрузки. При номинальном токе нагрузки снижение составляет 10—20%. Это следствие непрерывного уменьшения тока возбуждения $I_g = U/R_g$, магнитного потока Φ и ЭДС E при уменьшении напряжения U на якоре, питающего обмотку возбуждения. При достижении током значений $2,5-3I_{ном}$ напряжение падает так быстро, что генератор «размагничивается», «сбрасывая нагрузку».

Внезапное короткое замыкание также опасно, так как ток КЗ создается в течение некоторого времени ЭДС, близкой к номинальному значению.

Для получения неизменного напряжения при увеличении тока нагрузки нужно увеличивать поток возбуждения Φ . Это делается автома-

тически либо регулятором тока возбуждения, либо с помощью добавочной обмотки при смешанном возбуждении машины.

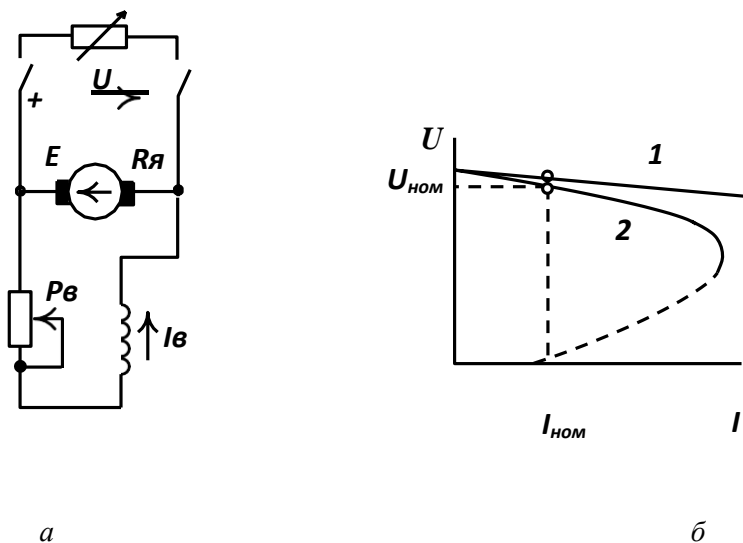


Рис. 10. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора параллельного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения имеет и параллельную и последовательную обмотки (рис. 11,а). При холостом ходе этот генератор обладает всеми качествами генератора параллельного возбуждения $\Phi = \Phi_g$. С увеличением тока нагрузки возрастает и магнитный поток $\Phi(I)$, создаваемый последовательной обмоткой, увеличиваются результирующие потоки полюсов $\Phi = \Phi_g + \Phi(I)$, а вместе с тем — ЭДС и напряжение на нагрузке. Число витков последовательной обмотки можно выбрать так, чтобы напряжение с ростом нагрузки оставалось практически неизменным (кривая 1 на рис. 11,б).

Конечно, включение обеих обмоток при этом должно быть согласным, чтобы их потоки складывались. При встречном включении обмоток напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко падает (кривая 2 на рис. 11,б). Такая внешняя характеристика необходима, например, при электродуговой сварке для постоянства тока при колебаниях сопротивления цепи вследствие изменения длины дуги.

Большинство выпускаемых машин имеет смешанное возбуждение. Генераторы последовательного возбуждения имеют внешнюю характеристику, сходную с характеристикой холостого хода. Их применяют лишь в особых случаях.

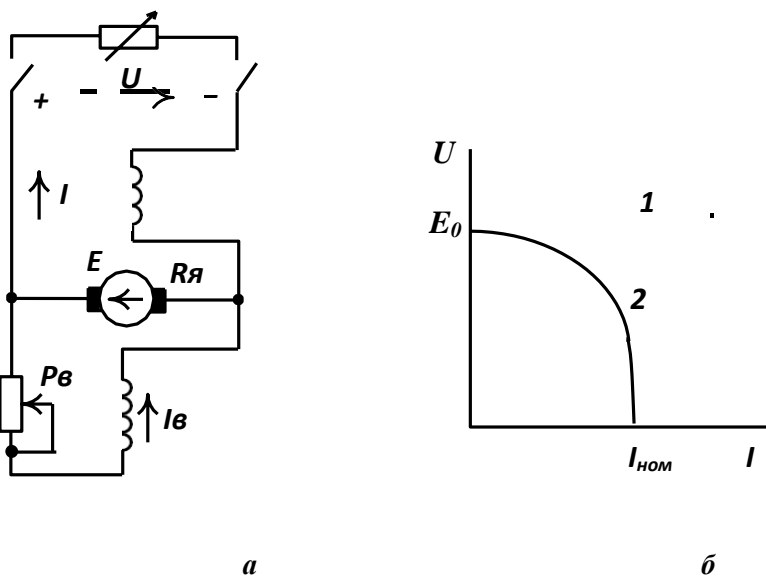


Рис. 11. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора смешанного возбуждения

2. Программа работы

6. Собрать электрическую цепь лабораторной установки для исследования генератора независимого возбуждения в соответствии со схемой, приведенной на рис. 12.

7. После проверки схемы преподавателем установить реостат R_d в цепи ротора приводного асинхронного двигателя в положение 1 (сопротивление R_d полностью введено). Включить асинхронный двигатель, замкнув выключатель B_1 , затем (универсальным переключателем УП) постепенно переводя R_d из положения 1 в положение 4, вывести сопротивление из цепи ротора.

8. Снять характеристику холостого ход генератора $U = f(I_e)$ при $I_a = 0$, $\omega = \omega_{ном}$ (разомкнуть выключатель в цепи нагрузки).

Измерить величину остаточной ЭДС E_0 на зажимах генератора при разомкнутой цепи возбуждения (B_3 - отключен). Данные занести в табл. 1.

Замкнуть цепь возбуждения генератора выключателем B_3 и измерить U_r , I_e , плавно увеличивая ток возбуждения с помощью ЛАТРа до

наибольшего значения 6–7 точек восходящей ветви характеристики. Данные занести в табл. 1.

Уменьшая ток возбуждения, записать данные 6–7 точек нисходящей ветви характеристики. Последнюю точку нисходящей ветви характеристики снять при отключенном автомате B_3 .

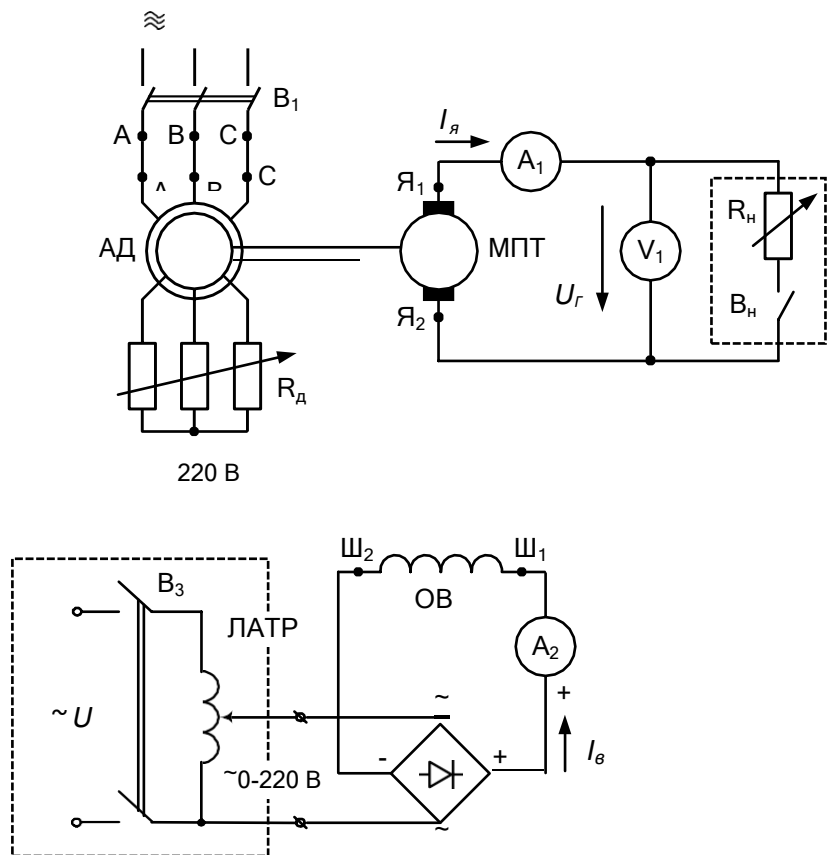


Рис. 12. Электрическая схема генератора независимого возбуждения

9. Снять внешнюю характеристику генератора $U = f(I_a)$ при $I_b = I_{b,ном}$, $\omega = \omega_{ном}$. Для этого ЛАТРОм установить номинальный ток возбуждения генератора согласно таблице номинальных данных. Установить максимальную нагрузку генератора, переведя переключатель на грузки

R_H в положение 4. Уменьшая нагрузку генератора переключателем R_H записать ток якоря и напряжение генератора в табл.2. Последней снять точку холостого хода (выключатель B_H разомкнут).

