

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

---

Направление подготовки/специальность: 11.04.01 Радиотехника

Наименование образовательной программы: Радиотехнические системы

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная


**Рабочая программа дисциплины**  
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.06.02.02</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>3 семестр - 3;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>108 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>3 семестр - 16 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>3 семестр - 16 часов;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>3 семестр - 75,7 часа;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b> <b>Тестирование</b> <b>Контрольная работа</b> <b>Расчетно-графическая работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Зачет с оценкой</b>	<b>3 семестр - 0,3 часа;</b>

**Москва 2024**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**


Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Михайлов М.С.
	Идентификатор	R88495daf-MikhailovMS-74da3f0e

М.С. Михайлов


**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Комаров А.А.
	Идентификатор	R8495daf1-KomarovAIA-eada3f0e

А.А. Комаров

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Комаров А.А.
	Идентификатор	R8495daf1-KomarovAIA-eada3f0e

А.А. Комаров

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** состоит в изучении математических методов прикладной электродинамики, дающих представление о совокупности математических методов, используемых в электродинамике, формулировке математических моделей, выборе методов и алгоритмов, применяемых при разработке пакетов прикладных программ..

### Задачи дисциплины

- изучение совокупности математических методов, применяемых в современной электродинамике, с упором на их практическое применение;
- освоение методов выбора конкретных решений при разработке математических моделей антенн и СВЧ/КВЧ устройств и систем.

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-1 Способен проводить исследования в целях совершенствования радиоэлектронных систем	ИД-3ПК-1 Разрабатывает алгоритмы и проводит исследования в целях совершенствования функциональных узлов радиоэлектронных систем	знать: - математические модели процессов и явлений, лежащих в основе решения практических задач прикладной электродинамики, антенн, СВЧ/КВЧ устройств и систем; - математические методы анализа практических задач прикладной электродинамики, антенн, СВЧ/КВЧ устройств и систем.  уметь: - применять программы расчета электромагнитных полей антенн и СВЧ/КВЧ устройств и систем; - формулировать и решать задачи, грамотно использовать математический аппарат, включающий аналитические, численные, асимптотические, гибридные методы для решения практических задач прикладной электродинамики, антенн, СВЧ/КВЧ устройств и систем;.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Радиотехнические системы (далее – ОПОП), направления подготовки 11.04.01 Радиотехника, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Базируется на уровне высшего образования (бакалавриат, специалитет).

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 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ 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 в дисциплину, постановка задачи, актуальность дисциплины. Обзор программных продуктов.	14	3	2	-	2	-	-	-	-	-	10	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], стр. 517-528
1.1	Введение в дисциплину, постановка задачи, актуальность дисциплины. Обзор программных продуктов.	14		2	-	2	-	-	-	-	-	10	-	
2	Основные положения электродинамики: уравнения Максвелла и интегральные соотношения, среды, поверхности и граничные условия.	20		4	-	4	-	-	-	-	-	12	-	
2.1	Основные положения электродинамики: уравнения Максвелла и интегральные соотношения, среды, поверхности и граничные условия.	20	4	-	4	-	-	-	-	-	12	-		

3	Излучение в свободное пространство и параметры антенн	16	2	-	2	-	-	-	-	-	12	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [2], стр. 169-193
3.1	Излучение в свободное пространство и параметры антенн	16	2	-	2	-	-	-	-	-	12	-	
4	Электродинамика СВЧ многополюсников	10	2	-	2	-	-	-	-	-	6	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [2], стр. 568-584
4.1	Электродинамика СВЧ многополюсников	10	2	-	2	-	-	-	-	-	6	-	
5	Асимптотические и гибридные методы решения граничных задач	16	2	-	2	-	-	-	-	-	12	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [3], стр. 22-57
5.1	Асимптотические и гибридные методы решения граничных задач	16	2	-	2	-	-	-	-	-	12	-	
6	Строгие численные методы решения электродинамических задач	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [1], стр. 129-142
6.1	Строгие численные методы решения электродинамических задач	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	Всего за семестр	108.0	16	-	16	-	-	-	-	0.3	58	17.7	
	Итого за семестр	108.0	16	-	16	-	-	-	-	0.3	75.7		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – 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 в дисциплину, постановка задачи, актуальность дисциплины. Обзор программных продуктов.

