

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Наименование образовательной программы: Электромеханика

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

<b>Блок:</b>	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
<b>Часть образовательной программы:</b>	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	Б1.Ч.08.01
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	5 семестр - 3; 6 семестр - 4; 7 семестр - 5; всего - 12
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	432 часа
<b>Лекции</b>	5 семестр - 16 часов; 6 семестр - 28 часа; 7 семестр - 16 часов; всего - 60 часов
<b>Практические занятия</b>	5 семестр - 16 часов; 6 семестр - 14 часов; 7 семестр - 32 часа; всего - 62 часа
<b>Лабораторные работы</b>	5 семестр - 16 часов; 6 семестр - 16 часов; всего - 32 часа
<b>Консультации</b>	5 семестр - 2 часа; 6 семестр - 2 часа; всего - 4 часа
<b>Самостоятельная работа</b>	5 семестр - 57,5 часа; 6 семестр - 83,5 часа; 7 семестр - 131,7 часа; всего - 272,7 часа
<b>в том числе на КП/КР</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Иная контактная работа</b>	проводится в рамках часов аудиторных занятий
<b>включая:</b> Тестирование Контрольная работа Лабораторная работа Домашнее задание Расчетно-графическая работа	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
Экзамен	5 семестр - 0,5 часа;
Экзамен	6 семестр - 0,5 часа;
Зачет с оценкой	7 семестр - 0,3 часа;

	всего - 1,3 часа
--	------------------

**Москва 2021**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Курбатова Е.П.
	Идентификатор	R51c6ebe0-KurbatovaYP-a15ccd6f

Е.П. Курбатова

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной  
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Ширинский С.В.
	Идентификатор	Rac9f4bfa-ShirinskiiSV-a85b725f

С.В. Ширинский

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Киселев М.Г.
	Идентификатор	R572ca413-KiselevMG-f37ee096

М.Г. Киселев

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** Получение знаний в области численных методов расчетов электромагнитных полей электротехнических объектов и практических навыков применения универсальных программных средств полевого анализа для последующего использования в исследовательской и проектно-конструкторской деятельности.

### Задачи дисциплины

- освоить методы и программные средства для расчетов электромагнитных полей электротехнических объектов;
- приобрести практические навыки при решении конкретных задач по определению параметров и характеристик магнитных систем электротехнических объектов.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-7 Способен участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике и анализировать полученные результаты	ИД-1 <sub>ПК-7</sub> Применяет основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации, использует компьютер для обработки информации	знать: - аналитические и численные методы расчета магнитного поля в электрической машине.  уметь: - использовать методы расчетов магнитных полей для анализа магнитного состояния электрической машины; - применять численные методы и программные средства для расчетов квазистационарного электромагнитного поля; - применять численные методы и программные средства для расчетов стационарного электромагнитного поля.
ПК-7 Способен участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике и анализировать полученные результаты	ИД-3 <sub>ПК-7</sub> Разрабатывает упрощенные модели электромеханических преобразователей энергии и протекающих в них процессов	знать: - принцип действия магнитной левитации; - методы контроля магнитных материалов и элементов магнитных систем; - принцип действия и конструкции магнитных систем переменного тока; - принцип действия и конструкции магнитных систем постоянного тока; - основные понятия и термины электромагнитного поля; - основы электромеханического преобразования энергии.  уметь: - выполнять контроль магнитных материалов с помощью катушек Гемльгольца;

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- рассчитывать параметры магнитных систем электромагнитов с использованием численных методов;</li> <li>- рассчитывать параметры магнитных систем электрических машин с использованием численных методов;</li> <li>- проводить экспериментальные исследования и рассчитывать параметры электромагнитов переменного тока с использованием численных методов;</li> <li>- проводить экспериментальные исследования и рассчитывать параметры электромагнитов постоянного тока с использованием численных методов;</li> <li>- анализировать силовые взаимодействия в магнитных системах;</li> <li>- применять аналитические и численные методы расчета для анализа процессов электромеханического преобразования энергии.</li> </ul>

