

Областное государственное бюджетное
профессиональное образовательное учреждение
«Большенагаткинский техникум технологии и сервиса»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
учебной дисциплины
ОП.01 Электротехника
по профессии 18545 Слесарь по ремонту сельскохозяйственных машин
и оборудования


с. Большое Нагаткино

2023 г.

Рабочая программа учебной дисциплины ОП.01 Электротехника разработана в соответствии с профессиональным стандартом Специалист в области механизации сельского хозяйства (утвержденного Приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 2 сентября 2020 г. №555н)

РАССМОТРЕНА
на заседании ЦМК по техническим
дисциплинам

Председатель ЦМК


 Можаяев А.В.

Протокол заседания ЦМК
№1 от 31 августа 2023 года

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по УПР

ОГБПОУ Большенагаткинский ТТиС

 Мынина О.Ю.

31 августа 2023 года

Автор-разработчик:

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПАСПОРТ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	стр. 4
2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	5
3. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	15
4. КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	17

1. ПАСПОРТ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОП.01Электротехника

1.1. Область применения рабочей программы

Рабочая программа учебной дисциплины ОП.

01Электротехника является частью основной профессиональной образовательной программы в соответствии с ФГОС и адаптирована для профессионального обучения по профессии 18545 Слесарь по ремонту сельскохозяйственных машин и оборудования

1.2. Место учебной дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы: дисциплина входит в профессиональный цикл в раздел общепрофессиональных дисциплин

1.3. Цели и задачи учебной дисциплины – требования к результатам освоения учебной дисциплины:

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен уметь:

- пользоваться измерительными приборами;
- производить проверку электрических элементов сельскохозяйственных машин и другого оборудования;
- производить подбор элементов электрических цепей, читать электрические схемы;

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен знать:

- простейшие методы расчета и измерения основных параметров электрических цепей;
- компоненты электронных устройств сельскохозяйственной техники;
- приборы для измерения электрических параметров;
- устройство и принцип действия электрических машин;

1.4. Рекомендуемое количество часов на освоение рабочей программы учебной дисциплины:

- обязательная аудиторная учебная нагрузка 41 час,
- лабораторные и практические работы 24

2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Объем учебной дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	<i>Объем часов</i>
Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)	<i>41</i>
в том числе:	
лабораторные и практические работы	<i>24</i>
Итоговая аттестация в форме дифференцированного зачета.	

2.2. Тематический план и содержание учебной дисциплины «Электротехника»

Наименование разделов и тем	Содержание учебного материала, самостоятельная работа обучаю
1	2
Электротехника.	
Тема 1. Электрическое поле. Проводниковые изделия и электроизоляционные материалы.	<p>Уметь: - читать простейшие электрические схемы и производить подбор элементов электрических цепей;</p> <p>Знать: - простейшие методы расчета и измерения основных параметров электрических цепей; - основные электроизоляционные и проводниковые материалы и область их применения;</p> <p>Содержание учебного материала</p> <p>1. Электрическое поле. Основные свойства и характеристики электрического поля. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Емкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов. Энергия электрического поля заряженного конденсатора.</p> <p>2. Проводниковые изделия и электроизоляционные материалы. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Область применения.</p> <p>Практическая работа №1 1. Расчет смешанных соединений конденсаторов.</p>
Тема 2. Электрические цепи постоянного тока.	<p>Уметь: - производить подбор элементов простейших электрических цепей;</p> <p>Знать: - методы расчета основных параметров электрических цепей;</p> <p>Содержание учебного материала</p> <p>1. Электрические цепи постоянного тока Элементы схемы электрической цепи: ветвь, узел, контур. Схемы замещения электрических цепей. Электрическое сопротивление. Зависимость электрического сопротивления от температуры. Электрическая проводимость. Резистор. Соединение резисторов. Режимы работы электрической цепи: холостой ход, номинальный, рабочий, короткого замыкания. Приборы для измерений сопротивления, тока, напряжения.</p> <p>2. Законы Ома и Кирхгофа. Энергия и мощность электрической цепи. Баланс мощностей. КПД. Основы расчета электрической цепи постоянного тока. Законы Ома и Кирхгофа. Расчет электрических цепей произвольной конфигурации методами: контурных токов, узловых потенциалов, двух узлов (узловое напряжение). Нелинейные электрические цепи постоянного тока</p> <p>Лабораторная работа №1 1. Подтверждение законов Ома и Кирхгофа для цепей постоянного тока.</p> <p>Практическая работа №2 2. Методика измерения основных параметров электрических цепей.</p>
Тема 3. Электромагнетизм.	<p>Уметь: - производить проверку электрических цепей автомобиля;</p> <p>Знать:</p>

	-компоненты автомобильных электронных устройств;
	Содержание учебного материала 1.Основные свойства и характеристики магнитного поля. Закон Ампера. Индуктивность: собственная и взаимная. Магнитная проницаемость: абсолютная и относительная. Магнитные свойства вещества. Намагничивание ферромагнетика. Гистерезис. Электромагнитная индукция. ЭДС самоиндукции и взаимной индукции. ЭДС в движущемся проводнике, движущемся в магнитном поле. Магнитные цепи: разветвленные и неразветвленные. Расчет неразветвленной магнитной цепи. Электромагнитные силы. Энергия магнитного поля. Электромагниты и их применение.
Тема4. Электрические измерения.	Уметь: -производить проверку электрических элементов автомобиля; -производить подбор элементов электрических цепей; Знать: -методы расчета и измерения основных параметров электрических, магнитных и электронных цепей; -компоненты автомобильных электронных устройств;
	Содержание учебного материала Электрические измерения. Основные понятия измерения. Погрешности измерения. Классификация электроизмерительных приборов. Измерение тока и напряжения. Магнитоэлектрический измерительный механизм. Электромагнитный измерительный механизм. Приборы и схемы для измерения электрического напряжения. Расширение пределов измерения амперметров и вольтметров.
Тема.5. Электрические машины постоянного тока.	Уметь: -производить проверку электрических элементов автомобиля; -производить подбор элементов электрических цепей и схем; Знать: -компоненты автомобильных электронных устройств; -устройство и принцип действия электрических машин;
	Лабораторные работы.№2,3. 2,3. Определение механических характеристик электродвигателя постоянного тока (стартера) автомобиля.
	Практическая работа №3. 3.Знакомство с электрическими машинами с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.
Тема 6. Однофазные электрические цепи переменного тока.	Уметь: -производить проверку электронных и электрических элементов автомобиля; -производить подбор элементов электрических цепей и электронных схем; Знать: -методы расчета и измерения основных параметров электрических, магнитных и электронных цепей; -компоненты автомобильных электронных устройств; -устройство и принцип действия электрических машин;
	Содержание учебного материала Характеристика цепей переменного тока. Понятие о генераторах переменного тока. Получение синусоидальной ЭДС. Общая характеристика цепей переменного тока. Амплитуда, период, частота.

	<p>начальная фаза синусоидального тока. Мгновенное, амплитудное, действительное, среднее значения ЭДС, напряжения, тока.</p> <p>Векторные диаграммы токов и напряжений. Неразветвленные электрические цепи.</p> <p>Изображение синусоидальных величин с помощью временных и векторных диаграмм. Электрическая цепь; с активным сопротивлением; с катушкой индуктивности (идеальной), с емкостью. Векторная диаграмма. Разность фаз напряжения и тока. Неразветвленные электрические RC и RL-цепи переменного тока. Треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей. Коэффициент мощности, баланс мощностей. Неразветвленная электрическая RLC-цепь переменного тока, резонанс напряжений и условия его возникновения. Разветвленная электрическая RLC-цепь переменного тока, резонанс токов и условия его возникновения. Расчет электрической цепи, содержащей источник синусоидальной ЭДС.</p> <p>Практическая работа №4,5,6.</p> <p>4,5,6.. Построение векторных диаграмм токов и напряжений для неразветвленных цепей однофазного переменного тока.</p>
<p>Тема 7 Трехфазные электрические цепи переменного тока.</p>	<p>Уметь: -производить проверку электрических элементов автомобиля; -производить подбор элементов электрических цепей и электронных схем;</p> <p>Знать: -методы расчета и измерения основных параметров электрических, магнитных и электронных цепей; -компоненты автомобильных электронных устройств; -устройство и принцип действия электрических машин;</p> <p>Содержание учебного материала</p> <p>Виды соединений трехфазных потребителей. Соединение обмоток трехфазных источников электрической энергии звездой и треугольником. Трехпроводные и четырехпроводные трехфазные электрические цепи. Фазные и линейные напряжения, фазные и линейные токи, соотношения между ними. Симметричные и несимметричные трехфазные электрические цепи. Нейтральный (нулевой) провод и его назначение. Векторная диаграмма напряжений и токов. Передача энергии по трехфазной линии.</p> <p>Мощность в цепях переменного тока. Мощность трехфазной электрической цепи при различных соединениях нагрузок. Расчет симметричной трехфазной электрической цепи при соединении нагрузок звездой и треугольником.</p> <p>Практическая работа №7</p> <p>7. Соединение потребителей в «звезду» и в «треугольник»</p>
<p>Тема 8. Трансформаторы.</p>	<p>Уметь: -производить проверку электронных и электрических элементов автомобиля; -производить подбор элементов электрических цепей и электронных схем;</p> <p>Знать:</p>

	<p>-методы расчета и измерения основных параметров электрических, магнитных и электронных цепей; -компоненты автомобильных электронных устройств; -устройство и принцип действия электрических машин;</p> <p>Содержание учебного материала</p> <p>Трансформаторы. Назначение, принцип действия и устройство однофазного трансформатора. Режимы работы трансформатора. Номинальные параметры трансформатора: мощность, напряжение и токи обмоток. Потери энергии и КПД трансформатора. Типы трансформаторов и их применение: трехфазные, многообмоточные, измерительные, автотрансформаторы.</p>
<p>Тема 9. Электрические машины переменного тока.</p>	<p>Уметь: -производить проверку электронных и электрических элементов автомобилей; -производить подбор элементов электрических цепей и электронных схем;</p> <p>Знать: -методы расчета и измерения основных параметров электрических, магнитных и электронных цепей; -компоненты автомобильных электронных устройств; -устройство и принцип действия электрических машин;</p> <p>Содержание учебного материала</p> <p>Электродвигатели переменного тока. Генераторы переменного тока. Назначение машин переменного тока и их классификация. Устройство и принцип действия машин переменного тока: магнитная цепь, ротор, обмотка статора. Рабочий процесс машины переменного тока. Регулирование частоты вращения. Схемы соединения обмоток.</p> <p>Стр133-160. Китаев В.Е. Электротехника с основами промышленной электроники. Учеб. Пособие для проф.-техн. Училищ.-М.; школа, 200.-254с.</p> <p>Лабораторная работа №4 . 4.Устройство асинхронного электродвигателя и генератора.</p> <p>Практическая работа №8 8.Пуск электродвигателей переменного тока.</p>

3. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Требования к минимальному материально-техническому обеспечению

Реализация учебной дисциплины требует наличия учебного кабинета и лаборатории электротехники

Оборудование учебного кабинета:

- посадочные места по количеству обучающихся ;
- рабочее место преподавателя;
- комплект учебно-наглядных пособий . « Основы электротехники».

Технические средства обучения:

- компьютер с лицензированным программным обеспечением и мультимедиа проектор.

Оборудование лаборатории: электротехники

- 15 индивидуальных мест с освещением и имеющих индивидуальные электрические автоматы, заземление и изолированные коврики:
- параллельно - поворотные тиски,
- комплект рабочих инструментов;
- электроизолированные приборы;
- пакетные выключатели:
- реверсивные переключатели:
- двухкнопочные станции:
- соединительные провода:

3.2. Информационное обеспечение обучения

Перечень рекомендуемых учебных изданий, Интернет-ресурсов, дополнительной литературы.

Основные источники:

1. Сиднев Ю.Г. Электротехника с основами электроники. Учебное пособие для профессиональных училищ и колледжей, Ростов Н/Д: Феникс, 2019.- 384 с.
2. Березкина Т.Ф. и другие. Задачник по общей электротехники с основами электроники: Учебное пособие. М. Высшая школа , 2018-380с.
3. Китаев В.Е. Электротехника с основами промышленной электроники. Учеб. Пособие для проф.-техн. Училищ.-М.; Высш. школа, 200.-254с.

Дополнительные источники:

1. Вальков В.М., Илющенко Ю.М. Цифровые интегральные схемы, микропроцессоры и микро-ЭВМ. М., Советское радио,1977-156 с
2. ГОСТ 2. 701-76 до 2. 751-73
3. Евдокимов Ф.Е. Общая Электротехника. Учебное пособие: М, Высшая школа, 2004- 346 с .
4. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. Учебное пособие: М. высшая школа, 2005 - 370с.
5. Данилов И.А., Иванов П.Н. Дидактический материал по общей электротехнике с основами электроники. Учебное пособие: М., высшая школа 2005- 273 с.
6. Касаткин А.С. Основы электротехники. Учебное пособие: М., высшая школа, 2008- 286с.

3.3.Общие требования к организации образовательного процесса по дисциплине.

Представленная программа дисциплины носит адаптивный характер. Целью ее является актуализация процессов самоопределения обучающихся за счет специальной организации их деятельности, включающей получение знаний по курсу электротехники , профессионального труда, их соотнесения с профессионально важными качествами в процессе обучения, развития и самодиагностики. В соответствии с заданной целью выстраивается содержание и логика курса, каждого занятия: от личностного к профессиональному самоопределению и реализации.

В тематический план включен один раздел: «Электротехника» , который отражает теоретические и практические аспекты профессионального развития и самоопределения конкурентноспособного рабочего и специалиста.

Технологической основой реализации дисциплины выступают интерактивные методы профессионально-личностного развития, направленные на формирование профессионального роста и совершенствования. Каждая тема программы содержит пакет информационно-методических материалов, включающих планы учебных занятий, диагностические методики, задания и упражнения. При реализации теоретической и практической частей программы дисциплины используется комплекс различных форм и методов обучения, учитывающий принципы активизации, индивидуализации, партнерского общения, самообучения.

Для сообщения и усвоения программы дисциплины применяются: информационно-коммуникационные технологии, лекции, дискуссии, анализ и обсуждение ситуаций, практические расчетно-графические задания и упражнения.

При изучении данного курса обучающиеся выполняют различные диагностические процедуры, самостоятельно оценивают достигнутый уровень сформированности того или иного умения и фиксируют полученные данные в рабочих тетрадях.

4. КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Контроль и оценка результатов освоения учебной дисциплины осуществляется преподавателем в процессе проведения практических занятий и лабораторных работ, тестирования, а также выполнения обучающимися индивидуальных заданий, проектов, исследований.

Результаты обучения (освоенные умения, усвоенные знания)	Формы и методы контроля и оценки результатов обучения
<p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> -использовать основные законы и принципы теоретической электротехники в профессиональной деятельности; -читать принципиальные, электрические и монтажные схемы; -рассчитывать параметры электрических, магнитных цепей; -пользоваться электроизмерительными приборами и приспособлениями, -собирать электрические схемы. <p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> -способы получения, передачи и использования электрической энергии; - электротехническую терминологию; - основные законы электротехники; -характеристики и параметры электрических и магнитных полей; -свойства проводников, полупроводников, электроизоляционных, магнитных материалов; -основы теории электрических машин, принцип работы типовых электрических устройств; 	<p>Экспертная оценка на практическом занятии</p> <p>Экспертная оценка на практическом занятии</p> <p>Экспертная оценка выполненного практического занятия</p> <p>Экспертная оценка выполненного практического занятия</p> <p>Экспертная оценка выполненного практического занятия</p> <p>Тестирование</p> <p>Тестирование зачет</p> <p>Тестирование</p> <p>Экспертная оценка выполненного практического занятия</p> <p>Тестирование</p>
<p>электронных устройств и приборов;</p> <ul style="list-style-type: none"> -правила эксплуатации электрооборудования. 	<p>Зачет</p> <p>Тестирование</p>

Министерство просвещения и воспитания Ульяновской области
ОГБПОУ
«Большенагаткинский ТТиС»

Утверждаю:

Заместитель директора

_____ /Мынина О.Ю./

« 31 » августа 2020 года

Методические указания
по проведению лабораторно-практических занятий
ОП 01 Электротехника
Профессия 18545 Слесарь по ремонту сельскохозяйственных машин и
оборудования

Практическое занятие № 1. (2 часа)

«Расчет смешанного соединения конденсаторов»

Цель работы: ознакомление с методикой расчета смешанного соединения конденсаторов;

выработки вычислительных навыков расчета для использования в практической деятельности.

Основные теоретические положения.

В зависимости от типа диэлектрика, разделяющего обкладки, конденсаторы бывают бумажные, слюдяные, керамические, электролитические, воздушные. В бумажных конденсаторах обкладками являются полосы алюминиевой или свинцовой фольги, а диэлектриком служит специальная тонкая бумага, пропитанная парафином или минеральным маслом. Полосы фольги вместе с разделяющей их бумагой сворачивают в рулон и после пропитки устанавливают в металлический герметизированный корпус.

В слюдяных конденсаторах между полосами металлической фольги помещают тонкие пластины слюды. Полосы фольги соединяют через одну, образуя несколько плоских конденсаторов, и в собранном виде запрессовывают в пластмассу, чтобы конденсатор не подвергался влиянию окружающей среды. В керамических конденсаторах диэлектриком служит керамика, на которую наносят металлические обкладки.

В электролитических конденсаторах между обкладками из алюминиевой фольги помещают фильтровальную бумагу, пропитанную электролитом. Обкладки вместе с изолирующими прокладками сворачивают в плотный рулон и помещают в изолированный корпус. В процессе изготовления конденсатора через него пропускают постоянный ток. В результате электролиза полоса фольги, соединенная с положительным полюсом источника тока, окисляется и покрывается тонким слоем окиси алюминия, служащей диэлектриком. При включении электролитических конденсаторов в цепь, надо строго соблюдать полярность. Достоинством их является большая емкость при малых габаритах. В процессе работы

конденсатора электролит со временем высыхает и емкость конденсатора уменьшается.

В радиотехнике широкое применение нашли воздушные конденсаторы переменной емкости. Обкладками такого конденсатора служат две системы алюминиевых пластин, одна из которых может поворачиваться вокруг своей оси, вызывая изменение емкости.

При увеличении напряжения на обкладках конденсатора, будет возрастать «ток утечки» и при определенной величине напряжения диэлектрик разрушится, т.е. наступит «пробой конденсатора». Напряжение, при котором происходит «пробой конденсатора», называют **напряжением пробоя**, которое определяет электрическую прочность конденсатора.

Соединения конденсаторов. Соединение конденсаторов может быть параллельным и последовательным. При параллельном соединении емкости конденсаторов складываются.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

При последовательном соединении, общая емкость конденсатора определяется из выражения:

$$C = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots}$$

Емкостью в 1 Фараду обладает конденсатор, если каждая обкладка имеет заряд в 1Кулон и напряжение между обкладками равно 1 Вольту. Более мелкая единица 1Мкф(микрофарада) = 10^{-6} Ф;
1Пф(пикофарада) = 10^{-12} Ф.

Порядок выполнения работы

1.Ознакомиться с теоретическими предпосылками к работе.

2. Зарисовать параллельное, последовательное и смешанное соединение конденсаторов, запомнить обозначение конденсатора на электрических схемах.

3. Вычислить общую емкость смешанного соединения конденсаторов, если первые три конденсатора соединены последовательно и имеют емкость 5 Мкф каждый. Четвертый, пятый и шестой конденсаторы соединены параллельно и имеют емкость по 2 Мкф каждый. Третий и блок параллельных конденсаторов соединены последовательно. Зарисовать схему.

4. Зарисовать графики изменения напряжения при заряде и разряде конденсатора. Записать формулу энергии электрического поля конденсатора.

5. От каких величин зависит емкость плоского конденсатора?

Сделать отчет.

Лабораторная работа № 1. (2 часа)

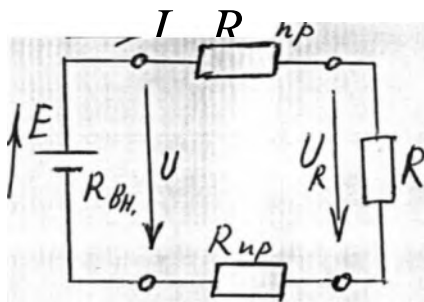
«Подтверждение законов Ома и Кирхгофа для цепей постоянного тока»

Цель работы: применение закона Ома и законов Кирхгофа для расчета разветвленных электрических цепей постоянного тока, снятие вольт-амперных характеристик элементов цепи, использование графического метода расчета линейных электрических цепей постоянного тока.

Основные теоретические положения Совокупность устройств для получения, передачи, распределения и потребления электрической энергии называется электрической цепью. Простейшая электрическая цепь постоянного тока (рис. 2.1) состоит из источника электрической энергии с внутренним сопротивлением $R_{вт}$, электродвижущей силой ЭДС E или напряжением U на зажимах потребителя электрической энергии R , преобразующего электрическую энергию в тепловую, и проводов с

сопротивлением R_{np} , обеспечивающих электрическое соединение источника

с потребителем.



В электрических цепях взаимосвязь между ЭДС, напряжениями, токами и сопротивлениями определяется законом Ома и законами Кирхгофа, с помощью которых можно произвести расчет цепи.

Для рассматриваемой замкнутой электрической цепи в соответствии с законом Ома ток прямо пропорционален ЭДС источника и обратно пропорционален суммарному сопротивлению всей цепи: $I = E / (R + R_{вн.} + 2R_{np})$.

Вместе с тем в соответствии с законом Ома для пассивного участка электрической цепи (т.е. для участка цепи, который не содержит ЭДС) ток пропорционален напряжению U , действующему на данном участке, и обратно пропорционален его сопротивлению: $I = U / R$.

Исходя из полученного выражения, напряжение, действующее на участке электрической цепи, можно рассматривать как падение напряжения на этом участке от тока: $U_R = RI$.

При смешанном соединении потребителей электрической энергии, когда одна часть потребителей соединена параллельно, а другая — последовательно (рис. 2.2), определить токи можно по законам Кирхгофа.

В соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов в точке разветвления электрической цепи равна нулю ($\sum I = 0$). С учетом этого выражение для токов в точке разветвления для рассматриваемой схемы $I = I_1 + I_2$.

Для определения токов во всех ветвях электрической цепи составляют еще два уравнения по второму закону Кирхгофа, в соответствии с которым алгебраическая сумма напряжений и падений напряжения в замкнутом контуре электрической цепи равна нулю ($\sum U = 0$). Применительно к рассматриваемой цепи справедливы уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа:

$$RI + R_1 I_1 -$$

$$U = 0;$$

$$RI + R_2 I_2 -$$

$$U = 0.$$

В результате совместного решения полученной системы уравнений определяют токи во всех ветвях и падения напряжения на участках электрической цепи: $U_R = R I$ и $U_D = U - U_R = U - R I$.

Приведенные уравнения справедливы для линейных и нелинейных цепей постоянного тока.

В отличие от линейных электрических цепей, параметры которых не зависят от тока и напряжения, при расчете нелинейных цепей, параметры которых зависят от тока и напряжения, удобно пользоваться графическим методом с использованием экспериментальных вольт-амперных характеристик элементов цепи, т. е. зависимостей тока в цепи от напряжения на элементах цепи $I(U)$.

На рис. 2.3 представлена схема последовательного, а на рис. 2.4 — параллельного соединений линейного элемента — резистора R и нелинейного элемента — полупроводникового диода.

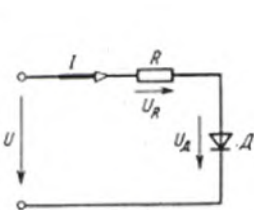


Рис. 2.3

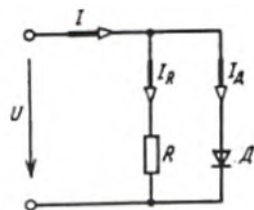


Рис. 2.4

да I_D , вольт-амперные характеристики которых приведены на рис. 2.5 и

2.6.

При последовательном соединении элементов цепи определение зависимости тока на входе от значения приложенного напряжения производят, как показано на рис. 2.5, суммированием напряжений $u = u_D + I/R$ при заданном значении тока I .

При параллельном соединении элементов цепи указанную зависимость находят суммированием соответствующих токов $I = I_D + I_R$ при заданном значении напряжения U (рис. 2.6).

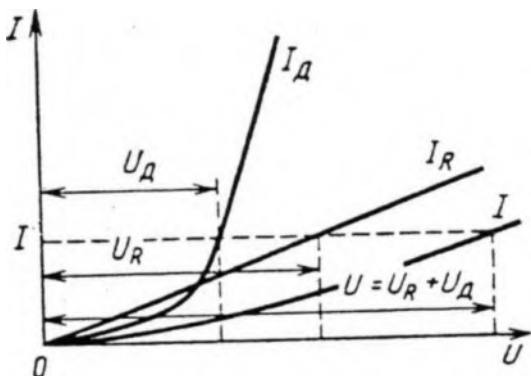


Рис. 2.5

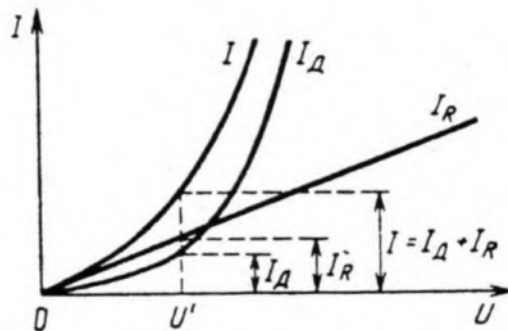


Рис. 2.6

Аналогично находят остальные координаты результирующих вольт-амперных характеристик цепи путем изменения значений I и U .

Задание по работе

1. Экспериментально установить возможность применения закона Ома и законов Кирхгофа для расчета разветвленной электрической цепи постоянного тока.
2. Снять вольт-амперные характеристики линейной электрической цепи постоянного тока.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием соответствующей панели стенда.
2. Рассчитать для электрической цепи, схема которой приведена на рис. 1.5, токи и напряжения на отдельных ее участках ($I_1, I_2, I_3, U_1, U_2, U_3$) при значениях сопротивлений резисторов $R_1=50 \text{ Ом}$, $R_2=100 \text{ Ом}$, $R_3=150 \text{ Ом}$ и напряжении на входе цепи $U=130 \text{ В}$.
3. По данным проведенного расчета выбрать из имеющихся на панели приборов три амперметра и вольтметр для измерения токов и напряжений на всех участках электрической цепи.
4. Провести исследование линейной электрической цепи. Для этого:
 - а) собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 1.6;
 - б) провести измерение напряжений на всех участках цепи переключением вольтметра с одного участка на другой;
 - в) ручку движка переменного резистора R_i установить в крайнее левое положение. Подключить собранную электрическую цепь к регулируемому источнику питания постоянным напряжением (0—220 В);
 - г) включить регулируемый источник питания постоянного напряжения; плавно увеличивая напряжение на выходе источника от нуля, произвести измерение токов и напряжений на участках цепи при напряжениях на входе, равных $U=50; 70; 90; 100$ и 130 В ; результаты измерений занести в табл. 2.1;

Т а б л и ц а
2.1

Номера измерений	Измерения						Вычисления			
	$U, \text{ В}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$	$I_3, \text{ А}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R, \text{ Ом}$

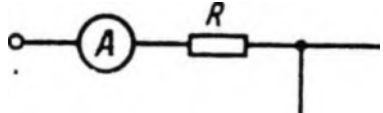
1										
2										

д) сравнивая результаты произведенных измерений и вычислений, убедиться в соблюдении закона Ома и законов Кирхгофа для рассматриваемой цепи независимо от ее режима работы;

е) используя измеренные токи и напряжения, построить в одной координатной системе вольт-амперные характеристики $I(U)$ для всех резисторов электрической цепи и, пользуясь ими, построить вольт-амперные характеристики $I(U_{ij})$ и $I(U)$; по характеристике $I(U)$ определить суммарное сопротивление всей цепи R и сравнить его со значением, полученным из табл. 2.1.

5. Провести исследование нелинейных электрических цепей. Для этого:

а) собрать электрическую цепь для снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики полупроводникового диода D , принципиальная схема которой представлена на рис. 2.7, а монтажная — на рис. 2.8; измерение тока в цепи производить магнито



электрическим амперметром с пределом измерения 2 А, а измерение прямого напряжения на диоде — вольт-амперметром В7-22А на пределе 2 В;

б) включить источник питания и, изменяя напряжение на входе цепи от нуля до значения, при котором ток в цепи диода равен 2 А, записать показания вольтметра в табл. 2.2 при токах: $I = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ А и т. д., выключить напряжение источника питания;

в) по измеренным значениям тока и напряжения построить прямую ветвь вольт-амперной характеристики для полупроводникового диода;

г) заменить в монтажной схеме рис. 2.8 диод D на лампу нака-

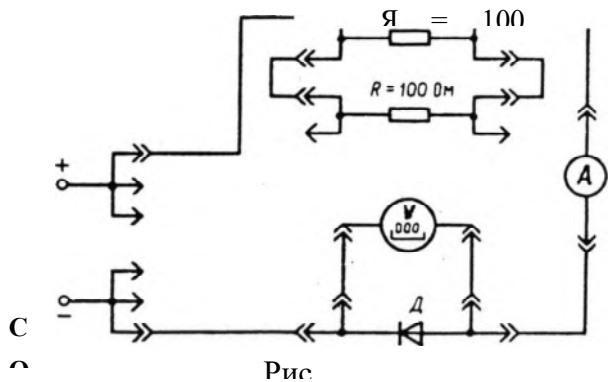


Рис.

ливания L , амперметр A — на амперметр с пределом измерения 1 А, а цифровой вольтамперметр переключить по схеме для измерения больших и средних сопротивлений, установив предел измерения на 200 В;

д) включить источник питания и, увеличивая напряжение на входе электрической цепи от нуля до 150 В (через каждые 30 В), занести показания вольтметра и амперметра в табл. 2.2;

Номера измерений	Полупроводниковый диод		Лампа накаливания	
	Д А	$U, В$	Д А	$U, В$
1				
2				

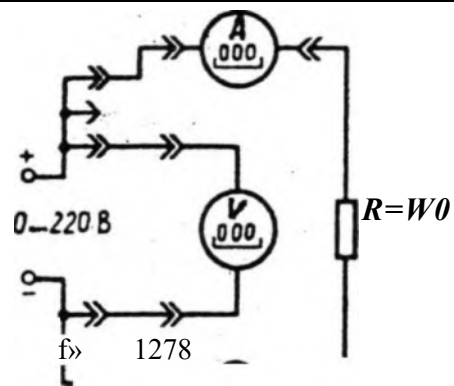
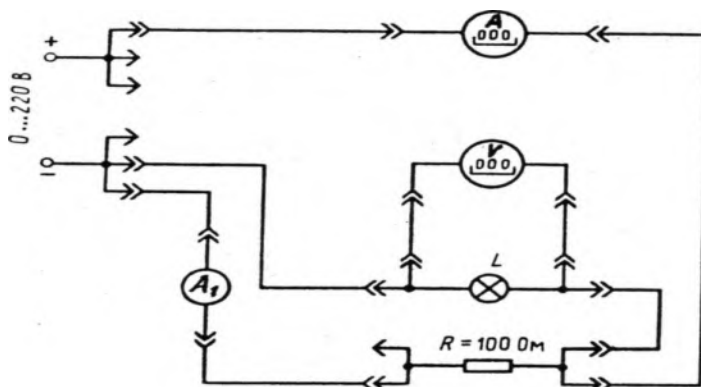


Рис. 2.9

е) снять вольт-амперные характеристики нелинейных электрических цепей при последовательном соединении резистора ($R=100 \text{ Ом}$) и лампы накаливания L (с номинальными напряжением $U_{\text{ном}}=127 \text{ В}$ и мощностью $P_{\text{ном}}=40 \text{ Вт}$) и при параллельном их соединении. Монтажная схема последовательной цепи приведена на рис. 2.9, а параллельной — на рис. 2.10.

