МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет
Кафедра радиофизики

Согласовано, декан ФФ
_____ Блинов В.Е.
подпись
«04» 04 2026 г.

Рабочая программа дисциплины

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

Направление подготовки **03.04.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Направление подготовки **03.04.01 Прикладные математика и физика**
Направленность (профиль): **Космическое и специальное приборостроение**

Форма обучения **Очная**

Семестр	**Общий объем**	**Виды учебных занятий (в часах)**				**Промежуточная аттестация (в часах)**				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72		32		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетные единицы из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-2 (ОПОП 03.04.02), ПК-1 (ОПОП 03.04.01)										

Руководитель программы
д.ф.-м.н. Логашенко И.Б.

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. 3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы..... 3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу 4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий 4
5. Перечень учебной литературы. 6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. 6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины..... 6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине..... 7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. 7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. 7

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Дисциплина «Вычислительные методы в электродинамике» имеет своей целью: ознакомление с основами современных методов и программ расчета электродинамических систем, в том числе с новыми методами и программами компьютерного моделирования электродинамических систем, получение практических навыков в расчете электродинамических систем с использованием компьютеров.

Создание современных ускорителей заряженных частиц для фундаментальных исследований и прикладных целей, исследования явлений в физике плазмы, ионосфере, астрофизике и других областях науки немыслимы без использования программ компьютерного моделирования электродинамических систем. Успех широкого использования компьютерного моделирования при разработке электродинамических систем связан как с бурным развитием компьютерной техники, так и с разработкой новых эффективных методов расчета таких систем.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-2 (ОПОП 03.04.02 Физика) Способен использовать специализированные знания в области физики при постановке и решении задач в исследовательской деятельности с помощью современной аппаратуры и информационно-телекоммуникационных технологий в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	**ПК -2.1.** Проводит научные изыскания в избранной области экспериментальных и/или теоретических физических исследований с помощью современной аппаратуры и информационно-телекоммуникационных технологий в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**Знать** современные методы и программы расчета электростатических и магнитостатических систем, в том числе новые методы и программы компьютерного моделирования электродинамических систем; основные методы, алгоритмы и программы, используемые для расчета электродинамических полей и систем. **Уметь** самостоятельно ставить конкретные задачи в области электродинамики; в конкретном случае выбрать программу для расчета простейших электродинамических систем. **Владеть** навыками расчета электродинамических систем с использованием компьютеров (численный расчет ВЧ систем; расчет траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях; численное моделирование стационарных интенсивных потоков заряженных частиц); представлением о современных численных методах и программах для расчета статических и ВЧ электромагнитных полей.
ПК-1 (ОПОП 03.04.01 Прикладные математика и физика) Способен осваивать и применять специализированные знания в области физико-математических и (или) естественных наук в своей профессиональной деятельности	**ПК -1.3**. Проводит научные изыскания в избранной области профессиональной деятельности с помощью современной аппаратуры и информационно-телекоммуникационных технологий.	

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Вычислительные методы в электродинамике» реализуется в осеннем семестре 2-го курса магистратуры, для обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика, 03.04.01 Прикладные математика и физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой радиофизики.

Дисциплина «Вычислительные методы в электродинамике» предназначена для знакомства студентов-физиков с основами применения численных методов для решения разнообразных электродинамических задач с помощью современной вычислительной техники и получения навыков работы с созданными для этого современными компьютерными программами.

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. ознакомление с основами современных методов и программ расчета электростатических и магнитостатических систем, в том числе с новыми методами и программами компьютерного моделирования электродинамических систем;
2. получение практических навыков в расчете электродинамических систем с использованием компьютеров (численный расчет ВЧ систем; расчет траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях; численное моделирование стационарных интенсивных потоков заряженных частиц);

Студенты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны иметь общую базовую подготовку в рамках программы подготовки **03.03.02 Физика**, в том числе:

– владеть математическим аппаратом линейной алгебры, математического анализа, теории функций комплексного переменного, дифференциальных уравнений.
– обладать предварительными знаниями основ: теории поля, электричества и магнетизма, электродинамики, электротехники и радиотехники, вакуумной техники, приборов и техники СВЧ-электроники, физики ускорителей заряженных частиц;
– иметь практический опыт программирования.

