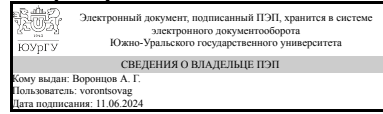


# ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ:  
Заведующий выпускающей  
кафедрой



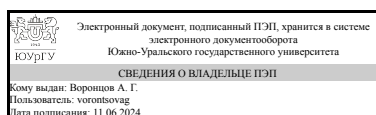
А. Г. Воронцов

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины 1.Ф.П0.15.02 Вычислительная электродинамика  
для направления 11.03.04 Электроника и наноэлектроника  
уровень Бакалавриат  
профиль подготовки Наноэлектроника: проектирование, технология, применение  
форма обучения очная  
кафедра-разработчик Физика наноразмерных систем

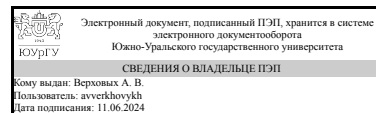
Рабочая программа составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, утверждённым приказом Минобрнауки от 19.09.2017 № 927

Зав.кафедрой разработчика,  
д.физ.-мат.н., доц.



А. Г. Воронцов

Разработчик программы,  
к.физ.-мат.н., доцент



А. В. Верховых

## 1. Цели и задачи дисциплины

Цель курса – освоение студентами основных современных вычислительных методов электродинамики и подходов к решению прикладных задач с использованием этих методов, принципов разработки вычислительных алгоритмов для решения задач прикладной электродинамики, получение навыков работы с некоторыми САПР (Ansys Electronics Desktop), используемыми при практическом решении вычислительных задач электродинамики.

## Краткое содержание дисциплины

Элективный курс "Вычислительная электродинамика" читается студентам в четвертом семестре бакалавриата. Центральное место в курсе занимают особенности использования хорошо разработанных численных методов, таких как методы конечных разностей и конечных элементов с учётом специфики электродинамических задач. Рассматривается использование основных теорем электродинамики - единственности, эквивалентности, взаимности - при построении вычислительных алгоритмов. Анализируются возможности использования при решении задач приближений, характерных именно для электродинамики. В процессе изучения дисциплины, студенты изучают принципы использования пакета САПР HFSS. Изучается структура пакета, моделируются устройства различных классов.

## 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

| Планируемые результаты освоения ОП ВО (компетенции)   | Планируемые результаты обучения по дисциплине   |
|---|---|
| ПК-1 Способен строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования | Знает: положения вычислительной электродинамики, необходимые для построения физических и математических модели моделей, узлов, блоков электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения |

## 3. Место дисциплины в структуре ОП ВО

| Перечень предшествующих дисциплин, видов работ учебного плана | Перечень последующих дисциплин, видов работ   |
|---|---|
| Теория функций комплексного переменного                       | Вычислительная математика,<br>Программные системы инженерного анализа,<br>Специальные главы квантовой механики,<br>Технологии вакуумного напыления,<br>Статистическая физика,<br>Введение в квантовую обработку информации,<br>Физика конденсированного состояния,<br>Уравнения математической физики,<br>Схемотехника цифровых устройств,<br>Производственная практика (научно-исследовательская работа) (8 семестр) |

Требования к «входным» знаниям, умениям, навыкам студента, необходимым при освоении данной дисциплины и приобретенным в результате освоения предшествующих дисциплин:

| Дисциплина                              | Требования   |
|---|--|
| Теория функций комплексного переменного | Знает: положения теории функций комплексного переменного, необходимые для построения физических и математических модели моделей, узлов, блоков электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения Умеет: Имеет практический опыт: |