В монтажных схемах последовательной и параллельной нелинейных



Рис

цепей для измерения токов и напряжений используются вольт-амперметры типа В7-22А; амперметр с пределом измерения тока 2000 мА, а вольтметр с пределом измерения напряжения 200 В.

При работе с параллельным включением ток в цепи резистора $R_{не}$ должен превышать 0,7 А.

Результаты измерений занести в табл. 2.3;

таблица 2.3

Последовательная цепь	/, А						
	u , В						
Параллельная цепь	/, А						
	u , В						

Практическое занятие № 2

«Методика измерения основных параметров электрических цепей»

Цель работы: Ознакомиться с измерительными приборами непосредственного отсчета (амперметрами и вольтметрами), методикой измерения токов, напряжений и сопротивлений в электрических цепях.

Основные теоретические положения

Контроль за режимом работы электрооборудования осуществляют с помощью электроизмерительных приборов.

Измерение тока, потребляемого электрическими цепями, производится амперметрами электроизмерительными приборами, включенными последовательно в цепь, в которой измеряется ток. Обмотку амперметра выполняют из небольшого числа витков толстого провода, поэтому она характеризуется очень малым сопротивлением, что необходимо для того, чтобы при включении амперметра в электрическую цепь, в которой производится измерение тока, сопротивление этой цепи практически не изменялось. При этом мощность, потребляемая прибором, оказывается ничтожной.

Включенные таким образом амперметры используют как приборы непосредственной оценки, они показывают числовое значение измеряемого тока.

В цепях постоянного тока в основном применяют амперметры магнитоэлектрической, реже - электромагнитной систем. Обмотка амперметра может допускать ограниченное значение измеренного тока. Для расширения предела измерения амперметра в электрических цепях постоянного тока используют шунты - специальные тарированные резисторы, включаемые параллельно с амперметром (рис 1.1).

Сопротивление шунта R_m , как следует из схемы рис 1.1, включено параллельно сопротивлению R_a обмотки амперметра, поэтому ток I электрической цепи распределяется по соответст-

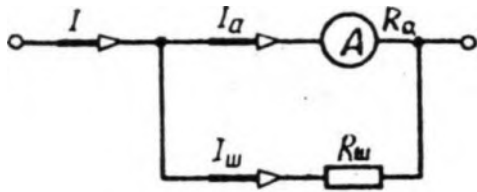
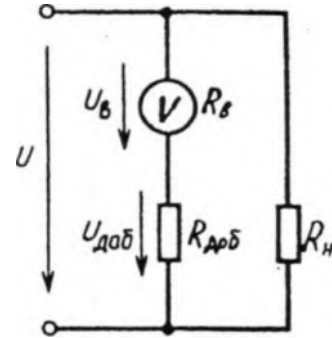


Рис. 1.1



Рис

вующим параллельным ее ветвям обратно пропорционально сопротивлению:

где $I_{ш}$ — ток в цепи шунта; I_a — ток в цепи амперметра (показание амперметра).

Для схемы рис. 1.1 справедливо следующее соотношение между токами в соответствии с первым законом Кирхгофа: $I = I_a + I_{ш}$.

С учетом этого измеряемый ток I в электрической цепи можно определить по показаниям амперметра и известным значениям сопротивлений обмотки амперметра и шунта:

$$I = I_a (1 + R_a / R_{ш}) = K_{ш} I_a,$$

где $K_{ш}$ — шунтирующий множитель.

В ряде случаев шкала амперметра градуируется с учетом наличия шунта, при этом измеряемый ток в электрической цепи отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

Измерение напряжения, действующего в электрической цепи постоянного тока, осуществляется с помощью соответствующих электроизмерительных приборов — вольтметров. Для снижения мощности, потребляемой вольтметрами, обмотки последних выполняют из большого числа витков тонкого провода с достаточно большим сопротивлением.

Вольтметры подключаются параллельно к участку электрической цепи R_H , напряжение на которой необходимо измерить. При этом они используются как приборы непосредственной оценки и указывают числовое значение измеряемого напряжения. В цепях постоянного тока обычно используют вольтметры магнитоэлектрической и электромагнитной систем. Для расширения предела измерения вольтметров последовательно с обмоткой включают тарированные добавочные резисторы, помещаемые внутри прибора или отдельно от него (рис. 1.2).

При наличии добавочного сопротивления $R_{доб}$, включенного последовательно с обмоткой вольтметра, имеющей сопротивле-

ние R_B , подлежащее измерению напряжение U распределяется пропорционально этим сопротивлениям

где U_B — напряжение на зажимах вольтметра (показания вольтметра); $\varepsilon_{доб}$ — напряжение, приложенное к добавочному сопротивлению.

Измеряемое напряжение $U = U_B + \varepsilon_{доб}$. С учетом этого измеряемое напряжение определяют по показаниям вольтметра U^* и известным сопротивлениям обмотки вольтметра и добавочного сопротивления:

$$U = (1 + R_{доб}/R_s) U_B = K_{доб} U_B,$$

где $K_{доб}$ — добавочный множитель.

Во многих случаях шкала вольтметра градуируется с учетом включённого последовательно с его обмоткой добавочного сопротивления, при этом измеряемое напряжение, действующее на зажимах электрической цепи, отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

Существует несколько методов измерения электрических сопротивлений. При этом широко используется метод амперметра и вольтметра, основанный на применении закона Ома к участку электрической цепи, который содержит измеряемое сопротивление. По падению напряжения на участке цепи и току представляется возможным определить его сопротивление.

Измерение больших электрических сопротивлений методом амперметра и вольтметра осуществляют по схеме рис. 1.3. При этом измеряемое сопротивление

где U — напряжение, подводимое к измеряемому сопротивлению; I — ток в цепи измеряемого сопротивления.

Схема рис. 1.3 используется в тех случаях, когда измеряемое сопротивление значительно больше сопротивления обмотки амперметра, последовательно с которой оно включено. При этом пренебрегают падением напряжения на сопротивлении обмотки

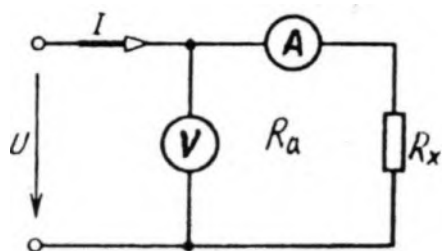


Рис. 1.3

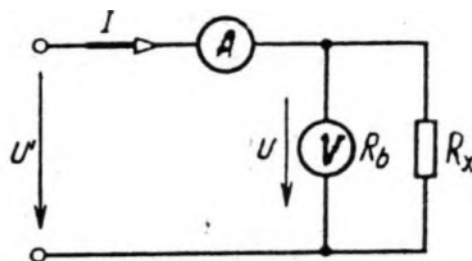


Рис. 1.4

амперметра, считая, что подводимое напряжение полностью при

ложено к измеряемому сопротивлению. При точном определении измеряемого сопротивления с учетом ошибки, вносимой амперметром, его значение рассчитывают по формуле

$$R_x = (U - R_J) / I,$$

где R_a — сопротивление обмотки амперметра.

При измерении малых сопротивлений, когда сопротивление обмотки амперметра соизмеримо с измеряемым сопротивлением, для определения его значения следует использовать схему рис. 1.4, которая позволяет исключить влияние сопротивления обмотки амперметра на точность определения измеряемого сопротивления.

Однако эта схема не учитывает влияния сопротивления обмотки вольтметра R_B на ток в цепи амперметра. Для точного определения сопротивления с учетом погрешности, вносимой вольтметром, его значение рассчитывается так: $R_x = U / (I - U / R_B)$.

Задание по работе

1. Измерить с помощью измерительных приборов непосредственного отсчета (амперметров и вольтметра) токи и напряжения на участках смешанной электрической цепи постоянного тока (рис. 1.5).
2. По экспериментальным данным п. 1 рассчитать сопротивления всех ветвей исследуемой электрической цепи в соответствии с заданными условиями.
3. Составить принципиальные схемы для измерения больших и малых сопротивлений по методу амперметра и вольтметра.
4. С помощью метода амперметра и вольтметра провести измерение большого электрического сопротивления постоянному току (обмотки вольтметра магнитоэлектрической системы).
5. С помощью метода амперметра и вольтметра провести измерение малого электрического сопротивления постоянному току (обмотки амперметра магнитоэлектрической системы).
6. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

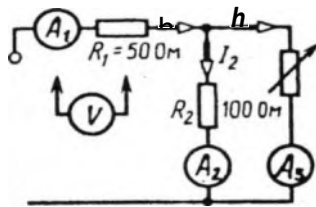
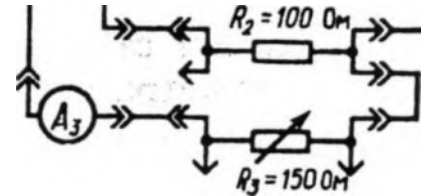
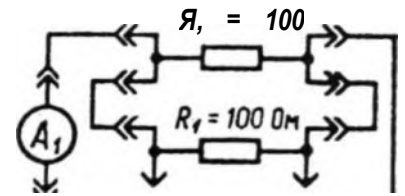


Рис. 1.5



1. Провести внешний осмотр измерительных приборов — амперметров и вольтметра, установленных на панели б лабораторного стенда, и записать в отчет по лабораторной работе технические данные (тип, систему, род тока, предел измерения, класс точности, цену деления шкалы) приборов.

2. Собрать электрическую цепь (принципиальная схема представлена на рис. 1.5) по монтажной схеме, приведенной на рис. 1.6. Соединение резисторов и измерительных приборов при сборке электрической цепи производить с помощью соединительных проводов, входящих в комплект стенда. Рис" 16

Ручку движка переменного резистора R_3 установить в крайнее левое положение. В качестве амперметров A_1 , A_2 и A_3 использовать имеющиеся на рабочей панели стенда амперметры с номинальными значениями измеряемого тока соответственно 2 А, 1 А и 2 А. Измерение напряжений на отдельных участках цепи проводить с помощью вольтметра с пределом измерения 150 В путем подключения его к соответствующим участкам. Далее подключить данную электрическую цепь к источнику регулируемого постоянного напряжения (0—220 В). При этом рукоятку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение.

3. Провести измерение токов и напряжений в электрической цепи. Для этого:
а) включить регулируемый источник питания постоянного напряжения нажатием последовательно кнопок «сеть» и «постоянное напряжение» и, поворачивая плавно рукоятку регулятора, увеличивать напряжение на выходе источника питания от нулевого значения до 50 В, контролируя его по вольтметру, установленному на панели источников питания, и одновременно контролируя значение постоянного тока на входе цепи по показаниям амперметра A_1 . Записать показания всех амперметров в табл. 1.1;

б) измерение напряжений на участках электрической цепи проводить, переключая вольтметр с одного ее участка на другой; затем, поддерживая напряжение на входе цепи равным 50 В, уменьшить сопротивление переменного резистора R_3 до нуля. Записать показания всех приборов в табл. 1.1.

Номера измерения	Измерения						Вычисления			
	$U, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$U_1, В$	$U_2, В$	$R_{\text{в}}$	$R_{\text{ср}}$, Ом	R_i , Ом	$R_{\text{с}}$ Ом
1 2										

4. Провести измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра. Для этого: а) подключить вольтметр к параллельному участку электрической цепи и, установив движок переменного резистора $R_{\text{в}}$ промежуточное положение, записать показания амперметра A_1 и вольтметра V при трех значениях напряжения на входе цепи: $U_1=50; 60$ и $70 В$. При этом, исходя из номинальных значений резисторов, ток в цепи амперметра A_1 не должен превышать значения $1,4 А$, а в цепях амперметров A_2 и A_3 — значений $0,7 А$;

б) по измеренным значениям токов и напряжений определить сопротивление переменного резистора $R_{\text{ср}}$ при данном положении движка;

в) отключить напряжение источника питания, предварительно снизив его до нулевого значения.

5. Измерить сопротивление вольтметра. Для этого:

а) начертить общую принципиальную схему для измерения больших сопротивлений по методу амперметра и вольтметра;

б) заменить в монтажной схеме рис. 1.6 переменный резистор $R_{\text{с}}$ — вольтметром K , амперметр A_1 — цифровым вольтамперметром В7-22А, предварительно подготовив его для измерения постоянного тока на пределе $0—2 А$; второй цифровой вольтамперметр В7-22А подготовить для измерения постоянного напряжения на пределе $0—200 В$ и включить его вместо резистора R_i и амперметра A_2 ;

в) включить регулируемый источник питания и установить на входе электрической цепи (по вольтметру источника) напряжение, при котором ток цифрового амперметра A_1 не превышает $0,2 А$;

г) по трем показаниям цифровых амперметра и вольтметра рассчитать сопротивление исследуемого прибора — вольтметра V .

6. Измерить сопротивление амперметра. Для этого:

а) начертить общую принципиальную схему для измерения малых сопротивлений по методу амперметра и вольтметра;

б) собрать электрическую цепь в соответствии с монтажной схемой, приведенной на рис. 1.7; измерение тока в цепи амперметра A_1 , сопротивление обмотки которого определяется, произ-

водить цифровым вольтамперметром, подготовленным для измерения постоянного тока на пределе 0—2000 мА, а измерение напряжения на амперметре A_3 — вольтамперметром, подготовленным для измерения постоянного напряжения на пределе 0—0,2 В;

в) включить напряжение питания электрической цепи и произвести измерения при трех значениях напряжения питания, соответствующих токам в цепи амперметра A_1 : 0,6; 0,8 и 1 А. По результатам измерений определить сопротивление амперметра A_3 .

Контрольные вопросы

1. Назовите системы электроизмерительных приборов, используемых в электрических цепях постоянного тока.
2. Укажите стандартные классы точности электроизмерительных приборов.
3. Объясните принцип действия амперметра магнитоэлектрической системы.
4. Объясните принцип действия вольтметра электромагнитной системы.
5. Поясните способ расширения предела измерения амперметра в цепях постоянного тока.
6. Поясните способ расширения предела измерения вольтметра в цепях постоянного тока.
7. Нарисуйте схему для измерения методом амперметра и вольтметра малых электрических сопротивлений.
8. Нарисуйте схему для измерения методом амперметра и вольтметра больших электрических сопротивлений.
9. Напишите формулу для точного определения малых электрических сопротивлений методом амперметра и вольтметра с учетом сопротивления обмотки амперметра.
10. Напишите формулу для точного определения больших электрических сопротивлений методом амперметра и вольтметра с учетом сопротивления обмотки вольтметра.

Лабораторная работа №2, №3.

Тема: «Определение механических характеристик электродвигателя постоянного тока (стартера) автомобиля»

Цель работы: ознакомиться с устройством, принципом работы, основными механическими характеристиками электродвигателей постоянного тока.

Основные теоретические положения

Генератор постоянного тока - электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в энергию постоянного тока, генератор состоит из трех основных частей: индуктора 1, якоря 2 и коллектора 3 (рис. 18.1).

Индуктор предназначен для создания магнитного поля полюсов и расположен на неподвижной части машины - статоре (см. рис. 18.1). вращающаяся часть машины называется якорем. Принцип действия генераторов постоянного тока основан на законе электромагнитной индукции. При вращении якоря каким либо первичным двигателем, вследствие пересечения проводниками обмотки якоря магнитного поля полюсов, в соответствии с законом электромагнитной индукции, в последней наводится ЭДС. В зависимости от типа используемого при этом первичного двигателя различают турбогенераторы, гидрогенераторы, мотогенераторы и т.п. ЭДС, возникаемая в каждом проводнике обмотки якоря машины, является переменной $e=f(t)$, так как она изменяется во времени по величине и направлению и зависит от положения проводников в межполюсном пространстве. Для получения на зажимах генератора постоянной во времени ЭДС предназначен коллектор, расположенный на вращающемся якоре, с системой неподвижных щеток, расположенных на статоре машины. Для создания магнитного потока требуемой величины на полюсах индуктора имеются обмотки возбуждения, обтекаемые регулируемым постоянным током. В зависимости от способа возбуждения генераторов постоянного тока различают: генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

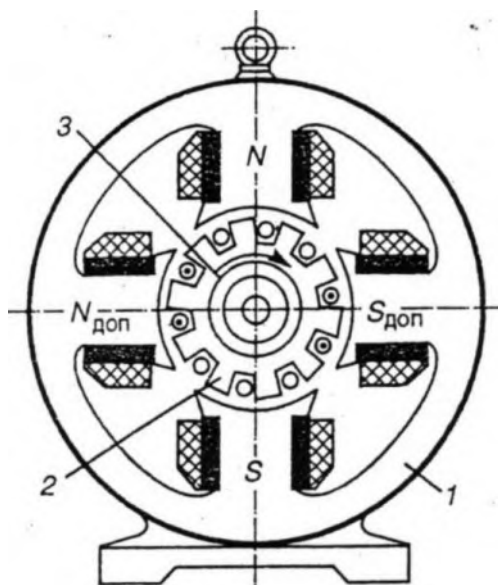


Рис. 18.1

У генераторов с *независимым возбуждением* обмотка возбуждения питается постоянным током, получаемым от постороннего источника, а у генераторов с *самовозбуждением* — непосредственно от зажимов якоря самой машины. На практике в основном применяют генераторы с самовозбуждением, имеющие более простую конструкцию и легкость эксплуатации. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения генераторы постоянного тока с самовозбуждением разделяют на генераторы с параллельным, последовательным и со смешанным возбуждением.

Наиболее широко в настоящее время применяют *генераторы постоянного тока с параллельным возбуждением*. Схема включения такого генератора представлена на рис. 18.2. Цепь обмотки возбуждения генератора подключается параллельно с нагрузочным сопротивлением R_H , поэтому он и называется генератором с параллельным возбуждением.

При вращении якоря в его обмотке возникает ЭДС E , направление которой зависит от направления вращения якоря. При работе в режиме генератора электрическая машина выполняет функции источника энергии, поэтому возникающий в цепи якоря ток I_a совпадает по направлению с индуцируемой в нем ЭДС E . Как видно из схемы рис. 18.2, ток якоря разветвляется по двум параллельным ветвям. По цепи обмотки возбуждения протекает ток возбуждения I_b , для регулирования которого включено регулировочное сопротивление R_p . По цепи нагрузки протекает ток нагрузки I . При этом в соответствии с первым законом Кирхгофа для точки разветвления токов имеем

$$I = I_b + I_a$$

Обмотку возбуждения генераторов с параллельным возбуждением выполняют из большого количества витков тонкого провода. Это позволяет получить необходимые для создания требуемого магнитного потока ампервитки при относительно небольшом токе возбуждения. Для современных машин постоянного тока ток возбуждения составляет около 1..,5%-рт номинального значения тока якоря I_a .

Одной из основных характеристик генератора с параллельным возбуждением является характеристика холостого хода, т. е.

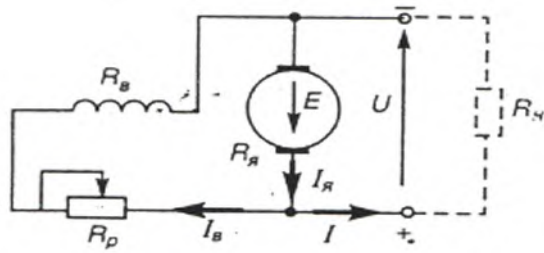


Рис. 18.2

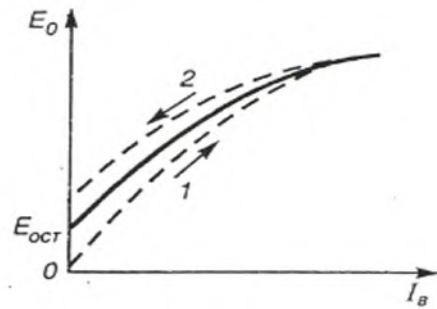


Рис. 18.3

зависимость ЭДС E_0 , индуцируемой в обмотке якоря, от тока возбуждения h при токе нагрузки, равном нулю (при разомкнутой цепи нагрузки) и постоянной частоте вращения, равной номинальной, т. е. зависимость $E_0(h)$, при $f = 0$ и $n = n_n = \text{const}$. Электродвижущая сила, возникающая на зажимах якоря, как известно, определяется уравнением

$$E = C_e n \Phi,$$

где C_e — постоянная, зависящая от конструктивных данных генератора; n — частота вращения якоря; Φ — результирующий магнитный поток машины.

Магнитный поток зависит от намагничивающей силы (ампервитков) обмотки возбуждения, а следовательно, от тока возбуждения. При $n = \text{const}$ между ЭДС и магнитным потоком устанавливается пропорциональность. При этом зависимость $E_0(I_b)$ будет иметь тот же вид, что и зависимость $\Phi(I_b)$.

Характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением (рис. 18.3) представляет собой совокупность двух расходящихся ветвей 1 и 2.

Ветвь 1 (восходящая) соответствует постепенному повышению тока возбуждения от нуля, ветвь 2 (нисходящая) — его уменьшению. При $h = 0$ (цепь обмотки возбуждения разомкнута) ЭДС E_0 холостого хода не равна нулю. Объясняется это тем, что в магнитной системе машины имеется остаточный магнитный поток $\Phi_{ост}$, который и обуславливает появление соответствующей ему ЭДС $E_{ост} = C_e n \Phi_{ост}$.

С увеличением тока возбуждения ЭДС вначале интенсивно возрастает почти по прямолинейному закону. Наклон начальной прямолинейной части характеристики зависит от величины воздушного зазора машины, причем меньшему зазору соответствует больший угол наклона. С последующим увеличением тока возбуждения h прямолинейность характеристики холостого хода нарушается вследствие явления насыщения магнитной системы машины. При сильном насыщении машины характеристика холостого хода снова принимает прямолинейный вид.

но имеет уже весьма незначительный наклон относительно оси абсцисс. При уменьшении тока возбуждения в обратном порядке получается

нисходящая ветвь 2 характеристики холостого хода. Как видно из рис. 18.3, одному и тому же значению тока возбуждения нисходящей ветви соответствует несколько большая ЭДС, чем ЭДС восходящей ветви, что происходит вследствие явления гистерезиса. По характеру расхождения ветвей можно судить о качестве магнитного материала магнитной системы машины. У генераторов, изготовленных из высококачественных электротехнических сталей, расхождение ветвей незначительно.

При расчете и исследовании свойств машин обычно используют практическую кривую характеристики холостого хода, за которую принимают среднюю линию, проведенную между двумя ветвями (на рис. 18.3 — сплошная линия). Следует заметить, что после отключения обмотки возбуждения ($I_{в}$) остаточный магнитный поток машины, соответствующий нисходящей ветви, в течение определенного промежутка времени вследствие самопроизвольного размагничивания уменьшается до значения, соответствующего $E_{ост}$ нижней восходящей ветви, так что при повторном снятии характеристики холостого хода будет снова наблюдаться ее раздвоение.

Прежде чем к зажимам генератора подключать нагрузочное сопротивление R_H , генератор необходимо возбудить, т. е. создать на его зажимах необходимое для нормальной работы напряжение. Источником питания обмотки возбуждения генератора постоянного тока с параллельным возбуждением является сам генератор. При этом обмотка возбуждения рассчитывается так, чтобы при нормальной частоте вращения якоря и нормальном токе нагрузки ток возбуждения $I_{в}$ создавал необходимый для нормальной работы машины магнитный поток. Процесс самовозбуждения генератора происходит следующим образом. При разомкнутой обмотке возбуждения и вращении якоря в обмотке Σ якоря создается ЭДС $E_{ост}$, обусловленная остаточным магнитным потоком. Величина этой ЭДС обычно незначительна и составляет около 3...5% от номинального значения напряжения U_n . Напряжение на зажимах генератора $U = E_{ост}$ будет оставаться до тех пор, пока не будет подано питание в цепь обмотки возбуждения. При подключении цепи обмотки возбуждения к зажимам якоря, под действием ЭДС $E_{ост}$ возникает относительно небольшой ток возбуждения, величина которого определяется в соответствии с законом Ома, записанным для цепи обмотки возбуждения (см. рис. 18.2).

$$I_{в} = E_{ост} / (R_H + R_B + R_p),$$

где R^* — сопротивление цепи якоря; R_B — сопротивление обмотки возбуждения; R_p — сопротивление регулировочного реостата (в процессе самовозбуждения сопротивление R_p остается постоянным).

Под действием этого тока возбуждения происходит некоторое увеличение магнитного потока машины, а следовательно ЭДС (в

соответствии с характеристикой холостого хода). Возрастание ЭДС, в свою очередь, приводит к возрастанию тока возбуждения и т. д.

Однако возрастание ЭДС не будет беспредельным. Согласно характеристике холостого хода (см. рис. 18.3) с увеличением тока возбуждения темп нарастания ЭДС постепенно снижается. Вместе с тем, зависимость тока в цепи обмотки возбуждения I_B от ЭДС E имеет прямолинейный вид, так как

$$E = (R_a + R_B + D_p) I_B = \xi I_B / v.$$

Тангенс угла наклона характеристики определяется коэффициентом пропорциональности ξ между ЭДС E и током возбуждения I_B .

Очевидно, что процесс самовозбуждения генератора будет продолжаться до тех пор, пока будет происходить возрастание тока возбуждения. При равенстве ЭДС, определяемой этим уравнением, ЭДС, соответствующей характеристике холостого хода, процесс самовозбуждения генератора заканчивается. Этому соответствует вполне определенное значение тока возбуждения.

Точка пересечения J (рис. 18.4) характеристики холостого хода с прямой, описываемой полученным выше уравнением, и определяет

тот режим, который устанавливается в конце процесса самовозбуждения генератора. Для уменьшения ЭДС, а следовательно,

напряжения на зажимах генератора по окончании процесса

самовозбуждения достаточно увеличить величину сопротивления

R_p регулировочного реостата. При этом в соответствии с приведенным выше уравнением тангенс угла наклона прямой увеличится и она

пересечется с характеристикой холостого хода в точке 2. При разрыве цепи возбуждения сопротивление ее возрастет до бесконечности, а

ЭДС на зажимах якоря будет равной $E_{ост}$. С уменьшением величины сопротивления R_p регулировочного реостата тангенс угла наклона

прямой будет уменьшаться, а следовательно, будет увеличиваться напряжение на зажимах генератора (точка 3 на рис. 18.4).

Магнитное поле, создаваемое полюсами индуктора, равномерно распределяется вдоль воздушного зазора машины. При подключении нагрузки в проводниках обмотки якоря увеличивается ток, который создает свое собственное магнитное поле, то поле взаимодействует с основным полем машины, создаваемым

полюсами индуктора. Воздействие поля якоря на основное поле машины называется *реакцией якоря*.

Влияние потока якоря приводит к искажению результирующего поля машины и неравномерному распределению магнитного потока под полюсами. При этом в

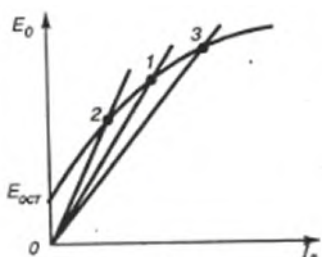


Рис. 18.4

тех местах полюсов, где направление линий поля якоря и поля индуктора совпадают, происходит усиление результирующего поля, в противном случае — ослабление результирующего магнитного поля.

Вследствие искажения поля машины происходит смещение физической нейтрали, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий относительно геометрической нейтрали, на которой устанавливаются щетки. В процессе вращения якоря неподвижные щетки периодически замыкают накоротко соседние коллекторные пластины и, следовательно, замыкают накоротко часть обмотки якоря (секции), цепь которой соединена с этими пластинами. При этом происходит периодическое замыкание и размыкание цепи; щетка — короткозамкнутая секция, в проводниках которой под действием индуктированной в них ЭДС возникает ток короткого замыкания. Величина этого тока будет зависеть от величины указанной ЭДС. Процесс перехода щетки с одной коллекторной пластины на другую и явления, связанные с этим переходом, называются *коммутацией*. Если же щетки будут оставаться на геометрической нейтрали, то в проводниках короткозамкнутой секции будет возникать довольно значительная ЭДС и ток, вызывающий в процессе коммутации значительное искрение под щетками и, как следствие этого, подгорание коллекторных пластин. При наиболее неблагоприятных условиях коммутации искрение настолько возрастает, что вокруг коллектора может возникнуть так называемый «круговой огонь», при котором обмотка якоря практически работает в режиме короткого замыкания.

Для обеспечения безыскровой коммутации, с изменением тока нагрузки необходимо соответственно менять и положение щеток, что представляет большие неудобства в процессе эксплуатации машины. В современных машинах постоянного тока для безыскровой работы применяют дополнительные полюса, расположенные между основными полюсами на геометрической нейтрали. Полярность дополнительных полюсов выбирают с таким расчетом, чтобы их поток был направлен навстречу поперечносоставляющей потока якоря. Для автоматической компенсации продольной составляющей потока якоря при изменении нагрузки обмотки дополнительных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря машины с таким расчетом, чтобы поток дополнительных полюсов при любой заданной нагрузке был равен поперечной составляющей потока якоря при этой нагрузке.

Важнейшей характеристикой генератора постоянного тока с параллельным возбуждением является в н е ш н я я характеристика — зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки / при постоянном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и

постоянной частоте вращения, равной номинальной, т. е. зависимость $U(I)$ при $R_p = \text{const}$ и $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$.

Уравнение, описывающее внешнюю характеристику генератора с параллельным возбуждением, можно получить исходя из уравнения электрического равновесия, записанного по второму закону Кирхгофа для цепи нагрузки,

$$E = U + I_a R_a.$$

Пренебрегая относительно небольшой величиной тока возбуждения, без особой погрешности можно принять $I_a = I$.

С учетом этого уравнение внешней характеристики запишется в следующем виде

$$U = E - I R_a.$$

Если при этом принять $E = \text{const}$, то внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением представится в виде прямой.

В реальных машинах $E \neq \text{const}$ вследствие размагничивающего действия реакции якоря, так как с увеличением тока якоря результирующий поток, а следовательно, и ЭДС якоря уменьшаются, и при этом уменьшается ток возбуждения. Поэтому в действительности внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением имеет вид ниспадающей кривой I (рис. 18.5). В целом уменьшение напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением с увеличением тока нагрузки обусловлено следующими основными причинами: 1) с увеличением тока нагрузки увеличивается падение напряжения на обмотке якоря — $I R_a$; 2) с увеличением нагрузки, вследствие реакции якоря происходит уменьшение результирующего магнитного потока, а следовательно, и ЭДС E якоря.

Наличие указанных двух причин, в свою очередь, приводит к уменьшению тока возбуждения, а следовательно, уменьшению магнитного потока, ЭДС якоря и соответственно напряжения на зажимах генератора.

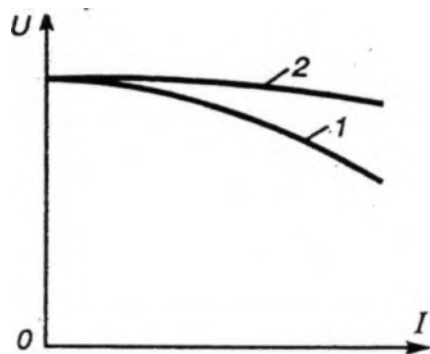
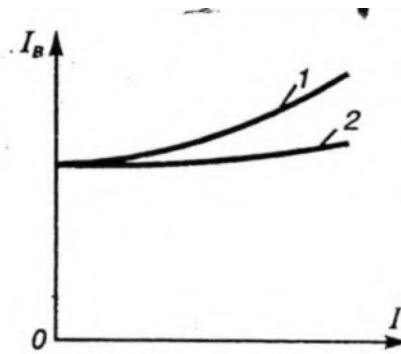


Рис 18 5



Рис

Таким образом, в соответствии с внешней характеристикой генератора с параллельным возбуждением, по мере увеличения тока нагрузки происходит уменьшение напряжения на его зажимах.

