

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета  Бурковский А.В.

«31» августа 2018 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

«Математическое моделирование основных типов электрических  
машин»

**Направление подготовки** 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

**Профиль** Технология проектирования и производства электрических машин для устойчивой работы в заданных условиях с учетом геометрии воздушного зазора

**Квалификация выпускника** магистр

**Нормативный период обучения** 2 года


**Форма обучения** очная

**Год начала подготовки** 2018

Автор программы

  
/Кононенко К.Е./

Заведующий кафедрой  
Электромеханических  
систем и электроснабжения

  
/Шелякин В.П./

Руководитель ОПОП

  
/Кононенко К.Е./

Воронеж 2018

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

**1.1. Цели дисциплины:** учитывая физические особенности режимов работы электрических машин создавать работоспособные математические модели.

**1.2. Задачи освоения дисциплины:** изучение методов проведения расчетов переходных процессов; освоение основных технических средств, используемых при проведении научных исследований электромагнитного поля; ознакомление с историей развития теории расчетов электрических машин; ознакомление с современными программными комплексами, используемыми при проведении вычислительных экспериментов.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Математическое моделирование основных типов электрических машин» относится к дисциплинам вариативной части блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Математическое моделирование основных типов электрических машин» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1 - Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки при исследовании самостоятельных тем

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-1	Знать особенности расчета каждого типа электрических машин.
	Уметь составлять уравнения и решать поставленные задачи в основных режимах работы электрических машин.
	Владеть современными методами расчета электрических машин.

## 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Математическое моделирование основных типов электрических машин» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		3
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	54	54
В том числе:		
Лекции	18	18

Практические занятия (ПЗ)	18	18
Лабораторные работы (ЛР)	18	18
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>126</b>	<b>126</b>
Виды промежуточной аттестации - зачет с оценкой	+	+
Общая трудоемкость: академические часы	180	180
зач.ед.	5	5

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Общие вопросы математического моделирования электрических машин.	Системы координат и относительных единиц. Основные методы расчета переходных режимов. Методы расчета электромагнитного поля.	4	2	4	20	30
2	Моделирование электромагнитного поля в машинах постоянного тока.	Моделирование постоянных магнитов. Гладкие и зубцовые магнитопроводы. Свойства материалов	4	2	4	20	30
3	Моделирование переходных процессов асинхронных машин.	Моделирование трехфазных, конденсаторных и однофазных двигателей.	4	2	4	20	30
4	Моделирование электромагнитного поля в асинхронных машинах.	Метод конечных элементов и моделирование основных режимов работы.	2	4	2	22	30
5	Моделирование переходных процессов синхронных машин.	Моделирование трехфазных с электромагнитным возбуждением, конденсаторных и однофазных двигателей, работающих от полупроводниковых преобразователей.	2	4	2	22	30
6	Моделирование электромагнитного поля в синхронных машинах.	Метод конечных элементов и моделирование основных режимов работы.	2	4	2	22	30
<b>Итого</b>			<b>18</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>126</b>	<b>180</b>

### 5.2 Перечень лабораторных работ

Моделирование переходных процессов асинхронных машин.

Моделирование электромагнитного поля асинхронной машины.

Моделирование переходных процессов синхронных машин.

Моделирование электромагнитного поля синхронной машины.

Постановка физических экспериментов как проверка адекватности модели.

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания**

### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-1	Знать особенности расчета каждого типа электрических машин.	Активная работа на практических и лабораторных занятиях, ответы на теоретические вопросы при защите лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь составлять уравнения и решать поставленные задачи в основных режимах работы электрических машин.	Активная работа на практических и лабораторных занятиях, ответы на теоретические вопросы при защите лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть современными методами расчета электрических машин.	Активная работа на практических и лабораторных занятиях, ответы на теоретические вопросы при защите лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 3 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-1	Знать особенности расчета каждого типа	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов

электрических машин.						
Уметь составлять уравнения и решать поставленные задачи в основных режимах работы электрических машин.	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены	
Владеть современными методами расчета электрических машин.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены	

## **7.2 Примерный перечень оценочных средств (типичные контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)**

### **7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию**

**1.** Назначение какой из частей машины постоянного тока указано не полностью?

1. Основные полюсы служат для создания основного магнитного потока.
2. Добавочные полюсы служат для обеспечения безыскровой работы щеток на коллекторе.
3. Станина служит для проведения магнитного потока основных и добавочных полюсов, для конструктивного оформления машины и для крепления ее к фундаменту.
4. Коллектор и щеточный аппарат служат для соединения обмотки якоря с внешней цепью.