#### 4. Объём и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч., 70,25 ч. контактной работы

| Вид учебной работы   | Всего часов | Распределение по семестрам в часах |  |
|--|-------------|------------------------------------|--|
|  |             | Номер семестра                     |  |
|  |             | 4                                  |  |
| Общая трудоёмкость дисциплины  | 108         | 108                                |  |
| <i>Аудиторные занятия:</i>   | 64          | 64                                 |  |
| Лекции (Л)   | 32          | 32                                 |  |
| Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ) | 32          | 32                                 |  |
| Лабораторные работы (ЛР)   | 0           | 0                                  |  |
| <i>Самостоятельная работа (СРС)</i>  | 37,75       | 37,75                              |  |
| Подготовка к контрольным мероприятиям                                      | 16          | 16                                 |  |
| Подготовка к зачету  | 5,75        | 5,75                               |  |
| Подготовка к практическим занятиям   | 16          | 16                                 |  |
| Консультации и промежуточная аттестация                                    | 6,25        | 6,25                               |  |
| Вид контроля (зачет, диф.зачет, экзамен)                                   | -           | зачет                              |  |

#### 5. Содержание дисциплины

| № раздела | Наименование разделов дисциплины                             | Объем аудиторных занятий по видам в часах |    |    |    |
|-----------|--|---|----|----|----|
|           |  | Всего                                     | Л  | ПЗ | ЛР |
| 1         | Теоретические основы классической электродинамики            | 12  | 8  | 4  | 0  |
| 2         | Метод конечных разностей в частотной и во временной областях | 16  | 12 | 4  | 0  |
| 3         | Метод конечных элементов в частотной и во временной областях | 36  | 12 | 24 | 0  |

##### 5.1. Лекции

| № лекции | № раздела | Наименование или краткое содержание лекционного занятия | Кол-во |
|----------|-----------|---|--------|
|          |           |   |        |

|    |   |   | часов |
|----|---|---|-------|
| 1  | 1 | Введение в вычислительную электродинамику. Основные уравнения и законы электромагнитного поля   | 2     |
| 2  | 1 | Уравнения Максвелла и их решение. Одномерное волновое уравнение   | 2     |
| 3  | 1 | Электродинамические потенциалы и векторы Герца. Начальные и граничные условия.  | 2     |
| 4  | 1 | Классы задач электродинамики. Постановка краевых задач электродинамики.   | 2     |
| 5  | 2 | Метод конечных разностей. Конечно-разностные аппроксимации дифференциальных операторов. Аппроксимация граничных условий.  | 2     |
| 6  | 2 | Методы решения конечно-разностной системы линейных алгебраических уравнений. Интегрирование сеточных функций.   | 2     |
| 7  | 2 | Конечно-разностные уравнения в прямоугольных координатах. Конечно-разностные уравнения в криволинейных координатах. Начальные и граничные условия.  | 2     |
| 8  | 2 | Абсорбционные граничные условия. Идеально согласованные слои. Метод дополнительных операторов. Источники возбуждения.   | 2     |
| 9  | 2 | Сосредоточенные элементы. Конформный метод конечных разностей во временной области  | 2     |
| 10 | 2 | Метод конечных разностей во временной области для сред с временной дисперсией. Погрешности метода. Алгоритмы метода с повышенной точностью и производительностью. Метод конечного интегрирования. | 2     |
| 11 | 3 | Метод конечных элементов в частотной области. Основные уравнения и граничные условия. Методы построения сетки и решения глобального матричного уравнения.   | 2     |
| 12 | 3 | Базисные функции. Построение локальной матрицы. Составление глобального матричного уравнения.   | 2     |
| 13 | 3 | Численная реализация граничных условий. Методы решения матричных задач.   | 2     |
| 14 | 3 | Вычисление электромагнитного поля и параметров электродинамических систем.  | 2     |
| 15 | 3 | Методы увеличения эффективности метода конечных элементов. Примеры использования  | 2     |
| 16 | 3 | Метод коллокаций. Неявные схемы Метод конечных элементов во временной области. Разрывный метод Галеркина. Погрешности и примеры расчета.  | 2     |