1.1. Введение в дисциплину, постановка задачи, актуальность дисциплины. Обзор программных продуктов.

1.1. Цели и задачи курса, его актуальность. 1.2. Современные системы электродинамического моделирования (ЭДМ) и их краткая характеристика. 1.3. Системы 3-х мерного и 2.5 мерного моделирования. 1.4. Метода решения граничных задач электродинамики и их краткая характеристика. 1.5. Сравнительный анализ решения задач электродинамики с помощью программных про-дуктов, использующих различные методы..

#### 2. Основные положения электродинамики: уравнения Максвелла и интегральные соотношения, среды, поверхности и граничные условия.

2.1. Основные положения электродинамики: уравнения Максвелла и интегральные соотношения, среды, поверхности и граничные условия.

2.1. Уравнения Максвелла и квадратичные (интегральные) соотношения для электромагнитного поля: закон сохранения энергии, теорема взаимности, теорема эквивалентности, един-ственность решения. 2.2. Среда в системах ЭДМ, виды сред и их описание, изотропные магнито-диэлектрики, анизотропные среды, металлы, гиротропные среды, бианизотропные (киральные) среды, ме-таматериалы. 2.3. Поверхности и граничные условия. Идеальные электрическая и магнитная стенки, импедансные непрозрачные стенки: изотропные, анизотропные, нелокальные импедансные граничные условия, условия Щукина-Леонтовича Сосредоточенные элементы и R,L,C граничные условия. Поверхности излучения и идеально согласованные слои, поверхности симметрии и принцип зеркального изображения. Периодические граничные условия, теория Флоке..

#### 3. Излучение в свободное пространство и параметры антенн

3.1. Излучение в свободное пространство и параметры антенн

3.1. Функция Грина свободного пространства. Дальняя зона и представление функции Грина в дальней зоне. Электромагнитное поле в дальней зоне. 3.2. Диаграмма направленности, виды диаграмм направленности: по вектору Пойнтинга, по полю, амплитудная и фазовая диаграммы. 3.3. Вторичные параметры антенн: коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, реализованный коэффициент усиления. 3.4. Поляризационные параметры поля излучения: типовые виды поляризации поля, коэффициент эллиптичности, кросс-поляризация и поляризационные потери..

#### 4. Электродинамика СВЧ многополюсников

4.1. Электродинамика СВЧ многополюсников

4.1. Собственные волны линий передачи, задачи на собственные волны, параметры собственных волн, обобщенные амплитуды собственных волн, обобщенные напряжения и ток в линии передачи. 4.2. Волновой и сосредоточенный порты, порты и собственные волны, пределы применимо-сти сосредоточенных портов. 4.3. Матричное описание СВЧ многополюсников, одномодовые матрицы рассеяния и матрицы передачи, многомодовые и обобщенные матрицы рассеяния, декомпозиция СВЧ схем, пределы применимости декомпозиции. 4.4. Анализ сложных СВЧ схем, метод матрицы рассеяния соединений, блок Schematic. 4.5. Матрицы рассеяния недиссипативных и взаимных многополюсников. 4.6.

Матрицы рассеяния симметричных четырехполюсников, шестиполюсников и восьмиполюсников..

