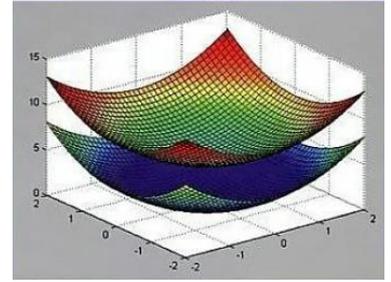


1. **Название курса:** «Численные методы в радиофизике»
2. **Лектор:** доцент практики, д.т.н. Бородулин Роман Юрьевич
3. **Ассистент:** доцент практики, к.т.н. Лукьянов Николай Олегович



4. **Язык обучения:** русский

5. **Зачетные единицы:** 3 з.е., экзамен

6. **Образовательная программа и семестр изучения:** Магистратура: «Радиочастотные системы и устройства», 2 семестр

7. **Пререквизиты:** общая физика, техническая электродинамика, теория цепей, информатика, программирование (ориентирование на MATLAB, FORTRAN)

8. **Краткая аннотация:**

Цель изучения данного курса – глубокое освоение современных методов и методик проектирования и анализа излучения сложных электродинамических систем на основе компьютерного моделирования. В основе курса лежит представление фундаментальных принципов теории электромагнитного поля таким образом, чтобы учащиеся смогли легко применить их к задачам анализа и проектирования антенн.

Курс начинается с рассмотрения общих физических принципов, на которых основывается теория электромагнитного поля, что требуется для понимания принципов излучения радиоволн антеннами. Далее в применении к анализу антенн последовательно рассматриваются три базовых численных метода: метод конечных разностей во временной области (КРВО), метод моментов (ММ) и метод конечных элементов (МКЭ).

Поскольку КРВО непосредственно аппроксимирует уравнения Максвелла, основное место в курсе уделено именно ему. Подробно рассматриваются общая структура КРВО-программ, программное представление расчетной области и преобразование уравнений Максвелла в конечно-разностную форму, классический алгоритм Йи, пространственно-временная дискретизация материальных объектов, проблемы устойчивости, численной сходимости метода и многое другое, поглощающие граничные условия, идеально-согласованные слои (perfectly matched layers, PML) и т.п.

При изучении метода моментов рассматриваются общие математические ММ, интегральные уравнения произвольной и проволочной структуры, алгоритмическая и программная реализация формирования СЛАУ и представления моделей возбуждения, осуществляется обучение практическому решению систем интегральных уравнений. Параллельно рассматриваются методики численного интегрирования, дифференцирования и т.п.

Метод конечных элементов представлен в виде узловой реализации, позволяющей решать скалярные уравнения Лапласа и Пуассона, либо осесимметричные векторные за-

дачи в виде волновых уравнений Гельмгольца. Последовательно рассматривается процедура решения одномерных, двумерных задач, реализация узлового МКЭ в среде MATLAB и практическое решение простейшей задачи излучения элементарного магнитного диполя.

подавляющее число занятий являются практическими. Цель практических занятий – самостоятельная и пошаговая подготовка студентами алгоритмов расчета антенн, реализация алгоритмов в среде MATLAB в виде готовых программ. Основной упор в дисциплине делается на приведении физики, математики и основ программирования к понятному для студента уровню, развитие творческого и нестандартного мышления, повышение научного потенциала обучаемых.

Исходя из тенденции широкого внедрения при проектировании радиотехнических систем современных программных комплексов, таких как CST Microwave Studio, ANSYS HFSS, FEKO, COMSOL и т.п., глубокое понимание процессов, моделируемых данными программными продуктами за счет умения самостоятельно их моделировать является крайне актуальным для будущих инженеров – специалистов широкого профиля. Курс является уникальным, ориентирован на развитие у студентов научного нестандартного подхода к разработке сложных электродинамических систем.

9. Содержание курса

Номер занятия	Основные темы раздела, разделенные на лекции, практики, лабораторные	Формат занятия
2 семестр		
Основные уравнения классической электродинамики		
1.	Уравнения Максвелла и Гельмгольца.	Л
2.	Начальные и граничные условия	Л
3.	Введение в численные методы электродинамики.	Л
Метод конечных разностей во временной области		
4.	Введение в метод конечных разностей во временной области	Л
5.	Структура КРВО - программ	ПЗ
6.	Программное представление расчетной области и преобразование уравнений Максвелла в конечно-разностную форму	ПЗ
7.	Алгоритм Йи	Л
8.	Представление уравнений Максвелла для решения задач методом КРВО	Л
9.	Пространственная дискретизация объектов в алгоритмах КРВО	ПЗ
10.	Пространственно-временная дискретизация объектов КРВО	ПЗ