10. Снять регулировочную характеристику $I_{\epsilon} = f(I_{\gamma})$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$. Для этого установить номинальную нагрузку генератора ($R_{\text{н}}$ в 4-е положение). Записать I_{ϵ} и I_{γ} в табл.3. Уменьшать нагрузку генератора. При этом напряжение генератора будет возрастать. Для поддержания его неизменным необходимо уменьшать ток возбуждения с помощью ЛАТРа. Последней снимается точка холостого хода при $I_{\gamma}=0$ (выключатель нагрузки $B_{\text{н}}$ отключен). Результаты занести в табл. 3.

Таблица 1
Данные характеристики холостого хода генератора

	Восходящая ветвь						Нисходящая ветвь					
U_{Γ} , В												
I_{ϵ} , А												

Таблица 2
Экспериментальные данные внешней характеристики

U_{Γ} , В					
I_{γ} , А					

Таблица 3
Данные регулировочной характеристики

I_{γ} , А					
I_{ϵ} , А					

3. Обработка результатов работы

5. По данным табл. 1 построить характеристику холостого хода генератора $U = f(I_{\epsilon})$ при $I_{\gamma}=0$, $\omega = \omega_{\text{ном}}$. Отметить на ней точку $U_{\text{ном}}$. Сделать выводы о возможности плавного регулирования напряжения генератора.

6. По данным табл. 2 построить внешнюю характеристику генератора $U_{\Gamma} = f(I_{\gamma})$ при $I_{\epsilon \text{ ном}}$, $\omega_{\text{ном}}$. Сделать вывод о свойствах генератора как источника электропитания, о степени постоянства напряжения при увеличении тока нагрузки.

7. По данным табл. 3 построить регулировочную характеристику генератора $I_{\epsilon} = f(I_{\gamma})$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$. Сделать вывод о том, как нужно

изменять ток возбуждения, чтобы с изменением тока нагрузки напряжение генератора поддерживать постоянным.

8. Контрольные вопросы

12. Изложите принцип работы генератора постоянного тока.
13. Опишите устройство промышленного генератора постоянного тока.
14. Какую роль играет коллектор в машинах постоянного тока?
15. От чего зависят ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока.
16. Перечислите способы возбуждения генераторов постоянного тока и нарисуйте соответствующие схемы включения.
17. Запишите и поясните уравнение баланса мощностей цепей якоря генератора и двигателя.
18. Что такое реакция якоря и ее роль в машинах постоянного тока?
19. Каким образом осуществляется процесс самовозбуждения генераторов параллельного возбуждения?
20. Какой генератор применяют для плавного регулирования напряжения?
21. Каким образом можно получить напряжение генератора, которое бы мало зависело от тока нагрузки?
22. Что такое обратимость машин постоянного тока?

Лабораторная работа №24

Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

1. Цель работы

- Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором.
- Ознакомиться со способами пуска.
- Установить влияние добавочного сопротивления в цепи ротора на вид механических характеристик двигателя.
- Оценить свойства двигателя из анализа полученных рабочих и механических характеристик

2. Теоретическая часть

Назначение и области применения асинхронных машин

Асинхронные машины относятся к электрическим машинам переменного тока, и как любой электромеханический преобразователь, обладают свойствами обратимости, т. е. служат для взаимного преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию или наоборот, механической энергии в электрическую.

Магнитное поле асинхронной машины создается трехфазным, двухфазным или однофазным источником переменного напряжения. В соответствии с этим различают трех-, двух- или однофазные асинхронные машины.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность специальных асинхронных двигателей - несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватт. Электрические машины общего назначения выпускаются в виде серий, охватывающих определенный диапазон мощностей, частот вращения и напряжений. Машины одной серии обладают общностью конструктивных решений и технологии их изготовления, а также однотипностью применяемых материалов.

В настоящее время наиболее распространенной серией асинхронных двигателей является серия 4А, охватывающая ряд машин мощностью от 0,06 до 400 кВт. Кроме основного исполнения имеется ряд модификаций двигателей с повышенным пусковым моментом, многоскоростные, малошумные и т. д. Выпускаются также асинхронные двигатели новой серии АИ, которые имеют улучшенные массогабаритные показатели и характеристики, охватывая диапазон мощностей от 0,025 до 400 кВт.

Устройство асинхронных машин

Асинхронные машины состоят из двух частей: неподвижной - статора и вращающейся - ротора.

Магнитопровод или сердечник статора представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных колец (рис. 1) изготовленных из листов электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм, причем эти кольца электрически изолируют друг от друга оксидированием или лакировкой. При сборке магнитопровода - пакетировании, кольца, полученные штамповкой, ориентируют так, чтобы выштампованные пазы образовывали каналы для укладки проводников обмотки.

Собранный пакет колец статора запрессован в корпус - станину, который имеет соединительные элементы (лапы, торцовый фланец и т. д.) для крепления к неподвижному жесткому основанию. Обмотку статора выполняют в виде многовитковых катушек, имеющих, как правило, одинаковые размеры.

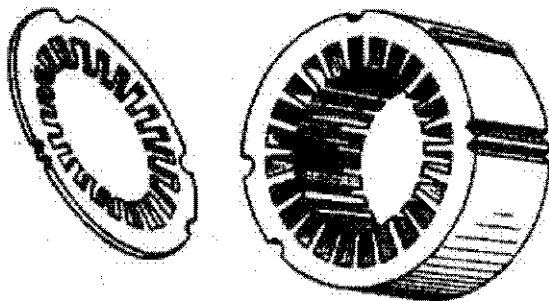


Рис.1. Пакет штампованных листов статора

Лобовые части катушек отгибают и они проходят вдоль торцовой поверхности пакета статорных колец (рис. 2).

Ротор асинхронной машины набирают из штампованных дисков, изготовленных также из листов электротехнической стали, которые запрессовывают на вал, входящий при сборке машины в боковые подшипниковые щиты.

По конструкции роторной обмотки асинхронные машины делятся на два основных типа: с короткозамкнутым и фазным ротором.

Обмотки короткозамкнутых роторов выполняются литыми чаще всего из алюминия или его сплавов. При заливке одновременно отливаются стержни, лежащие в пазах и короткозамыкающие кольца с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками (рис. 3). Этот тип обмотки называют часто «белчьим колесом» (рис. 4).

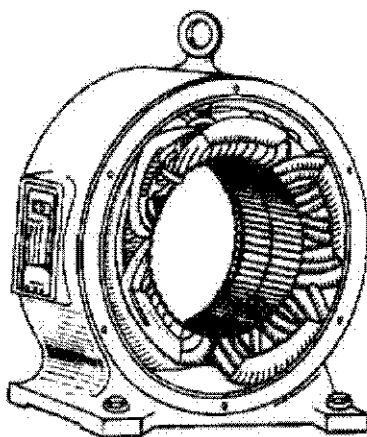


Рис. 2. Внешний вид статора со стороны лобовой части трехфазной обмотки

Короткозамкнутые роторы крупных машин и специальных машин с улучшенными пусковыми характеристиками выполняются сварными. Стержни ротора из меди или латуни привариваются к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляются стержни обмотки.