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Электромеханика (далее – ОПОП), направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать курс "Высшая математика"
- знать курс "Физика"
- знать курс "Теоретические основы электротехники"

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 12 зачетных единиц, 432 часа.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля	13	5	4	-	4	-	-	-	-	-	5	-	<p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу "Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля" и подготовка к тесту "Электромагнитные величины"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 30-37 [2], 4-23 [4], 144-156 [5], 30-37</p>	
1.1	Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля	13		4	-	4	-	-	-	-	-	5	-		
2	Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений.	13		4	-	4	-	-	-	-	-	5	-		<p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу "Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений" и подготовка к контрольной работе "Расчет стационарного магнитного поля"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 38-50 [2], 9-23 [5], 38-50</p>
2.1	Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных.	13		4	-	4	-	-	-	-	-	5	-		

	Численные методы решения уравнений.												
3	Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов.	23	4	8	4	-	-	-	-	-	7	-	<b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу "Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов" и подготовка к контрольной работе "Силовые взаимодействия в магнитном поле"
3.1	Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов.	23	4	8	4	-	-	-	-	-	7	-	<b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для выполнения заданий по лабораторной работе необходимо предварительно ознакомиться с описанием лабораторной работы №1 "Определение магнитных моментов намагниченных деталей с помощью катушек Гельмгольца", изучить задачи выполнения лабораторной работы и обработки полученных результатов. <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 51-60 [2], 24-33 [3], 4-19 [5], 51-60
4	Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля.	23	4	8	4	-	-	-	-	-	7	-	<b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для выполнения заданий по лабораторной работе необходимо предварительно ознакомиться с описанием лабораторной работы №2 "Электромагнитный подвес", изучить задачи выполнения лабораторной работы и обработки полученных результатов.
4.1	Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля.	23	4	8	4	-	-	-	-	-	7	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 61-71 [3], 20-38 [5], 61-71
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>108.0</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>24</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>108.0</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>57.5</b>			

5	Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле	16	6	4	-	2	-	-	-	-	-	10	-	<p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу "Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле" и подготовка к контрольной работе "Анализ процесса импульсного намагничивания постоянного магнита в катушках Гельмгольца"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 30-50 [2], 4-23 [5], 30-50</p>	
5.1	Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле	16		4	-	2	-	-	-	-	-	-	10		-
6	Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока	34		8	8	6	-	-	-	-	-	-	12	-	<p><b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для выполнения заданий по лабораторной работе необходимо предварительно ознакомиться с описанием лабораторной работы №3 "Определение параметров магнитного поля и тяговых характеристик электромагнита постоянного тока броневое типа", изучить задачи выполнения лабораторной работы и обработки полученных результатов.</p> <p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу "Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока" и подготовка к контрольной работе "Электрические параметры электромагнита переменного тока"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 150-214 [2], 40-87 [3], 39-53 [4], 144-197 [5], 150-214</p>
6.1	Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока	34		8	8	6	-	-	-	-	-	-	12	-	
7	Электромагнитное поле в электрических	26		8	-	4	-	-	-	-	-	-	14	-	



	машинах													
7.1	Электромагнитное поле в электрических машинах.	26		8	-	4	-	-	-	-	-	14	-	Электромагнитное поле в электрических машинах" и подготовка к контрольной работе "Генератор с постоянными магнитами на роторе" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 40-87 [9], 3.4 - 3.6 (стр. 126-144)
8	Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль	32		8	8	2	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для выполнения заданий по лабораторной работе необходимо предварительно ознакомиться с описанием лабораторной работы №4
8.1	Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль	32		8	8	2	-	-	-	-	-	14	-	"Исследование электромагнита переменного тока", изучить задачи выполнения лабораторной работы и обработки полученных результатов. <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 40-87 [3], 54-70
	Экзамен	36.0		-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	Всего за семестр	144.0		28	16	14	-	2	-	-	0.5	50	33.5	
	Итого за семестр	144.0		28	16	14		2		-	0.5		83.5	
9	Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах	80	7	6	-	20	-	-	-	-	-	54	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах" <b><u>Подготовка расчетно-графического задания:</u></b> В рамках расчетно-графического задания выполняется создание схемы обмотки и построение на ее основе кривых МДС, их гармонический анализ и расчет гармоник индукции магнитного поля Задание выполняется индивидуально по вариантам.
9.1	Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах	80		6	-	20	-	-	-	-	-	54	-	<b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах и