### 5. Асимптотические и гибридные методы решения граничных задач

#### 5.1. Асимптотические и гибридные методы решения граничных задач

6.1. Метод геометрической оптики, лучевые трубки и закон сохранения энергии, лучи и трассировка в геометрической оптике. 6.2. Теорема эквивалентности и метод физической оптики, применение метода физической оптики для решения задач рассеяния на объектах с большими электрическими размерами. 6.3. Метод геометрической теории дифракции. Ключевые структуры и ключевые задачи. Дифракция плоской волны на металлическом клине. Представление поля в рамках метода геометрической теории дифракции. 6.4. Метод физической теории дифракции. Понятие краевой волны электрического тока. Представление рассеянного поля в рамках метода физической теории дифракции. 6.5. Гибридные методы решения задач рассеяния. Метод интегральных уравнений в сочетании с методом физической оптики..

### 6. Строгие численные методы решения электродинамических задач

#### 6.1. Строгие численные методы решения электродинамических задач

5.1. Метод интегральных уравнений для трехмерных структур, вывод интегральных уравнений, базисные и тестовые функции, метод Галеркина, использование априорной информации при выборе базисных функций, переход от интегрального уравнения к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). 5.2. Метод интегральных уравнений для 2.5 мерных структур, анализ печатных схем СВЧ, функция Грина плоско-слоистой структуры, применение магнитных токов для анализа щелевых структур. 5.3. Метод конечных элементов в частотной области, дискретизация пространства, базисные функции в виде интерполяционных полиномов, функционалы поля, минимизация функционала поля, формирование СЛАУ на примере анализа коаксиальной линии передачи с проводниками произвольной формы..

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Методы дискретизации уравнений Максвелла, сводящие задачу электродинамики к системе линейных алгебраических уравнений: метод конечных элементов, метод интегральных уравнений;
2. Методы геометрической и физической оптики, рассеяние электромагнитных волн на объектах больших электрических размеров;
3. Периодические структуры, граничные условия периодичности, порты Флоке, применение периодических граничных условий для анализа фазированных антенных решеток;
4. Собственные волны линий передачи и порты;
5. Виртуальные поверхности в системах ЭДМ: поверхности симметрии и их применение, поверхности излучения и идеально согласованные слои;
6. Среды и поверхности в системах ЭДМ, основные виды поверхностей и граничных условий;
7. Базовые блоки современных систем электродинамического моделирования: ввод исходных данных, алгоритм решения задачи и представление результатов.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

### **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	
<b>Знать:</b>								
математические методы анализа практических задач прикладной электродинамики, антенн, СВЧ/КВЧ устройств и систем	ИД-3ПК-1	+	+					Тестирование/Тест «Основные понятия и положения вычислительной электродинамики»
математические модели процессов и явлений, лежащих в основе решения практических задач прикладной электродинамики, антенн, СВЧ/КВЧ устройств и систем	ИД-3ПК-1			+	+			Тестирование/Тест «Математические модели антенн и устройств СВЧ/КВЧ»
<b>Уметь:</b>								
формулировать и решать задачи, грамотно использовать математический аппарат, включающий аналитические, численные, асимптотические, гибридные методы для решения практических задач прикладной электродинамики, антенн, СВЧ/КВЧ устройств и систем;	ИД-3ПК-1				+	+		Контрольная работа/Контрольная работа «Анализ излучения прямоугольной апертуры в приближении физической оптики» Тестирование/Тест «Методы решения граничных задач электродинамики»
применять программы расчета электромагнитных полей антенн и СВЧ/КВЧ устройств и систем	ИД-3ПК-1						+	Расчетно-графическая работа/Защита расчетного задания

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

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

**3 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Защита расчетного задания (Расчетно-графическая работа)
2. Контрольная работа «Анализ излучения прямоугольной апертуры в приближении физической оптики» (Контрольная работа)
3. Тест «Математические модели антенн и устройств СВЧ/КВЧ» (Тестирование)
4. Тест «Методы решения граничных задач электродинамики» (Тестирование)
5. Тест «Основные понятия и положения вычислительной электродинамики» (Тестирование)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

*Зачет с оценкой (Семестр №3)*

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и зачетной составляющих.