Во многих случаях на практике необходимо, чтобы с увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным, т. е.

$$U = E - RJ - \text{const.}$$

Из этого уравнения видно, что для обеспечения постоянства напряжения необходимо, чтобы падение напряжения RJ на обмотке якоря, а также снижение ЭДС за счет указанных выше других причин было скомпенсировано, с тем чтобы разность в правой части уравнения при изменении тока нагрузки в заданных пределах оставалась постоянной. Это достигается соответствующим увеличением ЭДС E якоря в результате изменения тока возбуждения генератора. *Регулировочной характеристикой* называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$, при которой обеспечивается постоянство напряжения на зажимах генератора, т. е. зависимость $h(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$ (кривая 1 на рис. 18.6). Изменение тока возбуждения h производится изменением положения движка регулировочного реостата R_p .

Из регулировочной характеристики видно, что с увеличением тока нагрузки при заданных условиях ток возбуждения должен возрастать вначале медленно. По мере дальнейшего роста нагрузки, вследствие явления насыщения стали магнитопровода, незначительное приращение магнитного потока, а следовательно, незначительное приращение ЭДС E якоря достигается довольно значительным увеличением тока возбуждения. В результате в области относительно больших нагрузок кривая зависимости $h(I)$ довольно резко загибается вверх (см. рис. 18.6).

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением имеет схему, представленную на рис. 18.7. Как видно из схемы, у этого генератора обмотка возбуждения питается от посто-

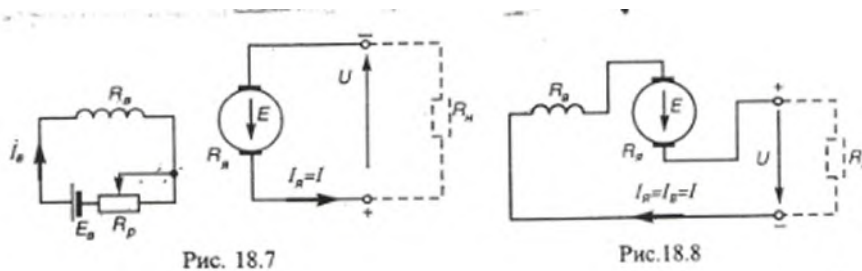


Рис. 18.7

Рис. 18.8

ронного, независимого источника, в качестве которого может быть использован другой генератор постоянного тока, аккумуляторная батарея, а также любой другой источник постоянного напряжения.

Свойства генераторов с независимым возбуждением так же, как и генераторов с параллельным возбуждением, определяются соответствующими характеристиками.

Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением по виду не отличается от соответствующей характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (см. рис. 18.3).

Внешняя характеристика такого генератора имеет, примерно, тот же вид, что и у генераторов с параллельным возбуждением, но оказывается более жесткой (см. рис. 18.5, кривая 2), так как у этих генераторов отсутствует третья причина снижения напряжения, вследствие чего при изменении тока нагрузки происходит несколько меньшее изменение напряжения на зажимах генератора такого типа. Этим объясняется также и то, что регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением оказывается более полой, чем генератора с параллельным возбуждением (рис. 18.6, кривая 2).

Генератор постоянного тока с последовательным возбуждением включается по схеме, представленной на рис. 18.8. Как видно из этой схемы, такой генератор имеет обмотку возбуждения, которая включается последовательно с обмоткой якоря и с нагрузкой. Поэтому в данном случае ток якоря оказывается равным току возбуждения и току нагрузки, т. е. $I_a = I_f = I$.

Характеристика холостого хода генератора с последовательным возбуждением снимается при питании обмотки возбуждения от независимого источника и имеет тот же вид, что и у генераторов других типов (см. рис. 18.3).

Уравнение электрического равновесия, записанное для замкнутой цепи генератора с последовательным возбуждением в соответствии со вторым законом Кирхгофа, имеет вид

$$E = U + (R^* + R_B)I,$$

где \dot{I}_B — **внутри обмотки** "последовательного возбуждения".

С учетом этого уравнение внешней характеристики для этого генератора запишется в виде

$$U = E - (Y_{\dot{I}} + R_B)I.$$

Сопротивление обмотки возбуждения R_B у генераторов с последовательным возбуждением, рассчитанной на прохождение всего тока нагрузки, оказывается незначительным, поэтому при расчете характеристик оно не учитывается.

Как видно из уравнения, напряжение на зажимах генератора при любой заданной нагрузке равно разности между ЭДС и падением напряжения на обмотках якоря и возбуждения.

С изменением же тока нагрузки, равного току возбуждения, величины, входящие в уравнение, будут изменяться. При этом ЭДС изменяется в соответствии с характеристикой холостого хода (рис. 18.9, зависимость 1), а падение напряжения $I(R_A + R_B)$ по прямолинейному закону (зависимость 2). Нетрудно видеть, что данному значению тока нагрузки соответствует напряжение, определяемое как разность ординат указанных зависимостей.

В результате внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением приобретает вид зависимости $U(I)$ (см. рис. 18.9).

Особенностью внешней характеристики генератора с последовательным возбуждением является то, что в пределах относительно малых нагрузок напряжение на его зажимах возрастает, а при достаточно больших нагрузках — снижается. Подобная внешняя характеристика является весьма неудобной при работе с меняющейся нагрузкой. Поэтому такие генераторы целесообразно использовать для питания потребителей с неменяющейся нагрузкой. Изменение напряжения на зажимах генератора в отличие от генераторов с параллельным и независимым возбуждением, осуществляется путем изменения величины тока в обмотке возбуждения — либо шунтированием обмотки соответствующим сопротивлением, либо уменьшением числа витков обмотки возбуждения шунтированием части из них.

Резкое уменьшение напряжения с увеличением нагрузки обуславливает значительно меньшие токи короткого замыкания, чем у генераторов с параллельным и независимым возбуждением. Это явилось причиной того, что подобные генераторы находят широкое применение для питания потребителей, сопротивление которых может принимать весьма малые значения, а также потребителей, способных создавать при работе ре-

жимы короткого замыкания (например, сварочные дуговые машины), без опасности недопустимой перегрузки обмоток генератора.

Генераторы постоянного тока со смешанным возбуждением отличаются наличием двух обмоток возбуждения. Цепь одной из обмоток возбуждения ($R_{B\parallel}$) включается параллельно цепи якоря, а цепь другой ($R_{B\text{с}}$) — последовательно с обмоткой якоря и с нагрузочным

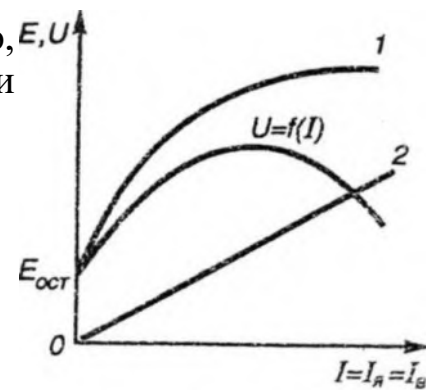


Рис. 18.9

сопротивлением. Таким образом, генератор со смешанным возбуждением имеет комбинированную систему возбуждения. Схема генератора постоянного тока со смешанным возбуждением приведена на рис. 18.10.

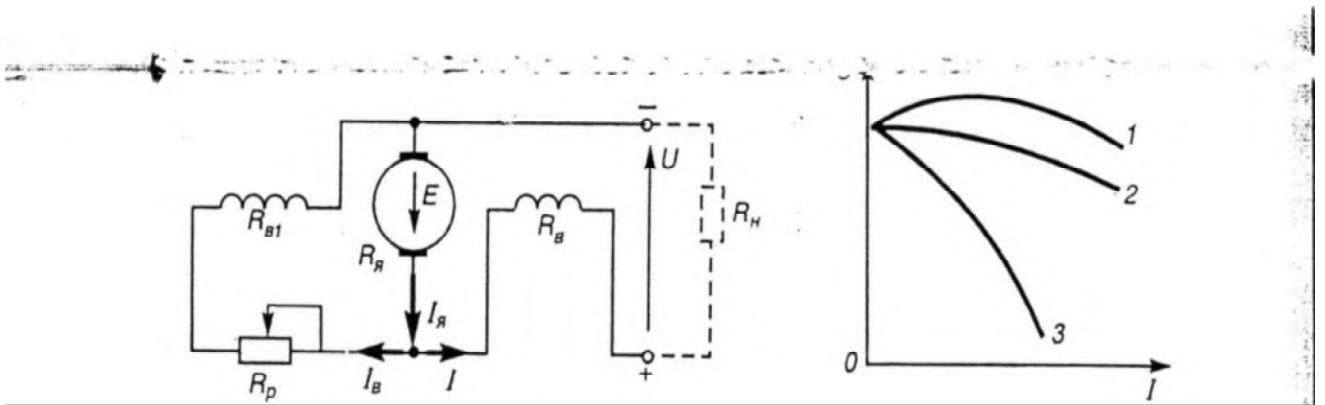
При отключении обмотки параллельного возбуждения подобный генератор превращается в генератор с последовательным возбуждением, а при отключении обмотки последовательного возбуждения — в генератор с параллельным возбуждением.

Основной обмоткой возбуждения такого генератора является обмотка параллельного возбуждения ($R_{B\parallel}$). Последовательная обмотка возбуждения ($R_{B\text{с}}$) выполняет при этом роль вспомогательной.

Уравнение электрического равновесия, записанное для якорной цепи генератора (см. рис. 18.10), и уравнение внешней характеристики, соответственно, имеют такой же вид, как и уравнения для генератора с последовательным возбуждением. Однако входящий в выражение для ЭДС якоря магнитный поток представляет собой сумму магнитного потока Φ_2 , создаваемого последовательной обмоткой возбуждения, и потока Φ_1 , создаваемого параллельной обмоткой возбуждения. При согласном включении обмоток возбуждения генератора (см. рис. 18.10) этот поток оказывается равным

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

При отключенной последовательной обмотке возбуждения генератор будет иметь такую же внешнюю характеристику, как и генератор с параллельным возбуждением (см. рис. 18.5). Включение этой обмотки приводит к наложению потока Φ_2 на поток Φ_1 . При этом внешняя характеристика приобретает вид зависимости J (рис. 18.11), которая отражает свойства генератора с параллельным возбуждением и генератора с последовательным возбуждением. В этом случае напряжение хотя и меняется с изменением нагрузки, однако слабее, чем у генераторов с парал-



Рис

18 10

лельным возбуждением. Нетрудно видеть, что можно так подобрать параметры обмотки последовательного возбуждения, что напряжение на зажимах генератора в определенном интервале нагрузок практически не будет меняться с изменением тока нагрузки (см. рис. 18.11, зависимость 2). Изменение направления тока в обмотке последовательного возбуждения приводит к созданию встречного по отношению к основному потоку Φ_1 потока Φ_2 . При этом результирующий магнитный поток генератора будет равен

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$$

Это приводит к тому, что с увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах генератора резко падает (см. рис. 18.11, зависимость 3).

Генераторы постоянного тока со смешанным возбуждением с падающей внешней характеристикой так же, как и генераторы с последовательным возбуждением, целесообразно использовать в условиях возможных частых коротких замыканий (например, для питания дуговых сварочных машин).

Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и конструкцией исследуемого генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
2. Снять и построить основные характеристики исследуемого генератора с параллельным возбуждением.
3. Сделать краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. На демонстрационном стенде «Машины постоянного тока» ознакомиться с устройством генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Записать в лабораторный отчет технические паспортные данные исследуемого генератора:

- Тип генератора
- Номинальная мощность ($P_{ном}$), кВт
- Номинальное напряжение ($U_{ном}$), В
- Номинальный ток ($I_{ном}$), А
- Номинальная частота вращения ($n_{ном}$), об/мин

2. На рабочей панели «Генератор постоянного тока» стенда в соответствии с принципиальной схемой (рис. 18.12) собрать схему для испытания генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Монтаж схемы осуществляется соединителями по монтажной схеме, приведенной на рис. 18.13. В качестве приводного двигателя генератора используется асинхронный трехфазный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Сборку схем электродвигателя исследуемого генератора проводят на одной и той же панели.

Перед пуском приводного электродвигателя необходимо:

а) установить рукоятку нагрузочного реостата на панели «Машины постоянного тока» в крайнее левое положение (цепь нагрузки генератора должна быть разомкнута);

б) установить рукоятку регулировочного реостата в цепи тока обмотки возбуждения генератора в крайнее левое положение, т. е. установить минимальный ток возбуждения (I_B);

в) произвести пуск приводного электродвигателя. Для этого, включив напряжение сети на панели «Машины переменного тока», нажать кнопку «Включение асинхронной и синхронной машины»;

г) при установившейся частоте вращения якоря генератора ($n = \text{const}$) увеличить ток возбуждения генератора I_B путем изменения сопротивления R_B регулировочного реостата возбуждения. При этом необходимо убедиться, что генератор самовозбуждается. При правильном включении обмотки возбуждения наводимая в якоре генератора ЭДС будет возрастать.

3. Снять характеристику холостого хода генератора $E(I_B)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$. Показания для первой точки характери-

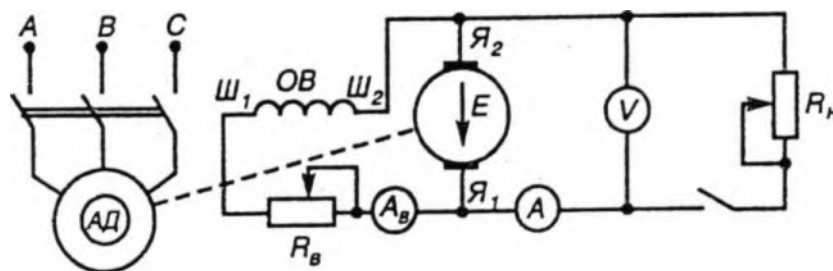


Рис. 18.12

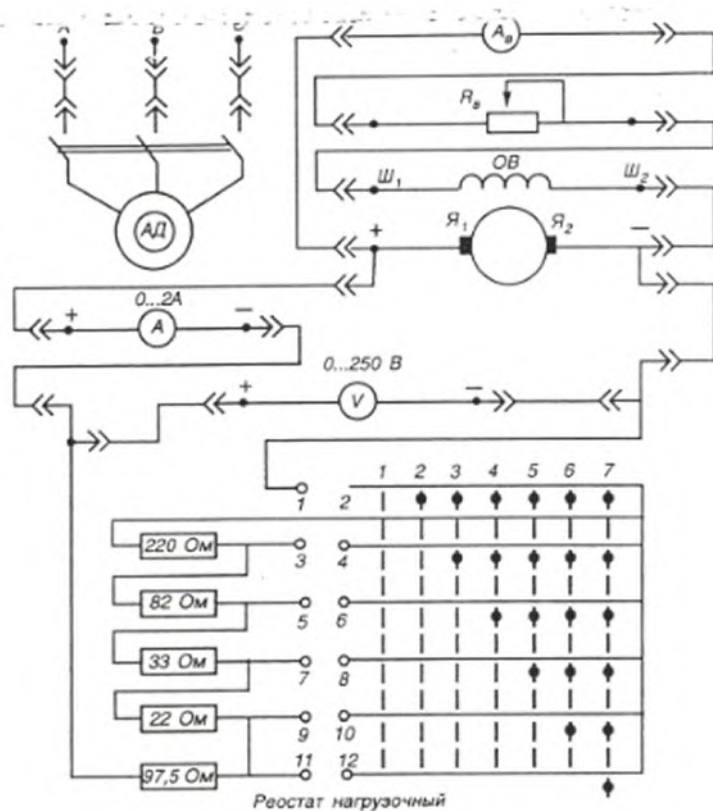


Рис. 18.13

етки снимать при разомкнутой цепи обмотки возбуждения. Установив предварительно ручку регулировочного реостата в крайнее левое положение, включить цепь возбуждения и снять показания в шести-семи точках, плавно увеличивая ток возбуждения I_B до значения, при котором ЭДС E якоря генератора на 10...15% больше номинального значения напряжения $U_{ном}$ генератора. Затем, плавно уменьшая ток возбуждения до нуля, снять показания измерительных приборов еще для шести-семи точек. При снятии прямой и обратной ветвей характеристики холостого хода $E(I_B)$ не допускается переменное увеличение и уменьшение тока возбуждения, так как в противном случае будет происходить искажение характеристики из-за влияния явления гистерезиса.

Результаты измерений записать в табл. 18.1

Т а б л и ц а 18.1

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
I, A							
$\xi T, B$							
h_i, A							
$E I, B$							

4. Снять внешнюю характеристику генератора $U(I)$ при $R_B = \text{const}$ и $n = \text{const}$, начиная с номинального режима (при номинальном напряжении $\xi_{\text{ном}}$ и номинальном токе $I_{\text{ном}}$). Для этого необходимо:

а) возбудить генератор и установить одновременным изменением сопротивления R_H нагрузки (нагрузочным реостатом) и тока возбуждения h номинальный режим; определить номинальное значение тока возбуждения $I_{\text{ном}}$. В дальнейшем сопротивление R_B реостата возбуждения не изменять;

б) нагрузочным реостатом уменьшить ток нагрузки I до нуля и записать показания приборов в табл. 18.2;

в) постепенно увеличивая нагрузку генератора I от 0 до $1,2 I_{\text{ном}}$, снять показания в шести-семи точках, включая точку номинального режима. Результаты измерений записать в табл. 18.2.

Т а б л и ц а 18.2

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
Измерения							
U, B							
I, A							
I_k, A							
$P^*, кВт$							

* $P = UI$ — мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь.

5. Снять регулировочную характеристику генератора $I_B(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Для этого необходимо:

а) установить на зажимах генератора заданное преподавателем напряжение при токе нагрузки, равном нулю;

б) изменяя нагрузку генератора нагрузочным реостатом R_H , поддерживать регулировочным реостатом R_B напряжение на нагрузке генератора постоянным $U = \text{const}$. Ток нагрузки I при этом должен изменяться в пределах от 0 до $1,2 I_{\text{ном}}$. Результат измерений для шести-семи точек занести в табл. 18.3.

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
Измерения							
$u, В$							
$I, А$							
$I_{\text{н}}, А$							

6. Обработка результатов измерений:

а) по полученным в п.3 данным измерений построить зависимость $E(h)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$;

б) по результатам измерений и вычислений в п.4 построить зависимости $U(I)$ и $U(P)$ при $R^* = \text{const}$ и $n = \text{const}$;

в) по построенной зависимости $U(I)$ вычислить процентное повышение напряжения генератора при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода;

г) по результатам измерений и вычислений п. 5 построить зависимость $I_{\text{н}}(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
2. По каким внешним конструктивным признакам можно отличить электрическую машину постоянного тока от электрической машины переменного тока?
3. Укажите условия самовозбуждения генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
4. Объясните, при каких условиях заканчивается процесс самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением и какие факторы влияют на величину ЭДС, возникающую на его зажимах.
5. Поясните вид характеристики холостого хода генератора с параллельным возбуждением.
6. Дайте обоснование причин снижения напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением с увеличением тока нагрузки.
7. Объясните, почему в машинах постоянного тока магнитопровод статора выполняется сплошным (литым), а якоря — наборным из изолированных пластин электротехнической стали.
8. Укажите причину, по которой генератор параллельного возбуждения не возбуждается при изменении полярности подключения к якорю обмотки возбуждения.
9. Поясните, почему при отсутствии тока в обмотке возбуждения генератора постоянного тока с параллельным возбуждением имеет место ЭДС на его зажимах.
10. Объясните различие внешних характеристик генераторов постоянного тока с параллельным, смешанным и последовательным возбуждением.

Практическая работа №3.

«Знакомство с электрическими машинами с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением»

Цель работы: ознакомиться с устройством, принципом работы, основными характеристиками электрических машин с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением .

Основные теоретические положения

Генератор постоянного тока - электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в энергию постоянного тока, генератор состоит из трех основных частей: индуктора 1, якоря 2 и коллектора 3 (рис. 18.1).

Индуктор предназначен для создания магнитного поля полюсов и расположен на неподвижной части машины - статоре (см. рис. 18.1). вращающаяся часть машины называется якорем. Принцип действия генераторов постоянного тока основан на законе электромагнитной индукции. При вращении якоря каким

либо первичным двигателем, вследствие пересечения проводниками обмотки якоря магнитного поля полюсов, в соответствии с законом электромагнитной индукции, в последней наводится ЭДС. В зависимости от типа используемого при этом первичного двигателя различают турбогенераторы, гидрогенераторы, мотогенераторы и т.п. ЭДС, возникаемая в каждом проводнике обмотки якоря машины, является переменной $e=f(t)$, так как она изменяется во времени по величине и направлению и зависит от положения проводников в межполюсном пространстве. Для получения на зажимах генератора постоянной во времени ЭДС предназначен коллектор, расположенный на вращающемся якоре, с системой неподвижных щеток, расположенных на статоре машины. Для создания магнитного потока требуемой величины на полюсах индуктора имеются обмотки возбуждения, обтекаемые регулируемым постоянным током. В зависимости от способа возбуждения генераторов постоянного тока различают: генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

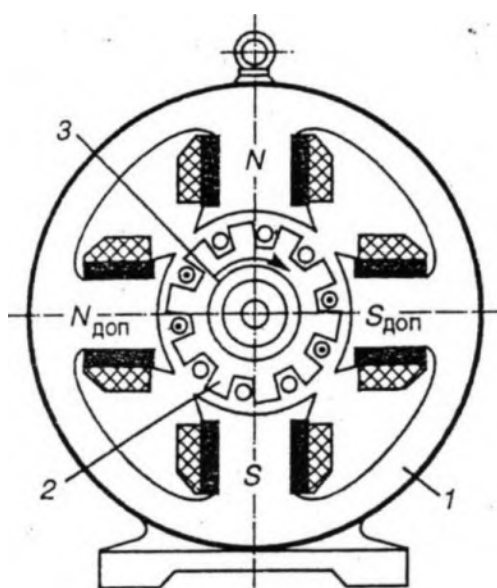


Рис. 18.1

У генераторов с *независимым возбуждением* обмотка возбуждения питается постоянным током, получаемым от постороннего источника, а у генераторов с *самовозбуждением* — непосредственно от зажимов якоря самой машины. На практике в основном применяют генераторы с самовозбуждением, имеющие более простую конструкцию и легкость эксплуатации. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения генераторы постоянного тока с самовозбуждением разделяют на генераторы с параллельным, последовательным и со смешанным возбуждением.

Наиболее широко в настоящее время применяют *генераторы постоянного тока с параллельным возбуждением*. Схема включения такого генератора представлена на рис. 18.2. Цепь обмотки возбуждения генератора подключается параллельно с нагрузочным сопротивлением

R_H , поэтому он и называется генератором с параллельным возбуждением.

При вращении якоря в его обмотке возникает ЭДС E , направление которой зависит от направления вращения якоря. При работе в режиме генератора электрическая машина выполняет функции источника энергии, поэтому возникающий в цепи якоря ток I_a совпадает по направлению с индуцируемой в нем ЭДС E . Как видно из схемы рис. 18.2, ток якоря разветвляется по двум параллельным ветвям. По цепи обмотки возбуждения протекает ток возбуждения I_b , для регулирования которого включено регулировочное сопротивление R_p . По цепи нагрузки протекает ток нагрузки I . При этом в соответствии с первым законом Кирхгофа для точки разветвления токов имеем

$$I = I_b + I_a$$

Обмотку возбуждения генераторов с параллельным возбуждением выполняют из большого количества витков тонкого провода. Это позволяет получить необходимые для создания требуемого магнитного потока ампервитки при относительно небольшом токе возбуждения. Для современных машин постоянного тока ток возбуждения составляет около 1...5%-рт номинального значения тока якоря I_a .

Одной из основных характеристик генератора с параллельным

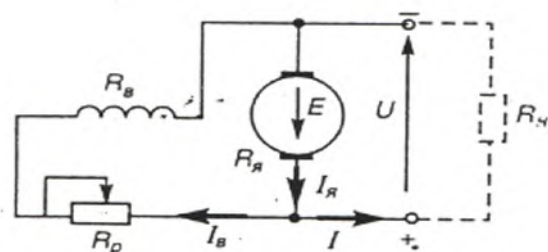


Рис. 18.2

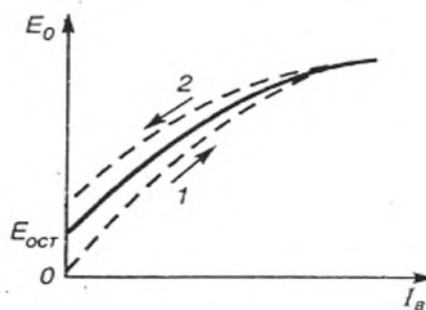


Рис. 18.3

возбуждением является характеристика холостого хода, т. е.

зависимость ЭДС E_0 , индуцируемой в обмотке якоря, от тока возбуждения I_b при токе нагрузки, равном нулю (при разомкнутой цепи нагрузки) и постоянной частоте вращения, равной номинальной, т. е. зависимость $E_0(I_b)$, при $I = 0$ и $n = n_n = \text{const}$. Электродвижущая сила, возникающая на зажимах якоря, как известно, определяется уравнением

$$E = C_n n \Phi,$$

где C_n — постоянная, зависящая от конструктивных данных генератора; n — частота вращения якоря; Φ — результирующий магнитный поток машины.

Магнитный поток зависит от намагничивающей силы (ампервитков) обмотки возбуждения, а следовательно, от тока возбуждения.

При $n = \text{const}$ между ЭДС и магнитным потоком устанавливается пропорциональность. При этом зависимость $\mathcal{E}_0(I_B)$ будет иметь тот же вид, что и зависимость $\Phi(I_B)$.

Характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением (рис. 18.3) представляет собой совокупность двух расходящихся ветвей 1 и 2.

Ветвь 1 (восходящая) соответствует постепенному повышению тока возбуждения от нуля, ветвь 2 (нисходящая) — его уменьшению. При $h = 0$ (цепь обмотки возбуждения разомкнута) ЭДС E_0 холостого хода не равна нулю. Объясняется это тем, что в магнитной системе машины имеется остаточный магнитный поток $\Phi_{ост}$, который и обуславливает появление соответствующей ему ЭДС $E_{ост} = S_e \Delta \Phi_{ост}$.

С увеличением тока возбуждения ЭДС вначале интенсивно возрастает почти по прямолинейному закону. Наклон начальной прямолинейной части характеристики зависит от величины воздушного зазора машины, причем меньшему зазору соответствует больший угол наклона. С последующим увеличением тока возбуждения I прямолинейность характеристики холостого хода нарушается вследствие явления насыщения магнитной системы машины. При сильном насыщении машины характеристика холостого хода снова принимает прямолинейный вид.

но имеет уже весьма незначительный наклон относительно оси абсцисс. При уменьшении тока возбуждения в обратном порядке получается нисходящая ветвь 2 характеристики холостого хода. Как видно из рис. 18.3, одному и тому же значению тока возбуждения нисходящей ветви соответствует несколько большая ЭДС, чем ЭДС восходящей ветви, что происходит вследствие явления гистерезиса. По характеру расхождения ветвей можно судить о качестве магнитного материала магнитной системы машины. У генераторов, изготовленных из высококачественных электротехнических сталей, расхождение ветвей незначительно.

При расчете и исследовании свойств машин обычно используют практическую кривую характеристики холостого хода, за которую принимают среднюю линию, проведенную между двумя ветвями (на рис. 18.3 — сплошная линия). Следует заметить, что после отключения обмотки возбуждения ($I_B = 0$) остаточный магнитный поток машины, соответствующий нисходящей ветви, в течение определенного промежутка времени вследствие самопроизвольного размагничивания уменьшается до значения, соответствующего $\mathcal{E}_{ост}$ нижней восходящей ветви, так что при повторном снятии характеристики холостого хода будет снова наблюдаться ее раздвоение.

Прежде чем к зажимам генератора подключать нагрузочное сопротивление R_H , генератор необходимо возбудить, т. е. создать на его зажимах необходимое для нормальной работы напряжение. Источником

питания обмотки возбуждения генератора постоянного тока с параллельным возбуждением является сам генератор. При этом обмотка возбуждения рассчитывается так, чтобы при нормальной частоте вращения якоря и нормальном токе нагрузки ток возбуждения I_B создавал необходимый для нормальной работы машины магнитный поток. Процесс самовозбуждения генератора происходит следующим образом. При разомкнутой обмотке возбуждения и вращении якоря в обмотке Σ якоря создается ЭДС $E_{ост}$, обусловленная остаточным магнитным потоком. Величина этой ЭДС обычно незначительна и составляет около 3...5% от номинального значения напряжения U . Напряжение на зажимах генератора $U = E_{ост}$ будет оставаться до тех пор, пока не будет подано питание в цепь обмотки возбуждения. При подключении цепи обмотки возбуждения к зажимам якоря, под действием ЭДС $E_{ост}$ возникает относительно небольшой ток возбуждения, величина которого определяется в соответствии с законом Ома, записанным для цепи обмотки возбуждения (см. рис. 18.2).

$$I_B = E_{ост} / (R_A + R_B + R_p),$$

где R_A — сопротивление цепи якоря; R_B — сопротивление обмотки возбуждения; R_p — сопротивление регулировочного реостата (в процессе самовозбуждения сопротивление R_p остается постоянным).

Под действием этого тока возбуждения происходит некоторое увеличение магнитного потока машины, а следовательно ЭДС (в соответствии с характеристикой холостого хода). Возрастание ЭДС, в свою очередь, приводит к возрастанию тока возбуждения и т. д.

Однако возрастание ЭДС не будет беспредельным. Согласно характеристике холостого хода (см. рис. 18.3) с увеличением тока возбуждения темп нарастания ЭДС постепенно снижается. Вместе с тем, зависимость тока в цепи обмотки возбуждения I_B от ЭДС E имеет прямолинейный вид, так как

$$E = (R_A + R_B + R_p) I_B = \Sigma R I_B.$$

Тангенс угла наклона характеристики определяется коэффициентом пропорциональности ΣR между ЭДС E и током возбуждения I_B .

Очевидно, что процесс самовозбуждения генератора будет продолжаться до тех пор, пока будет происходить возрастание I_B тока возбуждения. При равенстве ЭДС, определяемой этим уравнением, ЭДС, соответствующей характеристике холостого хода, процесс самовозбуждения генератора заканчивается. Этому соответствует вполне определенное значение тока возбуждения.

Точка пересечения J (рис. 18.4) характеристики холостого хода с прямой, описываемой полученным выше уравнением, определяет тот режим, который устанавливается в конце процесса самовозбуждения генератора. Для уменьшения ЭДС, а следовательно,

напряжения на зажимах генератора по окончании процесса самовозбуждения достаточно увеличить величину сопротивления R_p регулировочного реостата. При этом в соответствии с приведенным выше уравнением тангенс угла наклона прямой увеличивается и она пересечется с характеристикой холостого хода в точке 2. При разрыве цепи возбуждения сопротивление ее возрастет до бесконечности, а ЭДС на зажимах якоря будет равной $E_{ост}$. С уменьшением величины сопротивления R_p регулировочного реостата тангенс угла наклона прямой будет уменьшаться, а следовательно, будет увеличиваться напряжение на зажимах генератора (точка 3 на рис. 18.4).