**2.** Какой из основных элементов конструкции машины постоянного тока не может быть изготовлен из указанных материалов? Укажите правильный ответ.

1. Сердечник якоря - электротехническая сталь.
2. Обмотка возбуждения - медь, алюминий.
3. Станина (ядро) - сталь, чугун, алюминий.
4. Подшипниковые щиты - сталь, чугун, алюминий.

**3.** По какому признаку делят магнитную цепь машины постоянного тока на расчетные участки? Укажите правильный ответ.

1. По виду магнитного потока через участок: полный, полезный или рассеяния.
2. По качеству материала, из которого выполнен участок магнитной цепи.
3. По признаку одинаковых условий охлаждения магнитопровода в пределах расчетного участка.
4. По признаку неизменной величины индукции в пределах длины магнитной линии на данном участке.

**4.** Какая из частей асинхронного двигателя не может быть изготовлена из указанных материалов?

1. Обмотка статора - медь, алюминий.

2. Сердечник статора - электротехническая сталь.
3. Сердечник ротора - электротехническая сталь, алюминий.
4. Обмотка ротора - медь, алюминий, латунь.

**5.** Почему сердечник статора асинхронных двигателей собирается в осевом направлении из изолированных между собой листов электротехнической стали? Укажите правильный ответ.

1. Из технологических соображений.
2. Для улучшения охлаждения сердечника.
3. Для облегчения конструкции.
4. Для уменьшения потерь в стали на вихревые токи.

**6.** Выберите наиболее распространенный вариант конструктивного исполнения сердечника ротора асинхронной машины.

1. Массивный в виде отливки из чугуна.
2. Шихтованный из листов электротехнической стали.
3. Массивный из стали.
4. Как шихтованный, так и массивный.

**7.** Почему сердечник статора синхронной машины обязательно набирают из тонких изолированных листов электротехнической стали, а сердечник ротора может быть и массивным, как например, в турбогенераторах? Укажите неправильный ответ.

1. Сердечник статора перемагничивается с частотой тока в сети.
2. Магнитный поток в сердечнике ротора во много раз меньше, чем в сердечнике статора.
3. Магнитный поток неподвижен относительно сердечника ротора, так как обмотка возбуждения, расположенная на роторе, подключена к источнику постоянного тока.
4. Для уменьшения потерь в сердечнике статора на вихревые токи.

**8.** Какими мероприятиями обеспечивается синусоидальность напряжения на зажимах синхронного генератора? Укажите неправильный ответ.

1. Обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока.
2. Обмотка статора (якоря) выполняется распределенной с укороченным шагом.
3. В явнополюсных машинах выбирается определенная форма полюсных наконечников (воздушный зазор под краями полюсных наконечников увеличивается).
4. В неявнополюсных машинах выбирается определенное отношение обмотанной части полюса ко всему полюсному делению ротора.

**9.** Перечислите основные свойства синхронной машины. Укажите неправильный ответ.

1. Синхронной машиной называется такая машина переменного тока, частота вращения которой находится в строго постоянном отношении к частоте тока в сети ( $n_1 = f_1/p$  об/с) и не зависит от нагрузки.
2. Синхронная машина обратима, то есть может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах.

3. Синхронный двигатель - самый распространенный двигатель переменного тока.
4. Синхронные генераторы являются основным источником электрической энергии в промышленных сетях.

**10.** Могут ли жидкости применяться для охлаждения обмоток мощных синхронных машин? Укажите неправильный ответ.

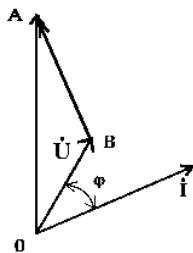
1. Обмотка статора может быть погружена в трансформаторное масло.
2. Обмотки статора, изготовленные из полых проводников, могут выполняться с внутренним охлаждением трансформаторным маслом.
3. В качестве охлаждающей жидкости при внутреннем охлаждении проводников обмотки может применяться обычная водопроводная вода.
4. Жидкости могут применяться для внутреннего охлаждения проводников как обмотки статора, так и обмотки ротора.

### 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

**1.** Определить значение емкости, при включении которой параллельно обмотке якоря синхронного генератора напряжение на ее зажимах сохраняется номинальным при плавном уменьшении тока возбуждения до нуля. Синхронное индуктивное сопротивление машины  $x_d = 0,2 \text{ Ом}$ , частота тока якоря  $f = 50 \text{ Гц}$ . Чему равна величина тока нагрузки, если номинальное фазное напряжение генератора  $U_{н,ф} = 0,23 \text{ кВ}$ . Укажите правильный ответ.

