

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
А.С. Батурин**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Прикладная электродинамика
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.Е. Банков, д-р техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электроники 12.02.2024

## Аннотация

Курс посвящен изучению современных методов электродинамического моделирования сложных структур

Курс включает следующие разделы:

1. Общая характеристика граничных задач прикладной электродинамики. Интегральные соотношения электродинамики.
2. Среда в прикладной электродинамике, материальные параметры, магнито-диэлектрики, проводники, гиротропные среды.
3. Поверхности в прикладной электродинамике, граничные условия.
4. Симметрия в электродинамике, виды симметрии, принцип зеркального изображения.
5. Электродинамика периодических структур, теорема Флоке.
6. Источники электромагнитного поля, волновые и сосредоточенные порты
7. Излучение электромагнитных волн и антенны, параметры антенн.
8. Задачи на собственные волны и собственные колебания.
9. Методы решения граничных задач электродинамики.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение теоретических основ применения современных систем электродинамического моделирования.

### Задачи дисциплины

- изучение базовых свойств электромагнитного поля и граничных задач электродинамики;
- изучение объектов прикладной электродинамики: сред, граничных условий, источников поля;
- изучение граничных задач для структур с особыми свойствами: симметрией, периодичностью, излучением на бесконечность, острыми кромками и т.д.;
- изучение универсальных и объектно-ориентированных методов решения граничных задач электродинамики.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели

новые научные результаты

ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- уравнения Максвелла, интегральные соотношения электродинамики, виды граничных условий и способы их применения, виды источников электромагнитного поля и их свойства, виды симметричных объектов и способы их моделирования, виды периодических структур и методы их моделирования, универсальные методы решения граничных задач и их основные характеристики, проблемно-ориентированные методы, их назначение и особенности.

уметь:

- построить модель реального объекта, выбрать источник электромагнитного поля, установить граничные условия на поверхностях, выбрать метод решения граничной задачи, адекватный моделируемому объекту.

владеть:

- принципами построения электродинамических моделей и методами решения граничных задач электродинамики.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Общие вопросы прикладной электродинамики. Система уравнений Максвелла. Виды граничных задач. Интегральные соотношения электродинамики	1			10
2	Объекты прикладной электродинамики: среды и их параметры, граничные условия, источники поля	5			10
3	Структуры с особыми свойствами	6			10
4	Излучение и антенны. Функция Грина свободного пространства. Первичные и вторичные параметры антенн. Поглощающие поверхности. Моделирование антенн разных видов.	6			10
5	Волноводы и линии передачи, собственные волны и волновые порты. СВЧ многополюсники и их матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния симметричных, унитарных и взаимных многополюсников.	6			10
6	Методы решения граничных задач электродинамики	6			10
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Общие вопросы прикладной электродинамики. Система уравнений Максвелла. Виды граничных задач. Интегральные соотношения электродинамики

Система уравнений Максвелла. Виды граничных задач. Следствия из уравнений Максвелла: теорема Умова-Пойнтинга, теорема взаимности, теорема единственности решения, теорема эквивалентности, волновое уравнение Гельмгольца, плоские волны.

2. Объекты прикладной электродинамики: среды и их параметры, граничные условия, источники поля

Среды. Тензоры магнитной и диэлектрической проницаемости. Однородные, изотропные среды. Частотная дисперсия, модель Дебая. Анизотропные среды. Гиротропные среды. Проводники, с идеальной и неидеальной проводимостями, скин-слой. Искусственные среды и метаматериалы.

Граничные условия. Идеальные граничные условия - электрическая и магнитная стенки. Импедансные граничные условия разных видов: односторонние, двухсторонние, нелокальные, анизотропные.

Источники поля: сторонние токи, первичное поле. Волноводы и линии передачи. Задачи Штурма-Лиувилля на собственные волны. Волновые порты. Линии передачи и генераторы с внутренним сопротивлением, сосредоточенные порты. Понятие СВЧ многополюсника и его матрица рассеяния.

3. Структуры с особыми свойствами

Симметричные структуры. Структуры с плоскостями симметрии, зеркальное отображение. Метод симметрии, парциальные структуры.

Периодические структуры. Классификация периодических структур, одномерные, двумерные и трехмерные периодические структуры. Теорема Флоке для одномерных структур, одномерные гармоники Флоке. Теорема Флоке для двумерных структур, двумерные гармоники Флоке. Теорема Флоке для трехмерных структур, периодические среды.

Структуры с острыми кромками. Условия Мейкснера и особенности поля вблизи острых кромок. Особенности электродинамического моделирования полосковых интегральных схем.

4. Излучение и антенны. Функция Грина свободного пространства. Первичные и вторичные параметры антенн. Поглощающие поверхности. Моделирование антенн разных видов.

Функция Грина свободного пространства, приближение дальней зоны. Поле в дальней зоне, диаграмма направленности, поляризационные характеристики. Вторичные параметры антенн: коэффициент направленного действия, коэффициент усиления.

Антенные решетки. Приближение бесконечной двумерной решетки. Квазипериодический режим, волновод и канал Флоке, периодические граничные условия и поверхности master/slave. Возбуждение одиночного элемента решетки, связь с параметрами квазипериодического режима.

Особенности антенн малых электрических размеров. Критерий Харрингтона-Чу. Согласование антенн малых размеров, теорема Фано, понятие об антенне-фильтре.

5. Волноводы и линии передачи, собственные волны и волновые порты. СВЧ многополюсники и их матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния симметричных, унитарных и взаимных многополюсников.