## 5.2. Практические занятия, семинары

| № занятия | № раздела | Наименование или краткое содержание практического занятия, семинара   | Кол-во часов |
|-----------|-----------|---|--------------|
| 1         | 1         | Основные положения электродинамики. Уравнения Максвелла. Энергетические соотношения. Граничные условия                      | 2            |
| 2         | 1         | Волноводы. Условия распространения, фазовая скорость и длина волны в волноводе. Структура поля, токов. Переносимая мощность | 2            |
| 3         | 2         | Программное представление расчетной области и преобразование уравнений Максвелла в конечно-разностную форму                 | 2            |
| 4         | 2         | Алгоритм метода конечных разностей. Методика моделирования.   | 2            |
| 5         | 3         | Введение в ANSYS: основные элементы программного комплекса и работа с ними  | 2            |
| 6         | 3         | Библиотека модулей ANSYS: модуль электродинамика  | 2            |
| 7         | 3         | Моделирование структур в оптическом диапазоне частот  | 2            |
| 8         | 3         | Волноводная антенная решетка  | 2            |

|    |   |   |   |
|----|---|---|---|
| 9  | 3 | Моделирование частотно-селективной поверхности    | 2 |
| 10 | 3 | Полосовой волноводный фильтр                      | 2 |
| 11 | 3 | Учет температурных режимов                        | 2 |
| 12 | 3 | Анализ рупорной антенны во временной области      | 2 |
| 13 | 3 | Моделирование коннектора                          | 2 |
| 14 | 3 | Проектирование наноразмерных светодиодных модулей | 2 |
| 15 | 3 | Использование гибридных методов расчета           | 2 |
| 16 | 3 | Использование асимптотических методов расчета     | 2 |

### 5.3. Лабораторные работы

Не предусмотрены

### 5.4. Самостоятельная работа студента

| Выполнение СРС                        |  |         |              |
|---------------------------------------|--|---------|--------------|
| Подвид СРС                            | Список литературы (с указанием разделов, глав, страниц) / ссылка на ресурс   | Семестр | Кол-во часов |
| Подготовка к контрольным мероприятиям | Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника : учебник / А. Д. Григорьев. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 704 с. — ISBN 978-5-8114-0706-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167679">https://e.lanbook.com/book/167679</a> : главы 1 и 14; Григорьев, А. Д. Методы вычислительной электродинамики / А. Д. Григорьев. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 428 с. — ISBN 978-5-9221-1450-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/48301">https://e.lanbook.com/book/48301</a> : главы 1-5; Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя : справочник / К. А. Басов. — Москва : ДМК Пресс, 2008. — 640 с. — ISBN 5-94074-108-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/1335">https://e.lanbook.com/book/1335</a> : главы 1-4; Банков, С. Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS / С. Е. Банков, А. А. Курушин, В. Д. Разевиг. — 2-е изд. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2009. — 216 с. — ISBN 5-98003-226-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/13716">https://e.lanbook.com/book/13716</a> : параграфы 1,2,5,8,9,11,14,15,17,18 | 4       | 16           |
| Подготовка к зачету                   | Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника : учебник / А. Д. Григорьев. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 704 с. — ISBN 978-5-8114-0706-4. — Текст : электронный //   | 4       | 5,75         |