Результаты освоения курса используются в следующих дисциплинах:

- Электронные приборы СВЧ;
- Квантовые приборы СВЧ

Освоение дисциплины необходимо при подготовке и выполнении выпускной квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.
Форма промежуточной аттестации: 3 семестр – экзамен

№	Вид деятельности	Семестр
		3
1	Лекции, ч	-
2	Практические занятия, ч	32
3	Лабораторные занятия, ч	-
4	Занятия в контактной форме, ч из них	-
5	аудиторных занятий, ч	-
6	в электронной форме, ч	-
7	консультаций, час.	2
8	промежуточная аттестация, ч	2
9	Самостоятельная работа, час.	36
10	Всего, ч	72

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

Дисциплина «Вычислительные методы в электродинамике» представляет собой полугодовой курс, читаемый для магистрантов физического факультета НГУ в осеннем семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет **2** зачетные единицы, **72** академических часа.

Данный курс позволяет студентам познакомиться с современными методами и программами расчета электродинамических систем. Практические задания курса выполняются с использованием самых современных программ, разработанных и удачно используемых в ИЯФ им. Г.И. Будкера. Понимание актуальности численных расчетов и навык работы с реальными программами помогают студентам решать, как дипломные, так и будущие задачи по специальности.

Программа практических занятий (32 часа)

1. **Введение (4 часа)**

Краткое ознакомление с содержанием курса и основными современными дифференциальными и интегральными численными методами расчета электродинамических систем. Основные особенности дифференциальных и интегральных методов, их преимущества и недостатки.

2. **Методы расчета электростатических и магнитостатических систем (12 часов)**

Общие свойства статических полей. Дифференциальная формулировка задачи расчета статических полей, граничные условия. Описание численных дифференциальных методов на примере их использования для расчета электронных пушек. Метод конечных разностей, аппроксимация исходного дифференциального уравнения центральными конечными разностями. Методы решения системы разностных уравнений. Метод конечных интегралов, его использование на сетке с прямоугольными и треугольными элементами, понятие базисных функций. Метод конечных элементов, сетки с криволинейными элементами, вариационные методы поиска решений.

Концепция вторичных источников, потенциал и поле простого заряженного слоя. Граничные интегральные уравнения электростатики. Граничные интегральные уравнения линейной магнитостатики, причины их некорректности и способы регуляризации. Численное решение граничных интегральных уравнений электростатики и линейной магнитостатики с помощью метода коллокаций. Повышение точности расчетов с помощью кубической интерполяции решения, выделения особенностей ядра в узлах коллокаций, а также выделения особенностей решения на острых кромках электродов, изоляторов, ферромагнетиков.

Расчет коэффициентов емкости и взаимной электростатической индукции, численное решение задачи Робэна.

Методы расчета нелинейных магнитных систем. Метод векторного потенциала, его использование для расчета двумерных систем. Использование метода скалярного потенциала для расчета трехмерных систем, его формулировка и особенности. Метод конечных элементов с использованием двух скалярных потенциалов. Обзор наиболее распространенных программ расчета электростатических и магнитостатических систем.

3. **Численный расчет ВЧ систем (12 часов)**

Уравнения Максвелла, их формулировка при расчете переходных и установившихся процессов в ВЧ системах. Граничные условия Леонтовича и реально используемые при расчетах ВЧ систем граничные условия на электродинамические поля. Численные методы расчета аксиально-симметричных мод в аксиально-симметричных резонаторах. Численные методы расчета аксиально-несимметричных мод в аксиально-симметричных резонаторах. Расчет критических частот волноводов и потерь в них. Численный расчет периодических ВЧ структур. Численный расчет возбуждения резонатора интенсивным пучком заряженных частиц. Наиболее распространенные программы расчета ВЧ систем, их вычислительные и физические основы и возможности.