1.  $C = 0,0148 \text{ Ф}$ ;  $I = 1,05 \text{ кА}$ .
2.  $C = 0,0159 \text{ Ф}$ ;  $I = 1,15 \text{ кА}$ .
3.  $C = 0,017 \text{ Ф}$ ;  $I = 1,25 \text{ кА}$ .
4.  $C = 0,0181 \text{ Ф}$ ;  $I = 1,35 \text{ кА}$ .

**2.** На рисунке изображена упрощенная векторная диаграмма синхронного неявнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке. Укажите правильное обозначение векторов  $AO$  и  $AB$ .



1.  $\overline{AO} = \mathcal{E}_0$ ;  $\overline{AB} = jx_d \mathcal{I}$
2.  $\overline{AO} = \mathcal{E}_0$ ;  $\overline{AB} = -jx_d \mathcal{I}$
3.  $\overline{AO} = jx_d \mathcal{I}$ ;  $\overline{AB} = \mathcal{E}_0$ .
4.  $\overline{AO} = -jx_d \mathcal{I}$ ;  $\overline{AB} = \mathcal{E}_0$ .

**3.** Электромагнитная мощность, в первом приближении равная мощности, отдаваемой неявнополюсным синхронным генератором в сеть при параллельной работе, определяется выражением

$$P_{эм} = \frac{mE_0U}{x_d} \sin\theta.$$

Какая величина, входящая в эту формулу, изменится при увеличении мощности,

отдаваемой генератором в сеть? Укажите правильный ответ.

1. ЭДС  $E_0$ .
2. Угол  $\theta$ .
3. Напряжение  $U$ .
4. Синхронное индуктивное сопротивление  $x_d$ .

4. В каких пределах может изменяться угол нагрузки турбогенератора при параллельной работе с сетью, чтобы его режим работы оставался статически устойчивым? Укажите правильный ответ.

1.  $\theta = 0...45^\circ$ .
2.  $\theta = 0...90^\circ$ .
3.  $\theta = 45...135^\circ$ .
4.  $\theta = 90...180^\circ$ .

5. Определите максимальную мощность  $P_{2\text{макс}}$ , отдаваемую трехфазным турбогенератором при параллельной работе с мощной сетью, если известно, что  $U_\phi = 6,3 \text{ кВ}$ ;  $E_0 = 7,0 \text{ кВ}$ ;  $x_d = 100 \text{ Ом}$ . Укажите правильный ответ.

1. 0,44 МВт.
2. 0,93 МВт.
3. 1,32 МВт.
4. 2,28 МВт.

6. Определите номинальную мощность трехфазного турбогенератора при параллельной работе с мощной сетью, если известно, что  $U_\phi = 6,3 \text{ кВ}$ ;  $E_0 = 7,5 \text{ кВ}$ ;  $x_d = 50 \text{ Ом}$ ; перегрузочная способность 2,1. Укажите правильный ответ.

1. 1,35 МВт.
2. 0,45 МВт.
3. 0,78 МВт.
4. 0,95 МВт.

7. Вертикальный явнополюсный трехфазный гидрогенератор имеет следующие данные:  $m = 3$ ;  $U_n = 13,8 \text{ кВ}$ ;  $E_0 = 16,4 \text{ кВ}$ ;  $x_d = 1,4 \text{ Ом}$ ;  $x_q = 1 \text{ Ом}$ . Определить, какую часть от полного электромагнитного момента машины составляет реактивный момент при работе генератора с углом нагрузки  $\theta_n = 30^\circ$ . Укажите правильный ответ.

1. 0,32.
2. 0,23.
3. 0,16.
4. 0,11.

8. В каких пределах должно находиться значение напряжения  $U_1$ , подводимого к обмотке статора асинхронного двигателя с заторможенным ротором, чтобы выполнялось условие  $I_{1к} = I_{1н}$ ? Укажите правильный ответ.

1.  $U_1 = (0,01...0,05)U_{1н}$ .
2.  $U_1 = (0,15...0,25)U_{1н}$ .
3.  $U_1 = (0,3...0,4)U_{1н}$ .
4.  $U_1 = (0,4...0,5)U_{1н}$ .

9. В каких пределах находится значение тока в обмотке статора, если асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором включен на номинальное напряжение при заторможенном роторе? Укажите правильный ответ.