|                                    |   |   |    |
|------------------------------------|---|---|----|
|                                    | <p>Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167679">https://e.lanbook.com/book/167679</a> : главы 1 и 14; Григорьев, А. Д. Методы вычислительной электродинамики / А. Д. Григорьев. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 428 с. — ISBN 978-5-9221-1450-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/48301">https://e.lanbook.com/book/48301</a>: главы 1-5; Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя : справочник / К. А. Басов. — Москва : ДМК Пресс, 2008. — 640 с. — ISBN 5-94074-108-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/1335">https://e.lanbook.com/book/1335</a> : главы 1-4; Банков, С. Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS / С. Е. Банков, А. А. Курушин, В. Д. Разевиг. — 2-е изд. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2009. — 216 с. — ISBN 5-98003-226-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/13716">https://e.lanbook.com/book/13716</a>: параграфы 1,2,5,8,9,11,14,15,17,18</p>  |   |    |
| Подготовка к практическим занятиям | <p>Крамм, М. Н. Сборник задач по основам электродинамики : учебное пособие / М. Н. Крамм. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 256 с. — ISBN 978-5-8114-1122-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167874">https://e.lanbook.com/book/167874</a>: главы 3 и 6; Маслов, А. В. Решение электродинамических задач методом конечных разностей во временной области : учебно-методическое пособие / А. В. Маслов. — Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2016. — 42 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/153501">https://e.lanbook.com/book/153501</a>: параграф 3; Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя : справочник / К. А. Басов. — Москва : ДМК Пресс, 2008. — 640 с. — ISBN 5-94074-108-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/1335">https://e.lanbook.com/book/1335</a> : главы 1-4; Банков, С. Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS / С. Е. Банков, А. А. Курушин, В. Д. Разевиг. — 2-е изд. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2009. — 216 с. — ISBN 5-98003-226-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/13716">https://e.lanbook.com/book/13716</a>:</p> | 4 | 16 |

## 6. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации

Контроль качества освоения образовательной программы осуществляется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе оценивания результатов учебной деятельности обучающихся.

### 6.1. Контрольные мероприятия (КМ)

| № КМ | Се-местр | Вид контроля             | Название контрольного мероприятия | Вес | Макс. балл | Порядок начисления баллов  | Учитывается в ПА |
|------|----------|--------------------------|-----------------------------------|-----|------------|--|------------------|
| 1    | 4        | Текущий контроль         | Выполнение практических задач     | 1   | 10         | Оценка за практическую работу выставляется по результатам проверки расчетов в программе ANSYS, которые должны соответствовать теоретическим данным и содержать корректный результат. Всего 10 задач.<br>Максимальная оценка за практическую работу в семестре составляет 10 баллов.<br>Критерии оценивания:<br>1 балл: Программа работает правильно и корректно.<br>0 баллов: Программа не работает или результат некорректный | зачет            |
| 2    | 4        | Текущий контроль         | Контрольная работа 1              | 1   | 10         | Контрольная работа состоит из 2, предполагающих развернутый ответ. Каждый ответ на вопрос оценивается от 0 (ответ на вопрос отсутствует) до 5 (полный верный ответ) баллов. За каждую неточность снимается 1 балл. За каждую ошибку или отсутствие важной части материала снимается 2 балла.   | зачет            |
| 3    | 4        | Текущий контроль         | Контрольная работа 2              | 1   | 10         | Контрольная работа состоит из 2, предполагающих развернутый ответ. Каждый ответ на вопрос оценивается от 0 (ответ на вопрос отсутствует) до 5 (полный верный ответ) баллов. За каждую неточность снимается 1 балл. За каждую ошибку или отсутствие важной части материала снимается 2 балла.   | зачет            |
| 4    | 4        | Промежуточная аттестация | Зачетное задание                  | -   | 10         | Студенту озвучивается 10 вопросов. Правильный и полный ответ на каждый вопрос оценивается в 1 балл. Неполный или неверный ответ оценивается в 0 баллов.  | зачет            |

### 6.2. Процедура проведения, критерии оценивания

| Вид | Процедура проведения | Критерии |
|-----|----------------------|----------|
|-----|----------------------|----------|

|                          |  |   |
|--------------------------|--|---|
| промежуточной аттестации |  | оценивания                              |
| зачет                    | Промежуточная аттестация может быть выставлена по результатам текущего контроля. Студент может улучшить свой рейтинг, пройдя контрольное мероприятие промежуточной аттестации, которое не является обязательным. Зачет проводится в форме устного опроса по всему материалу курса. Время на подготовку не предполагается. Студенту в ходе ответа запрещается пользоваться любыми печатными или электронными носителями информации. | В соответствии с пп. 2.5, 2.6 Положения |