Магнитное поле, создаваемое полюсами индуктора, равномерно распределяется вдоль воздушного зазора машины. При подключении нагрузки в проводниках обмотки якоря увеличивается ток I_a , который создает свое собственное магнитное поле, то поле взаимодействует с основным полем машины, создае

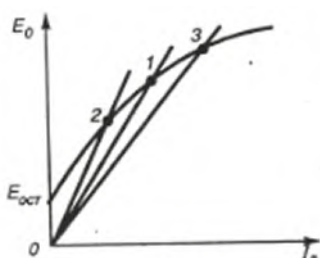


Рис. 18.4

мым полюсами индуктора. Воздействие поля якоря на основное поле машины называется *реакцией якоря*.

Влияние потока якоря приводит

к искажению результирующего поля машины и неравномерному распределению магнитного потока под полюсами. При этом в тех местах полюсов, где направление линий

поля якоря и поля индуктора совпадают, происходит

усиление результирующего поля, в противном случае — ослабление результирующего магнитного поля.

Вследствие искажения поля машины происходит смещение физической нейтральной линии, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий относительно геометрической нейтральной, на которой устанавливаются щетки. В процессе вращения якоря неподвижные щетки периодически замыкают накоротко соседние коллекторные пластины и, следовательно, замыкают накоротко часть обмотки якоря (секции), цепь которой соединена с этими пластинами. При этом происходит периодическое замыкание и размыкание цепи; щетка — короткозамкнутая секция, в проводниках которой под действием индуктированной в них ЭДС возникает ток короткого замыкания. Величина этого тока будет зависеть от величины указанной ЭДС. Процесс перехода щетки с одной коллекторной пластины на другую и явления, связанные с этим переходом, называются *коммутацией*. Если же щетки будут оставаться на геометрической нейтральной, то в проводниках короткозамкнутой секции будет возникать довольно значительная ЭДС и ток, вызывающий в процессе коммутации значительное искрение под щетками и, как следствие этого, подгорание коллекторных пластин. При наиболее неблагоприятных

условиях коммутации искрение настолько возрастает, что вокруг коллектора может возникнуть так называемый «круговой огонь», при котором обмотка якоря практически работает в режиме короткого замыкания.

Для обеспечения безыскровой коммутации, с изменением тока нагрузки необходимо соответственно менять и положение щеток, что представляет большие неудобства в процессе эксплуатации машины. В современных машинах постоянного тока для безыскровой работы применяют дополнительные полюса, расположенные между основными полюсами на геометрической нейтрали. Полярность дополнительных полюсов выбирают с таким расчетом, чтобы их поток был направлен навстречу поперечносоставляющей потока якоря. Для автоматической компенсации продольной составляющей потока якоря при изменении нагрузки обмотки дополнительных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря машины с таким расчетом, чтобы поток дополнительных полюсов при любой заданной нагрузке был равен поперечной составляющей потока якоря при этой нагрузке.

Важнейшей характеристикой генератора постоянного тока с параллельным возбуждением является в н е ш н я характеристика — зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки / при постоянном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и постоянной частоте вращения, равной номинальной, т. е. зависимость $U(I)$ при $R_p = \text{const}$ и $n = \text{ном} = \text{const}$.

Уравнение, описывающее внешнюю характеристику генератора с параллельным возбуждением, можно получить исходя из уравнения электрического равновесия, записанного по второму закону Кирхгофа для цепи нагрузки,

$$E = U + I_a R_a.$$

Пренебрегая относительно небольшой величиной тока возбуждения, без особой погрешности можно принять $I_a = I$.

С учетом этого уравнение внешней характеристики запишется в следующем виде

$$U = E - I R_a.$$

Если при этом принять $E = \text{const}$, то внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением представится в виде прямой.

В реальных машинах $E \neq \text{const}$ вследствие размагничивающего действия реакции якоря, так как с увеличением тока якоря результирующий поток, а следовательно, и ЭДС якоря уменьшаются, и при этом уменьшается ток возбуждения. Поэтому в действительности внешняя характеристика генератора с парал-

лельным возбуждением имеет вид ниспадающей кривой I (рис. 18.5). В целом уменьшение напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением с увеличением тока нагрузки обусловлено следующими основными причинами: 1) с увеличением тока нагрузки увеличивается падение напряжения на обмотке якоря — RJ ; 2) с увеличением нагрузки, вследствие реакции якоря происходит уменьшение результирующего магнитного потока, а следовательно, и ЭДС E якоря.

Наличие указанных двух причин, в свою очередь, приводит к уменьшению тока возбуждения, а следовательно, уменьшению магнитного потока, ЭДС якоря и соответственно напряжения на

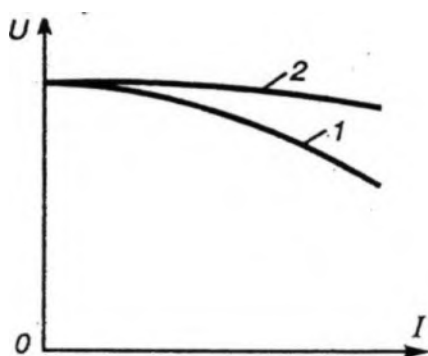


Рис. 18.5

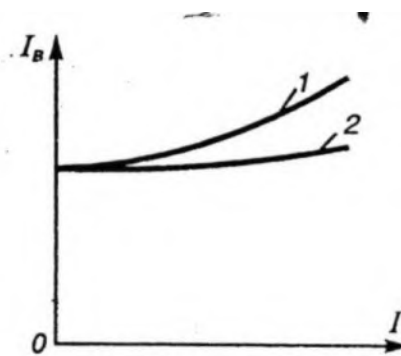


Рис.

зажимах генератора.

Таким образом, в соответствии с внешней характеристикой генератора с параллельным возбуждением, по мере увеличения тока нагрузки происходит уменьшение напряжения на его зажимах.

Во многих случаях на практике необходимо, чтобы с увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным, т. е.

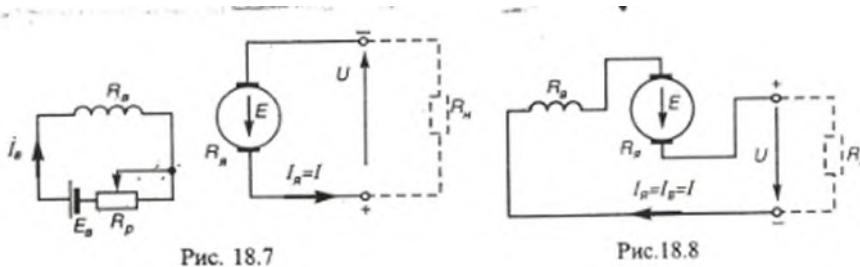
$$U = E - RJ - \text{const.}$$

Из этого уравнения видно, что для обеспечения постоянства напряжения необходимо, чтобы падение напряжения RJ на обмотке якоря, а также снижение ЭДС за счет указанных выше других причин было скомпенсировано, с тем чтобы разность в правой части уравнения при изменении тока нагрузки в заданных пределах оставалась постоянной. Это достигается соответствующим увеличением ЭДС E якоря в результате изменения тока возбуждения генератора. *Регулировочной характеристикой* называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при $n = \text{«ном»} = \text{const}$, при которой обеспечивается постоянство напряжения на зажимах генератора, т. е. зависимость $h\{I\}$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{«ном»} = \text{const}$ (кривая / на рис. 18.6).

Изменение тока возбуждения I_p производится изменением положения движка регулировочного реостата R_p .

Из регулировочной характеристики видно, что с увеличением тока нагрузки при заданных условиях ток возбуждения должен возрастать вначале медленно. По мере дальнейшего роста нагрузки, вследствие явления насыщения стали магнитопровода, незначительное приращение магнитного потока, а следовательно, незначительное приращение ЭДС E якоря достигается довольно значительным увеличением тока возбуждения. В результате в области относительно больших нагрузок кривая зависимости $U(I)$ довольно резко загибается вверх (см. рис. 18.6).

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением имеет схему, представленную на рис. 18.7. Как видно из схемы, у этого генератора обмотка



возбуждения питается от посто-

ронного, независимого источника, в качестве которого может быть использован другой генератор постоянного тока, аккумуляторная батарея, а также любой другой источник постоянного напряжения.

Свойства генераторов с независимым возбуждением так же, как и генераторов с параллельным возбуждением, определяются соответствующими характеристиками.

Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением по виду не отличается от соответствующей характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (см. рис. 18.3).

Внешняя характеристика такого генератора имеет, примерно, тот же вид, что и у генераторов с параллельным возбуждением, но оказывается более жесткой (см. рис. 18.5, кривая 2), так как у этих генераторов отсутствует третья причина снижения напряжения,

вследствие чего при изменении тока нагрузки происходит несколько меньшее изменение напряжения на зажимах генератора такого типа. Этим объясняется также и то, что регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением оказывается более пологой, чем генератора с параллельным возбуждением (рис. 18.6, кривая 2).

Генератор постоянного тока с последовательным возбуждением включается по схеме, представленной на рис. 18.8. Как видно из этой схемы, такой генератор имеет обмотку возбуждения, которая включается последовательно с обмоткой якоря и с нагрузкой. Поэтому в данном случае ток якоря оказывается равным току возбуждения и току нагрузки, т. е. $I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = I$.

Характеристика холостого хода генератора с последовательным возбуждением снимается при питании обмотки возбуждения от независимого источника и имеет тот же вид, что и у генераторов других типов (см. рис. 18.3).

Уравнение электрического равновесия, записанное для замкнутой цепи генератора с последовательным возбуждением в соответствии со вторым законом Кирхгофа, имеет вид

$$E = U + (R^* + R_B)I,$$

где iB — **wunpниo^дие^бл^ки** "последовательного возбуждения.

С учетом этого уравнение в ней характеристики для этого генератора запишется в виде

$$U = E - (R_{\text{я}} + R_B)I.$$

Сопротивление обмотки возбуждения R_B у генераторов с последовательным возбуждением, рассчитанной на прохождение всего тока нагрузки, оказывается незначительным, поэтому при расчете характеристик оно не учитывается.

Как видно из уравнения, напряжение на зажимах генератора при любой заданной нагрузке равно разности между ЭДС и падением напряжения на обмотках якоря и возбуждения.

С изменением же тока нагрузки, равного току возбуждения, величины, входящие в уравнение, будут изменяться. При этом ЭДС изменяется в соответствии с характеристикой холостого хода (рис. 18.9, зависимость 1), а падение напряжения $(R^* + R_B)I$ по прямолинейному закону (зависимость 2). Нетрудно видеть, что данному значению тока нагрузки соответствует напряжение, определяемое как разность ординат указанных зависимостей.

В результате внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением приобретает вид зависимости $U(I)$ (см. рис. 18.9).

Особенностью внешней характеристики генератора с последовательным возбуждением является то, что в пределах относительно малых нагрузок напряжение на его зажимах возрастает, а при достаточно больших нагрузках — снижается. Подобная внешняя характеристика является весьма неудобной при работе с меняющейся нагрузкой. Поэтому такие генераторы целесообразно использовать для питания потребителей с неменяющейся нагрузкой. Изменение напряжения на зажимах генератора в отличие от генераторов с параллельным и независимым возбуждением, осуществляется путем изменения величины тока в обмотке возбуждения — либо шунтированием обмотки соответствующим сопротивлением, либо уменьшением числа витков обмотки возбуждения шунтированием части из них.

Резкое уменьшение напряжения с увеличением нагрузки обуславливает значительно меньшие токи короткого замыкания, чем у генераторов с параллельным и независимым возбуждением. Это явилось причиной того, что подобные генераторы находят широкое применение для питания потребителей, сопротивление которых может принимать весьма малые значения, а также потребителей, способных создавать при работе ре-

жимы короткого замыкания (например, сварочные дуговые машины), без опасности недопустимой перегрузки обмоток генератора.

Генераторы постоянного тока со смешанным возбуждением отличаются наличием двух обмоток возбуждения. Цепь одной из обмоток возбуждения ($R_{B\parallel}$) включается параллельно цепи якоря, а цепь другой ($R_{B\text{с}}$) — последовательно с обмоткой якоря и с нагрузочным

сопротивлением. Таким образом, генератор со смешанным возбуждением имеет комбинированную систему возбуждения. Схема генератора постоянного тока со смешанным возбуждением приведена на рис. 18.10.

При отключении обмотки параллельного возбуждения подобный генератор превращается в генератор с последовательным возбуждением, а при отключении обмотки последовательного возбуждения — в генератор с параллельным возбуждением.

Основной обмоткой возбуждения такого генератора является обмотка параллельного возбуждения ($R_{B\parallel}$). Последовательная обмотка возбуждения ($R_{B\text{с}}$) выполняет при этом роль вспомогательной.

Уравнение электрического равновесия, записанное для якорной цепи генератора (см. рис. 18.10), и уравнение внешней характеристики,

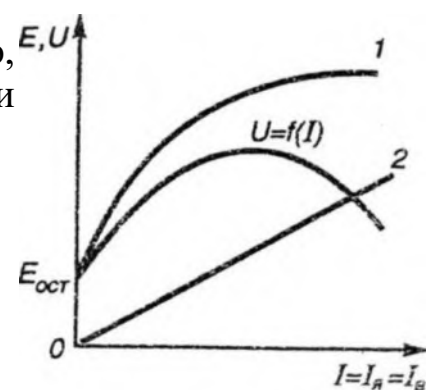
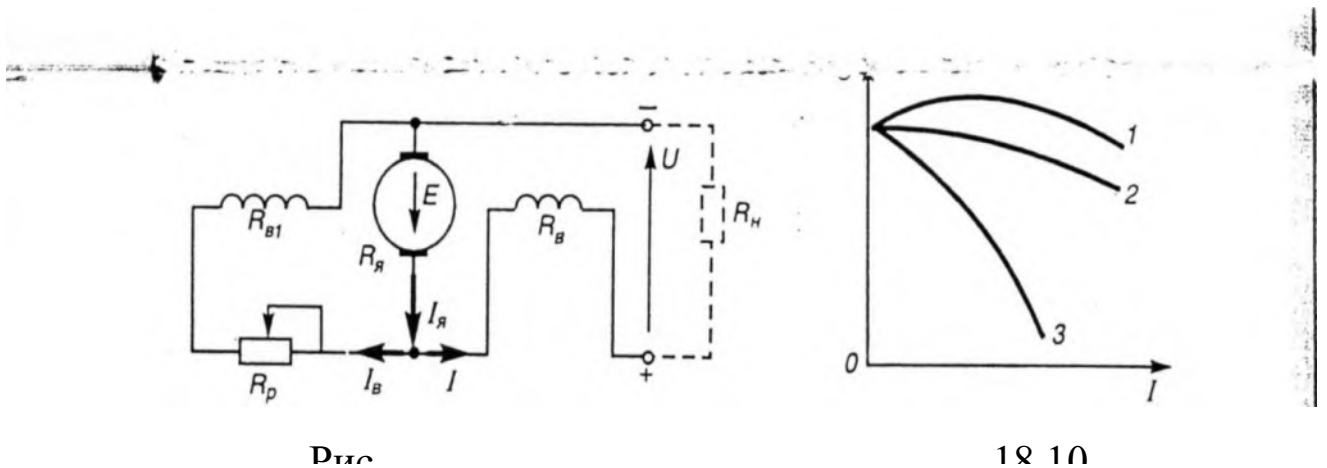


Рис. 18.9

соответственно, имеют такой же вид, как и уравнения для генератора с последовательным возбуждением. Однако входящий в выражение для ЭДС якоря магнитный поток представляет собой сумму магнитного потока Φ_2 , создаваемого последовательной обмоткой возбуждения, и потока Φ_1 , создаваемого параллельной обмоткой возбуждения. При согласном включении обмоток возбуждения генератора (см. рис. 18.10) этот поток оказывается равным

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

При отключенной последовательной обмотке возбуждения генератор будет иметь такую же внешнюю характеристику, как и генератор с параллельным возбуждением (см. рис. 18.5). Включение этой обмотки приводит к наложению потока Φ_2 на поток Φ_1 . При этом внешняя характеристика приобретает вид зависимости J (рис. 18.11), которая отражает свойства генератора с параллельным возбуждением и генератора с последовательным возбуждением. В этом случае напряжение хотя и меняется с изменением нагрузки, однако слабее, чем у генераторов с парал-



лельным возбуждением. Нетрудно видеть, что можно так подобрать параметры обмотки последовательного возбуждения, что напряжение на зажимах генератора в определенном интервале нагрузок практически не будет меняться с изменением тока нагрузки (см. рис. 18.11, зависимость 2). Изменение направления тока в обмотке последовательного возбуждения приводит к созданию встречного по отношению к основному потоку Φ_1 потока Φ_2 . При этом результирующий магнитный поток генератора будет равен

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$$

Это приводит к тому, что с увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах генератора резко падает (см. рис. 18.11, зависимость 3).

Генераторы постоянного тока со смешанным возбуждением с падающей внешней характеристикой так же, как и генераторы с

последовательным возбуждением, целесообразно использовать в условиях возможных частых коротких замыканий (например, для питания дуговых сварочных машин).

Задание по работе

3. Ознакомиться с устройством и конструкцией исследуемого генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
4. Снять и построить основные характеристики исследуемого генератора с параллельным возбуждением.
3. Сделать краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. На демонстрационном стенде «Машины постоянного тока» ознакомиться с устройством генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Записать в лабораторный отчет технические паспортные данные исследуемого генератора:

Тип генератора

Номинальная мощность ($P_{ном}$), кВт

Номинальное напряжение ($U_{ном}$), В

Номинальный ток ($I_{ном}$), А

Номинальная частота вращения ($n_{ном}$), об/мин
собрать схему для испытания генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Монтаж схемы осуществляется соединителями по монтажной схеме, приведенной на рис. 18.13. В качестве приводного двигателя генератора используется асинхронный трехфазный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Сборку схем электродвигателя исследуемого генератора проводят на одной и той же панели.

Перед пуском приводного электродвигателя необходимо:

а) установить рукоятку нагрузочного реостата на панели «Машины постоянного тока» в крайнее левое положение (цепь нагрузки генератора должна быть разомкнута);

б) установить рукоятку регулировочного реостата в цепи тока обмотки возбуждения генератора в крайнее левое положение, т. е. установить минимальный ток возбуждения ($I_{в}$);

в) произвести пуск приводного электродвигателя. Для этого, включив напряжение сети на панели «Машины переменного тока», нажать кнопку «Включение асинхронной и синхронной машины»;

г) при установившейся частоте вращения якоря генератора ($n = const$) увеличить ток возбуждения генератора $I_{в}$ путем изменения сопротивления $R_{в}$ регулировочного реостата возбуждения. При этом необходимо убедиться, что генератор самовозбуждает-

ся. При правильном включении обмотки возбуждения наводимая в якоре генератора ЭДС будет возрастать.

3. Снять характеристику холостого хода генератора $E(I_B)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$. Показания для первой точки характери-

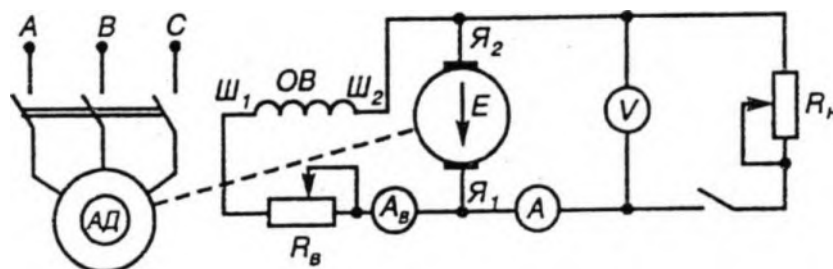


Рис. 18.12

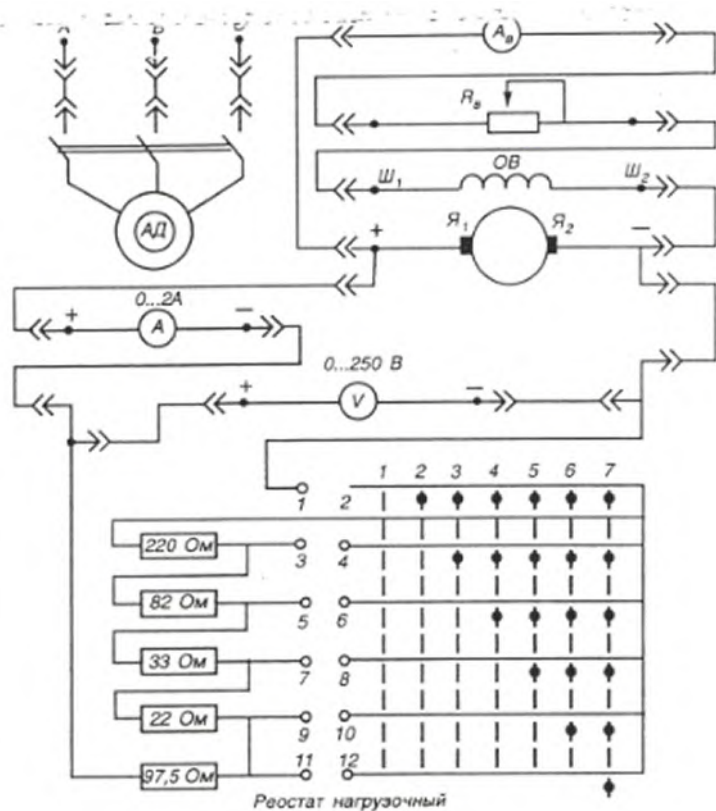


Рис. 18.13

стики снимать при разомкнутой цепи обмотки возбуждения. Установив предварительно ручку регулировочного реостата в крайнее левое положение, включить цепь возбуждения и снять показания в шести-семи точках, плавно увеличивая ток возбуждения I_B до значения, при котором ЭДС E якоря генератора на 10... 15% больше номинального значения напряжения $U_{ном}$ генератора. Затем, плавно уменьшая ток возбуждения до нуля, снять показания измерительных приборов еще для шести-семи точек. При снятии прямой и обратной ветвей характеристики холостого хода $E(I_B)$ не допускается переменное увеличение и уменьшение тока

возбуждения, так как в противном случае будет происходить искажение характеристики из-за влияния явления гистерезиса.

Результаты измерений записать в табл. 18.1

Т а б л и ц а 18.1

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
I_T, A							
E_T, B							
I_i, A							
E_i, B							

4. Снять внешнюю характеристику генератора $U(I)$ при $R_B = \text{const}$ и $n = \text{const}$, начиная с номинального режима (при номинальном напряжении $E_{\text{ном}}$ и номинальном токе $I_{\text{ном}}$). Для этого необходимо:

а) возбудить генератор и установить одновременным изменением сопротивления R_H нагрузки (нагрузочным реостатом) и тока возбуждения I номинальный режим; определить номинальное значение тока возбуждения $I_{\text{ном}}$. В дальнейшем сопротивление R_B реостата возбуждения не изменять;

б) нагрузочным реостатом уменьшить ток нагрузки I до нуля и записать показания приборов в табл. 18.2;

в) постепенно увеличивая нагрузку генератора I от 0 до $1,2 I_{\text{ном}}$, снять показания в шести-семи точках, включая точку номинального режима. Результаты измерений записать в табл. 18.2.

Т а б л и ц а 18.2

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
Измерения							
U, B							
I, A							
I_k, A							
$P^*, кВт$							

* $P = UI$ — мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь.

5. Снять регулировочную характеристику генератора $I_B(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Для этого необходимо:

а) установить на зажимах генератора заданное преподавателем напряжение при токе нагрузки, равном нулю;

б) изменяя нагрузку генератора нагрузочным реостатом R_H , поддерживать регулировочным реостатом R_B напряжение на нагрузке генератора постоянным $U = \text{const}$. Ток нагрузки / при этом должен изменяться в пределах от 0 до $1,2 I_{\text{ном}}$. Результат измерений для шести-семи точек занести в табл. 18.3.

8 Рекус Г.Г., Чесноков В.Н.

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
Измерения							
$u, В$							
$I, А$							
$I_{\text{в}}, А$							

6. Обработка результатов измерений:

а) по полученным в п.3 данным измерений построить зависимость $E(h)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$;

б) по результатам измерений и вычислений в п.4 построить зависимости $U(I)$ и $U(P)$ при $R^* = \text{const}$ и $n = \text{const}$;

в) по построенной зависимости $U(I)$ вычислить процентное повышение напряжения генератора при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода;

г) по результатам измерений и вычислений п. 5 построить зависимость $I_{\text{в}}(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Контрольные вопросы

10.Объясните устройство и принцип действия генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

11.По каким внешним конструктивным признакам можно отличить электрическую машину постоянного тока от электрической машины переменного тока?

12.Укажите условия самовозбуждения генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

13.Объясните, при каких условиях заканчивается процесс самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением и какие факторы влияют на величину ЭДС, возникающую на его зажимах.

14.Поясните вид характеристики холостого хода генератора с параллельным возбуждением.

15.Дайте обоснование причин снижения напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением с увеличением тока нагрузки.

16.Объясните, почему в машинах постоянного тока магнитопровод статора выполняется сплошным (литым), а якоря — наборным из изолированных пластин электротехнической стали.

17.Укажите причину, по которой генератор параллельного возбуждения не возбуждается при изменении полярности подключения к якорю обмотки возбуждения.

18.Поясните, почему при отсутствии тока в обмотке возбуждения генератора постоянного тока с параллельным возбуждением имеет место ЭДС на его зажимах.

10. Объясните различие внешних характеристик генераторов постоянного тока с параллельным, смешанным и последовательным возбуждением.

Практическая работа №4, 3%, №:6 (6 часов).

Тема: «Построение векторных диаграмм токов и напряжений для неразветвленных цепей однофазного переменного тока»

Цель работы: построение векторных диаграмм токов и напряжений исследование неразветвленной электрической цепи синусоидального тока при наличии потребителей с активно-реактивными сопротивлениями, определение параметров цепи, установление условий резонанса напряжений.

Основные теоретические положения

В цепи переменного тока при подаче напряжения \dot{U}

$$\dot{U} = U \sin(\omega t + \alpha)$$

возникает ток $\dot{i} = I \sin(\omega t + \beta)$

в неразветвленной электрической цепи переменного тока, содержащей элементы с параметрами: активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C (рис. 3.1), напряжение питающей сети равно векторной сумме напряжений, действующих на участках цепи. В соответствии с этим выражение для напряжения, подводимого к такой электрической цепи, может быть записано по второму закону Кирхгофа в комплексной форме

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

где $\dot{U}_R = RI$, $\dot{U}_L = jX_L I$, $\dot{U}_C = -jX_C I$ — комплексные напряжения на участках цепи, определяемые как произведения комплексного тока на соответствующие сопротивления: R , $X_L = \omega L$ и $X_C = 1/(\omega C)$ — активное и реактивные индуктивное и емкостное сопротивления; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота напряжения.

По уравнению для комплексного напряжения на входе цепи можно построить векторную диаграмму тока и напряжений электрической цепи, принимая во внимание, что умножение вектора напряжения на множитель $(+j)$ соответствует повороту его относительно вектора тока на угол $\pi/2$ в направлении отсчета положительных углов (против

часовой стрелки), а умножение на множитель $(-j)$ — повороту вектора напряжения на угол $\pi/2$ по часовой стрелке.

Вектор напряжения U_R на активном сопротивлении при этом совпадает с вектором тока I . Угол φ — угол между векторами тока и напряжения, подводимого к цепи (откладывается от вектора тока к вектору напряжения). Построенная таким образом векторная диаграмма для электрической цепи (см. рис. 3.1) представлена на рис. 3.2.

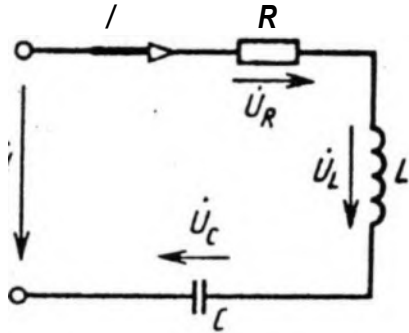


Рис. 3.1

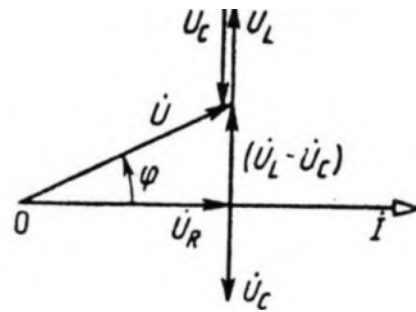


Рис. 3.2

Полученное ранее уравнение для подводимого к электрической цепи комплексного напряжения с учетом его составляющих преобразуется к виду

$$U = Ri + jX_L i - jX_C i = [R + j(X_L - X_C)]i = Zi$$

или к виду уравнения, записанного в комплексной форме по закону Ома для всей цепи:

$$I = U/Z,$$

где $Z = R + j(X_L - X_C)$ — комплексное сопротивление электрической цепи переменного тока.

Модуль комплексного сопротивления (полное сопротивление) цепи переменного тока

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

Из этого выражения следует, что полное сопротивление электрической цепи переменного тока зависит не только от параметров соответствующей цепи, но и от частоты питающего напряжения; причем для линейной цепи значение как полного сопротивления, так и его составляющих не зависит от значения подводимого напряжения.

При этом взаимосвязь между действующими значениями тока и напряжения и полным сопротивлением цепи определяется соотношениями $U = ZI$ или $I = U/Z$

Из треугольника напряжений, представленного на векторной диаграмме рис. 3.2, можно получить треугольник сопротивлений (рис. 3.3) для рассматриваемой цепи, разделив стороны этого треугольника на комплексный ток I , из которого следует, что

$$\cos \varphi = R/Z, \sin \varphi = X/Z = (X_L - X_C)/Z.$$

Полученные выражения показывают, что угол сдвига фаз φ между током I и напряжением U питающей сети зависит от характера сопротивлений, включенных в цепь переменного тока.

Умножив стороны треугольника сопротивлений на квадрат тока в цепи I^2 , получим треугольник мощностей (рис. 3.4). Активная мощность цепи переменного тока $P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi$, отсюда $\cos \varphi = P/S$.

Из треугольника мощностей можно установить взаимосвязь между активной P , полной S и реактивной Q мощностями электрической цепи:

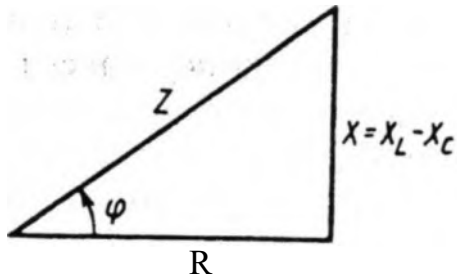


Рис. 3.3

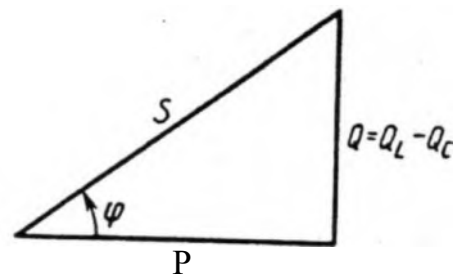


Рис. 3.4

$$P = S \cos \varphi, Q = S \sin \varphi, S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

При этом реактивная составляющая полной мощности цепи находится как разность реактивной индуктивной Q_L и реактивной емкостной Q_C составляющих: $Q = Q_L - Q_C$

Выражения для полной мощности цепи переменного тока в комплексной форме записывают в следующем виде:

$$S = UI = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C)$$

$$\text{или } S = S(\cos \varphi) + j S(\sin \varphi),$$

где $I^* = I^H$ — сопряженное значение комплексного тока $I = I e^{j\omega t}$.