														подготовка к контрольной работе <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [7], Глава 1 (стр. 11-35)
10	Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток	99.7	10	-	12	-	-	-	-	-	77.7	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток" <b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b> Изучение материалов по разделу Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток и подготовка к контрольной работе <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток" <b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: Расчет	
10.1	Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток	99.7	10	-	12	-	-	-	-	-	77.7	-	Изучение материалов по разделу Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток и подготовка к контрольной работе <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток" <b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: Расчет	

													индуктивностей обмотки для основной гармоника и высших гармоник поля Расчет индуктивностей дифференциального рассеяния Расчет индуктивностей пазового рассеяния Расчет индуктивностей лобового рассеяния <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [6], Глава 27-28 (стр. 333-362) [8], Глава 6-7 (стр. 161-254)
	Зачет с оценкой	0.3		-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	
	Всего за семестр	180.0		16	-	32	-	-	-	0.3	131.7	-	
	Итого за семестр	180.0		16	-	32	-	-	-	0.3	131.7	-	
	<b>ИТОГО</b>	<b>432.0</b>	-	<b>60</b>	<b>32</b>	<b>62</b>	<b>4</b>	-	-	<b>1.3</b>	<b>272.7</b>	-	

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля

1.1. Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля

Электромагнитные величины: электрический заряд, электрическая постоянная, магнитная постоянная, плотность электрического заряда, напряжённость электрического поля, плотностью тока проводимости, электрический диполь, электрическая поляризация, электрическая индукция, плотность электрического тока смещения, магнитная индукция, сила Кулона, сила Лоренца, намагниченность, напряженность магнитного поля. Законы электромагнитного поля. Источники поля векторов магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Закон электромагнитной индукции. Статические стационарные и квазистационарные поля. Уравнения Максвелла для частных случаев электромагнитного поля..

### 2. Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений.

2.1. Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений.

Система пространственных интегральных уравнений для векторов намагниченности ферромагнитных деталей магнитной системы со стационарным полем. Итерационный расчет намагниченности в деталях из магнит мягких и магнитотвердых материалов. Программный комплекс Easymag 3D. Граничные интегральные уравнения. Расчет магнитной проводимости трубки магнитного потока на основе системы граничных интегральных уравнений для фиктивных зарядов. Расчет стационарного магнитного поля при постоянных магнитных проницаемостях деталей. Метод конечных элементов для решения задач с распределенными в пространстве параметрами. Программные комплексы, использующие метод конечных элементов..

### 3. Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов.

3.1. Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов.

Электрические свойства материалов: электропроводящий материал, удельная электрическая проводимость, удельное электрическое сопротивление, изоляционный материал, полупроводник, сверхпроводник, диэлектрик, абсолютная диэлектрическая проницаемость, относительная диэлектрическая проницаемость, электрическая восприимчивость, (диэлектрическая восприимчивость), кривая поляризации, петля электрического гистерезиса, остаточная электрическая поляризация, диэлектрические потери, электрострикция, пьезоэлектрический эффект. Магнитные свойства материалов: магнитные материалы, абсолютная магнитная проницаемость, удельное магнитное сопротивление, относительная магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость, диамагнетизм, идеальный диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм, ферримагнетизм, температура Кюри, температура Нееля, материальные уравнения, идеальный сверхпроводник. Кривая намагничивания, магнитное насыщение, магнитный гистерезис, петля магнитного гистерезиса, остаточная магнитная

индукция, остаточная намагниченность, предельная остаточная магнитная индукция, коэрцитивная сила, кривая размагничивания, предельная петля гистерезиса, частные симметричные гистерезисные циклы, частные несимметричные гистерезисные циклы, магнитотвёрдый материал, магнитомягкий материал, магнитострикция.