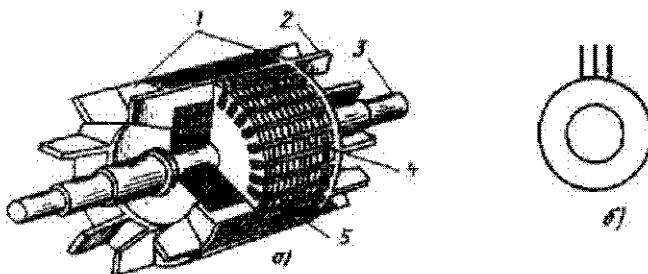


Рис. 3. Конструкция (а) и условное графическое обозначение (б) ротора с короткозамкнутой обмоткой; 1 - замыкающие кольца; 2 - вентиляционные лопасти; 3 - вал; 4 - пакет ротора; 5 - стержни обмотки

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку, которая выполняется так же, как и обмотка статора. Трехфазная обмотка соединяется звездой, выводы ее присоединены к контактным кольцам (рис. 5), поэтому асинхронную машину с фазным ротором также называют асинхронной машиной с контактными кольцами.

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку, которая выполняется так же, как и обмотка статора. Трехфазная обмотка соединяется звездой, выводы ее присоединены к контактным кольцам (рис. 5), поэтому асинхронную машину с фазным ротором также называют асинхронной машиной с контактными кольцами.

Контактные кольца, опрессованные пластмассой, насаживаются на вал двигателя, они выполняются чугунными или медными. Выводные концы обмотки ротора подводятся к трем кольцам через внутреннее отверстие вала ротора.

Токосъемное устройство состоит из щеток и щеткодержателей. Щеткодержатели укреплены на изолированной части пальца, металлический конец которого ввинчен в прилив подшипникового щита.

Кольца с помощью щеток подключают к трехфазному реостату для улучшения пусковых характеристик или для регулирования частоты вращения ротора. В некоторых сложных электрических приводах к кольцам ротора подводят регулируемое напряжение от неподвижного источника питания, что также позволяет изменять по желанию частоту вращения ротора асинхронной машины. Обычно в рабочем режиме асинхронного двигателя кольца фазного ротора замыкают накоротко.

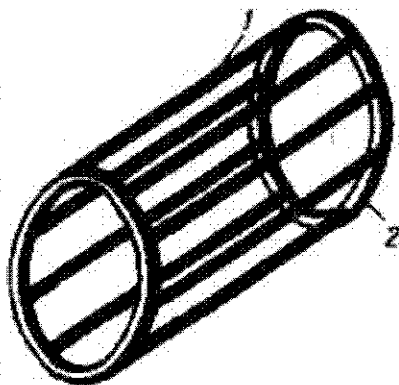


Рис. 4. Короткозамкнутая обмотка типа «беличье колесо»: 1 — стержни обмотки; 2 — замыкающее кольцо

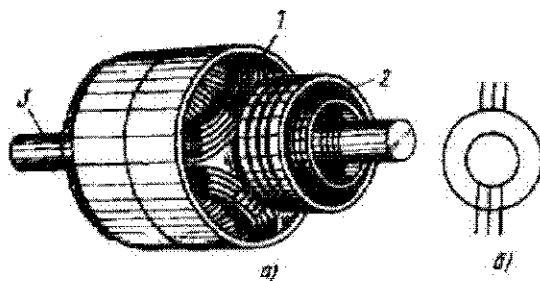


Рис. 5. Внешний вид ротора (а) и условное графическое обозначение (б) асинхронного двигателя с контактными кольцами: 1 - обмотка; 2 - контактные кольца; 3 - вал

Наибольшее распространение получили двигатели с короткозамкнутым ротором, которые дешевле в изготовлении и надежнее в эксплуатации.

В основе работы электрических машин переменного тока, в том числе и асинхронных машин, лежит использование вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора.

Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки

Рассмотрим создание вращающегося магнитного поля на упрощенной модели статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя (рис. 6, а). В пазах статора уложены три катушки, каждая из которых является фазой трехфазной обмотки и представлена одним витком. Катушки соединены между собой по схеме звезды (или треугольника) и подключены к трехфазной сети (рис. 6, б). Катушки совершенно идентичны и расположены симметрично, поэтому векторная диаграмма токов, будет также симметрична (рис. 6, в).

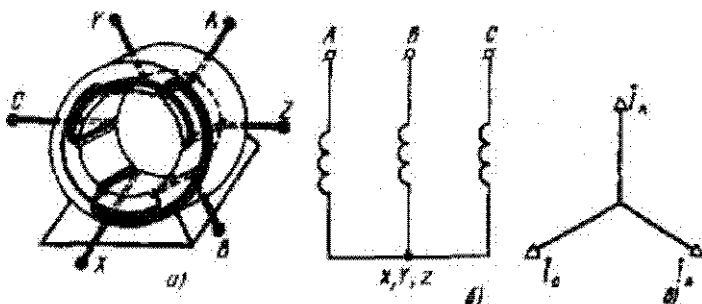


Рис. 6. Упрощенная модель статорной обмотки (а), схема соединения катушек (б) и векторная диаграмма токов (в)

На рис. 7, а показаны графики мгновенных значений токов обмотки статора. На рис. 7, б — г изображены поперечные сечения асинхронной машины для упрощенной модели трехфазной обмотки рис. 6, а.

Эффект вращения магнитного поля трехфазной обмотки можно наглядно показать на примере картин результирующего магнитного поля этой обмотки для нескольких моментов времени, например, при максимуме фазных токов i_A , i_B и i_C . Условимся за положительное направление тока принимать ток, направленный от начала обмотки к ее концу, таким образом в момент времени t_1 ток в катушке А-Х достигает положительного максимума (рис. 7, а) и направлен от зажима А к зажиму Х (рис. 7, б). В тот же момент времени токи в двух других катушках отрицательны, т. е. направлены от концов катушки (У и Z) к их началам (В и С). Направления токов в проводниках обмотки показаны на рис. 7, б-г знаками креста

и точки. Силовые линии магнитного поля охватывают проводники с одинаковым направлением тока. В момент времени t_1 две магнитные линии этого поля изображены на рис. 7, б пунктиром, а ось симметрии результирующего магнитного поля совпадает с осью симметрии катушки $A-X$. Рассмотрим направления токов в катушках в два последующих момента времени t_2 и t_3 , соответствующих максимумам токов в катушках $B-Y$ и $C-Z$ (рис. 7, в, г).

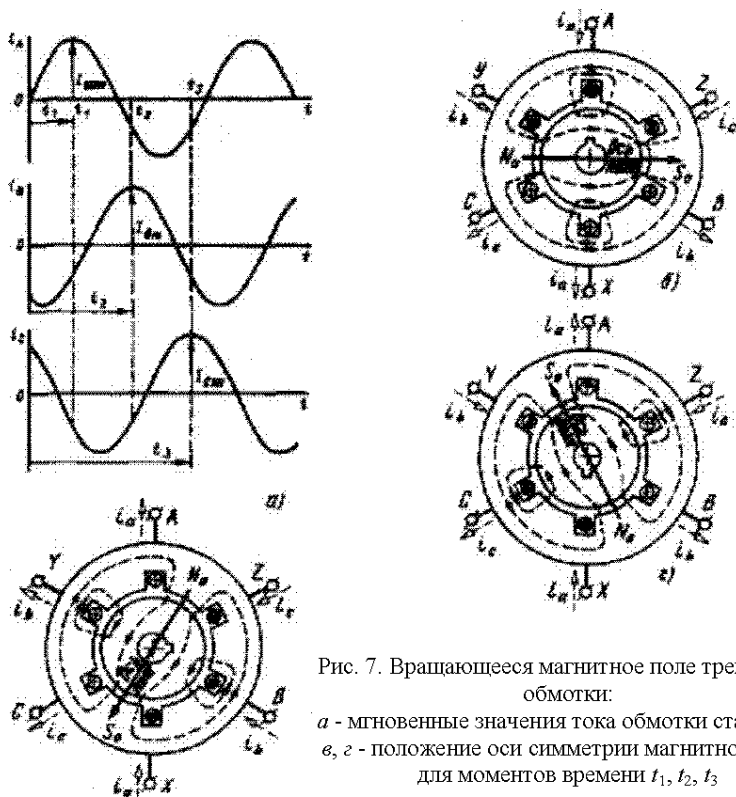


Рис. 7. Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки:
 а - мгновенные значения тока обмотки статора; б, в, г - положение оси симметрии магнитного поля для моментов времени t_1, t_2, t_3

Выяснив направление токов, легко провести ось симметрии результирующего магнитного поля катушек. Сопоставление магнитных полей на рис. 7, б-г указывает на вращение оси симметрии и всей картины магнитного поля. За один период T изменения токов магнитное поле делает полный оборот.