Номер занятия	Основные темы раздела, разделенные на лекции, практики, лабораторные	Формат занятия
11.	Проблемы устойчивости и численной сходимости метода КРВО	Л
12.	Источники возбуждения в методе КРВО	Л
13.	Расчет параметров дискретного электромагнитного поля в классических алгоритмах КРВО	ПЗ
14.	Моделирование простейших излучателей с использованием классических алгоритмов КРВО	ПЗ
15.	Моделирование переходных процессов в цепях питания антенн	ПЗ
16.	Расчет значений составляющих электромагнитного поля на заданном расстоянии от возбуждаемой точки пространства	ПЗ
17.	Методы имитации поглощения волн на границах расчетной области в методе КРВО	Л
18.	Алгоритмизация PML в методе КРВО	Л
19.	Расчет несимметричного вибратора с применением PML	ПЗ
20.	Моделирование плоских волн и объектов сложной конфигурации	ПЗ
	Макроскопическая электродинамика и метод КРВО	
21.	Постановка расчетных макроскопических задач электродинамики, решаемых методом КРВО	Л
22.	Расчет амплитудного распределения поля вблизи объектов различной конфигурации	ПЗ
23.	Моделирование прохождения плоской волны через границы раздела сред	ПЗ
24.	Моделирование падения плоской волны на границу раздела сред	ПЗ
25.	Моделирование зон, существенных для РРВ	ПЗ
26.	Моделирование распространения радиоволн над плоской, сферической и неоднородной поверхностью	ПЗ
27.	Постановка антенных задач для решения методом КРВО	Л
28.	Моделирование линейных антенн различной конфигурации	ПЗ
29.	Моделирование антенн круговой поляризации	ПЗ
30.	Расчет амплитудного распределения тока вдоль поверхности вибратора	ПЗ

Номер занятия	Основные темы раздела, разделенные на лекции, практики, лабораторные	Формат занятия
31.	Расчёт входного сопротивления антенны методом КРВО	ПЗ
32.	Метод Стреттона-Чу и его применение в задачах амплитуды полей в дальней зоне методом КРВО	Л
33.	Расчет диаграммы направленности симметричного вибратора в свободном пространстве	ПЗ
34.	Расчет элементов полей рассеяния объекта локальным методом КРВО	ПЗ
35.	Моделирование антенн в диссипативных средах методом КРВО	ПЗ
36.	Расчет взаимного влияния антенн методом КРВО	ПЗ
	Метод моментов	
37.	Математические аспекты метода моментов	Л
38.	Уравнение для проволочной структуры	Л
39.	Алгоритмическая реализация метода моментов	Л
40.	Модели возбуждения в методе моментов	ПЗ
41.	Решение интегральных уравнений методом моментов	ПЗ
	Метод конечных элементов	
42.	Введение в метод конечных элементов	Л
43.	Применение МКЭ для решения одномерных задач	Л
44.	Решения двумерных задач методом конечных элементов	Л
45.	Аппроксимация линейными многочленами и базисные функции	ПЗ
46.	Реализация узлового метода конечных элементов в среде программирования MATLAB	ПЗ
47.	Решение уравнения Лапласа (Гельмгольца) узловым методом конечных элементов (MATLAB)	ПЗ
48.	Решение задачи излучения элементарного магнитного диполя узловым методом конечных элементов	ПЗ
49.	Курсовая работа	
50.	Экзамен	Э

Л - лекция .

ПЗ – практическое занятие.

10. Литература:

Обязательная

1. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – Бином. Лаборатория знаний, 2003. – 640 с.
2. Бородулин Р.Ю. Численные методы электродинамики / Моногр. – СПб.: ВАС, 2016. – 200 с.: ил.

Дополнительная

1. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры; пер. с англ. под ред. Э. Л. Бурштейна. – М., 1977.
2. Марков, Г. Т. Антенны: Учеб. для студентов радиотехнич. специальностей вузов / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.
3. Stutzman, W. L. Antenna Theory and Design / W. L. Stutzman, G. A. Thiele. – 3-rd ed. – N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2012.
4. Sadiku, M. Numerical Techniques in Electromagnetics / M. Sadiku. – Second ed. – CRC Press, 2001.
5. Jin, J. M. The finite element method in electromagnetics / J. M. Jin. – Second ed. – N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2002.