#### 4. Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля.

##### 4.1. Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля.

Расчет параметров магнитных систем на основе анализа электромагнитного поля: потокосцепления, индуктивности, ЭДС. Возникновение сил между электромагнитом и элементом из магнитомягкого материала, постоянным магнитом и катушкой с током. Методы расчетов силовых взаимодействий в магнитном поле: интегрирование по источникам магнитного поля, метод ограничения области взаимодействия, формула Максвелла для пондеромоторной силы, энергетический метод. Обратные задачи электромагнитного поля. Расчет распределения намагниченности внутри постоянного магнита по измеренным значениям напряженности внешнего магнитного поля.

#### 5. Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле

##### 5.1. Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле

Уравнения Максвелла квазистационарного электромагнитного поля. Источники квазистационарного электромагнитного поля. Закон электромагнитной индукции при наличии движения. Полная система пространственных интегральных уравнений для источников квазистационарного электромагнитного поля. Общее решение для векторного магнитного потенциала. Расчет квазистационарного электромагнитного поля в программном комплексе Easymag 3D. Дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Расчет квазистационарного электромагнитного поля в программном комплексе FEMM.

#### 6. Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока

##### 6.1. Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока

Электромагнитные процессы в электромагнитах. Электромагниты постоянного тока. Электромагниты переменного тока с короткозамкнутыми витками. Макроскопическая модель электромагнита переменного тока. Расчет параметров макроскопической модели электромагнита с помощью анализа электромагнитного поля. Примеры применения электромагнитов в электрических аппаратах: приводы контакторов, автоматических выключателей и др. Электромагниты пропорционального действия и поляризованные электромагниты..

#### 7. Электромагнитное поле в электрических машинах

##### 7.1. Электромагнитное поле в электрических машинах.

Электромагнитные процессы в электрических машинах. Расчет электромагнитного поля и параметров эквивалентных схем машин постоянного тока, асинхронных машин с короткозамкнутым ротором, синхронных машин с обмоткой возбуждения и синхронных машин с постоянными магнитами. Анализ магнитного поля электрических машины с двойным питанием и машин Вернье..

## 8. Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль

### 8.1. Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль

Расчет электромагнитного поля в присутствии магнитных и электропроводящих экранов. Практические задачи экранирования постоянных и переменных электромагнитных полей. Анализ электромагнитного поля в задачах электромагнитного контроля изделий из магнитных и электропроводящих материалов.

## 9. Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах

### 9.1. Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах

Существующие методы анализа электрических машин. Полевые и цепные методы расчета. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи электрической машины. Особенности магнитного поля электрической машины. Основы метода зубцовых контуров. Магнитное поле зубцового контура – потоки, потокосцепления, проводимости. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи зубцового контура. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи ненасыщенной электрической машины. Обмотки машин переменного тока – математическое описание. Определение токов зубцовых контуров по токам электрических ветвей. Расчет схемы замещения – определение потоков зубцов и потокосцеплений зубцовых контуров. Определение потокосцеплений электрических ветвей. Индуктивности ветвей. Уравнение баланса напряжений ветвей. Энергия магнитного поля. Электромеханическое преобразование энергии. Электромагнитный момент..

## 10. Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток

### 10.1. Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток

МДС и поле фазы простой обмотки с  $q = 1$ , с произвольным  $q$ . Волна МДС. Простая многофазная обмотка. Сложная многофазная обмотка. Классификация высших гармонических МДС. Спектр поля многофазной обмотки. Спектр поля обмотки возбуждения. Потокосцепление и ЭДС катушки, катушечной группы, фазы, многофазной обмотки. Потокосцепления и ЭДС от высших гармоник поля. Главные индуктивности. Индуктивности для высших гармоник поля. Индуктивность рассеяния: пазового, лобового, дифференциального..