Реверсирование магнитного поля (изменение направления вращения) осуществляется переключением на зажимах источника питания двух выводов трехфазной обмотки (например, B и C). При этом фазы B и C об-

мотки как бы меняются местами, т. е. изменяется направление вращения магнитного поля.

На рис. 7 ось симметрии магнитного поля вращается по часовой стрелке, при переключении фаз *B* и *C* вращение будет против часовой стрелки.

При проектировании обмотки асинхронных машин добиваются того, чтобы закон распределения магнитной индукции *B* вдоль воздушного зазора между статором и ротором был близок к синусоидальному, поэтому вращающееся магнитное поле, созданное статором, принято упрощенно изображать в виде эпюры, показанной на рис. 8, *a*.

Рассмотренное магнитное поле имеет одну пару полюсов ($p = 1$).

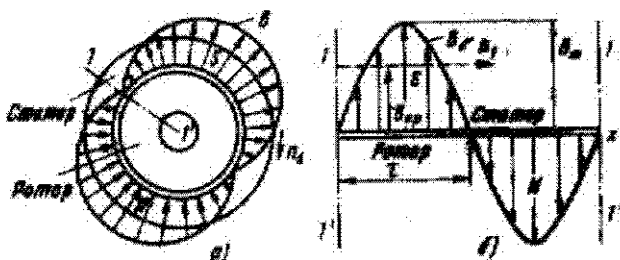


Рис. 8. Магнитное поле однофазной обмотки:

a - картина магнитного поля двухполюсной обмотки; *b* - опора распределения магнитного поля в воздушном зазоре на линейной развертке

Нетрудно определить частоту вращения магнитного поля: полный оборот совершается за время, равное периоду изменения токов статорной обмотки T ; за одну секунду число оборотов равно $1/T$, с учетом того, что $T = 1/f_1$ (f_1 - частота токов статора), частота вращения магнитного поля n_1 , об/мин, определяется формулой

$$n_1 = 60f_1.$$

Видоизменив обмотку статора, можно получить вращающееся магнитное поле с несколькими парами полюсов. Схематически устройство обмоток для случая $p = 2$ показано на рис. 9, *a*.

Число пар полюсов можно сделать любым, при этом формула для частоты вращения магнитного поля будет иметь вид

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Условимся, что в обозначениях величин индекс *1* относится к статору, а *2* - к ротору. Допустимо не ставить индекс для величины, отношение к статору или ротору которой очевидно. Например, частота сети f , частота вращения ротора n или угловая скорость ротора Ω .

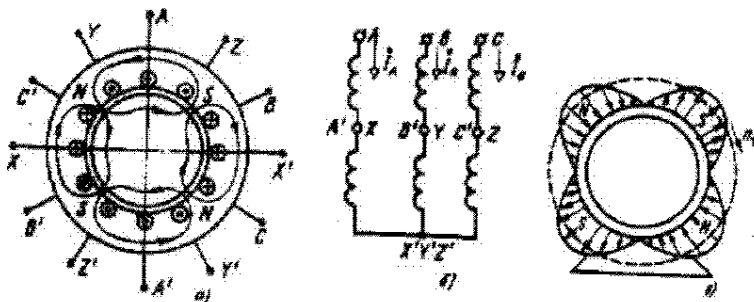


Рис. 9. Эшора вращающегося магнитного поля:
a - распределение тока по проводникам обмотки статора;
б - схема соединения катушек обмотки статора; *в* — эшора магнитного поля
 двухполосной машины

Принцип действия асинхронных двигателей

Принцип действия асинхронных двигателей основан на силовом взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами, возникающими в обмотке ротора под действием наведенной в ней ЭДС.

На рис. 10, *a* показан один из проводников обмотки ротора, расположенный во вращающемся магнитном поле, созданном токами статорной обмотки. Линии магнитной индукции пересекают проводник, индуцируя в нем ЭДС. Направление ЭДС определено по правилу правой руки, при этом учтено, что относительное движение проводника в магнитном поле направлено против часовой стрелки.

Возникновение ЭДС в роторной обмотке возможно только в случае, если ротор и магнитное поле статора вращаются с разными скоростями, т. е. относительная скорость движения проводника в магнитном поле отлична от нуля.

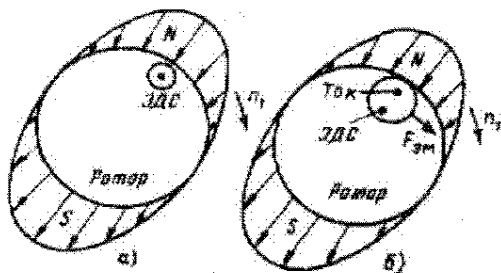


Рис. 10. Проводник ротора во вращающемся магнитном поле статора: *a* - наведение ЭДС в проводнике ротора; *б* - возникновение электромагнитных сил

Это обстоятельство определяет название электрической машины - асинхронная (несинхронная), в отличие от синхронной, у которой ротор

вращается со скоростью магнитного поля, созданного статорной обмоткой.

На проводник с током, находящийся в магнитном поле статорной обмотки, будет действовать электромагнитная сила F , направление которой определено по правилу левой руки. Под действием электромагнитных сил ротор будет вращаться в направлении вращения магнитного поля, при этом уменьшается относительная скорость движения проводника в поле, следовательно, изменяются ЭДС, ток и электромагнитные силы.

Установившийся режим наступит при такой постоянной частоте вращения ротора $n_2 = const$, когда электромагнитные силы будут уравновешены механическими силами торможения (сопротивления).

Скольжение

В теории асинхронных машин используется понятие скольжения

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Скольжение - безразмерная величина, которую выражают и в процентах

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

В режимах, близких к номинальному, разница в частотах вращения ротора и магнитного поля статора невелика и колеблется в пределах нескольких процентов.

Скольжение может выражаться и через угловую скорость ротора и вращающего магнитного поля статора, измеряемую в радианах в секунду

$$\omega = 2\pi n/60, \quad s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}.$$

Электродвижущие силы обмоток статора и ротора

В отличие от машин постоянного тока, в которых ЭДС наводится только во вращающейся обмотке, в асинхронных машинах ЭДС создается и во вращающейся и в неподвижной обмотках. Мгновенное значение ЭДС, наводимой вращающимся магнитным полем машины в проводнике, может быть определено по закону электромагнитной индукции

$$e(x) = l v_{отн} B_x,$$

где l — активная длина проводника, $v_{отн}$ — относительная скорость движения проводника в магнитном поле с магнитной индукцией B_x .

Частота ЭДС обмотки статора равна частоте напряжения сети. Частота вращения магнитного поля относительно вращающихся проводников

ротора, называется частотой скольжения n_s , она определяется разностью частот вращения магнитного поля и ротора

$$n_s = n_1 - n_2 = sn_1.$$

Следовательно, частота ЭДС обмотки ротора

$$f_2 = sf_1.$$

Частота ЭДС обмотки ротора прямо пропорциональна частоте сети и скольжению. Для неподвижного ротора $s=1, f_2=f_1$.