В неразветвленной электрической цепи переменного тока при определенных условиях может наступить резонанс напряжений (явление в неразветвленной электрической цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивный и емкостный элементы, при котором разность фаз напряжения и тока на входе цепи равна нулю) — особое состояние цепи переменного тока при последовательном

включении элементов с индуктивностью L и емкостью C , при котором индуктивное сопротивление цепи оказывается равным емкостному ее сопротивлению ($X_L = X_C$).

Резонанс напряжений, как это видно из приведенных выражений для X_L и X_C , можно получить при изменении частоты переменного тока, емкости или индуктивности, так же как и при одновременном изменении параметров цепи $X_L = X_C$.

сое

В простейшем случае резонанс напряжений может быть получен в электрической цепи переменного тока при последовательном включении катушки индуктивности и конденсаторов. При этом, изменяя емкость конденсаторов при постоянных параметрах катушки, получают резонанс напряжений при неизменных значениях напряжения и индуктивности, частоты и активного сопротивления цепи. При изменении емкости C конденсаторов происходит изменение реактивного емкостного сопротивления. При этом полное сопротивление цепи также изменяется, следовательно, изменяются ток, коэффициент мощности, напряжения на катушке индуктивности, конденсаторах и активном сопротивлении катушки и активная, реактивная и полная мощности электрической цепи. Зависимости тока I , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и полного сопротивления Z цепи переменного тока в функции емкостного сопротивления (резонансные кривые) для рассматриваемой цепи приведены на рис. 3.5.

Векторная диаграмма тока и напряжений этой цепи при резонансе

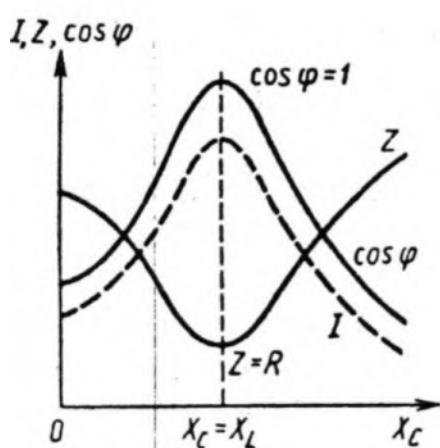


Рис. 3.5

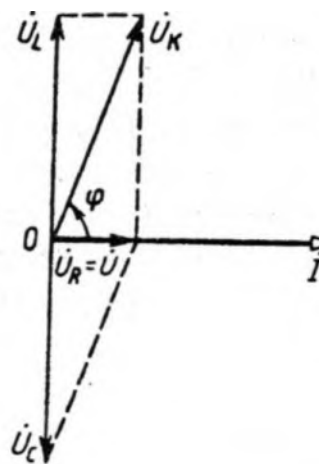


Рис.

представлена на рис. 3.6. Как видно из диаграммы, реак-

тивная составляющая напряжения U_L на катушке при резонансе равна напряжению U_C на конденсаторе. При этом напряжение на катушке индуктивности U_K при резонансе вследствие того, что катушка кроме реактивного сопротивления X_L обладает еще и активным

сопротивлением R_K , оказывается больше напряжения на конденсаторе. Поэтому точка резонанса в этих условиях определяется по наибольшему значению тока в электрической цепи.

Анализ представленных выражений, а также рис. 3.5 и 3.6 показывают, что резонанс напряжений характеризуется рядом существенных факторов.

1. При резонансе напряжений полное сопротивление электрической цепи переменного тока принимает минимальное значение и оказывается равным ее активному сопротивлению, т. е.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R, \text{ так как при этом } X_L = X_C.$$

2. Из этого следует, что при неизменном напряжении питающей сети ($C = \text{const}$) при резонансе напряжений ток в цепи достигает наибольшего значения $I = U/Z = U/R$. Теоретически ток может достигать больших значений, определяемых напряжением сети и активным сопротивлением катушки. При малом значении активного сопротивления ток может достигать большого значения.

3. Коэффициент мощности при резонансе $\cos(\varphi) = \cos(\arctan((X_L - X_C)/R)) = R/Z = R/R = 1$, т. е. принимает наибольшее значение, которому соответствует угол $\varphi = 0$. Это означает, что вектор тока I и вектор напряжения $U_{\text{сети}}$ при этом совпадают по направлению, так как они имеют равные начальные фазы $\varphi = 0$.

4. Активная мощность при резонансе $P = RI^2$ имеет наибольшее значение, равное полной мощности S , в то же время реактивная мощность цепи $Q = XLI^2 - XC I^2$ оказывается равной нулю: $Q = QL - QC = 0$.

При этом реактивная индуктивная и реактивная емкостная составляющие полной мощности $QL = QC - XLI^2 = XC I^2$ могут приобретать теоретически весьма большие значения, в зависимости от значений тока и реактивных сопротивлений.

5. При резонансе напряжений напряжения на емкости и индуктивности оказываются равными $U_C = U_L = X_C I = X_L I$ в зависимости от тока и реактивных сопротивлений могут принимать большие значения, во много раз превышающие напряжение питающей сети. При этом напряжение на активном сопротивлении оказывается равным напряжению питающей сети, т. е. $U_R = U$.

Резонанс напряжений в промышленных электротехнических установках нежелательное и опасное явление, так как может привести к аварии вследствие недопустимого перегрева отдельных элементов электрической цепи или к пробое изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, изоляции кабелей и конденсаторов при возможном перенапряжении на отдельных участках цепи. В то же время резонанс напряжений в электрических цепях переменного тока широко

используется в радиотехнике и электронике различного рода приборах и устройствах, основанных на резонансном явлении.

Задание по работе

1. Провести экспериментальное исследование неразветвленной электрической цепи переменного тока, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности, батареи конденсаторов и резисторов, а также электрических цепей, состоящих из различных сочетаний указанных элементов.
2. По экспериментальным данным провести расчет параметров соответствующих электрических цепей.
3. Экспериментально определить параметры, при которых наступает резонанс напряжений для заданной электрической цепи, и построить резонансные кривые.
4. По полученным данным построить векторные диаграммы для различных режимов исследуемой электрической цепи.
5. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием панелей № 3 и № 4 лабораторного стенда и измерительным комплектом К505.
2. Записать в отчет по лабораторной работе технические данные измерительных приборов и оборудования, используемого при выполнении работы.
3. Собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой представлена на рис. 3.7. В соответствии с монтажной схемой рис. 3.8 подключить параллельно каждому участку цепи вольтметры V_R , V_L , V_C

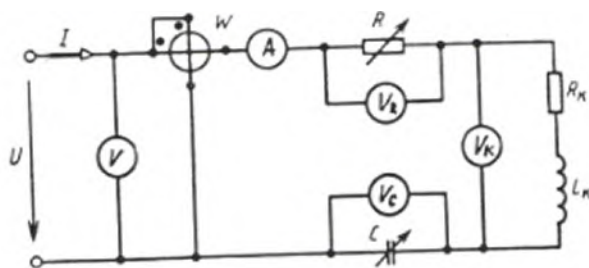


Рис. 3.7

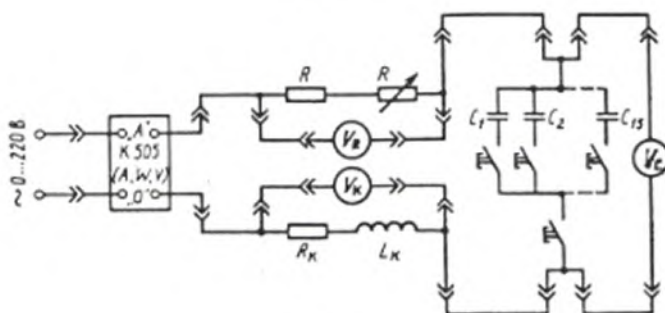


Рис. 3.8

4. На панели № 4 соответствующими тумблерами установить емкость батареи конденсаторов, равной 80—100 мкФ, и наибольшее сопротивление переменного резистора R .

5. Питание электрической цепи осуществлять от регулируемого источника синусоидального напряжения, расположенного на панели источников питания. Включение источника питания проводится нажатием кнопок «сеть» и «переменное». Перед включением необходимо убедиться, что ручка регулятора источника питания находится в крайнем левом положении ($\theta = 0$).

6. Измерение тока, мощности, напряжения на входе электрической цепи производить амперметром, ваттметром и вольтметром измерительного комплекта К505.

7. Установить заданное преподавателем значение напряжения на входе электрической цепи и записать показания всех измерительных приборов в табл. 3.1.

ности, близком к единице, можно считать, что в цепи имеет место резонансный режим. Записать показания всех приборов при резонансе в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Номера измерений	Измерения					Вычисления								
	«		CO	<	на,"	Z, Ом	s O	e aS и	S O	O	S O	X U. S	$\frac{U}{U_0}$	$\frac{P}{P_0}$
1														
2														

10. По измеренным значениям табл. 3.1 подсчитать параметры всех элементов электрической цепи и построить в масштабе соответствующие векторные диаграммы тока и напряжений и треугольник сопротивлений для катушки индуктивности.

11. По полученным в табл. 3.2 опытными и расчетными данными построить в масштабе векторные диаграммы для трех режимов цепи: при $U_K > U_C$, $U_K = U_C$ и $U_K < U_C$.

12. Построить в масштабе кривые изменения тока, коэффициента мощности, напряжения на катушке, напряжения на батарее конденсаторов и полного сопротивления электрической цепи в зависимости от емкости конденсаторов, т. е. I , $\cos(\varphi)$, C/K , U_C и Z в функции Сили X_C .

Расчетные формулы для табл. 3.1 и 3.2. ©=2я/=2я-50=314

$$\text{рад/с}; Z=U/I; R=UR/I; X_c=Uc/I=l/o)C; Z_K=\wedge^4 R_K=PJP;$$

$$X_L=X_K=, \sqrt{Z^2 - R^2} = aL_K; S=UI; \cos q \geq P/S.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление резонанса напряжений и при каких условиях оно возникает?
2. Какую опасность представляет резонанс напряжений для электротехнических устройств?
3. Изменением каких параметров электрической цепи (см. рис. 3.1) можно получить резонанс напряжений?
4. С помощью каких приборов и по какому признаку можно судить о возникновении резонанса напряжений в электрической цепи?
5. Проведите анализ построенных векторных диаграмм до и после резонанса напряжений и дайте объяснение, в каком случае напряжение опережающее, а в каком — отстающее.
6. К чему приводит изменение активного сопротивления электрической цепи при резонансе напряжений?
7. Сохранится ли резонанс напряжений, если изменить только напряжение питающей сети? Можно ли получить резонанс напряжений путем изменения других параметров питающего напряжения?
8. Запишите выражения для тока, полного сопротивления и коэффициента мощности электрической цепи при резонансе напряжений.
9. Определите емкость конденсаторов при резонансе напряжений по показаниям вольтметра и амперметра.
10. В электрической цепи (см. рис. 3.7) заданы параметры всех элементов (R , R_K , L_K , C), показания ваттметра и вольтметра на входе цепи. Запишите выражения для определения показаний амперметра и вольтметра на отдельных участках цепи.

Практическая работа № 7. (2 часа)

Тема: «Соединение потребителей в «звезду» и «треугольник»».

Цель работы: исследование режимов работы симметричных и несимметричных потребителей электроэнергии в трехфазных электрических цепях, определение основных соотношений между фазными и линейными значениями токов и

напряжений при симметричной нагрузке и включении потребителей в «звезду» и «треугольник».

Основные теоретические положения

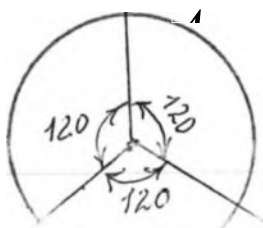
В современных условиях электрическая энергия вырабатывается преимущественно источниками энергии с трехфазной системой напряжений. Такие источники широко применяют в технике. Объясняется это тем, что трехфазная система переменного тока является наиболее экономичной. В качестве трехфазных источников напряжений на электрических станциях используют трехфазные синхронные генераторы, на статоре которых размещаются три фазные обмотки (фазы), смещенные в пространстве относительно друг друга на угол 120° . При вращении ротора, выполненного в виде электромагнита постоянного тока, в обмотках генератора будут индуцироваться переменные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга по фазе также на $120^\circ(2\pi/3)$: $\mathcal{E} = EA'S \leftarrow t^* \mathcal{E}^*$

$$e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad e_C = E_{Cm} \sin(\omega t + 2\pi/3);$$

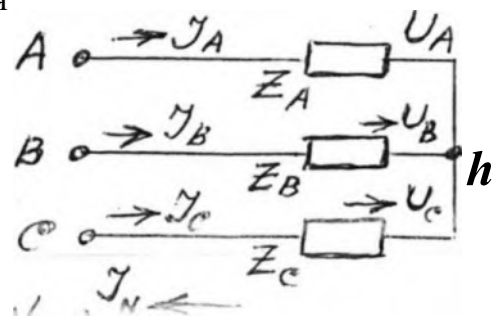
где $E_{A\Phi} = E_{B\Phi} = E_{C\Phi} = E_\Phi$ - значения ЭДС соответственно фаз А, В и С.

Таким образом, под трехфазной системой понимается совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС (напряжения) одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$, создаваемые общим источником электрической энергии.

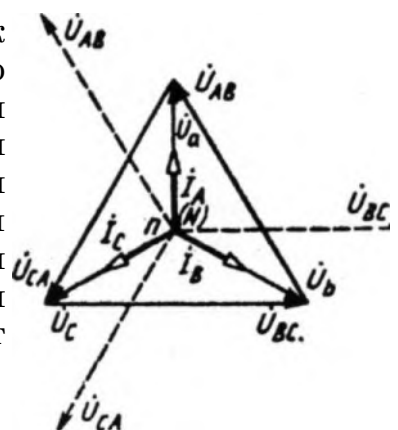
Под действием трехфазной системы ЭДС на зажимах трехфазного потребителя создается трехфазная симметричная система напряжений, сдвинутых по фазе на угол 120° , т.е. на угол $2\pi/3$, и имеющих одинаковые амплитудные и действующие значения (векторная диаграмма представлена на рис.5.1)



$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$$



Сопротивления линейных проводов, так как и сопротивление нейтрального, обычно малы и ими можно пренебречь. При этом линейные напряжения генератора равны линейным напряжениям потребителя и соответственно фазные напряжения генератора равны фазным напряжениям потребителя. В этом случае векторная диаграмма напряжений потребителя будет



же

Рис. 5.3

совпадать с векторной диаграммой напряжений генератора. Исходя из полученных уравнений и построений, можно сделать вывод о том, что линейные напряжения потребителя, так же как и фазные, сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$ (рис. 5.3). На рис. 5.3—5.8. принято:

$$Z_a—R_a, Z_b—R_b, Z_c—R_c$$

Из диаграммы следует, что при соединении потребителя электроэнергии звездой при симметричной нагрузке между фазными и линейными напряжениями существует соотношение:

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{ф}$$

Фазные токи потребителя определяют по закону Ома:

$$I_A = U_a / Z_a, \quad I_B = U_b / Z_b, \quad I_C = U_c / Z_c$$

При этом напряжение между нейтральными токами $U_{NN} = 0$. Так как фазные напряжения и фазные сопротивления потребителя электроэнергии равны между собой, то фазные токи при симметричной нагрузке также равны между собой $I_A = I_B = I_C = I^*$, и сдвинуты относительно фазных напряжений на равные углы определяемые из выражений

$$\operatorname{tg} \varphi_a = R_a / X_a = \operatorname{tg} \varphi_b = R_b / X_b = \operatorname{tg} \varphi_c = R_c / X_c$$

При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе, определяемый как векторная сумма фазных токов, оказывается равным нулю, поэтому при симметричной нагрузке этот провод становится не нужным и применять его нет смысла. При несимметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз в общем случае не равны между собой, т. е. $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$

Пренебрегая сопротивлениями линейных проводов, можно считать, что линейные напряжения потребителя независимо от характера нагрузки равны соответствующим линейным напряжениям генератора, т. е. система линейных напряжений и при несимметричной нагрузке симметрична.

При включении нейтрального провода и несимметричной нагрузке (сопротивлением нейтрального провода пренебрегаем) потенциал нейтральной точки потребителя равен потенциалу нейтральной точки N генератора. Следовательно, фазные напряжения потребителя равны соответствующим фазным напряжениям генератора, а напряжение между нейтральными точками $U_{NN} = 0$.

При наличии нейтрального провода и несимметричной нагрузке геометрическая сумма фазных токов трехфазной системы в соответствии с первым законом Кирхгофа для нейтральной точки равна току в нейтральном проводе

$$I_A + I_B + I_C = I_N$$

При этом векторная диаграмма для несимметричной нагрузки с нейтральным проводом имеет вид, представленный на рис. 5.4.

При отключении нейтрального провода потенциал нейтральной точки и потребителя электроэнергии не равен потенциалу нейтральной точки N

генератора при несимметричной нагрузке, так как эти точки не соединены между собой. При этом нейтральная точка n на векторной диаграмме потребителя сместится из своего первоначального положения в другое («0», при котором геометрическая сумма фазных токов потребителя равна нулю:

$$I_A + I_B + I_C = 0.$$

В этом случае векторная диаграмма принимает вид, представленный на рис. 5.5, из которой следует, что при несимметричной нагрузке в трехфазной системе без нейтрального провода фазные напряжения потребителя оказываются не равными друг другу. При этом на одних фазах может быть пониженное напряжение по сравнению с фазными напряжениями генератора, а на других — повышенное.

В этом случае между фазными токами, напряжениями и сопротивлениями существуют те же соотношения, обусловленные законом Ома, что и при симметричной нагрузке.

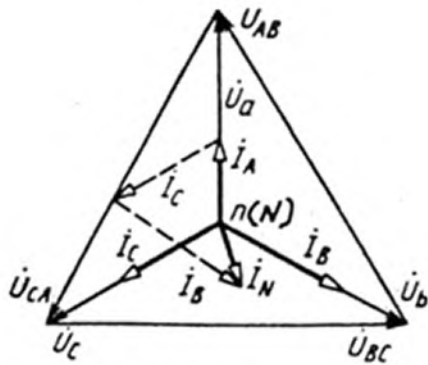


Рис. 5.4
(Несимметричная)

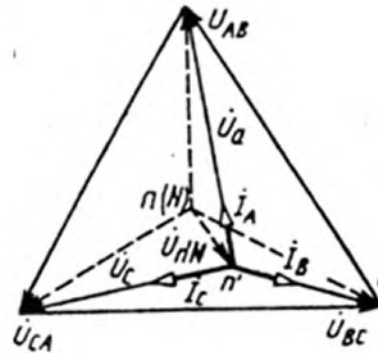


Рис. 5.5 (Несимметричная нагрузка без нейтрального провода)

Короткое

замыкание одной фазы потребителя электроэнергии, соединенного звездой без нейтрального провода, следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при котором напряжение на короткозамкнутой фазе потребителя становится равным нулю, а напряжение на двух других фазах увеличивается до значений, равных линейным напряжениям (рис. 5.6). Нейтральная точка n на векторной диаграмме смещается в этом случае в вершину треугольника линейных напряжений $\{rf\}$, соответствующую короткозамкнутой фазе. При этом напряжение $U_{Nn'}$ между нейтральными точками генератора и потребителя становится равным фазному напряжению питающего генератора.

Ток в короткозамкнутой фазе зависит от сопротивлений, включенных в двух других фазах потребителя. Геометрическая сумма векторов всех трёх фазных токов в этом случае равна нулю.

Отключение нагрузки одной из фаз в трехфазной системе при соединении потребителя электроэнергии звездой без нейтрального провода можно также рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при которой сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. При этом если сопротивления двух других фаз оказываются равными, то нейтральная точка n на векторной диаграмме переместится в середину одной из сторон треугольника (n^2) линейных напряжений (рис. 5.7).

При обрыве линейного провода трехфазный потребитель находится под линейным напряжением, так как при этом ни одна из точек нагрузки не будет под потенциалом оборванного линейно-

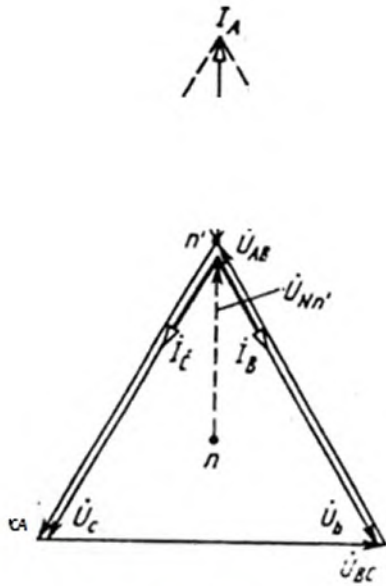


Рис. 5.6
(Короткое замыкание фазы Z_a при отсутствии нейтрального провода и U₀)

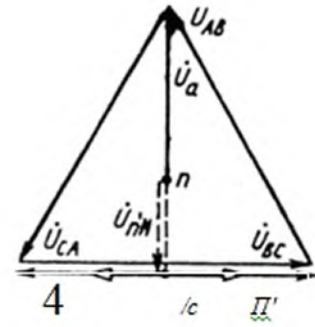


Рис. 5.7
(Отключение нагрузки фазы Z₀ при отсутствии нейтрального провода и U₀)

$$\vec{I}_B = -\vec{I}_C$$

Рис. 5.8
(Обрыв линейного провода A при отсутствии нейтрального провода и U₀)

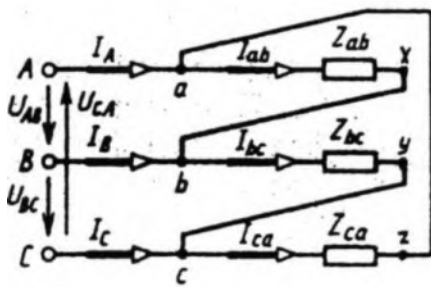


Рис. 5.9

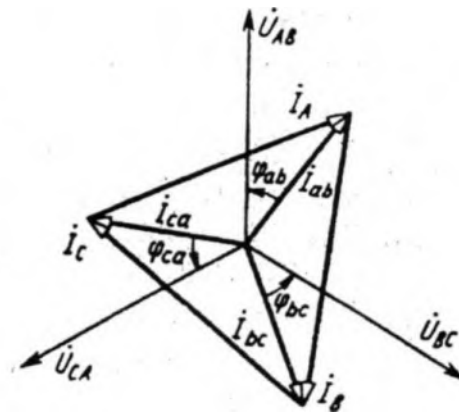


Рис. 5.10

го провода. В этом случае векторная диаграмма трехфазного потребителя при соединении звездой и отсутствии нейтрального провода приобретает вид, представленный на рис. 5.8.

Соединение, при котором конец первой фазы соединяется с началом второй **Б**, конец второй **у** — с началом третьей **с**, а конец третьей **z** — с началом первой **а**, называется соединением трехфазного потребителя электрической энергии и треугольником. При этом начала всех фаз потребителя присоединяют

к источнику электрической энергии с помощью линейных проводов. Из рис. 5.9 видно, что каждая фаза потребителя присоединяется соответственно к двум линейным проводам. Поэтому при соединении потребителя треугольником фазные напряжения оказываются равными соответствующим линейным напряжениям: $U_{\text{ф}}/U_{\text{л}}=C/\sqrt{3}$. Фазные токи при соединении трехфазного потребителя треугольником не равны линейным, так как в начале каждой фазы потребителя имеется узел разветвления токов. При этом независимо от сопротивлений потребителя между фазными и линейными токами существуют соотношения, полученные на основании первого закона Кирхгофа для узлов разветвления токов:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}, \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}, \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

Пользуясь указанными соотношениями, по векторам фазных токов, i_{ab} , i_{bc} , i_{ca} можно построить векторы линейных токов I_A , I_B и I_C

Соотношения между фазными напряжениями, токами и сопротивлениями при соединении потребителя треугольником находят в соответствии с законом Ома: $I_{ab} = U_{ab}/Z_{ab}$; $i_{bc} = U_{bc}/Z_{bc}$; $I_C = U_{ca}/Z_{ca}$. На рис. 5.10—5.13 принято: $Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab}$, $Z_{bc} = R_{bc} + jX_{bc}$, $Z_{ca} = R_{ca} + jX_{ca}$

Углы сдвига по фазе между векторами фазных напряжений, U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} и соответствующих фазных токов i_{ab} , i_{bc} , i_{ca} определяются фазными сопротивлениями потребителя: $\varphi_{ab} = \arctg X_{ab}/R_{ab}$; $\varphi_{bc} = \arctg X_{bc}/R_{bc}$; $\varphi_{ca} = \arctg X_{ca}/R_{ca}$.

При симметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз одинаковы, т. е. $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$. При этом как активные, так и реактивные сопротивления фаз потребителя равны: $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$, $X_{ab} = X_{bc} = X_{ca}$, причем реактивные сопротивления имеют одинаковый (индуктивный или емкостный) характер. В этом случае фазные токи и соответствующие углы сдвига по фазе между фазными напряжениями и фазными токами будут равны между собой: $i_{ab} = i_{bc} = i_{ca}$, $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$.

Таким образом, при соединении трехфазного потребителя электроэнергии треугольником при симметричной нагрузке токи всех трех фаз равны между собой и сдвинуты относительно соответствующих линейных напряжений на одинаковые углы. Из векторной диаграммы для симметричной нагрузки при соединении потребителя треугольником, представленной на рис. 5.10, видно, что линейные токи оказываются равными и сдвинутыми относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$. При этом между фазными и линейными токами существует соотношение:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$$

Рис. 5.11 (Несимметричная нагрузка)

При несимметричной нагрузке фазные токи и углы сдвига по фазе между фазными токами и фазными напряжениями в общем случае не одинаковы. Так же как и при симметричной нагрузке, они могут быть определены по

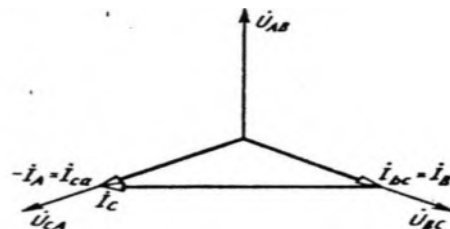
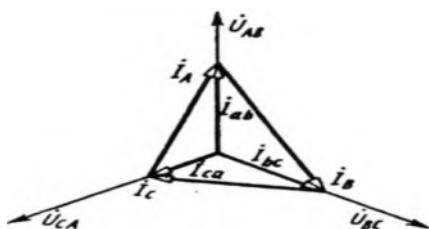


Рис. 5.12 (Отключение)

соответствующим формулам. Линейные токи и в этом случае определяются через соответствующие фазные токи. Векторная диаграмма, построенная для случая несимметричной активной нагрузки трехфазного потребителя при соединении треугольником, представлена

Отключение нагрузки одной из фаз следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, когда сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. В этом случае векторная диаграмма приобретает вид (представленный на рис. 5.12

При обрыве линейного провода в цепи трехфазного потребителя электроэнергии, соединенного треугольником, следует рассматривать его как потребителя, подключенного к однофазному источнику (U_{AB}). Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая представлена на рис. 5.13.

Активную мощность трехфазного потребителя электроэнергии в общем случае можно определить как сумму активных мощностей всех его фаз:
при соединении звездой

$$P = P_l + P_v + P_c = U_a I_a \cos(\rho_a) + U_b I_b \cos(\rho_b) + U_c I_c \cos(\rho_c);$$

при соединении треугольником

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{AB} I_{ab} \cos(\rho_{ab}) + U_{BC} I_{bc} \cos(\rho_{bc}) + U_{CA} I_{ca} \cos(\rho_{ca}).$$

При симметричной нагрузке фазные напряжения, токи и углы сдвига фаз оказываются равными. Вследствие этого равны также и активные мощности всех трех фаз потребителя электроэнергии.

Активная мощность трехфазного потребителя независимо от схемы его соединения может быть найдена через линейные токи и напряжения:

$$P = 3 I_{\phi} U_{\phi} \cos \rho = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos \rho \quad \text{или} \quad P = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos \rho.$$

Аналогично можно получить и формулу для реактивной мощности трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$Q = 3 I_{\phi} U_{\phi} \sin \rho \quad \text{или} \quad Q = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \sin \rho.$$

Полная мощность трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \quad \text{или} \quad S = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}}.$$

Задача по работе

1. Исследовать трехпроводную трехфазную электрическую цепь при соединении потребителей электроэнергии звездой и установить соотношения между линейными и фазными токами $I_{\text{л}}$ и

напряжениями $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{ф}}$ при симметричном и несимметричном режимах работы.

2. Исследовать четырехпроводную трехфазную цепь при соединении потребителей звездой и установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при симметричном и несимметричном режимах работы.

3. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей треугольником и установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.
4. Для исследуемых цепей построить векторные диаграммы токов / и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы.
5. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием, используемыми при выполнении работы, а также со схемой включения измерительного комплекта К505 при измерениях токов, напряжений и мощностей в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных электрических цепях.
2. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей электрической энергии звездой (см. рис. 5.2).
3. Собрать трехпроводную трехфазную цепь (см. рис. 5.2) по монтажной схеме рис. 5.14, используя в качестве нагрузки каждой фазы последовательно включенные резисторы.
4. Измерить токи и мощности по фазам с помощью измерительного комплекта К505. Измерение фазных и линейных напряжений проводить цифровым вольтметром, установленным на панели стенда, поочередно подключая его к соответствующим точкам цепи. Питание цепи осуществлять от трехфазного источника, расположенного на панели источников питания с $U_{л} = 220$ В.

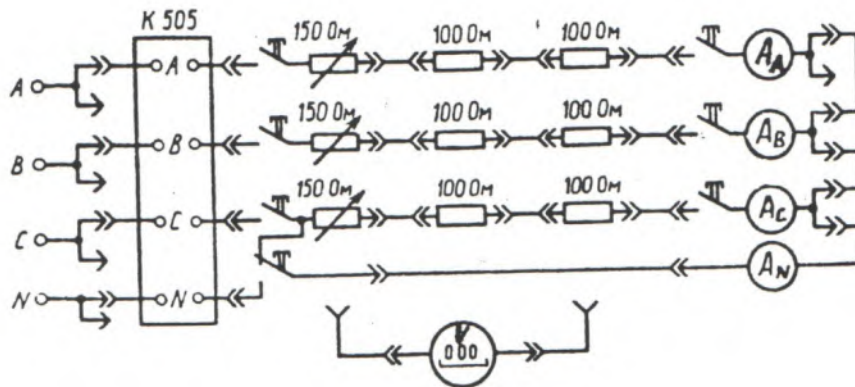


Рис. 5.14

5.
Изменяя
сопротивле
ние

переменных резисторов в фазах трехфазной цепи, измерить и записать в табл. 5.1 значения линейных токов I_n , фазных I_{ϕ} и линейных U_n напряжений, а также показания ваттметра для различных режимов работы цепи.

Т а б л и ц а 5.1

Номер а измере ний	Режим работы цепи	Изменения										Вычислен ия				
		<<	<	<	Ш	И	н	ВQ	я	0Q	<<	aa	aa	н	С _л /С/φ	

			■3	4	■	3			па.	3	5	3	ч	5	i	a	—
--	--	--	----	---	---	---	--	--	-----	---	---	---	---	---	---	---	---

А. Соединение потребителей электроэнергии звездой без нейтрального провода

1	Симметричный				—												
2	Несимметричный ¹				—												
3	Обрыв фазы ²				—												—
4	Обрыв линейного провода ³				—												—
5	Короткое замыкание фазы ⁴				—												—

Б. Соединение потребителей электроэнергии звездой с нейтральным проводом

1	Симметричный				—									0			
2	Несимметричный													0			

¹ При включении трехфазного потребителя по трехпроводной схеме и несимметричной нагрузке показания ваттметра комплекта К505 при измерении фазных мощностей P_A , P_B и P_C не соответствуют действительным фазным мощностям, так как потенциальная обмотка ваттметра подключена к искусственной нулевой точке, суммарная же мощность потребителя $P = P_A + P_B + P_C$ соответствует действительной мощности.