1.  $I_{1к} = (2...4)I_{1н}$ .
2.  $I_{1к} = (4...7)I_{1н}$ .
3.  $I_{1к} = (7...10)I_{1н}$ .
4.  $I_{1к} = (10...20)I_{1н}$ .

10. Трехфазная асинхронная машина имеет следующие данные: число витков фазы статора  $W_1 = 68$ ; ротора  $W_2 = 27$ ; обмоточный коэффициент обмотки статора  $K_{об,1} = 0,866$ , ротора  $K_{об,2} = 0,954$ . Частота питающей сети 50 Гц, вращающийся магнитный поток  $\Phi_M = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$ . Определить действующие значения ЭДС, индуцированных в обмотках статора  $E_1$  и ротора  $E_2$  двигателя при неподвижном роторе. Укажите правильный ответ.

1.  $E_1 = 353 \text{ В}$ ;  $E_2 = 154,4 \text{ В}$ .
3.  $E_1 = 250 \text{ В}$ ;  $E_2 = 109,3 \text{ В}$ .

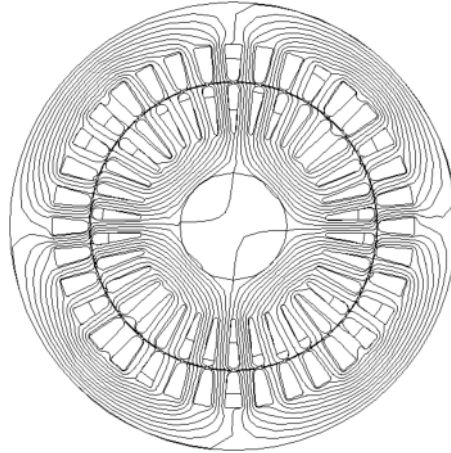


2.  $E_1 = 373 \text{ В}$ ;  $E_2 = 165,6 \text{ В}$ .

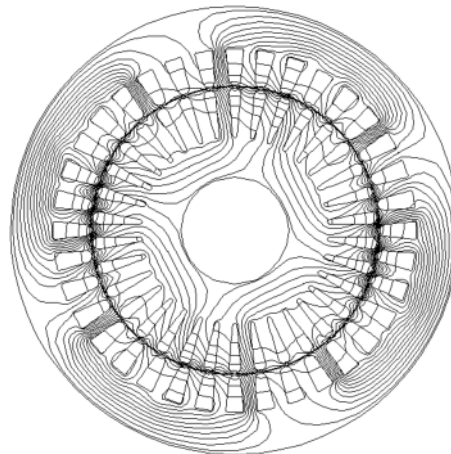
4.  $E_1 = 272 \text{ В}$ ;  $E_2 = 118,1 \text{ В}$ .

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач (минимум 10 вопросов для тестирования с вариантами ответов)

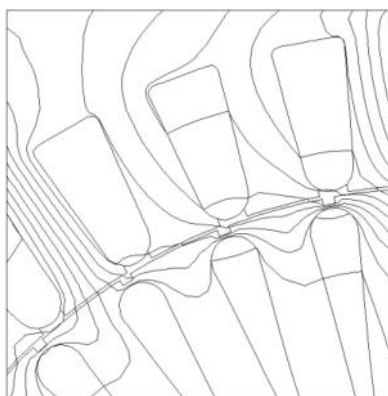
1. Какой режим показан на рисунке поля асинхронного двигателя. 1) Холостого хода; 2) короткого замыкания; 3) номинальной нагрузки; 4) электромагнитного торможения.