Действующее значение ЭДС в обмотке статора

$$E_1 = 4,44f_1W_1\Phi_mk_{01},$$

где k_{01} — обмоточный коэффициент, учитывающий, что каждая фаза статора состоит секций, сдвинутый в пространстве относительно друг друга, f_1 — частота тока статора, W_1 -число витков фазы, Φ_m -амплитуда магнитного потока.

Для неподвижного ротора ЭДС будет выражаться аналогичной формулой

$$E_2 = 4,44f_1W_2\Phi_mk_{02}.$$

Для вращающегося ротора относительная скорость проводника в магнитном поле будет определяться скольжением и, следовательно, ЭДС вращающегося ротора будет прямо пропорциональна скольжению. Условимся далее все электрические величины, характеризующие работу вращающегося ротора и зависящие от скольжения, обозначать индексом “s”

$$E_{2s} = 4,44sf_1W_2\Phi_mk_{02}.$$

Помимо ЭДС, индуцированных вращающимся магнитным полем, учитываются также ЭДС магнитного поля рассеяния, которое в асинхронной машине имеет специфическую топографию.

Уравнения электрического состояния обмоток

Уравнение электрического состояния фазы обмотки статора имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1\dot{I}_1 + jX_1\dot{I}_1.$$

Как и в трансформаторе, при токе \dot{I}_1 в фазе обмотки статора, не больше номинального, напряжение \dot{U}_1 этой фазы уравновешено главным образом основной ЭДС E_1 , так как слагаемые R_1I_1 и X_1I_1 , учитывающие нагрев обмотки и рассеяние магнитного потока статора малы по сравнению с основной ЭДС:

$$E_1 \approx U_1.$$

Обмотка ротора обычно замкнута накоротко ($U_2 = 0$), и ЭДС уравновешивается только падением напряжения на внутренних сопротивле-

ниях этой обмотки, учитывающих потери на нагрев обмотки ротора и рассеяние магнитного потока

$$\dot{E}_{2s} = R_2 \dot{I}_{2s} + jX_{2s} \dot{I}_{2s}.$$

Уравнения обмоток асинхронного двигателя тождественны аналогичным уравнениям для первичной и вторичной обмоток

Очевидна зависимость от скольжения и действующего значения тока

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}.$$

Таким образом, вместе с изменением нагрузки, сопровождающимся изменением частоты вращения ротора, в его обмотке (происходит одновременно изменение амплитуд ЭДС и тока, их частоты и угла сдвига фаз. Для двигательного режима работы асинхронной машины перечисленные величины достигают наибольшего значения при неподвижном роторе ($n_2 = 0$), когда $s=1$ (в момент пуска).

Преобразование энергии в асинхронном двигателе

При работе асинхронного двигателя происходит процесс преобразования электрической энергии в механическую энергию вращательного движения. Этот процесс сопровождается бесполезным расходом части энергии источника питания на нагрев машины, который характеризуют мощностями электрических, магнитных и механических потерь.

Мощностью электрических потерь характеризуют нагрев обмоток статора и ротора, обладающих активными сопротивлениями R_1 и R_2 . По закону Джоуля-Ленца, она, как известно, пропорциональна квадрату тока в обмотке.

Мощностью магнитных потерь характеризуют нагрев пакетов магнитопровода, вызванный гистерезисом и вихревыми токами.

Механические потери слагаются из потерь механической энергии на трение в подшипниках и контактных кольцах, а также на вентиляцию машины.

Процесс преобразования электрической энергии в полезную механическую энергию, развиваемую асинхронным двигателем, может быть описан уравнением баланса активной мощности. На основании закона сохранения и преобразования энергии можно записать:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \\ = P_2 + \Delta P_{1s} + \Delta P_{1\text{магн}} + \Delta P_{2s} + \Delta P_{2\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{2s},$$

где P_1 — мощность потребления электрической энергии; ΔP_{1s} — мощность электрических потерь в обмотке статора; $\Delta P_{1\text{магн}}$ — мощность магнитных потерь в пакете магнитопровода статора; ΔP_{2s} — мощность электрических потерь в обмотке ротора; $\Delta P_{2\text{магн}}$ — мощность магнитных потерь в пакете

магнитопровода ротора; $\Delta P_{\text{мех}}$ — мощность механических потерь; P_2 — полезная механическая мощность двигателя.

Из диаграммы рис. 11 следует, что мощность $P_{\text{эм}}$ передачи энергии со статора на ротор, осуществляемой посредством вращающегося магнитного поля, всегда меньше активной мощности двигателя на значение мощности электрических и магнитных потерь в статоре:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (\Delta P_{1\sigma} + \Delta P_{1\text{магн}}).$$

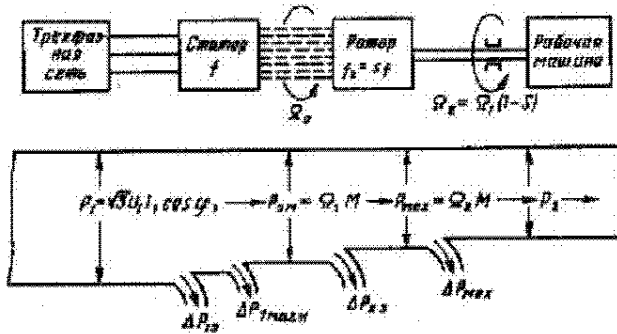


Рис. 11. Диаграмма преобразования энергии в асинхронном двигателе

Мощность $P_{\text{эм}}$, называемую электромагнитной мощностью, можно выразить также через механические величины — угловую скорость Ω_1 магнитного поля и электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, создаваемый двигателем вследствие силового взаимодействия вращающегося магнитного поля с токами роторной обмотки.

$$P_{\text{эм}} = \Omega_1 M_{\text{эм}}.$$

Аналогично выражается механическая мощность $P_{\text{мех}}$ ротора, вращающегося со скоростью Ω_2 :

$$P_{\text{мех}} = \Omega_2 M_{\text{эм}}.$$

Разность электромагнитной и механической мощностей равна мощности потерь в роторе машины. Поскольку мощность магнитных потерь в роторе мала по сравнению с мощностью электрических потерь (так как мала частота перемагничивания пакета ротора), ею пренебрегают и считают

$$P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = \Delta P_{2\sigma}.$$

Последнее равенство позволяет получить весьма важное для анализа работы асинхронных двигателей соотношение:

$$\Delta P_{2\sigma} = \omega_1 M_{\text{эм}} - \omega_2 M_{\text{эм}} = s P_{\text{эм}}.$$

Итак, мощность электрических потерь в роторе асинхронного двигателя пропорциональна скольжению.

Для ограничения электрических потерь в роторе двигателя его рассчитывают и конструируют таким образом, чтобы при номинальной нагрузке частота вращения ротора незначительно отличалась от частоты вращения магнитного поля и, как уже отмечалось выше, номинальное скольжение бывает равно нескольким процентам.

Полезная механическая мощность P_2 двигателя меньше механической мощности $P_{мех}$ ротора на значение мощности механических потерь

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех}$$

Поэтому полезный момент на валу двигателя немного меньше электромагнитного момента развиваемого ротором, т.е. $M_{эм} = M_{сп}$.

Для установившегося режима работы, как и для двигателя постоянного тока, вращающий момент $M_{сп}$ равен моменту нагрузки, т.е. моменту сопротивления M_c и в этом случае возможно обозначение момента без всякого индекса: $M = M_{эм} = M_c$.

Следует иметь в виду, что в паспорте асинхронного двигателя, так же как и других электрических двигателей, в качестве номинальной мощности всегда указывается его полезная механическая мощность P_2 , а не мощность потребления электрической энергии P_1 . Отношение этих мощностей определяет коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2/P_1.$$

Электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронного двигателя

Выражение для электромагнитного момента можно получить из мощности электрических потерь:

$$M = \frac{\Delta P_2 \vartheta}{s \omega_1}.$$

Так как при постоянстве напряжения сети магнитный поток полюса Φ_n не зависит от нагрузки на валу, получаем важный вывод: электромагнитный момент, развиваемый на валу двигателя, пропорционален активной составляющей тока ротора, т.е. зависит от скольжения.

