

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Н. В. Бочарова, М. С. Харитонов**

**«ELECTRICAL MACHINES / ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»**

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический  
материал по изучению дисциплины для студентов магистратуры  
по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника /  
Electrical Power Engineering and Electrical Engineering

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2023

УДК 631.371

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

И.Е. Кажекин

**Бочарова, Н. В.**

Электрические машины: учеб.-методич. пособие – локальный электронный методический материал по изучению дисциплины «Electrical machines / Электрические машины» для студ. магистратуры по направлению подгот. 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / Electrical Power Engineering and Electrical Engineering / **Н. В. Бочарова, М. С. Харитонов.** – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 27 с.

В учебно-методическом пособии представлен тематический план дисциплины, методические рекомендации по изучению каждой темы, вопросы для самостоятельной работы, материалы для подготовки к текущей и промежуточной аттестации.

Табл. 2, список лит. – 5 наименований

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 28.06.2023 г., протокол № 10

УДК 621.371

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Калининградский  
государственный технический  
университет», 2023 г.

© Бочарова Н. В., Харитонов М. С., 2023 г.

## Оглавление

Введение .....	4
1 Тематический план дисциплины .....	7
2 Содержание дисциплины.....	7
Тема 1. Однофазный и трехфазный трансформаторы .....	7
Тема 2. Общие вопросы теории машин переменного тока .....	11
Тема 3. Асинхронные машины.....	12
Тема 4. Синхронные машины.....	14
Тема 5. Машины постоянного тока.....	17
3 Методические указания по самостоятельной работе студентов .....	21
Список рекомендуемых источников .....	22
Приложение № 1 Вопросы для подготовки к тестированию .....	23

## Введение

Дисциплина «Electrical machines / Электрические машины» входит в состав основной профессиональной образовательной программы высшего образования магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника / Electrical Power Engineering and Electrical Engineering». Дисциплина является составным элементом модуля «Electrical machines / Электрические машины» и изучается в третьем семестре при очной и заочной формах обучения.

*Целью* освоения дисциплины «Электрические машины» является знакомство обучающихся с основными принципами работы электрических машин и формирование у обучающихся готовности к использованию системы знаний в области теории и практики электромеханического преобразования энергии, лежащего в основе современной электроэнергетики.

*Предметом* изучения является электрическая машина – основное звено энергетической установки на тепловых электростанциях.

### *Задачи дисциплины:*

- изучение многообразных взаимосвязанных физических явлений и процессов, происходящих в электрических машинах;
- освоение конструкции и принципа действия различных типов электрических машин и трансформаторов;
- приобретение навыков определения основных параметров и выходных характеристик электрических машин и трансформаторов.

В результате освоения дисциплины студент должен:

### *знать:*

- принцип действия современных типов электрических машин;
- особенности их конструкции;
- уравнения, схемы замещения и характеристики электрических машин;

### *уметь:*

- использовать полученные знания при эксплуатации электрических машин;

### *владеть:*

- навыками элементарных расчетов и испытаний электрических машин.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства текущего контроля успеваемости;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- тестовые задания (для студентов всех форм обучения);
- задания и контрольные вопросы по лабораторным работам (для студентов всех форм обучения).

Тестовые задания используются для оценки освоения тем дисциплины студентами. Тестирование обучающихся проводится на занятиях после изучения на лекциях соответствующих разделов. Вопросы для подготовки к тестированию приведены в приложении 1. По итогам выполнения тестовых заданий оценка выставляется по пятибалльной шкале в соответствии с критериями, приведенными в таблице 1.

Задания и контрольные вопросы по лабораторным работам по дисциплине приведены в соответствующем учебно-методическом пособии по выполнению лабораторных работ.

Промежуточная аттестация по дисциплине является составным элементом промежуточной аттестации по модулю «Electrical machines / Электрические машины». Промежуточная аттестация по модулю проводится в форме экзамена. Экзамен проходит в форме ответа на экзаменационные вопросы, содержащиеся в экзаменационном билете. Экзаменационный билет содержит два экзаменационных вопроса. Перечень вопросов к экзамену приведен в фонде оценочных средств по модулю. Оценка за экзамен выставляется по пятибалльной шкале в соответствии с критериями, представленными в таблице 1. Допуск студентов к экзамену осуществляется при условии выполнения и защиты всех лабораторных работ с учетом результатов текущего контроля успеваемости.

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок	2	3	4	5
	0-40%	41-60%	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
Критерий	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>1 Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект

	собой)			
<b>2 Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать и систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
<b>3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта</b>	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематически и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задаче данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
<b>4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

## 1 Тематический план дисциплины

Темы занятий приведены в таблице 2. На изучение каждой темы дисциплины выделяется не менее 2 академических часов лекционных занятий. Общее количество лекционных занятий по дисциплине составляет 16 академических часов для очной формы и 4 академических часа для заочной формы обучения.