² Обрыв одной из фаз потребителя осуществляется отсоединением конца соответствующего нагрузочного резистора от линейного провода.

³ Обрыв линейного провода проводить отключением штекерного соединителя от источника питания.

⁴ Короткое замыкание фазы осуществляется шунтированием нагрузки одной из фаз A , B или C при включенных нагрузках двух других фаз.

6. Подключить к исследуемой трехфазной цепи нейтральный провод. Для этого штекерное гнездо 0 источника питания соединить с соответствующей генераторной клеммой измерительного комплекта, а нагрузочную клемму — с соответствующим нагрузке штекерным гнездом.

7. Измерить все токи, напряжения и мощности при несимметричном (движок переменного резистора фазы A находится в правом крайнем положении, фазы B — в левом крайнем, фазы C — в среднем) и симметричном (движки всех переменных резисторов находятся в крайнем правом положении) режимах работы цепи, результаты измерений записать в табл. 5.1.

8. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей треугольником (см. рис. 5.9) в тех же режимах, что и при соединении звездой (см. п. 7) при тех же положениях движков резисторов в фазах A , B и C .

9. Собрать электрическую цепь треугольником (см. рис. 5.9) по монтажной схеме (рис. 5.15).

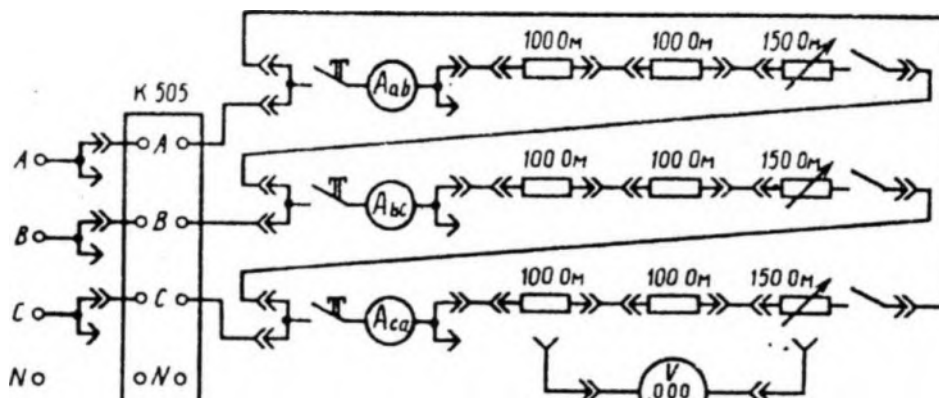


Рис. 5.15

10. Измерить линейные токи I_L и фазные активные мощности P_ϕ , измерительным комплектом К505, а линейные напряжения U_L — цифровым вольтметром.

Для измерения фазных токов использовать амперметры на панели стенда с пределом измерения 1 А.

11. Изменяя сопротивления переменных резисторов, измерить и записать в табл. 5.2 значения линейных I_L и фазных I_ϕ токов, линейных напряжений U_L , а также показания ваттметра для различных режимов работы цепи, соединенной треугольником.

12. Обработать результаты измерений по п. 2, 6 и 8:

а) подсчитать активные мощности отдельных фаз $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \phi$ и общую мощность $P = \sum P_\phi$ для симметричных режимов рабо

ты; сравнить вычисленные значения с результатами измерений;

б) определить соотношения между фазными I_ϕ и линейными I_L значениями напряжений (п. 2 и 6), а также фазными I_ϕ и линейными I_L значениями токов (п. 8) для симметричных и несимметричных режимов работы цепи; внести эти соотношения в табл. 5.1 и 5.2;

Т а б л и ц а 5.2. Соединение потребителей электроэнергии треугольником

Номера измерений	Режим работы цепи	Измерения										Вычисления		
		U_A	U_B	U_C , А	$P_{\phi B}$, Вт	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_{ϕ}	U_L	U_{ϕ}	P , Вт		
1	Симметричный													
2	Несимметричный													
3	Обрыв фазы													—
4	Обрыв линейного провода													—

в) по данным измерений построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы цепи по указанию преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение трехфазной системы синусоидального тока.
2. Поясните преимущества трехфазной системы синусоидального тока в сравнении с однофазной системой.
3. Укажите способы соединения потребителей электроэнергии в трехфазной системе.
4. Объясните назначение нейтрального провода и поясните, почему в этот провод не включаются разъединители и предохранители.
5. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении потребителей электроэнергии звездой и треугольником?
6. Укажите способы включения ваттметров для измерения активной мощности в четырехпроводных и трехпроводных трехфазных электрических цепях.
7. Объясните, почему опасно короткое замыкание фазы потребителя электроэнергии в четырехпроводной системе трехфазной цепи.
8. Укажите условия симметрии трехфазного потребителя электроэнергии.
9. Как изменятся напряжения и токи потребителя электроэнергии в четырехпроводной трехфазной симметричной системе при отключении нейтрального провода?
10. Поясните, в каком случае нельзя использовать метод двух ваттметров при измерении активной мощности трехфазного потребителя электроэнергии.

Лабораторная работа № 4. (2 часа)

«Устройство асинхронного электродвигателя и генератора».

Цель работы: ознакомление с устройством, принципом действия, основными характеристиками и методами испытания асинхронного трехфазного электродвигателя.

Основные теоретические положения.

Асинхронные электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. В зависимости от системы переменного тока асинхронные электродвигатели выполняются трех-или однофазными. В технике наиболее распространены асинхронные трехфазные электродвигатели.

Асинхронный трехфазный электродвигатель состоит из неподвижного статора (рис. 13.1) и вращающегося ротора (рис. 13.2,13.3). статор двигателя представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. В пазах сердечника статора (см. рис. 13.1) уложена трехфазная обмотка статора, выполненная из изолированного провода и состоящая из трех отдельных обмоток

фаз, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° . Обмотки фаз соединяются между собой звездой или треугольником, в зависимости от значения подводимого напряжения.

Ротор асинхронного электродвигателя изготавливают в двух исполнениях: короткозамкнутым (см. рис. 13.2) и с контактными кольцами (см. рис. 13.3).

Короткозамкнутый ротор представляет собой ферромагнитный сердечник в виде цилиндра с пазами, в которые уложена обмотка ротора, состоящая из медных или алюминиевых стержней. Эти стержни соединяются между собой торцовыми кольцами и образуют цилиндрическую клетку. В большинстве случаев клетка ротора отливается из алюминия или из сплава на его основе. Для уменьшения потерь мощности в магнитопроводе ротор, так же как и статор, собирают из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

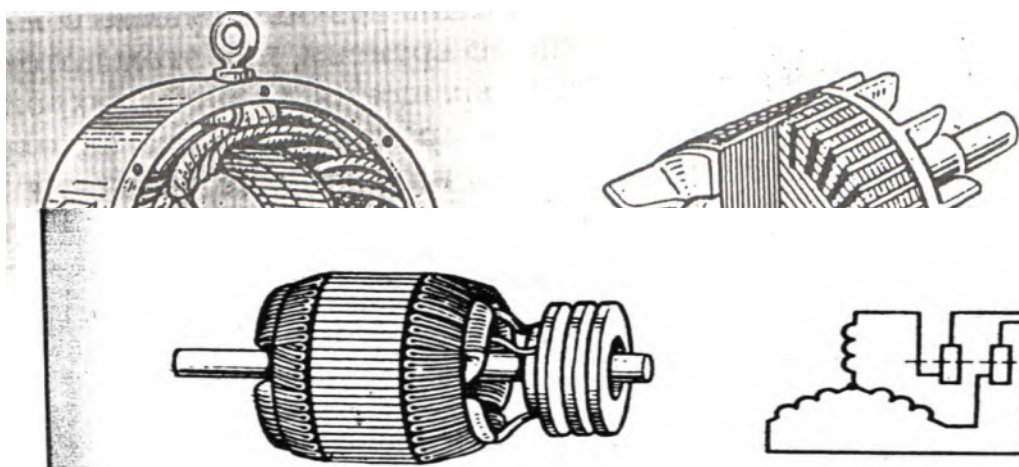


Рис. 13.3

Ротор с контактными кольцами (см. рис. 13.3), называемый иногда также фазным, имеет трехфазную обмотку, выполненную изолированным проводом, которая в конструктивном отношении мало чем отличается от обмотки статора двигателя. В большинстве случаев обмотка ротора соединяется в звезду. Свободные концы обмотки подводятся к контактными кольцам ротора. В процессе работы контактные кольца скользят по неподвижным щеткам и при этом обеспечивают электрическое соединение обмотки вращающегося ротора с трехфазным неподвижным реостатом, подключенным к щеткам (рис. 13.4).

Такое устройство позволяет изменять активное сопротивление электрической цепи ротора асинхронного двигателя в процессе его вращения, что необходимо для уменьшения значительного пускового тока, а также для регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя при работе и изменения пускового момента двигателя.

При подаче к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения в каждой его фазе будет создаваться магнитный поток, изменяющийся с частотой питающей сети. При этом потоки отдельных фаз оказываются сдвинутыми относительно друг друга на угол 120° как во времени, так и в пространстве.

Возникаемый при этом результирующий магнитный поток : оказывается вращающимся. В теоретической части курса элек-Тротехники показано, что значение результирующего магнитного потока $\Phi = |\Phi_T|$ постоянно во времени, при этом поток вращается в пространстве с частотой вращения, равной синхронной $n \setminus$.

Для изменения направления вращения ротора, асинхронного Т двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля, т. е. изменить порядок чередования фаз обмотки статора переключением любых двух из трех проводов, питающих Т двигатель от трехфазной системы напряжений.

Результирующий магнитный поток при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как обмотка ротора асинхронного двигателя имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который, взаимодействуя с

магнитным потоком статора, создает электромагнитный момент двигателя. Под действием этого момента ротор вращается в сторону вращающегося магнитного потока двигателя, причем частота вращения ротора двигателя всегда меньше частоты вращения вращающегося магнитного поля. Если ротор вращается с частотой поля, то его обмотка не пересекается этим полем и в ней не наводится ЭДС. Следовательно, при отсутствии тока в роторе электромагнитный момент двигателя равен нулю. При этом двигатель замедляет свой ход до тех пор, пока в роторе не появится ток, необходимый для обеспечения соответствующего момента, и двигатель продолжает вращаться при этой частоте вращения m .

Частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения) находится в строгой зависимости от частоты f подводимого напряжения и числа пар полюсов p двигателя; $n \setminus = 60/f/p$.

Из этого следует, что при принятой в стране промышленной частоте питающего напряжения ($f = 50$ Гц) наибольшее число оборотов магнитного поля оказывается равным 3000 об/мин при $p = 1$. При увеличении числа пар полюсов частота вращения магнитного поля уменьшается, а следовательно, снижается и частота вращения ротора m двигателя. При $p = 2, n \setminus = 1500$ об/мин и т. д.

Асинхронный электродвигатель характеризуется номинальными данными, на которые он рассчитан. Основные технические данные двигателя указываются в соответствующих каталогах, а также в паспортах, выполненных в виде специальных табличек, закрепленных на корпусах двигателей.

Асинхронные трехфазные электродвигатели имеют шесть выводов обмотки статора (три начала и три конца обмоток фаз). Начала обмоток каждой из трех фаз маркируются G, C_2, C_3 , а концы соответственно C^*, C_s, C_b .

Подобная конструкция обмотки статора дает возможность соединять обмотки фаз двигателя как треугольником, так и звездой. Благодаря этому

каждый трехфазный электродвигатель можно использовать при двух различных по значению напряжениях питающей сети (линейном и фазном), $U_n = U/3\sqrt{3}$.

Одним из важнейших показателей, характеризующих работу асинхронного двигателя, является скольжение ротора, под которым понимается отношение

$$s = (n - n_r) / n$$

где n — частота вращения ротора электродвигателя, об/мин; $n_s = 60f/p$ — синхронная частота вращения.

Для большинства современных типов асинхронных электродвигателей скольжение ротора при номинальной нагрузке составляет 2...6%, а при работе в режиме холостого хода, т. е. когда электродвигатель работает без нагрузки на валу, — доли процента.

При вращении ротора с частотой вращения поля его скольжение оказывается равным нулю ($s = 0$). При частоте вращения ротора, равной нулю, т. е. при неподвижном роторе, скольжение ротора равно единице ($s = 1$).

Разность частот вращения $n_s - sn_r$ представляет собой частоту скольжения, т. е. частоту вращения вращающегося поля статора двигателя относительно его ротора. Нетрудно видеть, что от частоты скольжения, а также от значения магнитного потока Φ , характеризующего вращающееся магнитное поле, зависит и значение ЭДС E_r , наводимой в обмотке ротора, а следовательно, ток ротора I_r его частота:

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} = \frac{s E_s}{Z_r}$$

При увеличении нагрузки на валу электродвигателя, обусловленной возрастанием момента сопротивления, частота вращения ротора уменьшается, а скольжение его возрастает. Это вызывает увеличение ЭДС ротора E_r , а следовательно, токов ротора и статора асинхронного двигателя. При этом мощность P_1 , потребляемая из сети, также возрастает.

При неподвижном роторе вращающееся магнитное поле в обмотках статора и ротора асинхронного электродвигателя будет наводить переменные ЭДС, действующие значения которых можно определить по формулам, аналогичным формулам, полученным для ЭДС трансформатора:

$$E_s = 4,44 f W_1 k_{w1} \Phi_m, \quad E_r = 4,44 f W_2 k_{w2} \Phi_m,$$

где E_s — фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке статора; E_r — фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора при неподвижном

его состоянии ($s = \frac{n - n_0}{n_0}$); w_1, w_2 — число витков в фазе статора и ротора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока фазы асинхронного двигателя; k_1, k_2 — обмоточные коэффициенты статора и ротора асинхронного двигателя.

В отличие от трансформатора, вследствие конструктивных особенностей асинхронного двигателя, вращающийся магнитный поток не будет одновременно сцеплен со всеми витками обмоток статора и ротора, что учитывается обмоточными коэффициентами k_1 и k_2 , меньшими единицы (у трансформатора $k_1 = k_2 = 1$).

При вращении ротора асинхронного двигателя в процессе работы в нем наводится переменная ЭДС с частотой f_2 , значение которой можно найти путем замены в выражении для E_2 частоты

$$f_2 = sf_1 \text{ на } \frac{1}{2s}$$

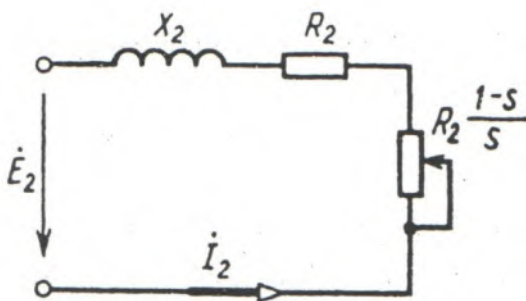


Рис. 13.5

$$E_2 = 4,44 k_2 w_2 f_1 s \Phi_m = 4,44 k_2 \Phi_m s f_1 = s E_1$$

Отсюда следует, что ЭДС вращающегося ротора находят по ЭДС неподвижного ротора, умножая ее значение на скольжение, соответствующее данной частоте вращения ротора электро-двигателя.

Рис. 5 При работе асинхронного электро-двигателя под действием ЭДС E_2 , возникающей во вращающемся роторе, в цепи обмотки ротора возникает ток I_2/s , который в

соответствии с законом Ома для данной цепи можно найти, исходя из выражения

$$I_2/s = E_2 / Z_2 = E_2 / (R_2/s + jX_2)$$

где Z_2/s — полное сопротивление фазы ротора; R_2/s — активное сопротивление фазы ротора (для двигателей нормального исполнения можно считать постоянным и независимым от частоты тока ротора); X_2/s — индуктивное сопротивление фазы ротора при данных скольжениях ротора и частотах тока ротора.

С учетом того, что $E_2 = sE_1$ и $X_2 = 2\pi f_1 L_2 = sX_1$, получаем выражение для ротора в другом виде:

$$I_2/s = sE_1 / (R_2/s + jX_2) = E_1 / (R_2/s^2 + jX_1/s) = I_2'$$

Из формулы видно, что ток ротора вращающегося двигателя можно определить через ЭДС E_1 неподвижного ротора. Сопротивление X_1/s , входящее в выражение для тока ротора, соответствует частоте f_1 и является постоянным, а активное сопротивление электрической цепи ротора при этом зависит от скольжения и находят его как отношение $R_2/s = R_1 + R_1' \{1 - s\}/s$.

С учетом этого и выражения для тока ротора схема замещения

ротора вращающегося асинхронного электродвигателя может быть приведена к схеме

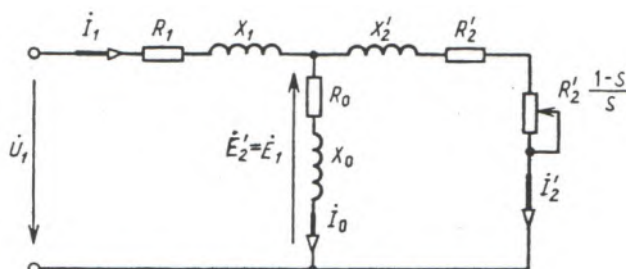


Рис. 13.6

замещения неподвижного ротора, представленной на рис. 13.5.

При построении схемы замещения синхронного электродвигателя, параметры схемы замещения ротора, подобно тому как это было сделано для вторичной обмотки трансформатора, приводят к числу витков и ЭДС обмотки статора электродвигателя. В результате полная схема замещения синхронного электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 13.6.

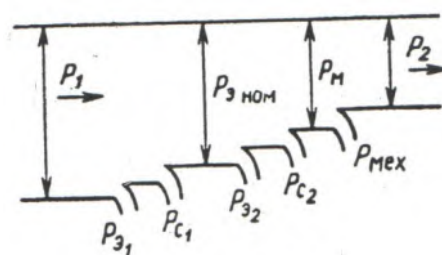


Рис. 13.7

Представление о распределении потока энергии, потребляемой синхронным электродвигателем из сети, дает энергетическая диаграмма рис. 13.7, на которой дана полная структура потерь мощности, возникающих при работе в синхронном электродвигателе:

$P_1 = m I_1 / i_1 \cos(\varphi_1)$ — активная мощность, подводимая к электродвигателю из сети; U_1 — фазное напряжение статора;

$P_{э1} = m I_1^2 R_1$ — электрические потери мощности в активном сопротивлении обмотки (потери в меди) статора; где m — число фаз обмотки статора; I_1 — ток фазы статора;

$P_{с1} = P_{и1} = P_{г1} + P_{в1}$ — потери мощности в магнитопроводе статора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи (потери в стали статора);

$P_{эм} = C \omega_1 M = m i_1 E_1 h \cos \alpha_1$ — электромагнитная мощность, передаваемая ротору вращающимся магнитным полем, здесь m — число фаз обмотки ротора; E_1 — ЭДС неподвижного ротора; h — фазный ток ротора; $\alpha_1/2$ — угол между током и ЭДС ротора; $\omega_1 = 2\pi n / 60 = (x) \sqrt{p}$ — угловая частота вращения магнитного поля статора; $\omega_1 = 2\pi f_1$ — угловая частота тока статора;

$P_{а1} - P_{м2}$ — потери мощности в магнитопроводе ротора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи в роторе (потери в стали ротора);

$P_{э2} = m i_2 R_2$ — электрические потери мощности в обмотках (потери в меди) ротора, где h — фазный ток ротора;

$P_{мех}$ — механические потери мощности в двигателе (потери мощности, возникаемые от трения в подшипниках и трения ротора о воздух);

$P_m = \omega_1 M$ — мощность, развиваемая электродвигателем с учетом механических потерь мощности в нем;

$P_2 = M \omega_2 / 9550$ — полезная мощность на валу двигателя, кВт.

$2\pi n$ — угловая частота вращения ротора двигателя; C

$C \omega_1 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi n}{60}$ — угловая частота вращения ротора двигателя; C

60 — угловая частота тока ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый синхронным электродвигателем, можно получить, исходя из его электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = m_2 E_2 h \cos \psi_2 = 4,44 f c_2 W_2 / \omega_2 < I V_2 \cos \psi_2 = \frac{X}{p} M,$$

откуда электромагнитный момент

$$M = c < D_m / 2 \cos \psi_2,$$

где постоянная $c = A \wedge A_{kimipfiwiJan}$.

Из формулы видно, что момент синхронного электродвигателя пропорционален произведению вращающегося магнитного потока Φ_m на ток ротора и косинус угла сдвига по фазе между током ротора I_2 и его ЭДС E_2 .

Вращающий момент синхронного двигателя можно определить и исходя из электрических потерь мощности в обмотках ротора. При этом находят сумму электрических потерь мощности в обмотках трех фаз:

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 R_2 = P_{эм} - P_{мех} = M \wedge \omega,$$

откуда

$$M = \frac{P_{э2}}{\omega} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{\omega} = \frac{m_2 (I'_2)^2 R'_2}{\omega}$$

Из полученного выражения следует, что электромагнитный момент асинхронного электродвигателя пропорционален электрическим потерям в обмотках ротора.

При скольжении ротора $s = 1$ пусковой момент асинхронного двигателя (при $n_2 = 0$)

$$M_{пуск} \sim \frac{m_2 (I'_2)^2 R'_2}{\omega_0}$$

Приведенный ток ротора I_2 можно выразить через параметры схемы замещения синхронного электродвигателя (см. рис. 13.6) с учетом того, что полное сопротивление намагничивающего контура намного больше полного сопротивления обмотки статора двигателя, т. е.

$$z_0 = \frac{X}{\omega} + X \quad \gg \quad z_1 = R + X$$

пренебрегая током I_0 , имеем:

формула:

С учетом полученного выражения для тока ротора I_2 получаем формулу для момента синхронного электродвигателя:

$$M = m_p R_2' \cos \alpha \left[R_1 + R_2' / s \right]^2 + (X_1 + X_2')^2$$

Из формулы видно, что момент синхронного электродвигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения и зависит от скольжения ротора. Причем имеется такое скольжение ротора, при котором электродвигатель развивает наибольший (критический) момент M_k . Максимальное (критическое) скольжение s_k ротора, соответствующее критическому моменту синхронного электродвигателя, можно найти, взяв производную момента по скольжению (пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора R_1 вследствие его относительной малости) и приравняв ее нулю. При этом $s_k = R_2' / (X_1 + X_2')$.

Подставив скольжение ротора s_k в формулу для момента (с учетом того, что $R_1 = 0$), получаем выражение для критического момента асинхронного электродвигателя:

В результате совместного решения приведенных уравнений получаем выражение для момента синхронного электродвигателя, записанное через критический момент и скольжение ротора:

формула:

Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения ротора $M(s)$, построенная согласно полученному уравнению, имеет вид, представленный на рис. 13.8. Эта зависимость фактически является механической характеристикой асинхронного электродвигателя (рис. 13.9), так как частота вращения ротора связана с его скольжением выражением $n_2 = n_1(1 - s)$.

Анализ показывает, что в интервале скольжений от $s = 0$ до $s = s_k$ механическая характеристика будет устойчивой, так как $dM/ds > 0$, т. е. при возрастании момента нагрузки на валу происходит возрастание момента, развиваемого электродвигателем. В то же время в интервале скольжения от $s = s_k$ до $s = 1$ механическая характеристика асинхронного двигателя оказывается неустойчивой, так как $dM/ds < 0$.

Так как между скольжением ротора и частотой вращения асинхронного электродвигателя существует прямая взаимосвязь, то, записав скольжение через частоту вращения ротора, представляем зависимость частоты вращения асинхронного двигателя от момента в виде кривой $n_2(M)$, также называемой механической характеристикой асинхронного двигателя (рис. 13.9).

Зависимости момента M , потребляемой мощности P_i , коэффициента мощности $\cos \varphi_i$, КПД η , скольжения ротора s и тока статора

P_1 , потребляемого двигателем из сети, от полезной мощности, т. е. мощности на валу двигателя P_i (рис. 13.10), являются рабочими характеристиками асинхронного электродвигателя.

При этом зависимость $M(P_i)$ определяется формулой $M = 9550 P_i / \omega$, из которой следует, что эта зависимость представляет собой несколько искривленную прямую, проходящую через начало координат, так как с изменением нагрузки на валу частота вращения ротора двигателя несколько уменьшается.

Характер зависимости $\cos(\varphi(P_2))$, т. е. зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от мощности на валу, определяется выражением $\cos \varphi = P_i / \sqrt{3} U I_h$. С учетом того, что $P_i = r \cdot P_1$

Значение коэффициента мощности для нормальных асинхронных двигателей средней мощности при номинальной нагрузке составляет 0,83...0,89. С уменьшением нагрузки на валу двигателя коэффициент мощности снижается и доходит до значений 0,2...0,3 при холостом ходе. В этом режиме полезная мощность на валу равна нулю, однако при этом двигатель потребляет мощность из сети, поэтому коэффициент мощности здесь не равен нулю. С увеличением нагрузки сверх номинальной наблюдается некоторое снижение значения коэффициента мощности за счет увеличения падения напряжения на индуктивной составляющей сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя. Харак-

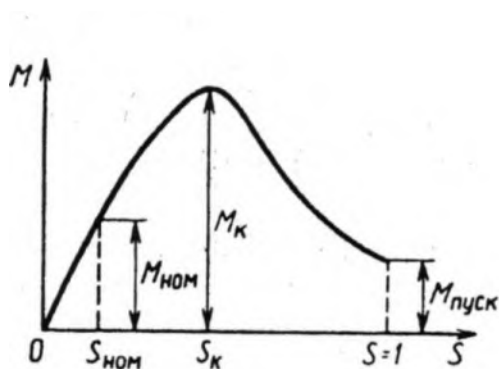


Рис. 13.8

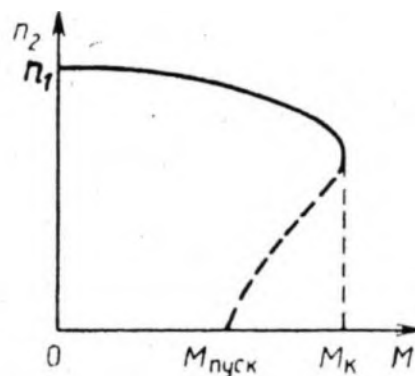


Рис. 13.9

тер изменения коэффициента мощности от нагрузки асинхронного двигателя имеет примерно такой же вид и изменяется по тем же причинам, что и у трансформатора.

Зависимость КПД асинхронного двигателя от нагрузки $\eta(P_2)$ определяется формулой

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + P_i),$$

где P_i — активная мощность, потребляемая двигателем из питающей сети; $P_i = P_m + P_{\Delta 1} + P_{\Delta 2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ноб}}$ — суммарные потери мощности в двигателе, равные сумме потерь мощности в магнитопроводе, электрических потерь мощности в обмотках статора, электрических потерь мощности в обмотке ротора, механических потерь и добавочных потерь мощности. При отсутствии нагрузки $P_2 = 0$, поэтому КПД электродвигателя при этом также равен нулю.

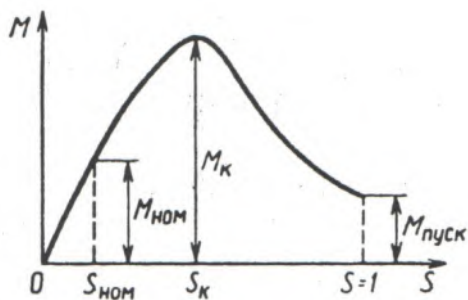


Рис. 13.8

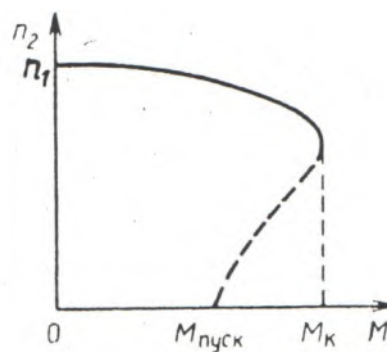


Рис. 13.9

С
увели
чение
м
нагру
зки

КПД двигателя растет и принимает наибольшее значение при условии, что постоянные потери мощности в электродвигателе ($P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{ноб}}$) оказываются равными переменным потерям мощности ($P_{\Delta 1} + P_{\Delta 2}$) в нем. При дальнейшем росте нагрузки КПД электродвигателя, так же как и у трансформатора, снижается. Ток статора при отсутствии нагрузки равен току холостого хода ($I_0 = I_0$). При увеличении мощности на валу* электродвигателя возрастает и ток I_1 , потребляемый двигателем из питающей сети. Увеличение тока происходит приблизительно по линейному закону. Однако при значительном возрастании мощности на валу линейность нарушается и ток начинает возрастать более интенсивно, чем мощность, так как коэффициент мощности двигателя при этом снижается, а электрические потери мощности в обмотках двигателя при больших нагрузках значительно возрастают. Снижение $\cos \varphi_1$ и увеличение потерь мощности в двигателе компенсируются увеличением тока вслед-

ствие возрастания мощности. Этим же объясняется и характер изменения потребляемой из сети мощности $P_1(P_2)$.

С увеличением мощности на валу, т. е. с увеличением нагрузки двигателя, вызываемой возрастанием момента сопротивления исполнительного механизма, частота вращения (число оборотов) ротора уменьшается, а его скольжение при этом возрастает, вызывая увеличение ЭДС E_2 в обмотках ротора, а следовательно, возрастание токов ротора и статора. При неизменном магнитном потоке двигателя

это приводит к увеличению момента, развиваемого двигателем. Таким образом, с увеличением нагрузки на валу равновесие между моментом, развиваемым двигателем, и моментом сопротивления наступает при снижении частоты вращения. При возрастании мощности на валу электродвигателя происходит снижение частоты вращения ротора.

При включении асинхронного электродвигателя в питающую сеть обмотка e_0 статора, обтекаемая переменным током, создает вращающееся магнитное поле. В момент пуска частота вращения ротора электродвигателя равна нулю, в то время как вращающееся поле вследствие того, что оно безынерционно, мгновенно приобретает синхронную частоту вращения по отношению к ротору, в результате в обмотке ротора наводится большая ЭДС. При этом токи ротора и статора в несколько раз превосходят номинальные их значения, так как они увеличиваются с увеличением скольжения ротора, т. е. с уменьшением его частоты вращения (рис. 13.11).

Пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором $I_{\text{пуск}}$ в 5...10 раз превышает номинальный $7 I_{\text{ном}}$ ($I_{\text{пуск}} = 1,1...1,8 I_{\text{ном}}$). Так как этот ток протекает по обмоткам электродвигателя кратковременно, только в процессе пуска, он не опасен для двигателя в тепловом отношении, если пуски двигателя не очень часты. Поэтому пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, как правило, проводится прямым включением в сеть, на полное напряжение. Однако большой пусковой ток крупных электродвигателей опасен не только для самого двигателя, он может вызвать значительное снижение напряжения, особенно в маломощных питающих сетях, что отрицательно сказывается на работе других потребителей электроэнергии, подключенных к той же сети. В этих случаях возникает необходимость ограничивать пусковой ток асинхронных электродвигателей при включении их в питающую сеть.