Приравнявая нулю производную функции $M(s)$ находим точку максимума момента $M_{макс}$:

$$M_{макс} = \frac{1}{2} C_m \Phi_n E_2 / X_2.$$

Значение скольжения, соответствующее $M_{макс}$, называют критическим

$$s_{кр} = R_2/X_2.$$

Зависимость $M(s)$

$$M = C_m \Phi_n \frac{E_2}{X_2} \cdot \frac{1}{s / s_{кр} + s_{кр} / s}$$

Выражение $C_m \Phi_n E_2 / X_2$ является константой, если неизменно напряжение сети и определяет максимальное значение момента $M_{макс}$ при $s = s_{кр}$.

Максимальный электромагнитный момент зависит от напряжения на статорной обмотке; эта зависимость непосредственно не видна из полученной формулы, но ее легко найти. Напряжение U_1 определяет значение, магнитного потока полюса Φ_n . В свою очередь, ЭДС E_2 также пропорциональна потоку Φ_n . Тогда легко установить, что

$$M_{макс} \sim U_1^2.$$

Зависимость $M(s)$ показана на рис. 12, а.

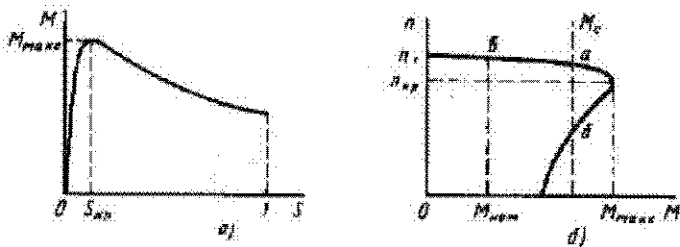


Рис. 12. Зависимость электромагнитного момента от скольжения (а) и механическая характеристика асинхронного двигателя (б)

Большинство асинхронных двигателей проектируют так, что точка максимального момента соответствует $s_{кр} \sim 0,1$. Зависимость $M(s)$ удобна для анализа физических процессов, происходящих в машине при пуске или при изменении нагрузки на валу. При анализе электромеханических процессов, связанных с эксплуатацией двигателя, удобнее пользоваться зависимостями частоты вращения ротора от момента на валу $n(M)$ механическими характеристиками двигателя.

На основании характеристики $M(s)$, показанной на рис. 12, а легко построить механическую характеристику, если вспомнить, что при $s=1$ $n_2=0$, а при $s=0$ $n_2=n_1$ (рис. 12, б).

Рассмотрим вопрос устойчивости работы двигателя при нагрузке на валу, не зависящей от частоты вращения $M_c = const$. В точках а и б (рис. 12, б) двигатель развивает одинаковый электромагнитный момент, но устойчивой работа двигателя может быть только в точке а, где проявляется свойство саморегулирования. Действительно, предположим, что при работе в точке а нагрузочный момент на валу в силу каких-то обстоятельств несколько возрос и двигатель начал замедляться, как видно из механической характеристики это вызывает одновременное увеличе-

ние электромагнитного момента, двигатель перейдет в новое устойчивое положение, когда при несколько сниженной частоте вращения, будет существовать равенство момента вращающего и момента сопротивления.

При работе в точке *б* ситуация иная. Любое малое положительное приращение тормозного момента опять, как и в точке *а*, приведет к замедлению вращения двигателя, однако это замедление вызовет уменьшение вращающего момента, двигатель продолжит торможение и остановится.

Частота вращения, соответствующая максимуму момента, называется критической ($n_{кр}$) — двигатель работает устойчиво при частоте вращения большей критической ($n_2 > n_{кр}$).

На рис. 12, б показано ориентировочное положение точки, соответствующей номинальному режиму работы двигателя (точка *в*). Отношение $M_{макс}/M_{ном}$ всегда больше единицы, что обеспечивает запас устойчивости и предотвращает внезапные остановки двигателя при случайных колебаниях напряжения сети или тормозного момента на валу.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками двигателя называют зависимости угловой скорости Ω_2 , или частоты вращения вала n_2 , электромагнитного момента M , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД двигателя от мощности нагрузки P_2 , при неизменном напряжении на статорной обмотке. Примерный вид характеристик показан на рис. 13 где зависимости для коэффициента мощности и КПД приведены в абсолютных значениях, а все остальные - в относительных единицах. Частота вращения вала в номинальном режиме меньше частоты вращения магнитного поля всего на несколько процентов, характери-

стика $\frac{\Omega_2}{\Omega_1}(P_2)$ близка к линейной. В

соответствии с соотношением $P_2 = \Omega_2 M$, при практически неизменной частоте вращения вала, электромагнитный момент возрастает с ростом мощности P_2 по закону также близкому к линейному.

Зависимость тока I_1 , от мощности на валу аналогично зависимости тока первичной обмотки трансформатора от мощности нагрузки - с ростом мощности увеличивается ток ротора, при этом возрастает также и ток статора, компенсируя размагничивающее действие тока ротора, при этом обеспечивается неизменность

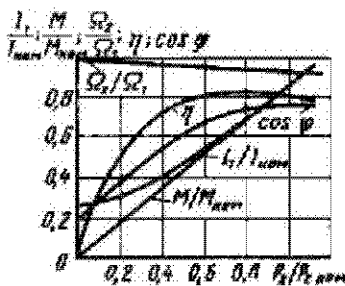


Рис. 13. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

Магнитного потока вращающегося магнитного поля. В отличие от трансформатора, у которого значение тока холостого хода составляет несколько процентов от значения номинального тока, в асинхронном двигателе ток холостого хода может достигать 50% номинального значения. Объясняется это тем, что в магнитной цепи двигателя имеется воздушный зазор, существенно увеличивающий ее магнитное сопротивление.

Как известно, коэффициент мощности оценивает соотношение между активной P_1 и реактивной Q_1 мощностями двигателя и численно равен косинусу угла φ_1 сдвига фазы тока в обмотке статора по отношению к напряжению:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}.$$

При изменении нагрузки двигателя от холостого хода до номинального режима реактивная мощность остается практически неизменной, так как ее значение определяется обратимыми процессами периодического изменения запаса энергии магнитного поля машины, магнитный поток которого поддерживается практически неизменным.

В режиме холостого хода, когда необратимые процессы преобразования энергии определяются только потерями на нагрев, и, следовательно, активная мощность мала, значение коэффициента мощности также мало и составляет 0,06 — 0,2. При возрастании нагрузки на валу активная мощность увеличивается, и при неизменном значении реактивной мощности возрастает коэффициент мощности, который в режиме, близком к номинальному, достигает своего наибольшего значения (0,7—0,95). Дальнейшее увеличение момента сопротивления на валу ведет к некоторому снижению коэффициента мощности, так как рост токов в обмотках приводит к насыщению машины, к значительным полям рассеяния, а обменные энергетические процессы в этих магнитных полях вызывают соответствующее возрастание реактивной мощности и соответственно уменьшение коэффициента мощности.

Пренебрегая трением, выражение коэффициента полезного действия можно записать в виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{маг}}},$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ — потери в обмотке статора и ротора; $\Delta P_{\text{маг}}$ — потери в магнитопроводе машины.

При анализе зависимости КПД двигателя от мощности на валу нужно учитывать, что магнитные потери не зависят от нагрузки на валу, так как при неизменном напряжении питания, магнитный поток вращающегося магнитного поля постоянен, а электрические потери пропорциональны квадрату тока.

естественная, которую имеет двигатель при замкнутых накоротко щетках. Механические характеристики рис. 14, б построены с учетом того, что частота вращения магнитного поля и значение максимального электрического момента M_{max} не зависят от активного сопротивления роторной цепи, а значение критической частоты вращения $n_{кр}$ обратно пропорционально этому сопротивлению.

Как видно из семейства механических характеристик, начальный пусковой момент M_n асинхронного двигателя зависит от активного сопротивления фазы обмотки ротора: увеличение активного сопротивления приводит к увеличению пускового момента. Он может быть даже равен максимальному, если общее сопротивление роторной цепи будет таким, при котором критическое скольжение станет равно единице.