Таблица 2 – Тематический план дисциплины

№ п/п	Темы занятий по дисциплине
1	<b>Тема 1.</b> Однофазный и трехфазный трансформаторы
2	<b>Тема 2.</b> Общие вопросы теории машин переменного тока
3	<b>Тема 3.</b> Асинхронные машины
4	<b>Тема 4.</b> Синхронные машины
5	<b>Тема 5.</b> Машины постоянного тока

Примечание: Чтение лекций осуществляется традиционным способом с использованием технических средств обучения.

## 2 Содержание дисциплины

### Тема 1. Однофазный и трехфазный трансформаторы

#### Ключевые вопросы темы:

1. Конструкция и принцип действия трансформатора.
2. Уравнения напряжений, МДС и токов трансформатора.
3. Векторная диаграмма трансформатора.
4. Экспериментальное определение параметров схемы замещения трансформатора.
5. Внешняя характеристика трансформатора.
6. Потери и КПД трансформатора.
7. Специальные трансформаторы.
8. Группы соединения обмоток трансформаторов.
9. Параллельная работа трансформаторов.

#### Методические рекомендации по теме:

Изучение темы «Трансформаторы» полезно начать с анализа процессов в катушке с ферромагнитным сердечником (дресселе) при синусоидальном напряжении на ее зажимах. В работе трансформатора важную роль играет то положение, что при изменении нагрузки трансформатора в широком диапазоне

магнитный поток может считаться практически неизменным. Напряжение на зажимах первичной обмотки уравнивается электродвижущей силой, наводимой в этой обмотке, и падением напряжения в первичной обмотке, которое очень невелико. Поэтому  $E_1$  при номинальной нагрузке  $(0.95 - 0.97) U_1$ . Увеличение тока даже в два раза может уменьшить  $E_1$  всего до  $(0.93 - 0.95)U_1$ . Таким образом, изменение  $E_1$  настолько незначительна, что практически эта ЭДС может считаться неизменной. Но  $E_1$  пропорциональна амплитудному значению магнитного потока. Отсюда и вытекает сформулированное выше положение о неизменности магнитного потока. Основываясь на этом положении, можно объяснить, почему при изменении нагрузки трансформатора, а следовательно, и тока во вторичной обмотке одновременно изменяется ток и в первичной обмотке. Всякое изменение тока вторичной обмотки принуждает изменяться ток первичной обмотки настолько, чтобы общая намагничивающая сила обмоток оставалась неизменной. Положение о неизменности магнитного потока относится не только к трансформаторам, но также и к машинам переменного тока – асинхронным и синхронным.

Анализируя работу трансформатора, главное внимание следует обратить на его векторную диаграмму и схемы замещения. Схема замещения представляет собой несложную цепь переменного тока, и исследовать ее проще, чем анализировать электромагнитные процессы в самом трансформаторе. Необходимо обратить внимание на построение векторных диаграмм при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузок, режимов холостого хода и короткого замыкания. При построении векторных диаграмм трансформатора следует иметь в виду, что лишь первый шаг является произвольным. Остальные построения будут обусловлены, с одной стороны, характером нагрузки и приведенным значением напряжения вторичной обмотки, а с другой – уравнениями напряжений и токов для первичной и вторичной обмоток трансформатора.

При рассмотрении изменении вторичного напряжения следует обратить внимание на активную нагрузку. При такой нагрузке  $\varphi_2 = 0$  и поэтому формула процентного изменения напряжения  $\Delta U\% = \beta u_{кА}$ . Отсюда следует, что при номинальной нагрузке величиной  $\Delta U$  можно пренебречь.

В теории трансформаторов пользуются схемой замещения. Возможность представить трансформатор его схемой замещения вытекает из теории четырехполюсника, поскольку трансформатор может рассматриваться как четырехполюсник. Подобная же схема замещения используется и в теории асинхронных машин вследствие существования некоторой аналогии между процессами в асинхронной машине и трансформаторе. Использование схемы замещения означает, что вместо реального объекта – электрической машины –

рассматривается его схема. Соотношения в реальном объекте (электрической машине) и аналоге (схеме замещения) описываются уравнениями одинакового вида. В то же время схема замещения значительно проще и нагляднее, нежели сама электрическая машина.

В трехфазных трансформаторах алгебраическая сумма мгновенных значений синусоидальных магнитных потоков в сердечнике равна нулю, поэтому необходимость в «нейтральном» стержне отпадает и трехфазный трансформатор выполняется в виде трехстержневого.

В паспорте трехфазных трансформаторов дается номинальная мощность и мощность потерь всех трех фаз: под номинальными напряжениями понимаются линейные на зажимах трансформатора в режиме холостого хода, а под номинальными токами – линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

Теория трансформаторов полностью распространяется на автотрансформаторы и измерительные трансформаторы. Поэтому при изучении последних следует обратить внимание на область применения, их особенности и возникающие дополнительные погрешности (в измерительных трансформаторах). Нужно четко уяснить, что рабочим режимом измерительного трансформатора напряжения является режим холостого хода, а рабочим режимом измерительного трансформатора тока – режим короткого замыкания. Нарушение данных режимов работы приводит к выходу из строя измерительных трансформаторов.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Изобразите схематически однофазный трансформатор и объясните принцип его работы. Объясните, почему стальной сердечник трансформатора собираются «внахлестку»?