Матричное описание СВЧ многополюсников. Одноволновые и обобщенные матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния симметричных, взаимных, унитарных многополюсников. Метод симметрии при анализе СВЧ многополюсников, парциальные многополюсники, четное и нечетное возбуждения.

Составные многополюсники, понятие СВЧ схемы, методы анализа СВЧ схем. Каскадное соединение четырехполюсников, волновые матрицы передачи.

СВЧ периодические структуры, разрешенные и запрещенные зоны. СВЧ фильтры. Стандартные частотные характеристики СВЧ фильтров. Обобщенный метод синтеза СВЧ фильтра.

#### 6. Методы решения граничных задач электродинамики

Метод интегральных уравнений. Интегральные уравнения для идеально проводящих тел. Дискретизация поверхности. Алгебраизация интегральных уравнений, система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), базисные и тестовые функции, RWG функции. Сходимость СЛАУ, критерии сходимости. Метод Галеркина. Функция Грина плоско-слоистой структуры, интегральные уравнения для таких структур.

Метод конечных элементов в частотной области. Дискретизация пространства. Электродинамические функционалы. Интерполяционные базисные функции. СЛАУ по методу конечных элементов.

Асимптотические методы. Метод геометрической оптики. Метод физической оптики. Геометрическая и физическая теории дифракции. Гибридный метод физической оптики и интегральных уравнений.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором, меловой или маркерной доской.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь. 1983.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. школа. 1988.

#### Дополнительная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. Банков С.Е. Теоретические основы применения систем электродинамического моделирования. М.: Солон-Пресс. 2024.

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Не предусмотрены

### 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	С.Е. Банков, д-р техн. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Прикладная электродинамика» обучающийся должен:

### знать:

- уравнения Максвелла, интегральные соотношения электродинамики, виды граничных условий и способы их применения, виды источников электромагнитного поля и их свойства, виды симметричных объектов и способы их моделирования, виды периодических структур и методы их моделирования, универсальные методы решения граничных задач и их основные характеристики, проблемно-ориентированные методы, их назначение и особенности.

### уметь:

- построить модель реального объекта, выбрать источник электромагнитного поля, установить граничные условия на поверхностях, выбрать метод решения граничной задачи, адекватный моделируемому объекту.

### владеть:

- принципами построения электродинамических моделей и методами решения граничных задач электродинамики.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В начале каждого занятия проводится краткий опрос по теме предыдущего занятия.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Условие взаимности структуры. Теорема взаимности. Матрица рассеяния взаимного многополюсника. Матрица рассеяния взаимного четырехполюсника без потерь.



2. Закон сохранения энергии. Теорема Умова-Пойнтинга. Матрица рассеяния многополюсника без потерь. Матрица рассеяния взаимного четырехполюсника без потерь.
3. Построение электродинамических моделей для анализа собственных волн однородного и периодического волноводов. Программный блок Eigenmode, его назначение и возможности.
4. Симметрия в электродинамике. Моделирование структур с одной и двумя плоскостями симметрии с применением поверхностей Symmetry E,H. Принцип зеркального изображения.
5. Волновой и сосредоточенный порты. Погрешности при применении сосредоточенных портов и причины их возникновения.
6. СВЧ периодические структуры. Зонная структура периодического волновода, запрещенные и разрешенные зоны. Анализ собственных волн периодических волноводов с использованием блока Eigenmode.
7. Модель бесконечной двумерной антенной решетки в квазипериодическом режиме. Волновод и канал Флоке. Характеристика собственных волн волновода Флоке. Поверхности master/slave.
8. Бесконечная двумерная антенная решетка в режиме возбуждения одного элемента, связь между параметрами решетки при возбуждении одного элемента и в квазипериодическом режиме.
9. Излучение в свободное пространство. Функция Грина свободного пространства и поле в дальней зоне. Диаграмма направленности и поляризационные характеристики излучения. Применение поглощающих поверхностей для решения задач излучения.
10. Теорема эквивалентности. Базовые принципы метода физической оптики. Основные положения гибридного метода физической оптики - интегральных уравнений. Схема моделирования зеркальной антенны с использованием метода физической оптики.
11. Поведение поля в окрестности острых металлических кромок, условия Мейкснера. Применение метода малых возмущений для расчета потерь в полосковых структурах.
12. Односторонние и двухсторонние импедансные граничные условия, структуры, которые они описывают. Пространственная дисперсия импеданса и нелокальные импедансные граничные условия.
13. Общая схема метода интегральных уравнений. Интегральные уравнения для идеально проводящего тела. Базисные и тестовые функции. RWG функции. Метод Галеркина и его особенности.
14. Особенности решения внешних задач электродинамики методами интегральных уравнений и конечных элементов, поверхность излучения и идеально согласованный слой.
15. Декомпозиция сложного СВЧ устройства на элементарные многополюсники. Условия корректной декомпозиции. Одномодовая и обобщенная матрицы рассеяния. Анализ каскадно соединенных четырехполюсников.
16. Собственные волны волноводов и их свойства. Задача Штурма-Лиувилля. Обобщенные волны в волноводах и линиях передачи. Определение матрицы рассеяния. Сдвиг отсчетных плоскостей (de-embedding).
17. Поведение поля в дальней зоне. Параметры, описывающие поляризационные характеристики поля излучения. Виды поляризаций, понятие поляризационного базиса.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Оценка за семестр выставляется по результатам устного дифференцированного зачета, проводимого в конце семестра. Опрос студента не должен превышать 40 минут.