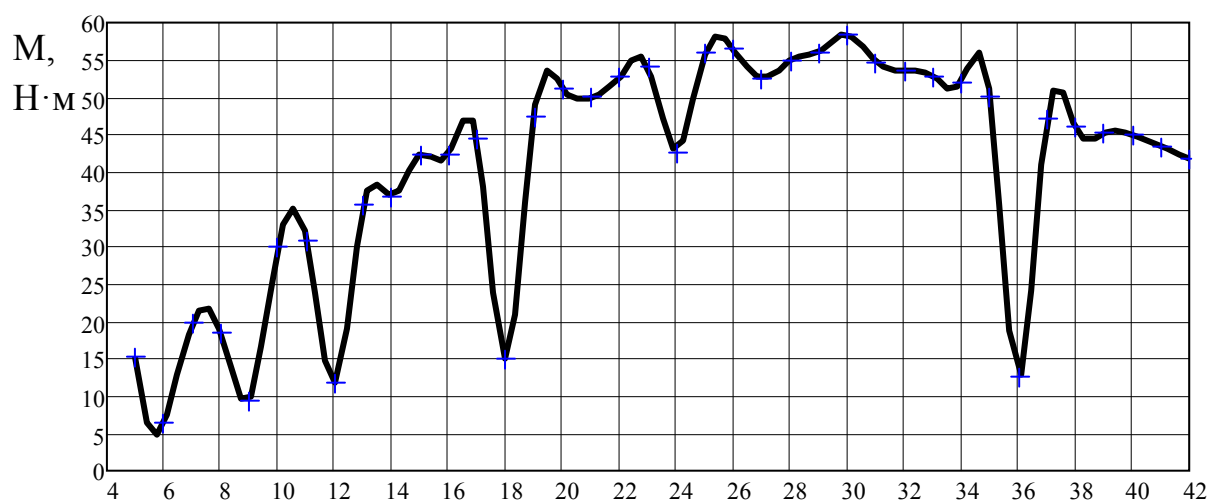
2. Какой режим показан на рисунке поля асинхронного двигателя. 1) Холостого хода; 2) короткого замыкания; 3) номинальной нагрузки; 4) электромагнитного торможения.



3. Какой режим показан на рисунке поля асинхронного двигателя. 1) Холостого хода; 2) короткого замыкания; 3) номинальной нагрузки; 4) электромагнитного торможения.



4. На рисунке показана зависимость электромагнитного вращающего момента асинхронного двигателя от числа пазов ротора. Дайте возможный вариант числа пазов статора: 1) 38; 2) 36; 3) 34; 4) 32.



5. Какую электрическую машину описывает приведенная ниже система уравнений? 1) Синхронную реактивную; 2) асинхронную; 3) постоянного тока; 4) синхронную с постоянными магнитами.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\psi_a}{d\tau} &= u_a \sin(\tau + \varphi_0) - r_a i_a, \\
 \frac{d\psi_\epsilon}{d\tau} &= u_\epsilon \sin(\tau + \varphi_0) - u_k - r_\epsilon i_\epsilon, \\
 \frac{d\psi_{\epsilon\alpha}}{d\tau} &= \psi_{\epsilon\beta} \omega - r_\epsilon i_{\epsilon\alpha}, \\
 \frac{d\psi_{\epsilon\beta}}{d\tau} &= -\psi_{\epsilon\alpha} \omega - r_\epsilon i_{\epsilon\beta}, \\
 \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{1}{H} (M_{\text{эм}} - M_c), \\
 \frac{du_c}{d\tau} &= x_c i_\epsilon,
 \end{aligned} \right\}$$

6. В качестве объекта исследования выберем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А типа 4АА63А2У3. Согласно справочным данным двигатель типа 4АА63А2У3 имеет параметры и размеры, указанные в таблице.

Таблица – Основные параметры и размеры двигателя 4АА63А2У3

Параметр или размер	Значение
Номинальная мощность, кВт	0,37
Номинальное линейное напряжение, В	380
Синхронная частота вращения, об/мин	3000
Номинальное скольжение, %	8,3
Номинальный КПД, %	70
Номинальный коэффициент мощности, %	86
Номинальный ток, А	0,94
Номинальный момент, Н·м	1,28
Пусковой ток, А	4,23
Пусковой момент, Н·м	2,56
Внешний диаметр сердечника статора, мм	100
Внутренний диаметр сердечника статора, мм	54
Длина сердечника статора, мм	56
Односторонний воздушный зазор между статором и ротором, мм	0,3
Число пазов статора	24
Число пазов ротора	18
Число эффективных проводников в пазу	126
Число параллельных ветвей обмотки	1
Число пазов на полюс и фазу	4
Форма паза статора	Рисунок 21
Высота паза статора, $h_c$ , мм	9,0
Большая ширина паза статора, $b_{1c}$ , мм	6,3
Меньшая ширина паза статора, $b_{2c}$ , мм	4,8
Ширина шлица паза статора, $m_c$ , мм	1,8
Высота шлица паза статора, $e_c$ , мм	0,5
Форма паза ротора	Рисунок

Высота паза ротора, $h_p$ , мм	10,5	
Большая ширина паза ротора, $b_{1p}$ , мм	4,4	
Меньшая ширина паза ротора, $b_{2p}$ , мм	1,9	
Ширина шлица паза ротора, $m_p$ , мм	1,0	
Высота шлица паза ротора, $e_p$ , мм	0,5	