2. Какую обмотку трансформатора называют первичной и какую вторичной?

3. Выведете выражения для действующих значений ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора основным магнитным потоком.

4. В чем состоит режим холостого хода трансформатора? Начертите векторную диаграмму режима холостого хода.

5. Что называют коэффициентом трансформации трансформатора?

6. Почему на сердечнике трансформатора обмотки высшего и низшего напряжений размещают на общем стержне?

7. Напишите уравнение намагничивающих сил в трансформаторе.

8. Напишите уравнение токов трансформатора и объясните физический смысл составляющих первичного тока.
9. В чем состоит явление рассеяния в трансформаторе? Как выражается ЭДС рассеяния обмоток?
10. Напишите уравнения напряжений для первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений.
11. Что называют приведенными значениями величин вторичной обмотки?
12. Начертите схему замещения трансформатора.
13. Начертите векторные диаграммы трансформатора для случаев нагрузки его чисто активным и активно-индуктивным сопротивлениями.
14. Начертите схему опыта холостого хода и объясните, какие величины определяются в этом опыте.
15. Почему в опыте холостого хода мощность потерь в меди настолько мала, что ею можно пренебречь?
16. Начертите схему опыта короткого замыкания и объясните, какие величины определяются в этом опыте.
17. Почему в опыте короткого замыкания мощность потерь в стали настолько мала, что ею можно пренебречь?
18. Сформулируйте определение для напряжения короткого замыкания; назовите его примерное значение.
19. Выведите выражение для процентного изменения напряжения трансформатора.
20. Напишите общее выражение для КПД трансформатора с учетом относительной величины вторичного тока.
21. Как осуществляется трансформирование трехфазной цепи?
22. Что понимают под группой соединения трехфазного трансформатора?
23. Назовите условия включения на параллельную работу трехфазного трансформатора.
24. Назовите последствия нарушения условий включения трехфазного трансформатора на параллельную работу.
25. Начертите схему автотрансформатора – однофазного и трехфазного. Каковы преимущества и недостатки автотрансформатора?
26. Начертите принципиальную схему трансформатора напряжения и тока.
27. Какие ошибки возникают при использовании трансформаторов напряжений и токов для измерения напряжения и тока?

## **Тема 2. Общие вопросы теории машин переменного тока**

### **Ключевые вопросы темы:**

1. Устройство статора машин переменного тока и основные понятия об обмотках статора.
2. Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки статора.

### **Методические рекомендации по теме**

Следует обратить внимание, что требования к обмотке статора машин переменного тока сводятся к следующему: меньший расход обмоточной меди; удобство и меньше затрат в изготовлении, т. е. технологичность; форма кривой ЭДС, наводимой в обмотке статора, должна быть практически синусоидальной. Применительно к генераторам переменного тока это требование обусловлено тем, что при несинусоидальной ЭДС в электрической цепи генераторов появляются высшие гармонические составляющие тока. Они оказывают вредное влияние на работу всей энергосистемы: возрастают потери, возникают опасные перенапряжения, усиливается вредное влияние линий электропередачи на цепи связи. Применительно к двигателям переменного тока требование несинусоидальности ЭДС обмотки статора также актуально, т. к. это ведет к росту потерь и уменьшению полезной мощности двигателя. Наличие зубцов и пазов на поверхности статора создает неравномерность воздушного зазора. По этой причине все гармонические составляющие магнитного поля приобретают зубцовую форму. Каждая из этих искаженных гармоник индуцирует в обмотке статора две ЭДС собственной частоты и зубцовую. Вредное влияние зубцовых гармоник ЭДС выражается в том, что они вызывают дополнительные потери в машине. Зубцовые гармоники можно ослабить сокращением шага обмотки и скосом пазов на одно зубцовое деление, а в синхронных машинах скосом полюсных наконечников.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что такое шаг обмотки по пазам и какой должна быть его величина?
2. Что такое полюсное деление?
3. Каковы достоинства и недостатки двухслойных и однослойных обмоток статора?
4. При каком условии вращающееся магнитное поле статора будет круговым?
5. Как изменить направление вращения магнитодвижущей силы обмотки статора?