4. **Расчет траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях (2 часа)**

Уравнения движения и уравнения траекторий. Методы их численного интегрирования. Методы Рунге-Кутта и Адамса-Башфорта. Особенности интегрирования траекторий частиц в магнитном поле, схема Бориса.

5. **Численное моделирование стационарных интенсивных потоков заряженных частиц (2 часа)**

Численное моделирование транспортировки интенсивных пучков заряженных частиц в длинных системах. Численные методы решения уравнения Пуассона при расчете электронных пушек. Модель трубок тока и условия старта с эмиттера. Методы расчета электрического и магнитного полей с учетом объемного заряда и тока пучка. Численный расчет электронных пушек методом итераций. Обзор и сравнительная характеристика существующих программ расчета электронных пушек.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Самостоятельное изучение интерфейса и возможностей комплекса программ SAM (руководство пользователя, препринты)	6
Самостоятельное решение расчетных электростатических задач (многожильная линия передачи, электрод Роговского)	6
Самостоятельный расчет пуши Пирса	6
Подготовка к экзамену	18

Задания для самостоятельного решения:

1. С помощью программы SAM рассчитать волновое сопротивление многожильного кабеля;
2. С помощью программы SAM рассчитать форму электрода Роговского;
3. С помощью программы SAM рассчитать одну из пушек Пирса.

5. Перечень учебной литературы.

1. *Ерофеенко В.Т.* Математические модели в электродинамике: курс лекций. Минск: Из-во Белорус. ун-та, 2004. (1 экз.)

2. *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. 2-е изд. перераб.и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. (3 экз.)

3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: Учеб. пособие: В 10 т. Т.8. Электродинамика сплошных сред. 3-е изд.,испр. М.: Наука, 1992. (55 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

1. *Карлинер М.М.* Электродинамика СВЧ: курс лекций : учеб. пособие / НГУ, 2006. 257 с. Режим доступа: http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-9665/page00000.pdf
2. *Иванов А.В.* Динамика заряженных частиц и интенсивных пучков в стационарных полях.

https://info.nsu.ru/upload/iblock/5a7/jphtffrycl8bpw7fjaiikh9a6ohw8yig/book108.pdf

3. *Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П.* SAM – интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Препринт ИЯФ 89-159, Новосибирск, 1989, 67 с

https://info.nsu.ru/upload/iblock/4ee/11rcrtw8lkj9ln5j6rnzl5p90038qc78/1989_159.pdf

4. *Тиунов М.А., Тарнецкий В.В., Яковлев В.П.* Комплекс программ SAM – 2D электростатика, линейная магнитостатика, электронные и ионные пушки. Руководство пользователя.

https://info.nsu.ru/upload/iblock/8a9/ewg5e3rg8pln9lus45okfj1lfthnumpa/SAM_Guide_Rus.pdf

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:
- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используется.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем выборочного опроса в начале занятия. Также студентам необходимо сделать несколько контрольных домашних заданий по расчетам различных электродинамических задач с помощью комплекса программ SAM. Первая работа служат для проверки освоения интерфейса программы SAM, вторая – знаний по электростатике и освоения метода комплексного потенциала, третья – знаний по теме «Источники электронов, пушки Пирса».

Промежуточная аттестация – экзамен

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области в области численных методов в электродинамике.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенций.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК-2 (ОПОП 03.04.02) **ПК -2.1.** Проводит научные изыскания в избранной области экспериментальных и/или теоретических физических исследований с помощью современной аппаратуры и информационно-телекоммуникационных технологий в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**Знать** современные методы и программы расчета электростатических и магнитостатических систем, в том числе новые методы и программы компьютерного моделирования электродинамических систем; основные методы, алгоритмы и программы, используемые для расчета электродинамических полей и систем. **Уметь** самостоятельно ставить конкретные задачи в области электродинамики; в конкретном случае выбрать программу для расчета простейших электродинамических систем. **Владеть** навыками расчета электродинамических систем с использованием компьютеров (численный расчет ВЧ систем; расчет траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях; численное моделирование стационарных интенсивных потоков заряженных частиц); представлением о современных численных методах и программах для расчета статических и ВЧ электромагнитных полей.	Выполнение расчетных задач, экзамен
ПК-1 (ОПОП 03.04.01) **ПК -1.3**. Проводит научные изыскания в избранной области профессиональной деятельности с помощью современной аппаратуры и информационно-телекоммуникационных технологий.		