11. Оценка успеваемости по курсу и примеры заданий

Форма контроля	Тип задания	Вес %	Минимальный порог выполнения для получения аттестации (оценка 3 или зачёт) %	Сроки выполнения	Комментарии
Текущий контроль	Практическое задание (задача)		оценка 3	1 час.	
Текущий контроль	Курсовая работа		оценка 3	16 часов	
Промежуточная аттестация (Mid-term)	Экзамен		оценка 3	4 часа	
Допуск к аттестации (если есть)					
Аттестация (экзамен/зачёт)					
Σ		100			

Примеры заданий

№ п/п	Тип задания	Составные части задания	Как используются
Текущий контроль успеваемости			
1	Задача/домашнее задание	<ul style="list-style-type: none"> • Описание технологии применения Текущий контроль осуществлять для проверки качества усвоения учебного материала и стимулирования учебной работы обучающихся. Текущий контроль проводить путем решения практической задачи во время одного из практических занятий. • Комплект задач Задача 1. Рассчитать и построить диаграмму направленности в плоскостях E и H элементарного электрического диполя, расположенного в свободном пространстве. Задача 2. Рассчитать и построить диаграмму направленности в плоскостях E элементарного электрического диполя, расположенного над идеально проводящей плоскостью на высоте $\lambda/4$. Задача 3. Рассчитать и изобразить графически распределение относительной амплитуды тока вдоль бесконечно тонкого симметричного вибратора с длиной плеча $l=0,5\lambda$. Задача 4. Рассчитать действующую длину полуволнового бесконечно тонкого симметричного вибратора, если частота возбуждающей переменной ЭДС $f=30$ МГц. Задача 5. Рассчитать и построить диаграмму направленности в плоскостях E элементарного электрического диполя, расположенного над идеально проводящей плоскостью на высоте $\lambda/2$. Задача 6. Рассчитать и изобразить графически распределение относительной амплитуды тока вдоль бесконечно тонкого симметричного вибратора с длиной плеча $l=0,25\lambda$. Задача 7. Рассчитать действующую длину полуволнового бесконечно тонкого симметричного вибратора, если частота возбуждающей переменной ЭДС $f=60$ МГц. Задача 8. Рассчитать и построить диаграмму направленности двух синфазно запитанных бесконечно тонких полуволновых симметричных вибраторов, расположенных в свободном пространстве, если расстояние между ними $d=0,25\lambda$. Задача 9. Рассчитать и построить диаграмму направленности двух противофазно запитанных бесконечно тонких полуволновых симметричных вибраторов, расположенных в свободном пространстве, если расстояние между ними $d=0,25\lambda$. Задача 10. Рассчитать активную и реактивную составляющую входного сопротивления полуволнового бесконечно тонкого симметричного вибратора, расположенного в свободном пространстве. Задача 11. Рассчитать и построить диаграмму направленности двух синфазно запитанных бесконечно тонких полуволновых симметричных вибраторов, расположенных в свободном пространстве, если расстояние между ними $d=0,5\lambda$. Задача 12. Рассчитать и построить диаграмму направленности двух противофазно запитанных бесконечно 	Решение задач индивидуально

№ п/п	Тип задания	Составные части задания	Как используются
		<p>тонких полуволновых симметричных вибраторов, расположенных в свободном пространстве, если расстояние между ними $d=0,5\lambda$.</p> <p>Задача 13. Рассчитать активную и реактивную составляющую входного сопротивления четвертьволнового бесконечно тонкого несимметричного вибратора, расположенного в над идеально проводящей плоскостью.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Требования к выполнению задач <p>Создать модель. Разработать программу. Провести расчет. Представить результаты расчета в виде пояснительной записки.</p>	
2	Исследовательская работа/проект/доклад	<ul style="list-style-type: none"> • Описание технологии применения <p>Задание на курсовой проект (работу): разработать компьютерную программу, позволяющую решать электродинамические задачи и рассчитывать электрические характеристики антенн используя методики и алгоритмы численных методов решения задач электродинамики. Результаты расчета должны соответствовать теоретическим данным, необходимо доказать, что результаты, полученные в ходе решения задачи в рамках курсовой работы верны, а разработанная программа, позволяет получить корректный результат.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Примерная тематика исследовательских работ <ol style="list-style-type: none"> 1. Решение задачи дифракции электромагнитного поля антенны, расположенной на объекте сложной геометрической формы методом КРВО. 2. Расчет электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств методом КРВО. 3. Разработка широкополосной антенны и анализ ее электрических характеристик методом КРВО. 4. Разработка антенной решетки поперечного излучения и анализ ее электрических характеристик методом КРВО. 5. Разработка полосковой антенны и анализ ее электрических характеристик методом КРВО. <ul style="list-style-type: none"> • Требования к выполнению задач <p>Пояснительная записка должна содержать:</p> <ul style="list-style-type: none"> описание конфигурации объекта; схема и модель объекта, расчетной области и антенны (четвертьволновой диполь для каждой частоты) результаты расчета ЭМП в ближней зоне (на трех частотах); результаты расчета ЭМП в дальней зоне (диаграмма направленности на трех частотах); выводы. 	Индивидуальный
Промежуточная аттестация / Сессия			
30	Собеседование по экзаменационным билетам	<ul style="list-style-type: none"> • Описание технологии применения <p>Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена. Билеты содержат один теоретический вопрос по дисциплине и один практический в виде типовой задачи, взятой из перечня задач. Перечень вопросов к зачету получить у преподавателя за 1 месяц до начала промежуточной аттестации через ответственного за связь с преподавателем. Подготовку осуществлять с использова-</p>	Собеседование с экспертами, перекрестное собеседование, письменный ответ на билет