## **3.3. Темы практических занятий**

1. Определение проводимостей взаимоиндукции зубцовых контуров по результатам полевого расчета.;
2. Правила формирования эквивалентной схемы замещения магнитной цепи электрической машины, имеющей зубчатую структуру сердечников.;
3. Учет насыщения элементов сердечников.;
4. Методы расчета нелинейных магнитных цепей.;
5. Универсальный метод расчета полей и процессов в электрических машинах.;
6. Методы решения алгебро-дифференциальных систем уравнений.;
7. Первоначальные и сопутствующие гармоники, зубцовые гармоники.;
8. Индуктивность катушки, фазы, взаимная индуктивность двух фаз, индуктивность многофазной обмотки для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.;
9. Главное поле и поле рассеяния – потокосцепления, ЭДС и индуктивности.;
10. Проводимость пазового рассеяния двухслойной обмотки.;
11. Проводимость дифференциального рассеяния АД с КЗ ротором с учетом демпфирования.;
12. Расчет потокосцепления катушки электромагнита. Собственные и взаимные

индуктивности.;

13. Освоение программных средств для расчетов электромагнитного поля на примерах решения простых задач стационарного магнитного поля. Расчет распределения векторов напряженности магнитного поля однородно намагниченных постоянных магнитов и катушек с постоянным током.;

14. Расчет электромагнита переменного тока с экранирующим электропроводящим диском.;

15. Освоение программных средств для расчетов электромагнитного поля на примерах решения простых задач стационарного магнитного поля. Траектории перемещения деталей. Средства визуализации результатов расчетов.;

16. Расчет индуцированной ЭДС в катушке электромагнита постоянного тока при движении постоянного магнита.;

17. Расчет электромагнитного момента и ЭДС синхронного генератора с постоянными магнитами.;

18. Расчет распределения намагниченности в магнитных системах с деталями из магнитотвердых материалов. Примеры решения задач. Система с постоянными магнитами.;

19. Расчет силовых взаимодействий в магнитном поле. Энергетический метод.;

20. Расчет параметров синхронного генератора с постоянными магнитами.;

21. Освоение программных средств для расчетов электромагнитного поля на примерах решения простых задач стационарного магнитного поля. Задание исходных данных о конструкции магнитной системы.;

22. Построение годографов вносимых ЭДС при электромагнитном контроле.;

23. Освоение программных средств для расчетов электромагнитного поля на примерах решения простых задач стационарного магнитного поля. Граничные условия. Плоскопараллельные задачи. Зеркальная, осевая и периодические симметрии. Симметрии в локальных системах координат.;

24. Расчет тяговой характеристики электромагнита.;

25. Расчет электромагнитного момента и ЭДС машины постоянного тока.;

26. Расчет индуцированной ЭДС в катушке электромагнита постоянного тока при движении якоря.;

27. Расчет параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.;

28. Проводимость лобового рассеяния по методике Майе.;

29. Расчет силовых взаимодействий в магнитном поле. Метод ограничивающей поверхности.;

30. Расчет распределения намагниченности в магнитных системах с деталями из магнитомягких материалов. Электромагнит.;

31. Расчет втяжного электромагнита постоянного тока. Тяговая характеристика, индуцируемая ЭДС.;

32. Простейшая эквивалентная схема замещения магнитной цепи машины постоянного тока..

### **3.4. Темы лабораторных работ**

1. Определение магнитных моментов намагниченных деталей с помощью катушек Гельмгольца;

2. Определение параметров магнитного поля и тяговых характеристик электромагнита постоянного тока броневое типа;

3. Электромагнитный подвес;

4. Исследование электромагнита переменного тока.