### **Тема 3. Асинхронные машины**

#### **Ключевые вопросы темы:**

1. Двигательный и генераторный режим работы асинхронной машины.
2. Устройство асинхронных двигателей.
3. Уравнения напряжений, магнитодвижущих сил и токов асинхронного двигателя.
4. Схемы замещения асинхронного двигателя.
5. Электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронного двигателя.
6. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.
7. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

#### **Методические рекомендации по теме**

Перед изучением темы «Асинхронные машины» следует повторить тему «Вращающееся магнитное поле», после чего рассмотреть конструкции обмоток машин переменного тока. Обмотки асинхронных и синхронных машин мало чем отличаются друг от друга, поэтому в теме «Синхронные машины» конструкции обмоток не рассматриваются. Процессы, происходящие в асинхронной машине, описываются с помощью формул, векторных диаграмм и схем замещения, близких к формулам, диаграммам и схемам замещения трансформатора. Асинхронный двигатель, стоящий неподвижно под током, представляет собой трансформатор с первичной (статорной) и вторичной (роторной) обмотками и магнитопроводом с воздушным зазором. Вращающееся магнитное поле статора создает в каждой фазе обмоток такие же синусоидальные ЭДС, какие в обмотках трансформатора создаются пульсирующим магнитным полем. Если же двигатель вращается со скольжением  $s$ , токи в роторе по величине и фазе не отличаются от токов неподвижного ротора, в каждую фазу которого введено добавочное сопротивление. Особое внимание нужно уделить формуле электромагнитного момента асинхронной машины, полученной с помощью Г-образной схемы замещения, которая имеет первостепенное значение для изучения остальных вопросов данной темы. Важно помнить при этом, что хотя формула справедлива для любого значения скольжения, асинхронный двигатель устойчиво работает только пока скольжение меньше критического значения.

При нормальной работе асинхронного двигателя и небольших скольжениях зависимость  $M = f(s)$  близка к прямолинейной. В результате в этом диапазоне механическая характеристика  $n = f(M)$  также почти прямолинейная и выражается уравнением  $n = n_0 - aM$ , где  $a$  – постоянная величина.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, как правило, пускают в ход прямым включением в сеть без применения специальных пусковых устройств. Мощности энергетических систем, от которых питаются сети промышленных предприятий, настолько велики, что толчки тока, происходящие при пуске асинхронных двигателей, даже большой мощности, не оказывают существенного воздействия на режим этих сетей. Хорошие пусковые свойства асинхронных двигателей объясняются тем, что при пуске в ход сопротивление обмотки ротора намного больше, чем при нормальной работе. Нужно разобраться в причинах такого явления. Изучив способы пуска, надо сравнить их между собой, проанализировав достоинства и недостатки каждого. Аналогично следует проанализировать способы регулирования частоты вращения двигателя.

Изучая способы регулирования скорости вращения ротора, нужно отчетливо представить себе вид механических характеристик, соответствующих различным способам регулирования.

#### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Изобразите схематически устройство асинхронной машины.
2. Объясните, как происходит возбуждение вращающегося магнитного поля трехфазной системой токов.
3. Объясните принцип работы асинхронного двигателя.
4. Что называется скольжением в асинхронном двигателе? Как измеряется скольжение?
5. Как зависит скорость вращения вращающегося магнитного поля от частоты напряжения в питающей сети и от выполнения обмотки статора? Какая возможна максимальная скорость вращения ротора при частоте сети 50 Гц.
6. Как осуществить изменение направления вращения ротора двигателя?
7. Чему равна частота ЭДС в роторе, если частота в сети равна 50 Гц, а скольжение составляет 2 %?
8. При каких условиях асинхронная машина работает в режиме: генератора, электромагнитного тормоза?
9. Напишите выражения для ЭДС, наводимой в неподвижном и вращающемся роторе.
10. Напишите уравнение намагничивающих сил и токов.
11. Выведите выражение для тока во вращающемся роторе.
12. Начертите векторную диаграмму асинхронного двигателя.
13. Объясните, в чем заключается аналогия между асинхронным двигателем и трансформатором.

14. Выведите выражение для вращающего момента двигателя. Начертите кривую  $M = f(s)$ .

15. Почему при увеличении скольжения в пределах от 0 до  $s_k$  вращающий момент увеличивается, а при дальнейшем увеличении скольжения от  $s_k$  до 1 – уменьшается?

16. Какая часть кривой  $M = f(s)$  соответствует устойчивой работе двигателя и какая - неустойчивой?

17. Что называется механической характеристикой двигателя? Начертите естественную механическую характеристику асинхронного двигателя.

18. Как влияет величина сопротивления цепи ротора на пусковые свойства двигателя?

19. Какие существуют пути уменьшения пускового тока в двигателе с короткозамкнутым ротором?

20. Перечислите возможные способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя.

21. Как осуществляется изменение числа пар полюсов обмотки статора двигателя?

22. Начертите искусственную механическую характеристику двигателя с фазным ротором при регулировании скорости вращения путем включения реостата в цепь ротора.

23. Начертите искусственные механические характеристики при регулировании скорости вращения путем изменения частоты питающего напряжения.

24. Начертите искусственные механические характеристики при регулировании скорости вращения путем изменения числа полюсов.

25. Каким образом асинхронная машина может быть использована для регулирования напряжения?

26. Каким основным недостатком обладает однофазный асинхронный двигатель? Какие существуют способы устранения этого недостатка?