### 6.3. Паспорт фонда оценочных средств

| Компетенции | Результаты обучения   | № КМ |   |   |   |
|-------------|---|------|---|---|---|
|             |   | 1    | 2 | 3 | 4 |
| ПК-1        | Знает: положения вычислительной электродинамики, необходимые для построения физических и математических модели моделей, узлов, блоков электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения | +    | + | + | + |

Типовые контрольные задания по каждому мероприятию находятся в приложениях.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Печатная учебно-методическая документация

*а) основная литература:*

Не предусмотрена

*б) дополнительная литература:*

Не предусмотрена

*в) отечественные и зарубежные журналы по дисциплине, имеющиеся в библиотеке:*

Не предусмотрены

*г) методические указания для студентов по освоению дисциплины:*

1. Методические указания при самостоятельном изучении материалов по дисциплине «Вычислительная электродинамика»

*из них: учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента:*

1. Методические указания при самостоятельном изучении материалов по дисциплине «Вычислительная электродинамика»

### Электронная учебно-методическая документация

| № | Вид литературы      | Наименование ресурса в электронной форме | Библиографическое описание  |
|---|---------------------|--|---|
| 1 | Основная литература | Электронно-библиотечная система          | Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника : учебник / А. Д. Григорьев. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 704 с. — ISBN 978-5-8114-0706- |



|   |                           |   |   |
|---|---------------------------|---|---|
|   |                           | издательства Лань                                 | 4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167679">https://e.lanbook.com/book/167679</a> . — Режим доступа: для авториз. пользователей.   |
| 2 | Основная литература       | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Крамм, М. Н. Сборник задач по основам электродинамики : учебное пособие / М. Н. Крамм. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 256 с. — ISBN 978-5-8114-1122-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167874">https://e.lanbook.com/book/167874</a> . — Режим доступа: для авториз. пользователей.  |
| 3 | Основная литература       | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя : справочник / К. А. Басов. — Москва : ДМК Пресс, 2008. — 640 с. — ISBN 5-94074-108-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/1335">https://e.lanbook.com/book/1335</a> . — Режим доступа: для авториз. пользователей.   |
| 4 | Основная литература       | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Курушин, А. А. Моделирование антенн и СВЧ структур с помощью HFSS : учебное пособие / А. А. Курушин, С. Е. Банков. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2018. — 280 с. — ISBN 978-5-91359-303-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/139115">https://e.lanbook.com/book/139115</a> — Режим доступа: для авториз. пользователей.                          |
| 5 | Основная литература       | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Григорьев, А. Д. Методы вычислительной электродинамики / А. Д. Григорьев. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 428 с. — ISBN 978-5-9221-1450-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/48301">https://e.lanbook.com/book/48301</a> . — Режим доступа: для авториз. пользователей.   |
| 6 | Дополнительная литература | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Банков, С. Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS / С. Е. Банков, А. А. Курушин, В. Д. Разевиг. — 2-е изд. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2009. — 216 с. — ISBN 5-98003-226-6 . — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/13716">https://e.lanbook.com/book/13716</a> — Режим доступа: для авториз. пользователей.               |
| 7 | Основная литература       | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Маслов, А. В. Решение электродинамических задач методом конечных разностей во временной области : учебно-методическое пособие / А. В. Маслов. — Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2016. — 42 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/153501">https://e.lanbook.com/book/153501</a> — Режим доступа: для авториз. пользователей. |

Перечень используемого программного обеспечения:

1. ANSYS-ANSYS Academic Multiphysics Campus Solution (Mechanical, Fluent, CFX, Workbench, Maxwell, HFSS, Simplorer, Designer, PowerArtist, RedHawk)(бессрочно)

Перечень используемых профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Нет

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

| Вид занятий                     | № ауд.     | Основное оборудование, стенды, макеты, компьютерная техника, предустановленное программное обеспечение, используемое для различных видов занятий |
|---------------------------------|------------|--|
| Практические занятия и семинары | 463<br>(1) | персональные компьютеры  |