### 3.5 Консультации

#### Текущий контроль (ТК)

1. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля"
2. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений."
3. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов."
4. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля."
5. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле"
6. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока"
7. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Электромагнитное поле в электрических машинах"
8. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль"
9. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах"
10. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток"

### 3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

Курсовой проект/ работа не предусмотрены



### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)										Оценочное средство (тип и наименование)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
<b>Знать:</b>													
аналитические и численные методы расчета магнитного поля в электрической машине	ИД-1ПК-7											+	Контрольная работа/Преобразование энергии в электрических машинах Контрольная работа/Структура обмотки Домашнее задание/Элементарные магнитные поля в электрических машинах
основы электромеханического преобразования энергии	ИД-3ПК-7											+	Расчетно-графическая работа/Индуктивности обмоток Расчетно-графическая работа/Схема обмотки, кривая МДС и гармонический состав поля
основные понятия и термины электромагнитного поля	ИД-3ПК-7	+											Тестирование/Электромагнитные величины
принцип действия и конструкции магнитных систем постоянного тока	ИД-3ПК-7						+						Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №3 "Определение параметров магнитного поля и тяговых характеристик электромагнита постоянного тока броневое типа"
принцип действия и конструкции магнитных систем переменного тока	ИД-3ПК-7										+		Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №4 "Исследование электромагнита переменного тока"
методы контроля магнитных материалов и элементов магнитных систем	ИД-3ПК-7			+									Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №1 "Определение магнитных моментов намагниченных деталей с помощью катушек Гельмгольца"
принцип действия магнитной левитации	ИД-3ПК-7				+								Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №2 "Электромагнитный подвес"
<b>Уметь:</b>													

применять численные методы и программные средства для расчетов стационарного электромагнитного поля	ИД-1ПК-7			+								Контрольная работа/Расчет стационарного магнитного поля
применять численные методы и программные средства для расчетов квазистационарного электромагнитного поля	ИД-1ПК-7						+					Контрольная работа/Анализ процесса импульсного намагничивания постоянного магнита в катушках Гельмгольца
использовать методы расчетов магнитных полей для анализа магнитного состояния электрической машины	ИД-1ПК-7									+		Контрольная работа/Преобразование энергии в электрических машинах Контрольная работа/Структура обмотки Домашнее задание/Элементарные магнитные поля в электрических машинах
применять аналитические и численные методы расчета для анализа процессов электромеханического преобразования энергии	ИД-3ПК-7										+	Расчетно-графическая работа/Индуктивности обмоток Расчетно-графическая работа/Схема обмотки, кривая МДС и гармонический состав поля
анализировать силовые взаимодействия в магнитных системах	ИД-3ПК-7			+								Контрольная работа/Силовые взаимодействия в магнитном поле
проводить экспериментальные исследования и рассчитывать параметры электромагнитов постоянного тока с использованием численных методов	ИД-3ПК-7						+					Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №2 "Электромагнитный подвес"
проводить экспериментальные исследования и рассчитывать параметры электромагнитов переменного тока с использованием численных методов	ИД-3ПК-7									+		Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №4 "Исследование электромагнита переменного тока"

рассчитывать параметры магнитных систем электрических машин с использованием численных методов	ИД-3ПК-7																			Контрольная работа/Генератор с постоянными магнитами на роторе
рассчитывать параметры магнитных систем электромагнитов с использованием численных методов	ИД-3ПК-7																			Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №3 "Определение параметров магнитного поля и тяговых характеристик электромагнита постоянного тока броневого типа" Контрольная работа/Электрические параметры электромагнита переменного тока
выполнять контроль магнитных материалов с помощью катушек Гемльгольца	ИД-3ПК-7																			Лабораторная работа/Защита лабораторной работы №1 "Определение магнитных моментов намагниченных деталей с помощью катушек Гельмгольца"

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

#### **5 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Расчет стационарного магнитного поля (Контрольная работа)
2. Силовые взаимодействия в магнитном поле (Контрольная работа)
3. Электромагнитные величины (Тестирование)