#### **Тема 4. Синхронные машины**

##### **Ключевые вопросы темы:**

1. Возбуждение синхронных машин.
2. Типы синхронных машин и их устройство.
3. Магнитная цепь синхронной машины.
4. Магнитное поле синхронной машины.
5. Реакция якоря синхронной машины.
6. Уравнения напряжений синхронного генератора.
7. Векторные диаграммы синхронного генератора.

8. Характеристики синхронного генератора.
9. Включение синхронного генератора на параллельную работу.
10. Угловые характеристики синхронного генератора.
11. Колебания синхронных генераторов.
12. V-образные характеристики синхронного генератора.
13. Принцип действия синхронного двигателя.
14. Пуск синхронного двигателя.
15. V-образные и рабочие характеристики синхронного двигателя.
16. Синхронные компенсаторы.

### **Методические рекомендации по теме:**

Важное место в теории синхронных машин занимает работа синхронной машины, присоединенной к сети, которая питается мощными генераторами. Исходят из предположения, что общая мощность этих генераторов несоизмеримо велика по сравнению с мощностью рассматриваемой синхронной машины (сеть большой мощности). В соответствии с этим считают, что любое изменение режима рассматриваемой машины не в состоянии оказать заметного влияния на электрическое состояние сети, которое может, таким образом, считаться неизменным.

Синхронная машина, присоединенная к сети, может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. В обоих режимах вращение ротора происходит с синхронной скоростью без каких-либо устройств для поддержания синхронизма.

Изучение процессов, имеющих место в синхронной машине, существенно облегчается, если воспользоваться своего рода механической моделью. Трехфазная система токов в обмотке якоря создает вращающееся магнитное поле. Это поле может быть заменено полюсной системой, скользящей вдоль внутренней поверхности статора с постоянной скоростью, равной скорости вращения магнитного поля. Две вращающиеся полюсные системы – ротора и воображаемая, эквивалентная вращающемуся магнитному полю, - неподвижны одна относительно другой. Между ними возникают силы магнитного притяжения, которые могут быть уподоблены упругим связям, соединяющим обе системы. Благодаря этим связям достигается синхронность вращения ротора и магнитного поля статора.

Если будет превышен известный предел нагрузки машины, то произойдет разрыв упругих связей. После этого скорость вращения ротора становится уже не зависящей от скорости вращения магнитного поля статора. Это явление называется выпадением из синхронизма. Работа синхронной машины в таком режиме невозможна.

Упругие связи между двумя вращающимися полюсными системами могут появиться только в том случае, если обе системы вращаются синхронно, а их полюса расположены надлежащим образом: N – полюс одной системы, против S - полюса другой системы. По этой причине пуск синхронного двигателя не может быть произведен прямым включением в сеть. Синхронный двигатель пускается как асинхронный и только после достижения ротором скорости, близкой к синхронной, переводится в синхронный режим. Усложнение процесса пуска является существенным недостатком синхронного двигателя.

Очень важную роль в синхронной машине играет реакция якоря, т.е. воздействие намагничивающей силы якоря на основное поле машины, создаваемое намагничивающей силой обмотки возбуждения ротора. Амплитудное значение магнитного потока в синхронной машине задается величиной напряжения в сети. Магнитный поток создается намагничивающей силой, которая складывается из намагничивающей силы обмотки возбуждения и намагничивающей силы обмотки якоря. Для неизменности амплитудного значения магнитного потока необходимо, чтобы результирующая намагничивающая сила оставалась неизменной. Всякое изменение тока в обмотке возбуждения ротора влечет за собой изменение величины и фазы тока в якоре и соответственное изменение намагничивающей силы якоря. В частности, если вследствие увеличения тока в обмотке возбуждения ЭДС якоря станет по модулю больше, чем напряжение в сети (перевозбуждение), то синхронная машина, работая в режиме двигателя, принуждается к потреблению из сети тока, опережающего по фазе напряжение в сети. Иначе говоря, синхронный двигатель в этих условиях представляет собой активно-емкостную нагрузку.

При изучении темы «Синхронные машины» большое внимание следует уделить векторным диаграммам, дающим большую информацию об электромагнитных процессах, соответствующих различным режимам работы машины. Следует научиться строить векторные диаграммы для любой точки внешних и регулировочных характеристик генератора и двигателя. Необходимо понимать причины конструктивного отличия роторов синхронных машин для высоких и низких частот вращения. При рассмотрении параллельной работы генераторов следует изучить способы включения генераторов на параллельную работу, сравнить их достоинства и недостатки.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие способы возбуждения синхронных машин существуют?

2. Объясните устройство явнополюсных и неявнополюсных роторов синхронных машин.
3. Чем обеспечивается неравномерный воздушный зазор в синхронной машине?
4. В чем состоит влияние реакции якоря?
5. Каково действие реакции якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузках синхронного генератора?
6. Почему характеристика короткого замыкания синхронной машины имеет вид прямой линии?
7. Что такое номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки и почему при емкостной нагрузке его величина отрицательна?
8. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
9. Что такое синхронизация генератора, включаемого на параллельную работу? Перечислите условия и порядок включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью трехфазного тока.
10. Как нагрузить генератор, включенный на параллельную работу?
11. Что такое коэффициент статической перегружаемости?
12. Какова причина собственных колебаний в синхронном генераторе?
13. Каково назначение и конструкция успокоительной обмотки?
14. Объясните процесс пуска синхронного двигателя. Почему пуск в ход синхронного двигателя осуществляется более сложным образом, чем пуск асинхронного двигателя?
15. Каково назначение синхронного компенсатора?
16. Каковы достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?