В диплом выставляется оценка за 3 семестр.

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

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

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

1. Гринев, А. Ю. Математические основы и методы решения задач электродинамики : учебное пособие по специальностям "Радиотехника", "Радиоэлектронные системы и комплексы" / А. Ю. Гринев, А. И. Гиголо . – М. : Радиотехника, 2015 . – 216 с. - ISBN 978-5-93108-095-6 .;
2. Григорьев А. Д.- "Электродинамика и микроволновая техника", (2-е изд.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2021 - (704 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/167679>;
3. Комаров, А. А. Асимптотические и численные методы современной электродинамики. Часть 1 : учебное пособие по курсу "Специальные вопросы электродинамики" по направлениям "Радиоэлектронные системы и комплексы", "Радиотехника" / А. А. Комаров, М. С. Михайлов, В. А. Пермяков ; ред. В. А. Пермяков ; Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2017 . – 60 с. - ISBN 978-5-7046-1803-4 .  
<http://elibrary.mpei.ru/elibrary/view.php?id=9415>.

### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. Ansys / CAE Fidesys;
5. Видеоконференции (Майнд, Сберджаз, ВК и др);

6. Python;
7. GNU Octave.

### 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. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. База данных ВИНТИ online - <http://www.viniti.ru/>
5. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
6. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
7. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
8. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
9. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
10. ЭБС "Консультант студента" - <http://www.studentlibrary.ru/>
11. 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	Е-612, Учебная аудитория кафедры "РТП и АС"	парта со скамьей, стол компьютерный, стул, вешалка для одежды, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Е-612, Учебная аудитория кафедры "РТП и АС"	парта со скамьей, стол компьютерный, стул, вешалка для одежды, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Е-612, Учебная аудитория кафедры "РТП и АС"	парта со скамьей, стол компьютерный, стул, вешалка для одежды, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Помещения для самостоятельной работы	НТБ-201, 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-612, Учебная аудитория кафедры "РТП и АС"	парта со скамьей, стол компьютерный, стул, вешалка для одежды, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран,

		компьютер персональный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Е-800/7, Архив каф. "РТП и АС"	стол, стул, шкаф для документов, вешалка для одежды, холодильник

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Математические методы электродинамики

(название дисциплины)

#### 3 семестр

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

- КМ-1 Тест «Основные понятия и положения вычислительной электродинамики» (Тестирование)
- КМ-2 Тест «Математические модели антенн и устройств СВЧ/КВЧ» (Тестирование)
- КМ-3 Тест «Методы решения граничных задач электродинамики» (Тестирование)
- КМ-4 Контрольная работа «Анализ излучения прямоугольной апертуры в приближении физической оптики» (Контрольная работа)
- КМ-5 Защита расчетного задания (Расчетно-графическая работа)

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

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
		Неделя КМ:	4	8	10	12	15
1	Введение в дисциплину, постановка задачи, актуальность дисциплины. Обзор программных продуктов.						
1.1	Введение в дисциплину, постановка задачи, актуальность дисциплины. Обзор программных продуктов.		+				
2	Основные положения электродинамики: уравнения Максвелла и интегральные соотношения, среды, поверхности и граничные условия.						
2.1	Основные положения электродинамики: уравнения Максвелла и интегральные соотношения, среды, поверхности и граничные условия.		+				
3	Излучение в свободное пространство и параметры антенн						
3.1	Излучение в свободное пространство и параметры антенн			+			
4	Электродинамика СВЧ многополюсников						
4.1	Электродинамика СВЧ многополюсников			+	+	+	
5	Асимптотические и гибридные методы решения граничных задач						
5.1	Асимптотические и гибридные методы решения граничных задач				+	+	
6	Строгие численные методы решения электродинамических задач						
6.1	Строгие численные методы решения электродинамических задач						+

	Bec KM, %:	10	10	20	20	40
--	------------	----	----	----	----	----