Снижение напряжения на обмотках асинхронного электродвигателя при пуске может быть достигнуто различными способами: а) пуском с использованием автотрансформатора или индукционного регулятора; б) пуском с переключением обмотки статора со звезды на треугольник; в) пуском с включением добавочного сопротивления в цепи ротора рабочая точка смещается с одной механической характеристики на другую, соответствующую новому, возросшему сопротивлению цепи ротора. Происходит увеличение скольжения ротора, а следовательно, уменьшение частоты вращения ротора асинхронного двигателя.

При рассматриваемом способе возможно регулирование частоты вращения двигателя в пределах от номинального значения n_2 ном до его значения, равного нулю. Однако при этом возникают значительные потери мощности в дополнительном активном сопротивлении цепи ротора, пропорциональные квадрату тока ротора I , что делает этот способ неэкономичным.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых электродвигателей изменением скольжения может быть достигнуто за счет уменьшения напряжения на зажимах двигателя. При этом критический момент асинхронного двигателя уменьшается, жесткость механической характеристики также уменьшается, а скольжение ротора двигателя при том же моменте нагрузки возрастает. Происходит уменьшение частоты вращения электродвигателя. Регулирование асинхронного двигателя при этом способе возможно только в незначительном диапазоне скольжений, который ограничивается критическим моментом.

Следует отметить, что при уменьшении напряжения происходит резкое снижение критического момента двигателя, пропорционального квадрату напряжения, а следовательно, резкое уменьшение перегрузочной способности двигателя по кратности критического момента, что ограничивает область применения этого способа.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых двигателей, как указывалось, возможно путем изменения числа пар полюсов, что применимо для многоскоростных двигателей. Сущность этого заключается в том, что при постоянной частоте напряжения питающей сети частота вращения асинхронного двигателя зависит от числа пар полюсов обмотки статора. Таким образом, если на статоре асинхронного двигателя разместить две или несколько отдельных обмоток с разными числами пар полюсов, то при включении в сеть каждой из обмоток в отдельности можно получить различные частоты вращения вращающегося магнитного поля и вращения ротора.

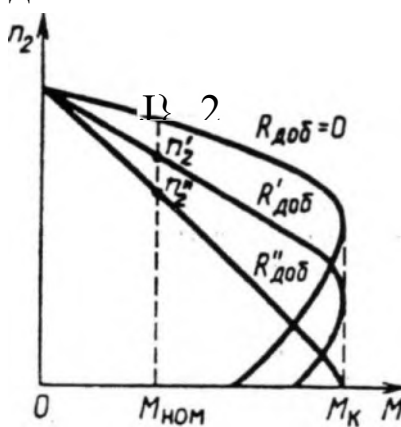


Рис. 13.12

Для увеличения диапазона регулирования частоты вращения поля статор асинхронного двигателя снабжается двумя независимыми обмотками, каждая из которых может переключаться на число пар полюсов в отношении 1:2. В этом случае асинхронный двигатель будет иметь четыре ступени скорости (рис. 13.13). Кроме электродвигателей, рассчитанных на одну частоту вращения, отечественная промышленность выпускает двух-, трех- и четырехскоростные асинхронные коротко-замкнутые электродвигатели с соответствующим числом пар полюсов.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей путем переключения числа пар полюсов производится без потерь мощности. Однако многоскоростные электродвигатели гораздо сложнее по конструкции и дороже обычных односкоростных. При

этом регулирование частоты вращения оказывается ступенчатым, неплавным.

Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей может быть осуществлено и путем изменения частоты напряжения, подводимого к обмотке статора. При этом происходит изменение частоты вращения вращающегося магнитного поля и частоты вращения ротора электродвигателя (рис. 13.14).

Существенным недостатком частотного способа регулирования является необходимость применения специального оборудования, в частности преобразователей частоты, что значительно усложняет систему электропривода и увеличивает массу, габариты и стоимость установки. Однако с развитием полупроводниковой техники, появления тиристоров и других полупроводниковых приборов этот способ нашел широкое применение.

Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и конструкцией исследуемого трехфазного синхронного электродвигателя.
2. Снять и построить рабочие и механическую характеристики исследуемого синхронного электродвигателя.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с устройством трехфазного синхронного электродвигателя на демонстрационном стенде лаборатории и отметить особенность его конструкции. Записать тип и номинальные данные исследуемого электродвигателя:

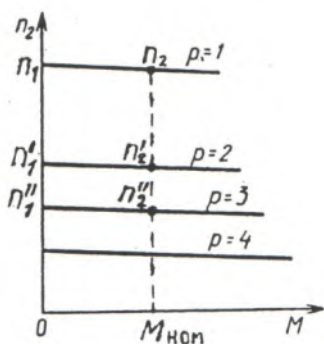


Рис. 13.13

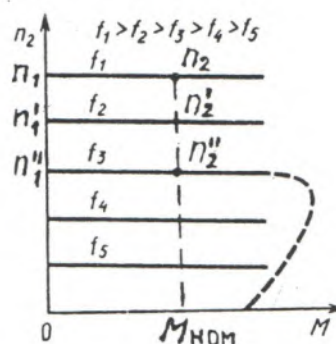


Рис. 13.14

Тип электродвигателя

Номинальное

напряжение ($U_{\text{ном}}$), В 3х220/380 0,55 2,9/1,7 50

Номинальная мощность ($P_{\text{ном}}$), кВт 1370 70,5 0,70

Номинальный ток ($I_{\text{ном}}$), А 2,9/1,7

Номинальная частота напряжения питания Гц 50

Номинальная частота вращения ротора ($\omega_{\text{ном}}$), об/мин.....1370
 Номинальный КПД ($\eta_{\text{ном}}$), %..... 70,5
 Номинальный коэффициент мощности ($\cos\varphi_{\text{ном}}$)0,70

2. На рабочей панели «Синхронный электродвигатель» стенда (секция 2) собрать электрическую цепь (рис. 13.15) для снятия рабочих и механической характеристик исследуемого электродвигателя.

Сборку этой цепи проводят соединителями в соответствии с монтажной схемой рис. 13.16. Измерение линейного напряжения питания, линейного тока (U_l, I_l) и потребляемой активной мощности (P_l) электродвигателя проводить измерительными приборами: вольтметром с пределом измерения 250 В, амперметром с пределом измерения 7,5 А и трехфазным ваттметром.

3. Провести проверку электрического нуля прибора «Момент агрегата № 1».

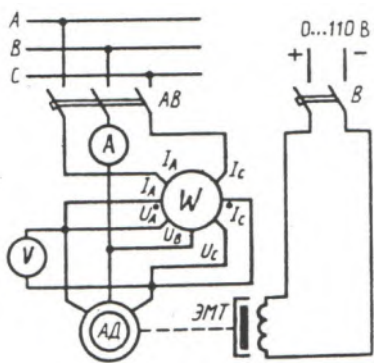


Рис. 13.15

Для этого ручку регулятора «Момент нагрузки» на панели «Нагрузочные устройства» стенда установить в крайнее левое положение, нажать кнопки «Сеть» и «Агрегат № 1», тем самым включив цепи измерения момента и частоты вращения агрегата № 1. Балансировка прибора проводится соответствующими переменными резисторами.

4. Провести пуск синхронного электродвигателя нажатием кнопки «Включение синхронной машины», расположенной на панели «Машины переменного тока».

Т а б л и ц а 13.1

Номера измерений	Измерения					Вычисления			
	C/i, В	I, А	P, кВт	M, Н м	n, об/мин	P ₂ , кВт	s	cosφ _i	Ч
1									
2									

5. Снять рабочие и механические характеристики электродвигателя, т. е. $I\{P_2\} P\{P_2\} M(P_2), \cos\varphi_i(P_2), \eta(P_2), s(\omega_2), m(M)$ при $t/i = \text{const}$. Для этого:

а) изменять нагрузку на валу синхронного электродвигателя от режима холостого хода до режима, при котором мощность на валу $P_2 = (1,2...1,5)P_{2\text{ном}}$. Изменение нагрузки на валу исследуемого электродвигателя проводится изменением тока в цепи обмот-

ки электромагнитного тормоза, соединенного с валом асинхронного электродвигателя, ручкой регулятора «Момент нагрузки» на панели «Нагрузочные устройства» стенда;

б) в указанном диапазоне изменения нагрузки провести шесть-семь измерений, записать показания измерительных приборов в табл. 13.1. Одно из измерений должно соответствовать номинальному режиму работы двигателя;

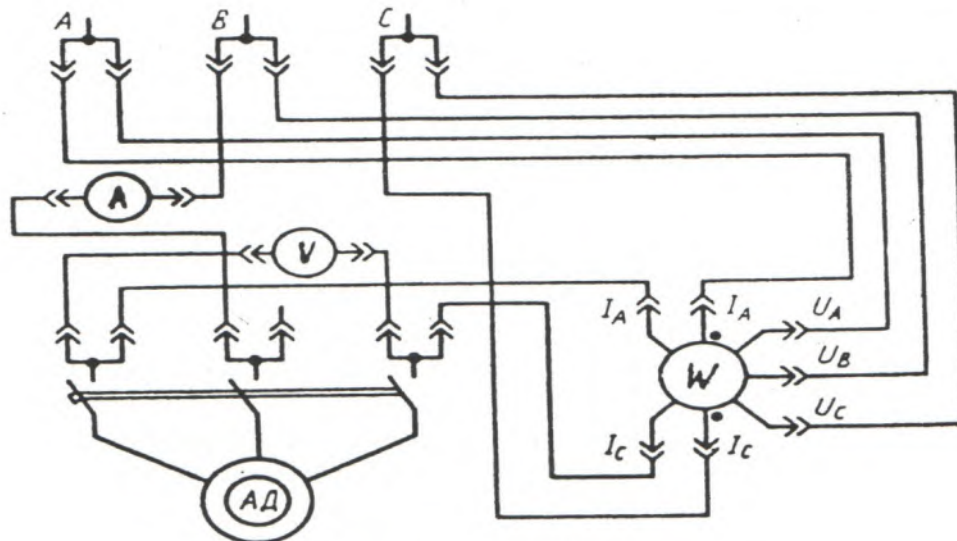


Рис. 13.16

в)
после
оконча
ния
опыта

нагрузки отключить электродвигатель от сети, нажав кнопку «Откл» на нагрузочной панели стенда.

6. Обработка результатов измерений:

По измеренным значениям п. 5 вычислить (см. табл. 13.1):

а) мощность на валу синхронного электродвигателя, кВт

$$P_2 = M\omega_2/9550,$$

где M — электромагнитный момент, Н м ($1\text{кГ}\cdot\text{м}=9,81\text{ Нм}$); ω_2 — частота вращения, об/мин;

б) скольжение ротора синхронного электродвигателя

$$s = (n - m)/n,$$

где $n = 60/f$ — частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

в) коэффициент мощности электродвигателя

$$\cos\varphi = P_1/(\sqrt{3}UI),$$

где P_1 — активная мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;

г) КПД электродвигателя

7. По измеренным и вычисленным значениям в единой системе координат построить рабочие характеристики, а в другой координатной системе — механическую характеристику синхронного электродвигателя.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия трехфазного синхронного электродвигателя.
2. Как изменить направление вращения трехфазного синхронного электродвигателя?
3. Как изменяется значение тока холостого хода синхронного электродвигателя с изменением величины воздушного зазора?
4. Почему с возрастанием нагрузки на валу асинхронного электродвигателя энергетические показатели его вначале возрастают, а затем снижаются?
5. Как изменяется максимальный (критический) момент асинхронного электродвигателя с изменением питающего напряжения?
6. Как изменяется частота тока ротора синхронного электродвигателя с изменением нагрузки на валу?
7. Перечислите способы пуска синхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.
8. Перечислите все виды потерь мощности в синхронных электродвигателях.
9. Назовите способы регулирования частоты вращения синхронных электродвигателей.
10. Как влияет на пусковой момент активное сопротивление пускового реостата асинхронного электродвигателя с фазным ротором?

7. Почему при опыте короткого замыкания можно пренебречь потерями мощности в магнитопроводе трансформатора?

8. Почему при изменении тока во вторичной обмотке трансформатора изменяется ток и в первичной его обмотке?

9. Какое влияние оказывает характер нагрузки на внешнюю характеристику трансформатора?

10. Почему с возрастанием тока нагрузки энергетические показатели трансформатора вначале возрастают, а затем снижаются?

Практическая работа №8. (2 часа) «Пуск электродвигателей переменного тока».

Цель работы: ознакомление с устройством, принципом действия, основными

характеристиками и методами испытания асинхронного трехфазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Основные теоретические положения Асинхронные электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. В зависимости от системы переменного тока асинхронные электродвигатели выполняются трех-или однофазными. В технике наиболее распространены асинхронные трехфазные электродвигатели.

Асинхронный трехфазный электродвигатель состоит из неподвижного статора (рис. 13.1) и вращающегося ротора (рис. 13.2,13.3). статор двигателя представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. В пазах сердечника статора (см. рис. 13.1) уложена трехфазная обмотка статора, выполненная из изолированного провода и состоящая из трех отдельных обмоток фаз, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° . Обмотки фаз соединяются между собой звездой или треугольником, в зависимости от значения подводимого напряжения.

Ротор асинхронного электродвигателя изготавливают в двух исполнениях: короткозамкнутым (см. рис. 13.2) и с контактными кольцами (см. рис. 13.3).

Короткозамкнутый ротор представляет собой ферромагнитный сердечник в виде цилиндра с пазами, в которые уложена обмотка ротора, состоящая из медных или алюминиевых стержней. Эти стержни соединяются между собой торцовыми кольцами и образуют цилиндрическую клетку. В большинстве случаев клетка ротора отливается из алюминия или из сплава на его основе. Для уменьшения потерь мощности в магнитопроводе ротор, так же как и статор, собирают из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

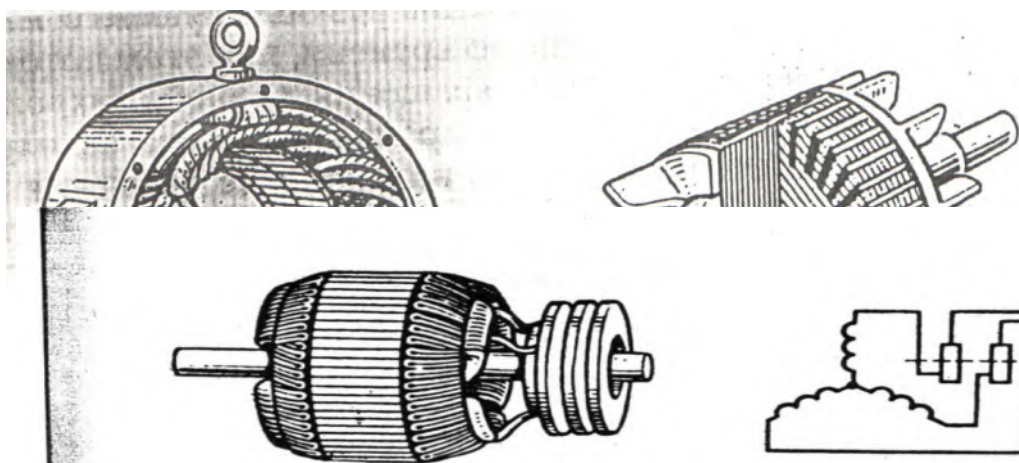


Рис. 13.3

Ротор с контактными кольцами (см. рис. 13.3), называемый Иногда также ф а з н ы м , имеет трехфазную обмотку, выполненную изолированным проводом, которая в конструктивном отношении мало чем отличается от обмотки статора двигателя. В большинстве случаев обмотка ротора

соединяется в звезду. Свободные концы обмотки подводятся к контактным кольцам ротора. В процессе работы контактные кольца скользят по неподвижным щеткам и при этом обеспечивают электрическое соединение обмотки вращающегося ротора с трехфазным неподвижным реостатом, подключенным к щеткам (рис. 13.4).

Такое устройство позволяет изменять активное сопротивление электрической цепи ротора асинхронного двигателя в процессе его вращения, что необходимо для уменьшения значительного пускового тока, а также для регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя при работе и изменения пускового момента двигателя.

При подаче к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения в каждой его фазе будет создаваться магнитный поток, изменяющийся с частотой питающей сети. При этом потоки отдельных фаз оказываются сдвинутыми относительно друг друга на угол 120° как во времени, так и в пространстве.

Возникающий при этом результирующий магнитный поток : оказывается вращающимся. В теоретической части курса электротехники показано, что значение результирующего магнитного потока $\Phi = |\Phi_t|$ постоянно во времени, при этом поток вращается в пространстве с частотой вращения, равной синхронной n .

Для изменения направления вращения ротора, асинхронного двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля, т. е. изменить порядок чередования фаз обмотки статора переключением любых двух из трех проводов, питающих двигатель от трехфазной системы напряжений.

Результирующий магнитный поток при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как обмотка ротора асинхронного двигателя имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который, взаимодействуя с

магнитным потоком статора, создает электромагнитный момент двигателя. Под действием этого момента ротор вращается в сторону вращающегося магнитного потока двигателя, причем частота вращения ротора двигателя всегда меньше частоты вращения вращающегося магнитного поля. Если ротор вращается с частотой поля, то его обмотка не пересекается этим полем и в ней не наводится ЭДС. Следовательно, при отсутствии тока в роторе электромагнитный момент двигателя равен нулю. При этом двигатель замедляет свой ход до тех пор, пока в роторе не появится ток, необходимый для обеспечения соответствующего момента, и двигатель продолжает вращаться при этой частоте вращения m .

Частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения) находится в строгой зависимости от частоты f подводимого напряжения и числа пар полюсов p двигателя; $n = 60/f/p$.

Из этого следует, что при принятой в стране промышленной частоте питающего напряжения ($f = 50$ Гц) наибольшее число оборотов магнитного

поля оказывается равным 3000 об/мин при $p = 1$. При увеличении числа пар полюсов частота вращения магнитного поля уменьшается, а следовательно, снижается и частота вращения ротора n двигателя. При $p = 2, n = 1500$ об/мин и т. д.

Асинхронный электродвигатель характеризуется номинальными данными, на которые он рассчитан. Основные технические данные двигателя указываются в соответствующих каталогах, а также в паспортах, выполненных в виде специальных табличек, закрепленных на корпусах двигателей.

Асинхронные трехфазные электродвигатели имеют шесть выводов обмотки статора (три начала и три конца обмоток фаз). Начала обмоток каждой из трех фаз маркируются G, C_2, C_3 , а концы соответственно C^*, C_s, C_b .

Подобная конструкция обмотки статора дает возможность соединять обмотки фаз двигателя как треугольником, так и звездой. Благодаря этому каждый трехфазный электродвигатель можно использовать при двух различных по значению напряжениях питающей сети (линейном и фазном), $U_n = U/3 \sqrt{3}$.

Одним из важнейших показателей, характеризующих работу асинхронного двигателя, является скольжение ротора, под которым понимается отношение

$$s = (n_s - n) / n_s$$

где n_s — частота вращения ротора электродвигателя, об/мин; $n_s = 60f/p$ — синхронная частота вращения.

Для большинства современных типов асинхронных электродвигателей скольжение ротора при номинальной нагрузке составляет 2...6%, а при работе в режиме холостого хода, т. е. когда электродвигатель работает без нагрузки на валу, — доли процента.

При вращении ротора с частотой вращения поля его скольжение оказывается равным нулю ($s = 0$). При частоте вращения ротора, равной нулю, т. е. при неподвижном роторе, скольжение ротора равно единице ($s = 1$).

Разность частот вращения $n_s - sn$ представляет собой частоту скольжения, т. е. частоту вращения вращающегося поля статора двигателя относительно его ротора. Нетрудно видеть, что от частоты скольжения, а также от значения магнитного потока Φ , характеризующего вращающееся магнитное поле, зависит и значение ЭДС E_i , наводимой в обмотке ротора, а следовательно, ток ротора I_i его частота:

$$E_i = \frac{p n_s}{2\pi} \Phi s$$

При увеличении нагрузки на валу электродвигателя, обусловленной возрастанием момента сопротивления, частота вращения ротора уменьшается, а скольжение его возрастает. Это вызывает увеличение ЭДС ротора E_2 , а следовательно, токов ротора и статора асинхронного двигателя. При этом мощность P_1 , потребляемая из сети, также возрастает.

При неподвижном роторе вращающееся магнитное поле в обмотках статора и ротора асинхронного электродвигателя будет наводить переменные ЭДС, действующие значения которых можно определить по формулам, аналогичным формулам, полученным для ЭДС трансформатора:

$$E_1 = 4,44 k_1 w_1 f \Phi_m, E_2 = 4,44 k_2 w_2 f s \Phi_m,$$

где E_1 — фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке статора; E_2 — фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора при неподвижном его состоянии ($s = \frac{n - n_0}{n}$); w_1, w_2 — число витков в фазе статора и ротора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока фазы асинхронного двигателя; k_1, k_2 — обмоточные коэффициенты статора и ротора асинхронного двигателя.

В отличие от трансформатора, вследствие конструктивных особенностей асинхронного двигателя, вращающийся магнитный поток не будет одновременно сцеплен со всеми витками обмоток статора и ротора, что учитывается обмоточными коэффициентами k_1 и k_2 , меньшими единицы (у трансформатора $k_1 = k_2 = 1$).

При вращении ротора асинхронного двигателя в процессе работы в нем наводится переменная ЭДС с частотой f_2 , значение которой можно найти путем замены в выражении для E_2 частоты

$$f_2 = s f = \frac{1-s}{s} f$$

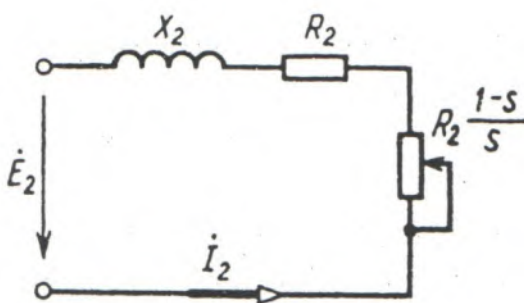


Рис. 13.5

$$E_2 = 4,44 k_2 w_2 f s \Phi_m = 4,44 k_2 \Phi_m f s = s E_2'$$

Отсюда следует, что ЭДС вращающегося ротора находят по ЭДС неподвижного ротора, умножая ее значение на скольжение, соответствующее данной частоте вращения ротора электродвигателя.

Рис. 5 При работе асинхронного электродвигателя под действием ЭДС E_2 , возникающей во вращающемся роторе, в цепи обмотки ротора возникает ток I_2/s , который в

соответствии с законом Ома для данной цепи можно найти, исходя из выражения

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2/s} = \frac{E_2 s}{Z_2 + X_1},$$

где Z_2/s — полное сопротивление фазы ротора; R_2 — активное сопротивление фазы ротора (для двигателей нормального исполнения можно считать постоянным и независимым от частоты тока ротора); X_1 —

индуктивное сопротивление фазы ротора при данных скольжениях ротора и частотах тока ротора.

С учетом того, что $E_2' = sE_2$ и $X_2' = 2\pi f_2 L_2 = sX_2$, получаем выражение для ротора в другом виде:

$$I_2' = sE_2 / \sqrt{(R_2/s)^2 + X_2'^2} = h.$$

Из формулы видно, что ток ротора вращающегося двигателя можно определить через ЭДС E_2' неподвижного ротора. Сопротивление X_2' , входящее в выражение для тока ротора, соответствует частоте f_2 и является постоянным, а активное сопротивление электрической цепи ротора при этом зависит от скольжения и находят его как отношение $R_2/s = R_2 + R_2'[(1-s)/s]$. С учетом этого и выражения для тока ротора схема замещения вращающегося ротора асинхронного электродвигателя может быть приведена к схеме замещения неподвижного ротора, представленной на рис. 13.5.

При построении схемы замещения асинхронного электродвигателя, параметры схемы замещения ротора, подобно тому как это было сделано для вторичной обмотки трансформатора, приводят к числу витков и ЭДС обмотки статора электродвигателя. В результате полная схема замещения асинхронного электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 13.6.

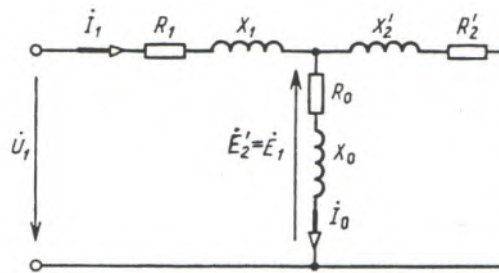


Рис. 13.6

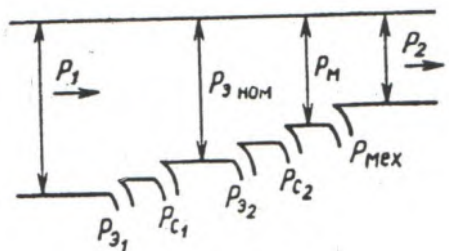


Рис. 13.7

Представление о распределении потока энергии, потребляемой асинхронным электродвигателем из сети, дает энергетическая диаграмма рис. 13.7, на которой дана полная структура потерь мощности, возникающих при работе в асинхронном электродвигателе:

$P_1 = m I_1 U_1 \cos(\varphi_1)$ — активная мощность, подводимая к электродвигателю из сети; U_1 — фазное напряжение статора;

$P_{3\lambda} = m I_2^2 R_\lambda$ — электрические потери мощности в активном сопротивлении обмотки (потери в меди) статора; где λ — число фаз обмотки статора; h — ток фазы статора;

$P_{c\lambda} = P_{и\lambda} = P_\Gamma + P_\Psi$ — потери мощности в магнитопроводе статора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи (потери в стали статора);

$P_{эм} = C I_2 M = m I_2 E_2' h \cos(\psi_2)$ — электромагнитная мощность, передаваемая ротору вращающимся магнитным полем, здесь m — число фаз обмотки ротора; E_2' — ЭДС неподвижного ротора; h — фазный ток ротора; $\psi_2/2$ — угол между током и ЭДС ротора; $\omega = 2\pi f_2 / 60 = (x) \sqrt{p}$ — угловая частота

вращения магнитного поля статора; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота тока статора;

$P_a - P_m2$ — потери мощности в магнитопроводе ротора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи в роторе (потери в стали ротора);

$P_{\Sigma 2} = \sum I^2 R_i$ — электрические потери мощности в обмотках (потери в меди) ротора, где I — фазный ток ротора;

$P_{мех}$ — механические потери мощности в двигателе (потери мощности, возникаемые от трения в подшипниках и трения ротора о воздух);

$P_m - P_{лм}$ — мощность, развиваемая электродвигателем с учетом механических потерь мощности в нем;

$P_2 = M\omega / 9550$ — полезная мощность на валу двигателя, кВт.

$\omega = 2\pi n$

ω — угловая частота вращения ротора двигателя; $\omega_0 = 2\pi n_0$

n_0 — угловая частота тока ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, можно получить, исходя из его электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = m_2 E_2 h \cos \varphi_2 = 4,44 f c_2 W_2 I_2 \cos \varphi_2 = \frac{X}{p} M,$$

откуда электромагнитный момент

$$M = c \Phi_m I_2 \cos \varphi_2,$$

где постоянная $c = \frac{A^2 k_{im} p f^2 W_2}{2\pi p}$.

Из формулы видно, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален произведению вращающегося магнитного потока Φ_m на ток ротора и косинус угла сдвига по фазе между током ротора I_2 и его ЭДС E_2 .

Вращающий момент асинхронного двигателя можно определить и исходя из электрических потерь мощности в обмотках ротора. При этом находят сумму электрических потерь мощности в обмотках трех фаз:

$$P_{\Sigma 2} = \sum I^2 R = P_{эм} - P_{мех} = \frac{X}{p} M,$$

откуда

$$M = \frac{p m_2 I_2^2 R_2}{X} + \frac{p m_x (I'_2)^2 R_l}{X}$$

Из полученного выражения следует, что электромагнитный момент асинхронного электродвигателя пропорционален электрическим потерям в обмотках ротора.

При скольжении ротора $s = 1$ пусковой момент асинхронного двигателя (при $n_2 = 0$)

$$I_{\text{пуск}} \sim \frac{p n_2 \{l'_2\}^2 R'_2}{s \omega_s}$$

Приведенный ток ротора I_2 можно выразить через параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя (см. рис. 13.6) с учетом того, что полное сопротивление намагничивающего контура намного больше полного сопротивления обмотки статора двигателя, т. е.

$$Z_0 = jX_m + X_{\sigma} \gg Z_1 = R_1 + jX_1$$

пренебрегая током I_0 , имеем:

формула:

С учетом полученного выражения для тока ротора I_2 получаем формулу для момента асинхронного электродвигателя:

$$M = m_p R'_2 \omega_s \frac{I_1^2 (R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

Из формулы видно, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения и зависит от скольжения ротора. Причем имеется такое скольжение ротора, при котором электродвигатель развивает наибольший (критический) момент M_k . Максимальное (критическое) скольжение s_k ротора, соответствующее критическому моменту асинхронного электродвигателя, можно найти, взяв производную момента по скольжению (пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора R_1 вследствие его относительной малости) и приравняв ее нулю. При этом $s_k = R'_2 / (X_1 + X'_2)$.

Подставив скольжение ротора s_k в формулу для момента (с учетом того, что $R_1 = 0$), получаем выражение для критического момента асинхронного электродвигателя:

В результате совместного решения приведенных уравнений получаем выражение для момента асинхронного электродвигателя, записанное через критический момент и скольжение ротора:

формула:

Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения ротора $M(s)$, построенная согласно полученному уравнению, имеет вид, представленный на рис. 13.8. Эта зависимость фактически является механической характеристикой асинхронного электродвигателя

(рис. 13.9), так как частота вращения ротора связана с его скольжением выражением $n_2 = n(1 - s)$.

Анализ показывает, что в интервале скольжений от $s = 0$ до $s = s_K$ механическая характеристика будет устойчивой, так как $dM/ds > 0$, т. е. при возрастании момента нагрузки на валу происходит возрастание момента, развиваемого электродвигателем. В то же время в интервале скольжении от $s = s_K$ до $s = 1$ механическая характеристика асинхронного двигателя оказывается неустойчивой, так как $dM/ds < 0$.

Так как между скольжением ротора и частотой вращения асинхронного электродвигателя существует прямая взаимосвязь, то, записав скольжение через частоту вращения ротора, представляем зависимость частоты вращения асинхронного двигателя от момента в виде кривой $n_2(M)$, также называемой механической характеристикой асинхронного двигателя (рис. 13.9).

Зависимости момента M , потребляемой мощности P_i , коэффициента мощности $\cos \varphi_i$, КПД η , скольжения ротора s и тока статора I_1 , потребляемого двигателем из сети, от полезной мощности, т. е. мощности на валу двигателя P_2 (рис. 13.10), являются рабочими характеристиками асинхронного электродвигателя.

При этом зависимость $M(P_2)$ определяется формулой $M = 9550 P_2 / n_2$, из которой следует, что эта зависимость представляет собой несколько искривленную прямую, проходящую через начало координат, так как с изменением нагрузки на валу частота вращения ротора двигателя несколько уменьшается.