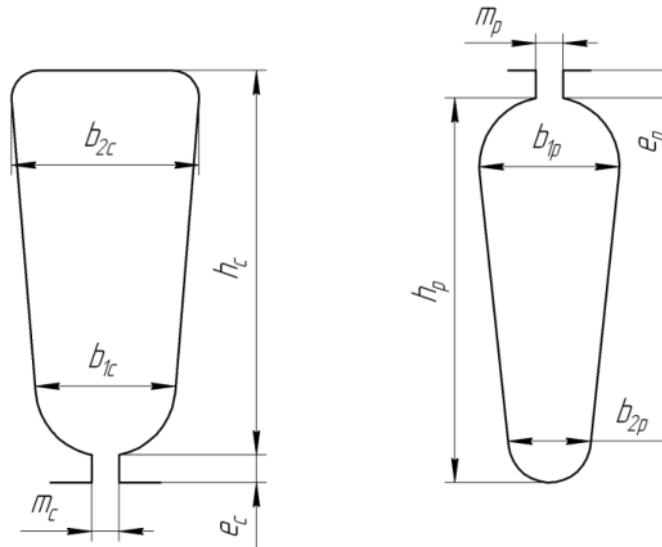


Рисунок – Форма пазов статора и ротора исследуемого двигателя

Начертить геометрию и задать свойства материалов. Использовать любой доступный пакет МКЭ.

7. Используя задание п.1 посчитать режим идеального холостого хода в части насыщения участков магнитной цепи.

8. Пользуясь справочными данными п.1 рассчитать номинальный режим.

9. Определить электромагнитный вращающий момент в режиме пуска в разных положениях ротора. Поворачивая ротор на 1 градус 10 раз.

10. Пользуясь данными п.3 видоизменить пазовую зону и найти максимум электромагнитного вращающего момента.

#### 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

№ варианта	Вопросы билета
1	1. Основные допущения идеализированной электрической машины. 2. Системы координатных осей. 3. Изображающий вектор.
2	1. Система относительных единиц. 2. Приведение обмоток электрических машин исходя из равенства основных гармоник МДС. 3. Приведение обмоток электрических машин исходя

	из равенства основных гармоник магнитной индукции.
3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Коэффициенты приведения токов, напряжений и сопротивлений.</li> <li>2. Замена короткозамкнутой обмотки ротора машины переменного тока эквивалентной обмоткой, расположенной по осям <math>d, q</math>.</li> <li>3. Параметры эквивалентных роторных обмоток.</li> </ol>
4	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Индуктивные сопротивления рассеяния электрических машин переменного тока.</li> <li>2. Методы анализа переходных процессов в электрических машинах.</li> <li>3. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Классический метод решения задачи.</li> </ol>
5	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Операторный метод решения задачи.</li> <li>2. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Графо-аналитический метод решения задачи.</li> <li>3. Уравнения синхронной явнополюсной машины в фазной системе координат. Уравнения реальных обмоток.</li> </ol>
6	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Потокосцепления синхронной машины.</li> <li>2. Индуктивности фазных обмоток статора синхронной машины.</li> <li>3. Взаимные индуктивности фазных обмоток статора.</li> </ol>
7	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Взаимные индуктивности фазных обмоток статора с обмотками ротора.</li> <li>2. Уравнения синхронных явнополюсных машин в системе координатных осей <math>d, q</math>. Преобразования переменных.</li> <li>3. Преобразования уравнений равновесия напряжений синхронной машины в осях <math>\alpha, \beta</math> статора и <math>d, q</math> ротора.</li> </ol>
8	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Уравнения равновесия напряжений синхронной машины в системе относительных единиц.</li> <li>2. Параметры синхронных машин.</li> <li>3. Вопросы устойчивой работы синхронных машин: статическая устойчивость.</li> </ol>
9	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Динамическая устойчивость синхронной машины, втягивание в синхронизм.</li> <li>2. Расчет статических пусковых характеристик.</li> </ol>