Дальнейшее увеличение активного сопротивления фазы обмотки ротора приводит вновь к ослаблению начального пускового момента (характеристика 4 на рис. 14, б).

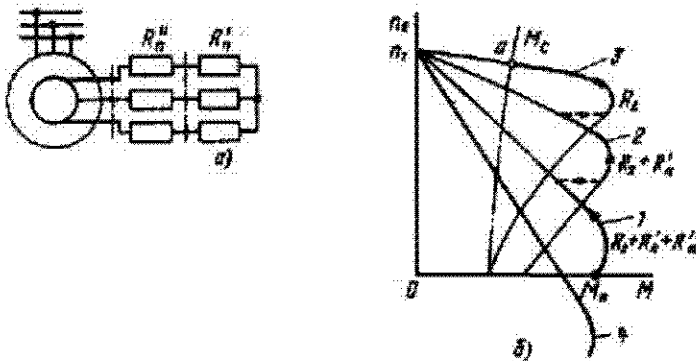


Рис. 14. Схема включения асинхронного двигателя с контактными кольцами (а) и его механические характеристики при разных значениях сопротивления реостата, включенного в цепь ротора (б)

Пуск двигателя происходит с момента включения обмотки статора в сеть. При этом в ротор вводят все секции пускового реостата, благодаря чему начальный пусковой момент значительно увеличивается (характеристика 1), а пусковой ток уменьшается. По мере разгона двигателя токи ротора и статора уменьшаются и часть пускового реостата R''_n закорачивают. Рабочая точка перемещается на новую характеристику 2, соответствующую сопротивлению $(R_2 + R'_n)$. Затем закорачивают весь пусковой реостат и рабочая точка перемещается по естественной механической характеристике до точки, в которой электромагнитный момент двигателя не станет равным моменту сопротивления (точка а на рис. 14, б).

Обычно реостат разбивают на 5—10 ступеней, которые автоматически закорачиваются по мере разгона ротора.

Применение двигателей с контактными кольцами обеспечивает уменьшение времени пуска.

Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором

Для улучшения пусковых свойств двигателей с короткозамкнутым ротором их выполняют специальной конструкции, например, алюминиевые стержни «беличьего колеса» заливают в глубокие пазы.

Благодаря эффекту вытеснения тока двигатель с глубоким пазом на роторе имеет условия пуска, аналогичные двигателю с фазным ротором, так как «автоматически» плавно уменьшается активное сопротивление ротора по мере его разгона. Такие двигатели имеют повышенный пусковой момент, т. е. сокращенное время разгона.

Регулирование частоты вращения

Полюсное регулирование

Этот способ регулирования основан на изменении числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора, т. е. на изменении частоты вращения магнитного поля $n_1 = 60f_1/p$.

Регулирование скорости путем переключения числа полюсов p - ступенчатое.

Следует иметь в виду, что частоты вращения при частоте сети 50 Гц и $p = 1$ и 2 соответственно 3000 и 1500 об/мин, а при $p = 5$ и 6 - 600 и 500 об/мин. При большем числе полюсов разница между частотами вращения уменьшается.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются многоскоростными. Промышленностью выпускаются двигатели на две, три и четыре скорости.

Частотное регулирование

В последние годы все большее распространение получает регулирование скорости двигателя посредством изменения частоты напряжения на статорной обмотке. При регулировании частоты скорость можно плавно изменять так, что ее максимальное значение будет в десятки или сотни раз превышать минимальное.

При осуществлении частотного регулирования учитывается, что значение максимального электрического момента M_{\max} пропорционально квадрату магнитного потока полюса вращающегося поля. Магнитный поток полюса Φ_{Γ} в свою очередь, определяется действующим значением и частотой фазного напряжения статора. Поэтому, если при регулировании частоты вращения ротора желательно, например, сохранить неизменным значение максимального электромагнитного момента, то нужно обеспечить выполнение условия $U_1/f_1 = \text{const}$ - одновременно с регулиро-

ванием частоты должно изменяться и действующее значение напряжения.

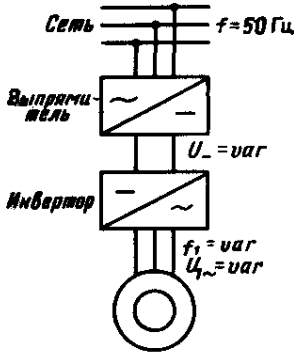


Рис. 15. Схема включения асинхронного двигателя с частотным регулированием скорости

Эту сложную задачу решают с помощью современных электронных устройств, которые включают между промышленной сетью и асинхронным двигателем (рис. 15). Как следует из приведенной упрощенной схемы, при частотном регулировании осуществляется двукратное преобразование электрической энергии: вначале напряжение трехфазной сети выпрямляется, а затем инвертор преобразует выпрямленное напряжение в трехфазную систему напряжений нужной частоты. В системе преобразования предусмотрено автоматическое согласование значений U_1 и f_1 , обеспечивающее требуемое значение максимального электромагнитного момента.

Семейство механических характеристик двигателя с частотным регулированием частоты вращения изображено на рис. 16. Логика работы тиристорного преобразователя зависит от того в какую сторону от $n_{ном}$ требуется осуществлять регулирование. Если нужно обеспечить $n < n_{ном}$, преобразователь автоматически создает условия неизменности максимального момента двигателя - одновременно с заданным снижением значения f_1 соответственно уменьшается и значение U_1 . Для случая $n > n_{ном}$ соблюдение условия

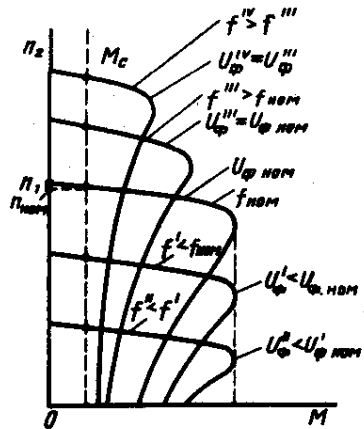


Рис. 16. Механические характеристики двигателя с частотным регулированием скорости

постоянства M_{\max} уже не выполняется, так как требует регулирования напряжения U_1 выше номинального, кроме того, во избежание перегрузки двигателя по мощности, его длительная работа при частотах вращения, превышающих номинальную, допустима только при соответствующем снижении момента сопротивления на валу. Частотное регулирование экономично, однако габариты преобразователя частоты превышают габариты двигателя. Кроме того, надежность работы преобразователей пока еще недостаточна.

Реостатное регулирование

Реостатное регулирование частоты вращения ротора трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами осуществляется при помощи трехфазного реостата, включаемого в цепь обмотки ротора так же, как и пусковой реостат (см. рис. 14, а). В отличие от пускового реостата его рассчитывают на длительный режим работы и называют регулировочным реостатом. Семейство механических характеристик двигателя с регулировочным реостатом ничем не отличается от характеристик с пусковым реостатом (см. рис. 14, б). Они свидетельствуют о том, что с увеличением сопротивления регулировочного реостата частота вращения ротора снижается.

Если момент сопротивления нагрузки неизменен, то амплитуды токов в обмотке ротора при реостатном регулировании сохраняются почти неизменными. Это означает, что с увеличением сопротивления регулировочного реостата мощность потерь в нем возрастает. Номинальная мощность регулировочного реостата обычно соизмерима с мощностью двигателя и, как следствие этого, он имеет большие габариты. Поэтому реостатный способ регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является неэкономичным. Однако он прост и обеспечивает плавное

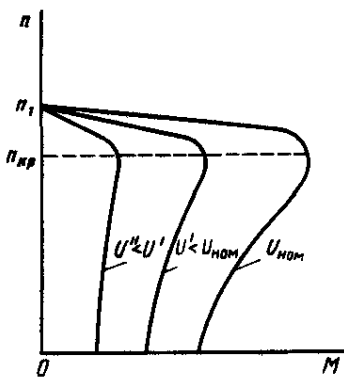


Рис. 17. Регулирование частоты вращения изменением напряжения питания

изменение частоты вращения в широких пределах. Его иногда применяют для регулирования частоты вращения двигателей средней мощности.