Характер зависимости $\cos \varphi_i(P_2)$, т. е. зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от мощности на валу, определяется выражением $\cos \varphi_i = P_2 / \sqrt{3} U I_1$. С учетом того, что $P_2 = r P_i$

Значение коэффициента мощности для нормальных асинхронных двигателей средней мощности при номинальной нагрузке составляет 0,83...0,89. С уменьшением нагрузки на валу двигателя коэффициент мощности снижается и доходит до значений 0,2...0,3 при холостом ходе. В этом режиме полезная мощность на валу равна нулю, однако при этом двигатель потребляет мощность из сети, поэтому коэффициент мощности здесь не равен нулю. С увеличением нагрузки сверх номинальной наблюдается некоторое снижение значения коэффициента

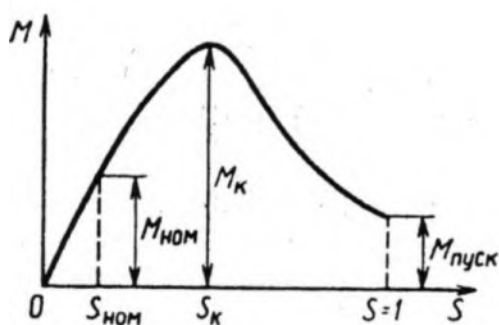


Рис. 13.8

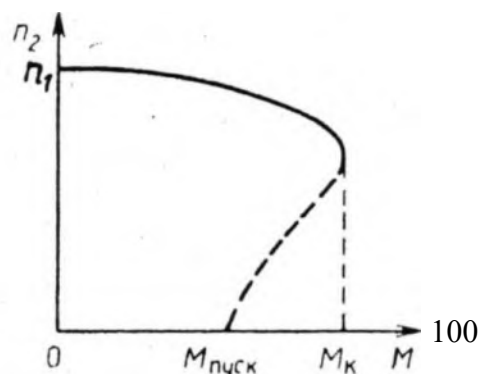


Рис. 13.9

мощности за счет увеличения падения напряжения на индуктивной составляющей сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя. Харак-

тер изменения коэффициента мощности от нагрузки асинхронного двигателя имеет примерно такой же вид и изменяется по тем же причинам, что и у трансформатора.

Зависимость КПД асинхронного двигателя от нагрузки $\eta(P_2)$ определяется формулой

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + P_i),$$

где P_i — активная мощность, потребляемая двигателем из питающей сети; $P_i = P_m + P_{\Delta 1} + P_{\Delta 2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ноб}}$ — суммарные потери мощности в двигателе, равные сумме потерь мощности в магнитопроводе, электрических потерь мощности в обмотках статора, электрических потерь мощности в обмотке ротора, механических потерь и добавочных потерь мощности. При отсутствии нагрузки $P_2 = 0$, поэтому КПД электродвигателя при этом также равен нулю.

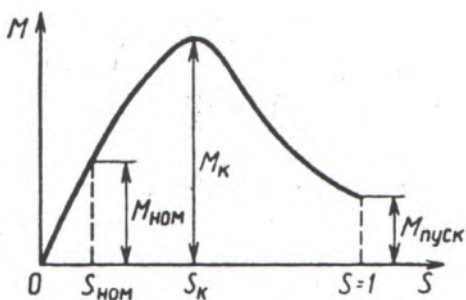


Рис. 13.8

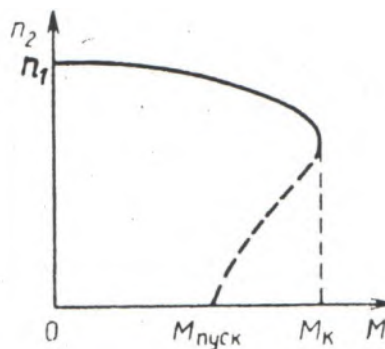


Рис. 13.9

С
увели
чение
м
нагру
зки

КПД двигателя растет и принимает наибольшее значение при условии, что постоянные потери мощности в электродвигателе ($P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{ноб}}$) оказываются равными переменным потерям мощности ($P_{\Delta 1} + P_{\Delta 2}$) в нем. При дальнейшем росте нагрузки КПД электродвигателя, так же как и у трансформатора, снижается. Ток статора при отсутствии нагрузки равен току холостого хода ($I_0 = I_0$). При увеличении мощности на валу* электродвигателя возрастает и ток I_1 , потребляемый двигателем из питающей сети. Увеличение тока происходит приблизительно по линейному закону. Однако при значительном возрастании мощности на валу линейность нарушается и ток начинает возрастать более интенсивно, чем мощность, так как коэффициент мощности двигателя при этом снижается, а электрические потери мощности в обмотках двигателя при больших нагрузках значительно возрастают. Снижение $\cos \varphi$ и увеличение

потерь мощности в двигателе компенсируются увеличением тока вслед-

ствие возрастания мощности. Этим же объясняется и характер изменения потребляемой из сети мощности $P_1(P_2)$.

С увеличением мощности на валу, т. е. с увеличением нагрузки двигателя, вызываемой возрастанием момента сопротивления исполнительного механизма, частота вращения (число оборотов) ротора уменьшается, а его скольжение при этом возрастает, вызывая увеличение ЭДС E_2 в обмотках ротора, а следовательно, возрастание токов ротора и статора. При неизменном магнитном потоке двигателя это приводит к увеличению момента, развиваемого двигателем. Таким образом, с увеличением нагрузки на валу равновесие между моментом, развиваемым двигателем, и моментом сопротивления наступает при снижении частоты вращения. При возрастании мощности на валу электродвигателя происходит снижение частоты вращения ротора.

При включении асинхронного электродвигателя в питающую сеть обмотка e_0 статора, обтекаемая переменным током, создает вращающееся магнитное поле. В момент пуска частота вращения ротора электродвигателя равна нулю, в то время как вращающееся поле вследствие того, что оно безынерционно, мгновенно приобретает синхронную частоту вращения по отношению к ротору, в результате в обмотке ротора наводится большая ЭДС. При этом токи ротора и статора в несколько раз превосходят номинальные их значения, так как они увеличиваются с увеличением скольжения ротора, т. е. с уменьшением его частоты вращения (рис. 13.11).

Пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором $I_{\text{пуск}}$ в 5...10 раз превышает номинальный $I_{\text{ном}}$ ($M_{\text{пуск}} = 1,1...1,8M_{\text{ном}}$). Так как этот ток протекает по обмоткам электродвигателя кратковременно, только в процессе пуска, он не опасен для двигателя в тепловом отношении, если пуски двигателя не очень часты. Поэтому пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, как правило, проводится прямым включением в сеть, на полное напряжение. Однако большой пусковой ток крупных электродвигателей опасен не только для самого двигателя, он может вызвать значительное снижение напряжения, особенно в маломощных питающих сетях, что отрицательно сказывается на работе других потребителей электроэнергии, подключенных к той же сети. В этих случаях возникает необходимость ограничивать пусковой ток асинхронных электродвигателей при включении их в питающую сеть.

Снижение напряжения на обмотках асинхронного электродвигателя при пуске может быть достигнуто различными способами: а) пуском с использованием автотрансформатора или индукционного регулятора; б) пуском с переключением обмотки статора со звезды на треугольник; в) пуском с включением добавочного сопротивления в цепи ротора рабочая

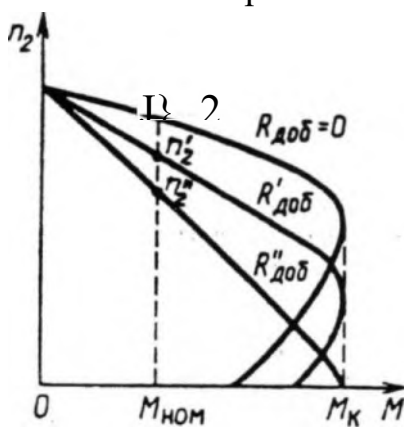
точка смещается с одной механической характеристики на другую, соответствующую новому, возросшему сопротивлению цепи ротора. Происходит увеличение скольжения ротора, а следовательно, уменьшение частоты вращения ротора асинхронного двигателя.

При рассматриваемом способе возможно регулирование частоты вращения двигателя в пределах от номинального значения n_2 ном до его значения, равного нулю. Однако при этом возникают значительные потери мощности в дополнительном активном сопротивлении цепи ротора, пропорциональные квадрату тока ротора I , что делает этот способ неэкономичным.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамк-нутых электродвигателей изменением скольжения может быть достигнуто за счет уменьшения напряжения на зажимах двигателя. При этом критический момент асинхронного двигателя уменьшается, жесткость механической характеристики также уменьшается, а скольжение ротора двигателя при том же моменте нагрузки возрастает. Происходит уменьшение частоты вращения электродвигателя. Регулирование асинхронного двигателя при этом способе возможно только в незначительном диапазоне скольжений, который ограничивается критическим моментом.

Следует отметить, что при уменьшении напряжения происходит резкое снижение критического момента двигателя, пропорционального квадрату напряжения, а следовательно, резкое уменьшение перегрузочной способности двигателя по кратности критического момента, что ограничивает область применения этого способа.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамк-нутых двигателей, как указывалось, возможно путем изменения числа пар полюсов, что применимо для многоскоростных двигателей. Сущность этого заключается в том, что при постоянной частоте напряжения питающей сети частота вращения асинхронного двигателя зависит от числа пар полюсов обмотки статора. Таким образом, если на статоре асинхронного двигателя



разместить две или несколько отдельных обмоток с разными числами пар полюсов, то при включении в сеть каждой из обмоток в отдельности можно получить различные частоты вращения вращающегося магнитного поля и вращения ротора.

Для увеличения диапазона регулирования частоты вращения поля статор асинхронного двигателя снабжается дву-

мя независимыми обмотками, каждая из которых может переключаться на число пар полюсов в отношении 1:2. В этом случае асинхронный двигатель будет иметь четыре ступени скорости (рис. 13.13). Кроме электродвигателей, рассчитанных на одну частоту вращения, отечественная промышленность выпускает двух-, трех- и

Рис. 13.12

четырёхскоростные асинхронные коротко-замкнутые электродвигатели с соответствующим числом пар полюсов.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей путем переключения числа пар полюсов производится без потерь мощности. Однако многоскоростные электродвигатели гораздо сложнее по конструкции и дороже обычных односкоростных. При этом регулирование частоты вращения оказывается ступенчатым, неплавным.

Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей может быть осуществлено и путем изменения частоты напряжения, подводимого к обмотке статора. При этом происходит изменение частоты вращения вращающегося магнитного поля и частоты вращения ротора электродвигателя (рис. 13.14).

Существенным недостатком частотного способа регулирования является необходимость применения специального оборудования, в частности преобразователей частоты, что значительно усложняет систему электропривода и увеличивает массу, габариты и стоимость установки. Однако с развитием полупроводниковой техники, появления тиристоров и других полупроводниковых приборов этот способ нашел широкое применение.

Задание по работе

3. Ознакомиться с устройством и конструкцией исследуемого трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
 4. Снять и построить рабочие и механические характеристики исследуемого асинхронного электродвигателя.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с устройством трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на демонстрационном стенде лаборатории и отметить особенность его конструкции. Записать тип и номинальные данные исследуемого электродвигателя:

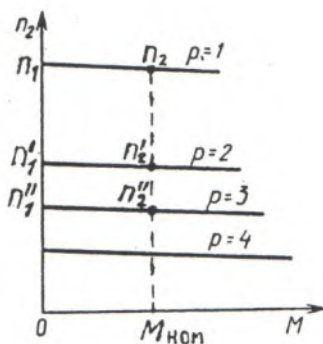


Рис. 13.13

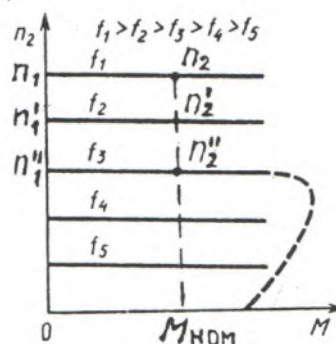


Рис. 13.14

Тип
электродвига

теля..... 4АМА71АЧУЗ
 Номинальное напряжение ($U_{\text{ном}}$), В..... 3х220/380 0,55 2,9/1,7 50
 Номинальная мощность ($P_{\text{ном}}$), кВт 1370 70,5 0,70
 Номинальный ток ($I_{\text{ном}}$), А 2,9/1,7
 Номинальная частота напряжения питания Гц50
 Номинальная частота вращения ротора ($n_{\text{ном}}$), об/мин.....1370
 Номинальный КПД ($\eta_{\text{ном}}$), % 70,5
 Номинальный коэффициент мощности ($\cos\varphi_{\text{ном}}$)0,70

2. На рабочей панели «Асинхронный электродвигатель» стенда (секция 2) собрать электрическую цепь (рис. 13.15) для снятия рабочих и механической характеристик исследуемого электродвигателя.

Сборку этой цепи проводят соединителями в соответствии с монтажной схемой рис. 13.16. Измерение линейного напряжения питания, линейного тока (U_l, I_l) и потребляемой активной мощности (P_l) электродвигателя проводить измерительными приборами: вольтметром с пределом измерения 250 В, амперметром с пределом измерения 7,5 А и трехфазным ваттметром.

3. "Провести проверку электрического нуля прибора «Момент агрегата № 1».

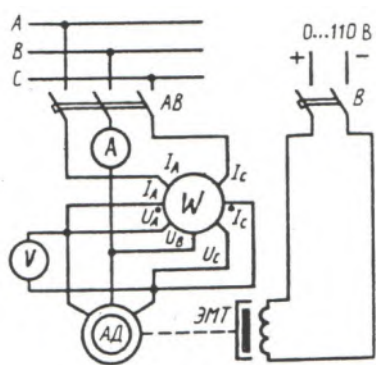


Рис. 13.15

Для этого ручку регулятора «Момент нагрузки» на панели «Нагрузочные устройства» стенда установить в крайнее левое положение, нажать кнопки «Сеть» и «Агрегат № 1», тем самым включив цепи измерения момента и частоты вращения агрегата № 1.

Балансировка прибора проводится соответствующими переменными резисторами.

4. Провести пуск асинхронного электродвигателя нажатием кнопки «Включение асинхронной и синхронной машины», расположенной на панели «Машины переменного тока».

Т а б л и ц а 13.1

Номера измерений	Измерения					Вычисления			
	$S/i, В$	$I_l, А$	$P_l, кВт$	$M, Н м$	$n_2, об/ми н$	$P_2, кВт$	S	$\cos\varphi_i$	η
1									
2									

5. Снять рабочие и механические характеристики электродвигателя, т. е. $I\{P_2\} P\{P_2\} M(P_2), \cos\varphi_i(P_2), \eta(P_2), s(\omega_2), m(M)$ при $t/i = \text{const}$. Для этого:

а) изменять нагрузку на валу асинхронного электродвигателя от режима холостого хода до режима, при котором мощность на валу $P_2 = (1,2 \dots 1,5) P_{2 \text{ ном}}$. Изменение нагрузки на валу исследуемого электродвигателя проводится изменением тока в цепи обмотки электромагнитного тормоза, соединенного с валом асинхронного электродвигателя, ручкой регулятора «Момент нагрузки» на панели «Нагрузочные устройства» стенда;

б) в указанном диапазоне изменения нагрузки провести шесть-семь измерений, записать показания измерительных приборов в табл. 13.1. Одно из измерений должно соответствовать номинальному режиму работы двигателя;

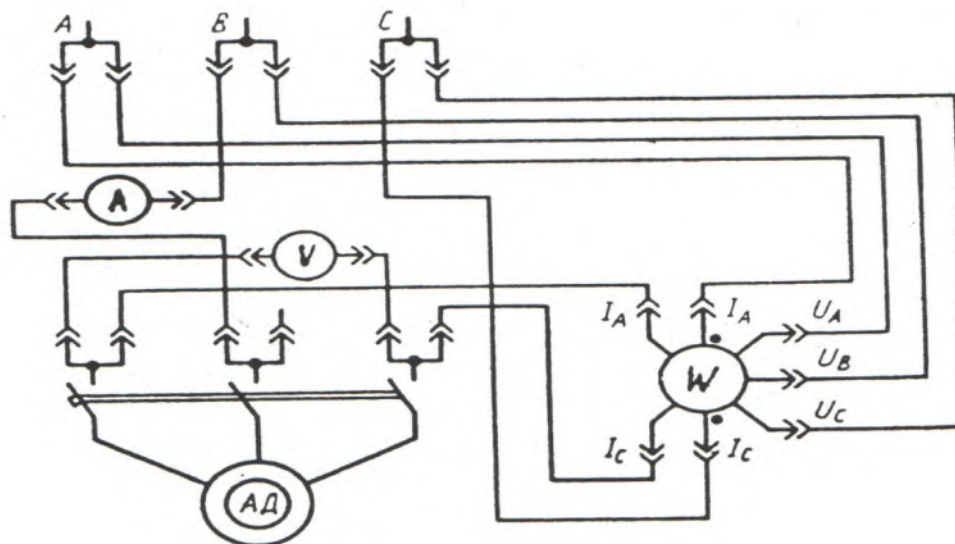


Рис. 13.16

в)
после
оконча
ния
опыта

нагрузки отключить электродвигатель от сети, нажав кнопку «Откл» на нагрузочной панели стенда.

6. Обработка результатов измерений:

По измеренным значениям п. 5 вычислить (см. табл. 13.1):

а) мощность на валу асинхронного электродвигателя, кВт

$$P_2 = M\omega_2/9550,$$

где M — электромагнитный момент, Н м ($1 \text{ кг}\cdot\text{м} = 9,81 \text{ Н}\cdot\text{м}$); ω — частота вращения, об/мин;

б) скольжение ротора асинхронного электродвигателя

$$s = (n - m)/n,$$

где $n = 60/f$ — частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

в) коэффициент мощности электродвигателя

$$\cos\varphi_i = P_i / (U_i I_i),$$

где P_i — активная мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;

г) КПД электродвигателя

7. По измеренным и вычисленным значениям в единой системе координат построить рабочие характеристики, а в другой координатной системе — механическую характеристику асинхронного электродвигателя.

Контрольные вопросы

10. Объясните устройство и принцип действия трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

11. Как изменить направление вращения трехфазного асинхронного электродвигателя?

12. Как изменяется значение тока холостого хода асинхронного электродвигателя с изменением величины воздушного зазора?

13. Почему с возрастанием нагрузки на валу асинхронного электродвигателя энергетические показатели его вначале возрастают, а затем снижаются?

14. Как изменяется максимальный (критический) момент асинхронного электродвигателя с изменением питающего напряжения?

15. Как изменяется частота тока ротора асинхронного электродвигателя с изменением нагрузки на валу?

16. Перечислите способы пуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

17. Перечислите все виды потерь мощности в асинхронных электродвигателях.

18. Назовите способы регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

10. Как влияет на пусковой момент активное сопротивление пускового реостата асинхронного электродвигателя с фазным ротором?

Министерство просвещения и воспитания Ульяновской области
ОГБПОУ «Большенагаткинский ТТис»

Утверждаю:

Заместитель директора

_____ /Мынина О.Ю./

« 31 » августа 2020 года

Контрольно-измерительные материалы

ОП 01 Электротехника
Профессия 23.01.03 Автомеханик

РАССМОТРЕН

на заседании цикловой методической
комиссии (ЦМК) по дисциплинам
технического профиля

Председатель ЦМК

_____ А.В.Можаев

СОГЛАСОВАНО

Заместитель директора

_____ О.Ю.Мынина

31 августа 2020 г.

Протокол заседания ЦМК

№ 1 от августа 2020 г.

Автор – разработчик: Наместников Александр Алексеевич - преподаватель

Содержание

1. Пояснительная записка..... стр.
2. Контрольно-измерительные материалы по темам:
 - 2.1. Типовые задания для оценки освоения дисциплины.....4 стр.

1. Пояснительная записка

Целью контрольно-измерительных материалов является установление уровня освоения дисциплины в ходе реализации федерального компонента государственного образовательного стандарта среднего (полного) общего образования в рамках профессиональных образовательных стандартов.

Комплект контрольно-измерительных материалов предназначен для проверки результатов освоения ОП 01 Электротехника.

В сборнике представлены контрольно-измерительные материалы, разработанные по всем темам дисциплины. Комплект контрольно-измерительных материалов предназначен для оценивания знаний обучающихся при проведении контроля качества обучения. В КИМЫ заложены задания 3-х уровней усвоения: 1-ознакомительный, 2-репродуктивный и 3-продуктивный (творческий).

Содержание контрольно-измерительных материалов в вариантах заданий тестового типа одинаковой сложности, имеют примерно одинаковое суммарное количество существенных операций. На каждый вариант контрольно-измерительных материалов подготовлены эталоны ответов.

Критерием оценки правильности выполнения задания служит коэффициент усвоения – $K:K=a/v$,

где a – количество правильно выполненных заданий (существенных операций), v – общее число заданий (существенных операций), которые необходимо выполнить.

Если $K=0,91-1,0$	отлично
Если $K=0,81-0,9$	хорошо
Если $K=0,7-0,8$	удовлетворительно
Если $K<0,7$	неудовлетворительно

1. Контрольно-измерительные материалы

2.1 Перечень учебных элементов, выносимых на контроль по дисциплине ОП 01 «Электротехника»

№	Наименование разделов и тем	Наименование учебных элементов	Проверяемые знания и умения	
			Знания	Умения
1.2	Электрические цепи постоянного тока	1. Общие сведения об электрических цепях 2. Электрическая проводимость и сопротивления 3. Расчет электрических цепей постоянного тока	1. Определять основные и вспомогательные элементы электрической цепи 2. Определять эквивалентное сопротивление при различном соединении резисторов 3. Различать режимы работы электрической цепи	
1.3	Электромагнетизм	1. Общие сведения о магнитных цепях 2. Электромагнитная индукция	1. Элементы магнитных цепей 2. Закон электромагнитной индукции	
1.4	Электрические измерения	1. Измерение электрических величин	1. Методы измерения тока, напряжения, сопротивления	
1.6	Электрические цепи переменного тока	1. Переменный электрический ток и его характеристики 2. Электрические цепи переменного тока с активными и реактивными сопротивлениями	1. Закон Ома для цепей переменного тока 2. Определять активную, реактивную и полную мощность в цепях переменного тока	
1.7	Трехфазные цепи переменного тока	1. Соединение потребителей в «звезду» и «треугольник» 2. Трех и четырех проводная линия	1. Элементы трехфазной системы 2. Соединения потребителей	

1.9	Электрические машины переменного тока	1. Принцип работы трехфазного асинхронного электродвигателя 2. Механические характеристики двигателей	1. Устройство и принцип работы электрических машин	
-----	---------------------------------------	--	--	--

2.2. Типовые задания для оценки освоения дисциплины

Тесты и эталоны ответов для дифференцированного зачета по дисциплине «Электротехника»

Составил преподаватель Наместников А. А.

Вариант 1

№	Вопросы	Ответы	Эталон ответа
1	Что произошло с сопротивлением электрической цепи, если увеличился ток при том же напряжении питания?		Сопротивление уменьшилось 3 существенные операции
2	Три сопротивления соединены параллельно. Чему равно полное сопротивление участка цепи.		$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ 4 существенные операции
3	Закончите предложение: Увеличение воздушного зазора в магнитопроводе цепи постоянного тока ...		Уменьшает магнитный поток в зазоре 3 существенные операции
4	Как включается добавочное сопротивление при измерении напряжения		Последовательно с измерительным прибором 2 существенные операции
5	Укажите причину неисправности электродвигателя: ротор не вращается, сильно гудит		Обрыв в фазе статора 4 существенные операции
6	Назовите основное достоинство двигателей постоянного тока		Возможность плавного регулирования частоты вращения ротора 3 существенные операции
7	Почему магнитопровод трансформатора набирают из отдельных листов электротехнической стали		Для уменьшения потерь на вихревые токи 3 существенные операции
8	Укажите причину неисправности электродвигателя: двигатель гудит, ротор вращается медленно		Замкнуты листы сердечника статора 4 существенные операции

9	При каком условии в контуре возникает Э.Д.С.		Если он перемещается в магнитном поле 3 существенные операции
10	Что такое «угол сдвига фаз»		Угол опережения или запаздывания тока относительно напряжения 3 существенные операции

Вариант 2

№	Вопросы	Ответы	Эталон ответа
1	Какие виды сопротивлений действуют в цепях переменного тока		Активные и реактивные 2 существенные операции
2	Фазы генератора и приемника энергии соединены в «звезду» с нулевым проводом. Амперметры в линейных проводах показывают одно и то же значение тока. Можно ли от приемника энергии отключить «нулевой» провод.		Можно, так как нагрузка симметричная 3 существенные операции
3	Какому току цепь с последовательным активным и индуктивным сопротивлениями оказывает большее сопротивление		Переменному току 3 существенные операции
4	Можно ли в цепях переменного тока арифметически складывать активное и реактивное сопротивление	1.	Нельзя 2 существенная операция
5	На основе какого явления в контуре возникает Э.Д.С.		Электромагнитной индукции 3 существенные операции
6	Трансформатор повышает или понижает:		Напряжение 3 существенные операции
7	Какова частота промышленного переменного тока в России		50Гц 2 существенная операция
8	Каков основной недостаток трехфазного асинхронного двигателя		Малый вращающий момент при запуске 3 существенные операции
9	Что необходимо сделать для реверсирования асинхронного электродвигателя		Поменять местами фазы В и С 2 существенные операции
10	Как изменится сопротивление катушки индуктивности с		Увеличится 3 существенные операции

	увеличением частоты переменного тока		
--	--------------------------------------	--	--

Вариант 1

№	Вопросы	Эталон ответа
1	Что произошло с сопротивлением электрической цепи, если увеличился ток при том же напряжении питания?	
2	Три сопротивления соединены параллельно. Чему равно полное сопротивление участка цепи.	
3	Закончите предложение: Увеличение воздушного зазора в магнитопроводе цепи постоянного тока ...	
4	Как включается добавочное сопротивление при измерении напряжения	
5	Укажите причину неисправности электродвигателя: ротор не вращается, сильно гудит	
6	Назовите основное достоинство двигателей постоянного тока	
7	Почему магнитопровод трансформатора набирают из отдельных листов электротехнической стали	
8	Укажите причину неисправности электродвигателя: двигатель гудит, ротор вращается медленно	
9	При каком условии в контуре возникает Э.Д.С.	
10	Что такое «угол сдвига фаз»	

Вариант 2

№	Вопросы	Ответы
1	Какие виды сопротивлений действуют в цепях переменного тока	
2	Фазы генератора и приемника энергии соединены в «звезду» с нулевым проводом. Амперметры в линейных проводах показывают одно и то же значение тока. Можно ли от приемника энергии отключить «нулевой» провод.	
3	Какому току цепь с последовательным активным и индуктивным сопротивлениями оказывает большее сопротивление	
4	Можно ли в цепях переменного тока арифметически складывать активное и реактивное сопротивление	
5	На основе какого явления в контуре возникает Э.Д.С.	
6	Трансформатор повышает или понижает:	
7	Какова частота промышленного переменного тока в России	
8	Каков основной недостаток трехфазного асинхронного двигателя	
9	Что необходимо сделать для реверсирования асинхронного электродвигателя	
10	Как изменится сопротивление катушки индуктивности с увеличением частоты переменного тока	

Вариант 3

№	Вопросы	Ответы
1	Какие виды мощности различают в цепях переменного тока	1.Активную мощность. 2. Реактивную мощность. 3.Полную мощность. 4. Все выше перечисленные.
2	Фазы генератора и приемника энергии соединены в «звезду» с нулевым проводом. Амперметры в линейных проводах показывают разные значения тока. Можно ли от приемника энергии отключить «нулевой» провод.	1.Можно, так как нагрузка симметричная. 2.Нельзя, так как нагрузка несимметричная 3.Нулевой провод не влияет на нагрузку.
3	Какое напряжение между нулевым проводом и фазным проводом.	1.380 В. 2.220 В. 3.127 В.
4	Можно ли в цепях переменного тока арифметически складывать активное и реактивное сопротивление	
5	На основе какого явления в контуре возникает Э.Д.С.	
6	Силовые трансформаторы имеют бак с маслом. Какую роль выполняет бак.	1.Хранит масло на случай чрезвычайной обстановки. 2.Гасит вибрации обмоток трансформатора. 3.Охлаждает обмотки трансформатора.
7	Для чего заземляют электроустановки.	1.Чтобы не допустить поражения человека электрическим током. 2.Чтобы предохранить обмотки от короткого замыкания. 3.Чтобы знать об утечке тока.
8	Каков основной недостаток трехфазного асинхронного двигателя	
9	Что необходимо сделать для реверсирования асинхронного электродвигателя	Поменять местами фазы В и С 2 существенные операции

10	Как изменится сопротивление участка цепи с конденсатором с увеличением частоты переменного тока	<ol style="list-style-type: none"> 1. Увеличится. 2. Уменьшится. 3. Останется неизменным.
----	---	--

Вариант 3

№	Вопросы	Эталоны ответов.
1	Какие виды мощности различают в цепях переменного тока	
2	Фазы генератора и приемника энергии соединены в «звезду» с нулевым проводом. Амперметры в линейных проводах показывают разные значения тока. Можно ли от приемника энергии отключить «нулевой» провод.	
3	Какое напряжение между нулевым проводом и фазным проводом.	
4	Можно ли в цепях переменного тока арифметически складывать активное и реактивное сопротивление	
5	На основе какого явления в контуре возникает Э.Д.С.	
6	Силовые трансформаторы имеют бак с маслом. Какую роль выполняет бак.	
7	Для чего заземляют электроустановки.	
8	Каков основной недостаток трехфазного асинхронного двигателя	
9	Что необходимо сделать для реверсирования асинхронного электродвигателя	
10	Как изменится сопротивление участка цепи с конденсатором	

	с увеличением частоты переменного тока	
--	--	--

Вариант 4

№	Вопросы	Ответы
1	Какие виды сопротивлений действуют в цепях переменного тока	
2	Фазы генератора и приемника энергии соединены в «звезду» с нулевым проводом. Амперметры в линейных проводах показывают одно и то же значение тока. Можно ли от приемника энергии отключить «нулевой» провод.	
3	Какому току цепь с последовательным активным и индуктивным сопротивлениями оказывает большее сопротивление	
4	Можно ли в цепях переменного тока арифметически складывать активное и реактивное сопротивление	
5	На основе какого явления в контуре возникает Э.Д.С.	
6	Трансформатор повышает или понижает:	
7	Какова частота промышленного переменного тока в России	1.
8	Каков основной недостаток трехфазного асинхронного двигателя	
9	Что необходимо сделать для реверсирования асинхронного электродвигателя	
10	Как изменится сопротивление катушки индуктивности с увеличением частоты переменного тока	

Вариант 5

№	Вопросы	Эталоны ответов.
1	В каких единицах измеряют частоту переменного тока.	
2	Фазы генератора и приемника энергии соединены в «звезду» с нулевым проводом. Амперметры в линейных проводах показывают разные значения тока. Можно ли от приемника энергии отключить «нулевой» провод.	
3	Какое напряжение между фазным проводом А и фазным проводом В.	
4	Можно ли в цепях переменного тока арифметически складывать активное и реактивное сопротивление	
5	На основе какого явления в контуре возникает Э.Д.С.	
6	Силовые трансформаторы имеют бак с маслом. Какую роль выполняет бак.	
7	Для чего заземляют электроустановки.	
8	Каков основной недостаток трехфазного асинхронного двигателя	
9	Что необходимо сделать для реверсирования асинхронного электродвигателя	
10	Как изменится сопротивление участка цепи с конденсатором с увеличением частоты переменного тока	

Вариант 6

№	Вопросы	Эталон ответа
1	Две лампочки соединены параллельно друг другу. Что произойдет в цепи, если перегорела одна из ламп.	
2	Три сопротивления соединены параллельно. Чему равно полное сопротивление участка цепи.	
3	Закончите предложение: Увеличение воздушного зазора в магнитопроводе цепи постоянного тока ...	
4	Как включается добавочное сопротивление при измерении напряжения	
5	Укажите причину неисправности электродвигателя: ротор не вращается, сильно гудит	
6	Назовите основное достоинство двигателей постоянного тока	
7	Почему магнитопровод трансформатора набирают из отдельных листов электротехнической стали	
8	Укажите причину неисправности электродвигателя: двигатель гудит, ротор вращается медленно	
9	При каком условии в контуре возникает Э.Д.С.	
10	Как увеличить $\cos\varphi$ в цепях переменного тока.	