	3. Введение в численные методы. Метод последовательных приближений.
10	1. Усовершенствованный метод последовательных приближений. 2. Метод Ньютона-Рафсона. 3. Метод Эйлера.
11	1. Исправленный метод Эйлера. 2. Модифицированный метод Эйлера. 3. Метод Рунге-Кутта четвертого порядка.
12	1. Решение системы дифференциальных уравнений Парка-Горева методом Рунге-Кутта в системе компьютерного моделирования MathCAD. 2. Взаимные индуктивности фазных обмоток статора с обмотками ротора. 3. Система относительных единиц.
13	1. Основные допущения идеализированной электрической машины. 2. Уравнения синхронных явнополюсных машин в системе координатных осей $d, q$ . Преобразования переменных. 3. Приведение обмоток электрических машин исходя из равенства основных гармоник МДС.
14	1. Системы координатных осей. 2. Преобразования уравнений равновесия напряжений синхронной машины в осях $\alpha, \beta$ статора и $d, q$ ротора. 3. Приведение обмоток электрических машин исходя из равенства основных гармоник магнитной индукции.
15	1. Изображающий вектор. 2. Уравнения равновесия напряжений синхронной машины в системе относительных единиц. 3. Коэффициенты приведения токов, напряжений и сопротивлений.
16	1. Система относительных единиц. 2. Параметры синхронных машин. 3. Замена короткозамкнутой обмотки ротора машины переменного тока эквивалентной обмоткой, расположенной по осям $d, q$ .
17	1. Приведение обмоток электрических машин исходя из равенства основных гармоник МДС. 2. Вопросы устойчивой работы синхронных машин: статическая устойчивость.

	3. Параметры эквивалентных роторных обмоток.
18	<p>1. Приведение обмоток электрических машин исходя из равенства основных гармоник магнитной индукции.</p> <p>2. Динамическая устойчивость синхронной машины, втягивание в синхронизм.</p> <p>3. Индуктивные сопротивления рассеяния электрических машин переменного тока.</p>
19	<p>1. Коэффициенты приведения токов, напряжений и сопротивлений.</p> <p>2. Расчет статических пусковых характеристик.</p> <p>3. Методы анализа переходных процессов в электрических машинах.</p>
20	<p>1. Замена короткозамкнутой обмотки ротора машины переменного тока эквивалентной обмоткой, расположенной по осям d,q.</p> <p>2. Введение в численные методы. Метод последовательных приближений.</p> <p>3. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Классический метод решения задачи.</p>
21	<p>1. Параметры эквивалентных роторных обмоток.</p> <p>2. Усовершенствованный метод последовательных приближений.</p> <p>3. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Операторный метод решения задачи.</p>
22	<p>1. Индуктивные сопротивления рассеяния электрических машин переменного тока.</p> <p>2. Метод Ньютона-Рафсона.</p> <p>3. Уравнения синхронной явнополюсной машины в фазной системе координат. Уравнения реальных обмоток.</p>
23	<p>1. Методы анализа переходных процессов в электрических машинах.</p> <p>2. Метод Эйлера.</p> <p>3. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Графо-аналитический метод решения задачи.</p>
24	<p>1. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Классический метод решения задачи.</p> <p>2. Исправленный метод Эйлера.</p> <p>3. Потокосцепления синхронной машины.</p>
25	<p>1. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов.</p>

	<p>Операторный метод решения задачи.</p> <p>2. Модифицированный метод Эйлера.</p> <p>3. Индуктивности фазных обмоток статора синхронной машины.</p>
26	<p>1. Исследование переходных процессов в электрических машинах с взаимно неподвижными осями обмоток и полюсов. Графо-аналитический метод решения задачи.</p> <p>2. Метод Рунге-Кутты четвертого порядка.</p> <p>3. Взаимные индуктивности фазных обмоток статора.</p>
27	<p>1. Уравнения синхронной явнополюсной машины в фазной системе координат. Уравнения реальных обмоток.</p> <p>2. Решение системы дифференциальных уравнений Парка-Горева методом Рунге-Кутты в системе компьютерного моделирования MathCAD.</p> <p>3. Взаимные индуктивности фазных обмоток статора с обмотками ротора.</p>
28	<p>1. Потокосцепления синхронной машины.</p> <p>2. Основные допущения идеализированной электрической машины.</p> <p>3. Уравнения синхронных явнополюсных машин в системе координатных осей <math>d, q</math>. Преобразования переменных.</p>
29	<p>1. Индуктивности фазных обмоток статора синхронной машины.</p> <p>2. Системы координатных осей.</p> <p>3. Преобразования уравнений равновесия напряжений синхронной машины в осях <math>\alpha, \beta</math> статора и <math>d, q</math> ротора.</p>
30	<p>1. Взаимные индуктивности фазных обмоток статора.</p> <p>2. Изображающий вектор.</p> <p>3. Метод Рунге-Кутты четвертого порядка.</p>

### 7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

Не предусмотрено учебным планом

### 7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

*Зачет проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.*

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент



набрал от 6 до 10 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.)