Форма реализации: Устная форма

1. Защита лабораторной работы №1 "Определение магнитных моментов намагниченных деталей с помощью катушек Гельмгольца" (Лабораторная работа)
2. Защита лабораторной работы №2 "Электромагнитный подвес" (Лабораторная работа)

#### **6 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Анализ процесса импульсного намагничивания постоянного магнита в катушках Гельмгольца (Контрольная работа)
2. Генератор с постоянными магнитами на роторе (Контрольная работа)
3. Электрические параметры электромагнита переменного тока (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Защита лабораторной работы №3 "Определение параметров магнитного поля и тяговых характеристик электромагнита постоянного тока броневого типа" (Лабораторная работа)
2. Защита лабораторной работы №4 "Исследование электромагнита переменного тока" (Лабораторная работа)

#### **7 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Преобразование энергии в электрических машинах (Контрольная работа)
2. Структура обмотки (Контрольная работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. Индуктивности обмоток (Расчетно-графическая работа)
2. Схема обмотки, кривая МДС и гармонический состав поля (Расчетно-графическая работа)
3. Элементарные магнитные поля в электрических машинах (Домашнее задание)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

Экзамен (Семестр №5)

Оценка за курс выставляется как среднее арифметическое из оценки за текущий контроль и оценки за промежуточную аттестацию

Экзамен (Семестр №6)

В диплом выставляется оценка за 6 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Основы теории электрических аппаратов : учебник для вузов по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / ред. П. А. Курбатов . – 5-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2015 . – 592 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература) . - ISBN 978-5-8114-1800-8 .;
2. Курбатов, П. А. Расчет и проектирование магнитных систем электрических аппаратов : учебное пособие по курсам "Расчет и проектирование магнитных систем электротехнических устройств", "Электромеханические системы электрических аппаратов" по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / П. А. Курбатов, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2016 . – 116 с. - ISBN 978-5-7046-1635-1 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=8109>;
3. Дергачев, П. А. Расчет электромагнитных полей : практикум по курсу "Расчет электромагнитных полей" по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника", модулю подготовки "Электрические и электронные аппараты" / П. А. Дергачев, Е. П. Курбатова, П. А. Курбатов, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – М. : Изд-во МЭИ, 2019 . – 76 с. - ISBN 978-5-7046-2202-04 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=10973>;
4. Электрические и электронные аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата, для вузов по инженерно-техническим направлениям и специальностям / отв. ред. П. А. Курбатов . – М. : Юрайт, 2016 . – 440 с. – (Бакалавр. Академический курс) . - ISBN 978-5-9916-5890-4 .;
5. Акимов Е. Г., Белкин Г. С., Годжелло А. Г., Дегтярь В. Г.- "Основы теории электрических аппаратов", (5-е изд., перераб. и доп.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2015 - (592 с.)  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=61364](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=61364);
6. Иванов-Смоленский А.В.- "Электрические машины. В двух томах. Том 1", Издательство: "МЭИ", Москва, 2017  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383012222.html>;
7. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский, [и др.] . – М. : Энергоатомиздат, 1986 . – 216 с.;
8. Ширинский, С. В. Методы анализа электрических машин : учебное пособие / С. В. Ширинский, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2017 . – 256 с. - ISBN 978-5-7046-1835-5 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=9189>;
9. Гончаров, В. И. Электромагнитные расчеты и моделирование полей в электрических машинах : практикум по курсам "Электромагнитные расчеты" и "Моделирование магнитных полей в электрических машинах" по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / В. И. Гончаров, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – Москва : Изд-во МЭИ, 2020 . – 192 с. - ISBN 978-5-7046-2222-2 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=11118>.