## **Тема 5. Машины постоянного тока**

### **Ключевые вопросы темы:**

1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.
2. Обмотки якоря машины постоянного тока.
3. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока.
4. Реакция якоря машины постоянного тока.
5. Способы возбуждения машин постоянного тока.
6. Генератор независимого возбуждения.
7. Генератор параллельного возбуждения.
8. Генератор смешанного возбуждения.
9. Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.

10. Пуск двигателей постоянного тока.

11. Двигатель последовательного возбуждения. Двигатель смешанного возбуждения.

### **Методические рекомендации по теме**

Изучая тему «Электрические машины постоянного тока», следует обратить внимание на то, что, несмотря на большую стоимость, большие габариты и меньшую надежность по сравнению с машинами переменного тока, у машин постоянного тока более легко и плавно и в больших диапазонах регулируется частота вращения, относительно легко осуществляются плавные пуск и реверс двигателя. При изучении свойств электрических машин целесообразно анализировать работу машины в режимах генератора и двигателя, сравнивая направления ЭДС и электромагнитного момента, энергетические диаграммы, изучать свойства генераторов (двигателей) с различными способами возбуждения, сравнивая механические характеристики.

Особое внимание следует обратить на механические свойства двигателей постоянного тока. Только понимая эти свойства, можно решить вопрос о пригодности того или иного двигателя постоянного тока для привода определенного механизма. Лишь на основе этих свойств станет понятно, почему для привода металлорежущего станка применяется двигатель с параллельным возбуждением, а для привода подъемного механизма – двигатель с последовательным возбуждением.

В противоположность асинхронному двигателю двигатель постоянного тока всегда пускается в ход посредством пускового реостата, ограничивающего величину пускового тока. С другой стороны, двигатель постоянного тока допускает плавное регулирование скорости, а асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором практически допускает лишь ступенчатое регулирование скорости вращения. Эти различия должны учитываться при выборе приводного двигателя для рабочего механизма.

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением обладает жесткой механической характеристикой. Магнитный поток остается неизменным при различных нагрузках. При увеличении нагрузки, вследствие реакции якоря, магнитный поток уменьшается. Поэтому механическая характеристика двигателя может считаться прямолинейной, если реакцией якоря можно пренебречь по малости ее или реакция якоря компенсируется.

Поскольку двигатель постоянного тока допускает плавное регулирование скорости вращения, то возникает вопрос о способе регулирования. Широкий диапазон позволил бы использовать двигатель без применения редуктора, что упростило бы передачу и улучшило бы работу приводимого механизма. Однако

возможность расширить диапазон регулирования ограничена, потому что увеличение скорости вращения приводит к ухудшению условий коммутации, а уменьшение скорости вызывает увеличение размеров двигателя.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Изобразите схематически устройство машины постоянного тока.
2. Объясните принцип работы машины постоянного тока в качестве генератора и двигателя.
3. Объясните устройство и назначение коллектора.
4. Выведите формулу для ЭДС, наводимой в обмотке якоря.
5. Начертите характеристику холостого хода. Объясните, почему при токе возбуждения, равном нулю, электродвижущая сила якоря не равна нулю.
6. Изобразите картину магнитного поля в машине постоянного тока для трех случаев: при холостом ходе (ток в обмотке якоря отсутствует); при наличии тока только в обмотке якоря; при наличии тока в обеих обмотках (возбуждения и якоря).
7. Объясните сущность явления реакции якоря. Как она влияет на работу машины?
8. Что называется коммутацией в машине постоянного тока? Какие процессы с ней связаны?
9. Какие существуют средства ослабления реакции якоря? Какие существуют способы улучшения коммутации?
10. Объясните, в чем состоит самовозбуждение генератора. В каком случае в генераторе с параллельным возбуждением самовозбуждение не наступает?
11. Изобразите внешнюю и регулировочную характеристики для генераторов с независимым и параллельным возбуждением.
12. Выведите формулу для электромагнитного вращающего момента двигателя.
13. Напишите уравнения по второму закону Кирхгофа для машины, работающей в режиме генератора и в режиме двигателя.
14. Напишите уравнения по первому закону Кирхгофа для машины с параллельным возбуждением, работающей в режиме генератора и в режиме двигателя.
15. Начертите электрическую схему машины постоянного тока с последовательным возбуждением и напишите уравнение токов для генераторного и двигательного режимов.
16. Изобразите графически зависимости  $M = f_1(I_a)$  и  $n = f_2(I_a)$ .