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Вычислительные методы в электродинамике»

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
На протяжении семестра студент принимал активное участие в дискуссиях и успешно выполнил весь комплекс практических заданий по расчету электростатических задач. **Экзамен**: Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины: – продемонстрировал уровень знаний, полностью соответствующий программе подготовки по всем разделам дисциплины. Даны исчерпывающие ответы на основные вопросы билета с корректным использованием профессиональной терминологии. – свободно и аргументированно отвечал на дополнительные вопросы, проявив уверенные навыки владения методами вычислительной электродинамики..	*Отлично*

В течение семестра посещено не менее 80% практических занятий Продемогстрировано умение применять программы SAM расчета электростатических задач. **Экзамен**: Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Продемонстрированы все основные умения. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок: – даны ответы на все вопросы билета, корректно примененяются термины и понятия. В ответах на вопросы билета допускаются незначительные ошибки; – затрудняется с ответом на дополнительные вопросы, после наводящих вопросов дает правильные ответы.	*Хорошо*
В течение семестра посещено не менее 60% практических занятий **Экзамен:** Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Продемонстрированы частично основные умения: – дан правильный ответ на один теоретический вопрос билета; – допускается значительное количество негрубых ошибок; – не отвечает на дополнительные вопросы.	*Удовлетворительно*
В течение семестра посещено не менее 60% практических занятий **Экзамен**: Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки. Отсутствие минимальных умений: – не даны правильные ответы на вопросы билета; – не отвечает на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины, имеют место грубые ошибки.	*Неудовлетворительно*

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень вопросов к экзамену по дисциплине «Вычислительные методы в электродинамике»:

1. Основные методы решения задач электростатики.
2. Особенности дифференциального метода и метода граничных интегралов.
3. Метод конечных разностей.
4. Общие свойства статических полей.
5. Дифференциальная формулировка задачи расчета статических полей.
6. Метод конечных интегралов.
7. Метод конечных элементов.
8. Концепция вторичных источников потенциал и поле заряженного слоя.
9. Некорректности граничных интегральных уравнений магнитостатики.
10. Метод коллокаций.
11. Повышение точности расчетов с помощью кубической интерполяции решения.
12. Выделение особенностей ядра в узлах коллокаций.
13. Выделение особенностей решения на кромках материалов.
14. Расчет коэффициентов емкости и взаимной электростатической индукции.
15. Численное решение задачи Робэна.
16. Методы расчета нелинейных магнитных систем.

17. Методы векторного и скалярного потенциала.
18. Формулировка уравнений Максвелла при численных расчетах ВЧ систем.
19. Граничные условия Леонтовича.
20. Численные методы расчета симметричных мод в резонаторах – фигурах вращения.
21. Численные методы расчета несимметричных мод в резонаторах – фигурах вращения.
22. Расчет критических частот волноводов и потерь в них.
23. Численный расчет периодических структур.
24. Численный расчет возбуждения резонатора пучком заряженных частиц.
25. Уравнения движения и уравнения траекторий заряженных частиц.
26. Методы Рунге-Кутта и Адамса-Башфорта.
27. Особенности интегрирования траекторий частиц в магнитном поле.
28. Расчет электронных пушек.
29. Методы расчета электрического и магнитного полей с учетом заряда и тока пучка.
30. Метод итераций при расчетах электронных пушек.

Образец экзаменационного билета:

Билет №4.

Вопрос 1. Метод конечных элементов для расчета собственных частот ВЧ-резонаторов. Поиск собственных частот и резонансного распределения полей.

Вопрос 2. Некорректность, возникающая при расчете задач линейной магнитостатики методом граничных интегральных уравнений и способ её преодоления.