## 5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux;
3. OpenModelica;
4. EasyMag.

## 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - [http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)
3. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Е-207, Лекционная аудитория	стол, стул, шкаф, лабораторный стенд
Учебные аудитории для проведения лабораторных занятий	Е-205, Компьютерный класс	рабочее место сотрудника, стол, стул, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Е-207, Лекционная аудитория	стол, стул, шкаф, лабораторный стенд
Помещения для самостоятельной работы	НТБ-303, Компьютерный читальный зал	стол компьютерный, стул, стол письменный, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, кондиционер
Помещения для консультирования	Е-207, Лекционная аудитория	стол, стул, шкаф, лабораторный стенд
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-122, Кладовая	стеллаж, шкаф, шкаф для документов

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей электротехнических объектов

(название дисциплины)

#### 5 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-1 Электромагнитные величины (Тестирование)
- КМ-2 Расчет стационарного магнитного поля (Контрольная работа)
- КМ-3 Силовые взаимодействия в магнитном поле (Контрольная работа)
- КМ-4 Защита лабораторной работы №1 "Определение магнитных моментов намагниченных деталей с помощью катушек Гельмгольца" (Лабораторная работа)
- КМ-5 Защита лабораторной работы №2 "Электромагнитный подвес" (Лабораторная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
		Неделя КМ:	4	8	12	16	16
1	Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля						
1.1	Введение. Электромагнитные величины. Основные законы и понятия электромагнитного поля		+				
2	Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений.						
2.1	Методы расчетов стационарного магнитного поля на основе интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных. Численные методы решения уравнений.			+			
3	Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов.						
3.1	Электрические и магнитные свойства материалов. Моделирование нелинейных и гистерезисных свойств материалов.				+	+	
4	Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля.						
4.1	Расчет параметров магнитных систем на основе анализа магнитного поля.						+
Вес КМ, %:			15	20	20	20	25

#### 6 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-6 Анализ процесса импульсного намагничивания постоянного магнита в катушках

- Гельмгольца (Контрольная работа)
- КМ-7 Электрические параметры электромагнита переменного тока (Контрольная работа)
- КМ-8 Генератор с постоянными магнитами на роторе (Контрольная работа)
- КМ-9 Защита лабораторной работы №3 "Определение параметров магнитного поля и тяговых характеристик электромагнита постоянного тока броневого типа" (Лабораторная работа)
- КМ-10 Защита лабораторной работы №4 "Исследование электромагнита переменного тока" (Лабораторная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-6	КМ-7	КМ-8	КМ-9	КМ-10
		Неделя КМ:	4	6	12	14	14
1	Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле						
1.1	Интегральные и дифференциальные уравнения квазистационарного электромагнитного поля. Движение в магнитном поле		+				
2	Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока						
2.1	Электромагнитные процессы в электромагнитах постоянного и переменного тока			+		+	
3	Электромагнитное поле в электрических машинах						
3.1	Электромагнитное поле в электрических машинах.				+		
4	Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль						
4.1	Электромагнитное экранирование. Электромагнитный контроль						+
Вес КМ, %:			20	20	20	20	20

### 7 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-11 Элементарные магнитные поля в электрических машинах (Домашнее задание)
- КМ-12 Структура обмотки (Контрольная работа)
- КМ-13 Преобразование энергии в электрических машинах (Контрольная работа)
- КМ-14 Схема обмотки, кривая МДС и гармонический состав поля (Расчетно-графическая работа)
- КМ-15 Индуктивности обмоток (Расчетно-графическая работа)

**Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.**

Номер	Раздел дисциплины	Индекс	КМ-	КМ-	КМ-	КМ-	КМ-
-------	-------------------	--------	-----	-----	-----	-----	-----



раздела		КМ:	11	12	13	14	15
		Неделя КМ:	4	8	12	14	16
1	Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах						
1.1	Методы расчета электромагнитных полей и процессов в электрических машинах	+	+	+			
2	Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток						
2.1	Магнитодвижущие силы, потокосцепления и индуктивности обмоток				+	+	
Вес КМ, %:			10	20	20	30	20