17. Какие двигатели (с какой обмоткой возбуждения) применяются в станках и подъемно-транспортных механизмах?
18. Напишите формулы механических характеристик двигателей с параллельным и последовательным возбуждением и начертите их характеристики.
19. Перечислите существующие способы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока и укажите преимущества и недостатки этих способов.
20. Начертите в общей системе координат три механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением – естественные и две искусственные: при включении реостата в цепь якоря; при включении регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения.
21. Изобразите схему включения двигателя с параллельным возбуждением, позволяющую реверсировать двигатель.

### **3 Методические указания по самостоятельной работе студентов**

Самостоятельная работа студентов является обязательной частью образовательного процесса. Наряду с изучением лекционного материала необходимо самостоятельно более подробно рассмотреть указанные в данном пособии темы. Приступать к выполнению практических работ необходимо только после изучения теоретического материала, относящегося к теме занятия, а также методических указаний по выполнению задания.

После проработки теоретического материала, выполнения практического задания нужно ответить на вопросы для самоконтроля. Ответы должны быть развернутыми, опираться на данные из нормативной документации, дополнительной литературы, материалов исследований и своего опыта.

Тестирование проводится на консультациях по дисциплине, каждый вариант теста включает в себя 10 вопросов. Материалы для подготовки к тестированию размещены в приложении 1.

## Список рекомендуемых источников

1. Кобозев, В. А. Электрические машины: учебное пособие / В. А. Кобозев. - Ставрополь: Ставропольский гос. Аграр. ун-т, 2015. - 200 с. - Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
2. Кобозев, В. А. Электрические машины: учебное пособие / В. А. Кобозев. - Ставрополь: Ставропольский гос. аграр. ун-т, 2015, 208 с. - Ч. 2. Электрические машины переменного тока. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
3. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. - Москва: Высшая школа, 2000. - 608 с.
4. Токарев, Б. Ф. Электрические машины: учеб. пособие / Б. Ф. Токарев. - Москва: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
5. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины: учеб. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 1990. - 528 с.
6. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов [и др.]. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 319 с.
8. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов [и др.]. – Санкт-Петербург: Питер, 2007. - 349 с.

## Приложение № 1

### Вопросы для подготовки к тестированию

#### Вариант №1

<i>Вопрос 1. Наибольшая температура нагрева электродвигателя ограничивается</i>	
1. термической стойкостью изоляции	3. механической стойкостью подшипников
2. температурой плавления обмоток	4. уставкой тепловой отсечки теплового токового реле

<i>Вопрос 2. Принцип обратимости электрической машины заключается в том, что она</i>	
1. может вращаться в любую сторону	3. может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме
2. может работать при любом напряжении	4. может работать при любом токе

<i>Вопрос 3. Повышенное гудение в трансформаторе может происходить из-за</i>	
1. обрыва заземления	3. ослабление прессовки магнитопровода
2. увлажнения масла	4. перегрузки

<i>Вопрос 4. При неизменном напряжении и частоте в первичной обмотке трансформатора увеличение числа витков первичной обмотки в 2 раза приведет к тому, что индукция в сердечнике трансформатора</i>	
1. Увеличится в 2 раза	3. Не изменится
2. Уменьшится в 2 раза	4. Увеличится в 4 раза

<i>Вопрос 5. Скольжение асинхронной машины, работающей в генераторном режиме, изменяется в пределах</i>	
1. от 2 до бесконечности	3. от 0 до 1
2. от минус бесконечности до 0	4. от минус бесконечности до плюс бесконечности

<i>Вопрос 6. Технические требования, которым должна соответствовать электрическая машина, включают</i>	
1. напряжение и частота вращения	3. ток и мощность
2. требования завода-изготовителя	4. паспортные данные

<i>Вопрос 7. Износ подшипников электрической машины приводит к</i>	
1. перегреву обмоток больше нормального	3. неравномерному воздушному зазору
2. ухудшению состояния изоляции	4. чрезмерному искрению щеток

<i>Вопрос 8. Механические неисправности электрических машин включают</i>	
1. нарушение изоляции	3. износ и нагрев подшипников
2. неравномерность воздушного зазора	4. перегрев магнитопровода

<i>Вопрос 9. Наиболее чувствительным к перегреву элементом в электрической машине является</i>	
1. обмотки	3. изоляция
2. станина	4. сердечник ротора

<i>Вопрос 10. Причина, которая НЕ может вызвать выход из строя асинхронного двигателя:</i>	
1. неправильный выбор АД	3. отсутствие защиты
2. повреждение подшипников	4. некачественное исполнение АД

### Вариант № 2

<i>Вопрос 1. Нагрев электрического двигателя обусловлен рядом факторов, в которые НЕ входят:</i>	
1. потери энергии в обмотках статора	3. потери энергии в обмотках ротора
2. потери на гистерезис и вихревые токи	4. трение в подшипниках

<i>Вопрос 2. Количество основных режимов работы асинхронных машин</i>	
1. 2	3. 4
2. 3	4. 1