### 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Общие вопросы математического моделирования электрических машин.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ.
2	Моделирование электромагнитного поля в машинах постоянного тока.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ.
3	Моделирование переходных процессов асинхронных машин.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ.
4	Моделирование электромагнитного поля в асинхронных машинах.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ.
5	Моделирование переходных процессов синхронных машин.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ.
6	Моделирование электромагнитного поля в синхронных машинах.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ.

### 7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

Кононенко А.В. Устойчивость работы и переходные процессы электрических машин переменного тока [электронный ресурс]. Кононенко А.В., Кононенко К.Е. учеб. Пособие. – Воронеж, 2014, - 180 с. № Гос. Регистрации 0321403572.

Кононенко А.В. Математическое моделирование асинхронных двигателей [электронный ресурс]. Кононенко А.В., Кононенко К.Е. учеб. Пособие. – Воронеж, 2014, - 125 с. № Гос. Регистрации 0321403443.

Кононенко К.Е. Лабораторный практикум по курсу «Электрические машины» [электронный ресурс]. Кононенко К.Е., Писаревский Ю.В., Кононенко А.В., Писаревский А.Ю. учеб. Пособие. – Воронеж, 2017, - 141 с. № Гос. Регистрации 0321702096.

Фурсов, В.Б. Компьютерное моделирование электротехнических устройств и систем [Электронный ресурс] : Учеб. пособие. - Воронеж : ВГТУ, 2002. - 1 дискета. - 20.00.

### **8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

#### **8.2.1 Программное обеспечение**

- Windows Professional 8.1 (7 и 8) Single Upgrade MVL A Each Academic
- SMath Studio;
- OpenOffice;
- Adobe Acrobat Reader
- Internet explorer;
- FEMM 4.2;
- Компас-График LT;
- AutoCAD.

#### **8.2.2 Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

- Российское образование. Федеральный портал. <http://www.edu.ru/>
- Образовательный портал ВГТУ <https://education.cchgeu.ru/>

#### **8.2.3 Информационные справочные системы**

- <http://window.edu.ru>
- <https://wiki.cchgeu.ru/>

#### **8.2.4 Современные профессиональные базы данных**

- Электронный фонд правовой и нормативно-технической

документации. URL: <http://docs.cntd.ru>

– Единая система конструкторской документации. URL: [https://standartgost.ru/0/2871-edinaya\\_sistema\\_konstruktorskoj\\_dokumentatsii](https://standartgost.ru/0/2871-edinaya_sistema_konstruktorskoj_dokumentatsii)

– Федеральный институт промышленной собственности.

Информационно-поисковая система. URL: [www1.fips.ru](http://www1.fips.ru)

– Национальная электронная библиотека. URL: [elibrary.ru](http://elibrary.ru)

– Electrical 4U. Разделы сайта: «Машины постоянного тока», «Трансформаторы», «Электротехника», «Справочник». Адрес ресурса: <https://www.electrical4u.com/>

– All about circuits. Одно из самых крупных онлайн-сообществ в области электротехники. На сайте размещены статьи, форум, учебные материалы (учебные пособия, видеолекции, разработки, вебинары) и другая информация. Адрес ресурса: <https://www.allaboutcircuits.com>

– Netelectro. Новости электротехники, оборудование и средства автоматизации. Информация о компаниях и выставках, статьи, объявления. Адрес ресурса: <https://netelectro.ru/>

– Marketelectro. Отраслевой электротехнический портал. Представлены новости отрасли и компаний, объявления, статьи, информация о мероприятиях, фотогалерея, видеоматериалы, нормативы и стандарты, библиотека, электромаркетинг. Адрес ресурса: <https://marketelectro.ru/>

– Библиотека Адрес ресурса: WWER <http://lib.wwer.ru/>

– Каталог электротехнического оборудования. URL: <https://electro.mashinform.ru;>

– Электродвигатели. <http://www.elecab.ru/dvig.shtml>

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

**Специализированная аудитория**, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой.

**Компьютерный класс** для магистров.

## **10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

По дисциплине «Математическое моделирование основных типов электрических машин» читаются лекции, проводятся практические занятия и лабораторные работы.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета различных типов и режимов работы электрических машин. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li> <li>- выполнение домашних заданий и расчетов;</li> <li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li> <li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li> <li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li> </ul>
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом с оценкой три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

### Лист регистрации изменений

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализирован раздел 8.2 в части состава используемого лицензионного программного обеспечения, современных профессиональных баз данных и справочных информационных систем	31.08.2019	
2	Актуализирован раздел 8.2 в части состава используемого лицензионного программного обеспечения, современных профессиональных баз данных и справочных информационных систем	31.08.2020	
3			