Существует еще несколько возможных методов регулирования. При изменении напряжения, подводимого к статору машины, механические характеристики изменяются так, как показано на рис. 17: максимальный момент изменяется пропорционально квадрату напряжения, а критическое скольжение остается неизменным. Критическое

скольжение, как правило, не превышает нескольких процентов, поэтому диапазон регулирования частоты вращения узкий. Снижение максимального момента уменьшает запас по устойчивости работы двигателя.

Иногда находит применение комбинированный способ регулирования, когда изменяются подводимое к двигателю напряжение и активное сопротивление ротора. Возможно регулирование частоты введением ЭДС в цепь ротора. Такие машины получили название асинхронных двигателей двойного питания.

В заключение отметим, что по сравнению с двигателями постоянного тока в настоящее время асинхронные двигатели имеют меньшие возможности по экономичному, надежному и плавному регулированию частоты вращения в широком диапазоне, что является их основным недостатком.

3. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде, где установлены необходимые приборы и оборудование. Электрическая схема лабораторной установки представлена на рис. 18.

В работе используется трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором АД, включаемый в сеть с помощью автомата B_1 и универсального переключателя УП. Для изменения сопротивления в цепи ротора служит переключатель R_d . В качестве нагрузки для АД используется машина постоянного тока МПТ, работающая в режиме генератора независимого возбуждения. Нагрузкой генератора служит реостат R_H , состоящий из четырех секций, переключаемых с помощью универсального переключателя.

Обмотка независимого возбуждения имеет выводы, обозначенные на стенде Ш1 и Ш2. Для регулирования тока возбуждения предназначен реостат R_{OB} .

Для определения частоты вращения двигателя служит тахогенератор (ТГ), соединенный с таховольтметром (V_T) за стендом.

4. Программа работы

1. Ознакомиться с оборудованием стенда и измерительными приборами. Определить цены деления приборов.
2. Собрать электрическую схему лабораторной установки на рис. 18.
3. После проверки схемы преподавателем, подать на стенд постоянное напряжение с помощью выключателя B_2 . Установить номинальный ток возбуждения МПТ (см. паспортные данные стенда).
4. Установить реостат R_d в положение "1" ($R_d = max$), включить выключатель B_1 и поворотом ручки универсального переключателя (УП) в положение «вкл», запустить асинхронный двигатель.
5. Вывести сопротивление в цепи ротора асинхронного двигателя, по-

следовательно переключая реостат R_D из положения "1" ($R_D = \max$) в положение "4" ($R_D = 0$).

6. Снять данные для построения естественной и рабочих характеристик двигателя (при $R_D = 0$), изменяя нагрузку с помощью сопротивления R_H . Результаты измерений занести в табл. 1.
7. Снять данные для построения искусственных механических характеристик для двух значений сопротивления в цепи ротора $R_{Д1} > 0$, $R_{Д2} > R_{Д1}$. Результаты измерений занести в табл. 2.

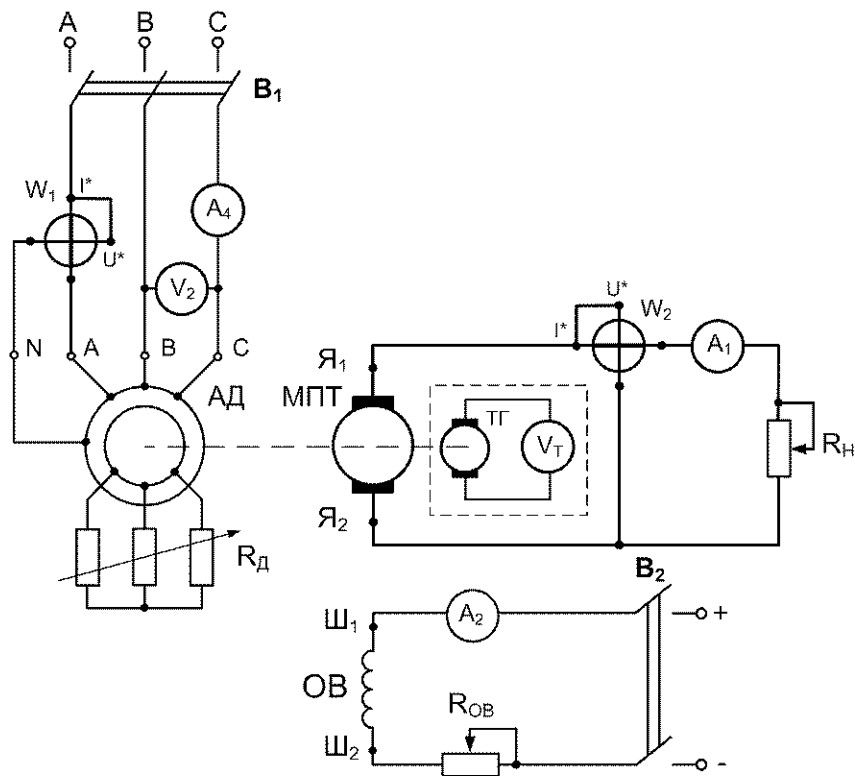


Рис. 18. Электрическая схема лабораторной установки

Таблица 1

Данные для построения естественной и рабочей характеристики

№ п/п	Измерено					Вычислено			
	ω	P_1	U_1	I_1	P_r	M_r	η	$\cos \varphi$	s
	c^{-1}	Вт	В	А	Вт	Н·м	%		
1									
2									
3									
4									
5									

Примечание: показания W_1 необходимо утраивать.

Таблица 2

Данные для построения искусственных механических характеристик

№ п/п	$R_{д1} > 0$				$R_{д2} > R_{д1}$			
	Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
	ω	P_r	M_r	s	ω	P_r	M_r	s
	c^{-1}	Вт	Н·м		c^{-1}	Вт	Н·м	
1								
2								
3								
4								
5								

5. Обработка результатов эксперимента

1. Мощность на валу асинхронного двигателя (потери в генераторе пренебрегаем)

$$P_2 = P_r.$$

Момент на валу генератора

$$M_r = \frac{P_2}{\omega}.$$

(момент на валу асинхронного двигателя принимаем равным моменту на валу генератора $M = M_r$).

Коэффициент мощности асинхронного двигателя

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1},$$

где P_1 – мощность, потребляемая трехфазной обмоткой статора из сети, $P_1 = 3P_w$;

Коэффициент полезного действия асинхронной машины

$$\eta = P_2 / P_1,$$

Скольжение ротора

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

где ω_0 - синхронная скорость $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}$; p - число пар полюсов,

определяется из паспортных данных асинхронного двигателя. Например у асинхронного двигателя А1-12-4 число полюсов равно 4 (на это указывает последняя цифра), тогда число пар полюсов $p = 2$ (в два раза меньше), $f_1 = 50 \text{ Гц}$.

2. На основании данных табл.1 построить рабочие характеристики асинхронного двигателя ω , S , η , M , $I_1(P_2)$ на одном чертеже.

3. По данным табл.1 и 2 построить на одном чертеже естественную и две искусственных механические характеристики асинхронного двигателя $\omega(M)$.

4. Сделать вывод по работе, обратив внимание на особенности пуска асинхронного двигателя с фазным ротором и возможности регулирования частоты вращения.

6. Контрольные вопросы

1. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
2. Каков принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
3. Объясните создание вращающегося магнитного поля трехфазной обмоткой машины переменного тока.
4. От чего зависит скорость вращения n_1 вращающегося магнитного поля?
5. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
6. Как электромагнитный момент зависит от скольжения?
7. Как производится реверсирование асинхронного двигателя?
8. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором?
9. Как производится пуск трехфазных асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором?
10. Перечислите виды потерь в асинхронном двигателе.
11. Как влияет изменение питающего напряжения на вращающий момент двигателя?