<i>Вопрос 3. Причиной перегрева электродвигателя при номинальной нагрузке может быть</i>	
1. обрыв фазы обмотки статора	3. витковое замыкание в обмотке статора
2. загрязнение вентиляционных каналов	4. неправильное соединение начала и конца фазы

<i>Вопрос 4. Потери в стали трансформатора пропорциональны:</i>	
1. току холостого хода	3. частоте тока
2. приложенному напряжению	4. квадрату приложенного напряжения

<i>Вопрос 5. Параметры, которыми определяются пусковые свойства асинхронного двигателя:</i>	
1. значение пускового тока и мощности	3. значение пускового тока и момента
2. значение номинального тока и номинального момента	4. скольжение и скорость вращения

<i>Вопрос 6. Причиной чрезмерного искрения щеток может быть</i>	
1. перегрев обмоток	3. износ подшипников
2. старение изоляции	4. слабое крепление и нажатие щеток

<i>Вопрос 7. Синхронный компенсатор применяется</i>	
1. для компенсации активной мощности	3. для генерирования активной мощности
2. для генерирования реактивной мощности	4. для потребления реактивной мощности

<i>Вопрос 8. В электрических машинах применяют изоляцию следующих классов нагревостойкости:</i>	
1. А, Е, В	3. А, В, Н
2. В, F, H	4. Е, В, F

<i>Вопрос 9. Система охлаждения электрических машин предназначена для</i>	
1. отвода тепла	3. регулирования температурных режимов электрических машин
2. поддержания оптимальной температуры машины	4. охлаждения электрических машин

<i>Вопрос 10. Зазор между магнитопроводом статора и полюсным наконечником ротора явнополюсной синхронной машины для обеспечения синусоидальной формы индуцируемой ЭДС выполняют</i>	
1. меньшим у середины полюсного наконечника, большим по краям	3. одинаковым по всей окружности полюсного наконечника
2. большим у середины полюсного наконечника, меньшим по краям	4. каким-то другим образом

### Вариант № 3

<i>Вопрос 1. Предельная допустимая температура нагрева обмоток двигателя с изоляцией класса F равна:</i>	
1. 120° С	3. 155° С
2. 130° С	4. 180° С

<i>Вопрос 2. Причины перегрева статора при общем равномерном перегреве:</i>	
1. напряжение на зажимах меньше номинального	3. междувитковое соединение в обмотке статора
2. короткое замыкание между двумя фазами	4. двигатель перегружен

<i>Вопрос 3. Свойство обратимости трансформатора заключается в том, что он</i>	
1. может работать при любом токе	3. может работать как повышающий, так и понижающий
2. может работать при любом напряжении	4. может работать при любой мощности

<i>Вопрос 4. Недостаток асинхронных двигателей:</i>	
1. сложное устройство	3. малый пусковой момент
2. малая частота вращения	4. малый пусковой ток

<i>Вопрос 5. Если нагрузка трансформатора имеет индуктивный характер, то при уменьшении тока напряжение на нагрузке</i>	
1. Уменьшится	3. Увеличится
2. Не изменится	4. Это зависит от степени насыщения сердечника трансформатора

<i>Вопрос 6. Автотрансформаторы <b>НЕ</b> применяются</i>	
1. В лабораториях для плавного регулирования напряжения	3. Для пуска синхронных и асинхронных двигателей
2. Для питания измерительных приборов в высоковольтных сетях	4. Для регулирования напряжения бытовых электроприборов

<i>Вопрос 7. Трехфазная асинхронная машина при работе может иметь следующие величины скольжений: а) <math>s = 1,1</math>; б) <math>s = -0,1</math>; в) <math>s = 0,1</math>. Режимы работы машины, которым соответствуют данные скольжения:</i>	
1. а) – генераторный; б) – электромагнитный тормоз; в) – двигательный	3. а) – электромагнитный тормоз; б) – двигательный; в) – генераторный
2. а) – электромагнитный тормоз; б) – генераторный; в) – двигательный	4. а) – двигательный; б) – генераторный; в) – электромагнитный тормоз

<i>Вопрос 8. Магнитные неисправности электрических машин включают</i>	
1. разрыв бандажей	3. ослабление крепления магнитопроводов
2. обрыв в обмотках и проводах	4. искривление вала

<i>Вопрос 9. При анализе работы асинхронного двигателя пренебрегают потерями в стали ротора поскольку</i>	
1. мощность потерь холостого хода $P_0$ мала	3. поток в зазоре машины практически неизменен
2. частота перемагничивания ротора $f_{2s}$ мала	4. частота вращения магнитного поля статора $n_1$ неизменна

<i>Вопрос 10. Перегрев электрической машины опасен</i>	
1. уменьшением мощности	3. снижением топливной экономичности
2. увеличением оборотов	4. снижением срока службы

Локальный электронный методический материал

Наталья Владимировна Бочарова  
Максим Сергеевич Харитонов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Редактор И.В. Голубева*

Уч.-изд. л.1,9. Печ. л. 1,7.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
236022, Калининград, Советский проспект, 1