№ п/п	Тип задания	Составные части задания	Как используются
		<p>нием текстов лекций, основной и дополнительной литературы.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Примерный перечень вопросов/заданий к экзамену <ol style="list-style-type: none"> 1. Уравнения Максвелла и материальные уравнения. 2. Электродинамические потенциалы и векторы Герца. <ol style="list-style-type: none"> 1. Условия на границе раздела сред. 2. Граничные условия на разных поверхностях. 3. Общая характеристика методов решения задач электродинамики. 4. Классификация численных методов и области их применения. 5. Общее описание метода КРВО 6. Уравнения Максвелла для метода КРВО. 7. Программная дискретизация уравнений Максвелла. 8. Итерационный алгоритм расчета ЭМП. 9. Формирование составляющих ЭМП по алгоритму Йи. 10. Сходимость и устойчивость метода. 11. Дифференциальные уравнения Максвелла в декартовой системе координат. 12. Представления уравнений Максвелла в конечно-разностной форме. 13. Формирование временной дискретности. Условие Куранта-Фридрихса-Леви. 14. Пространственная дискретизация. 15. Переходные процессы. 16. Виды моделей возбуждения. 17. Мягкие источники. 18. Жесткие источники. 19. Нестационарный источник в виде гауссова импульса. 20. Способ моделирования Гаусс импульса. 21. Процесс постановки поглощающих граничных условий в методе КРВО. 22. Виды поглощающих условий. 23. Выражения ПГУ для ТМ-волны. 24. Решение уравнений максвелла с идеально-согласованными слоями. 25. Методика выбора электрических параметров и размеров поглощающих слоев. 26. Зависимость идеально согласованных поглощающих слоев от частоты. 27. Сходимость результатов. 28. Решение задач дифракции в дальней и ближней зоне излучателя методом КРВО. 29. Решение задач ЭМС антенн. 30. Особенности расчета электрических характеристик антенн методом КРВО. 31. Особенности расчета внутренних характеристик антенн методом КРВО. 32. Решение задач излучения антенн и расчет характеристики направленности. 33. Особенности расчета амплитуды электромагнитных полей в дальней зоне излучателя 34. Интегральные уравнения как уравнения Кирхгоффа для электрической цепи. 35. Формирования элементов СЛАУ. 	

№ п/п	Тип задания	Составные части задания	Как используются
		<p>36. Основные этапы решения одномерных задач. 37. Численное решение однородного дифференциального уравнения узловым методом конечных элементов.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Порядок формирования экзаменационного билета Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена. Билеты содержат один теоретический вопрос по дисциплине и один практический в виде типовой задачи, взятой из перечня задач. Перечень вопросов к зачету получить у преподавателя за 1 месяц до начала промежуточной аттестации. Подготовку осуществлять с использованием текстов лекций, основной и дополнительной литературы. • Шкала оценивания и критерии оценки <ol style="list-style-type: none"> 1. «Отлично» – обучающийся глубоко и прочно усвоил весь программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагает, не затрудняется с ответом при видоизменении задания, свободно справляется с задачами и практическими заданиями, правильно обосновывает принятые решения, умеет самостоятельно обобщать и излагать материал, не допуская ошибок. 2. «Хорошо» – обучающийся твердо знает программный материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, может правильно применять теоретические положения и владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических заданий. 3. «Удовлетворительно» – обучающийся усвоил только основной материал, но не знает отдельных деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушает последовательность в изложении программного материала и испытывает затруднения в выполнении практических заданий. 4. «Неудовлетворительно» – обучающийся не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, с большими затруднениями выполняет практические задания, задачи. 	