

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 6 от 31.05.2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Электродинамика

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
11.03.04 - Электроника и наноэлектроника

Направленность образовательной программы
Радиофотоника и оптоэлектроника

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2021 год начала подготовки

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Электродинамика» относится к обязательной части образовательной программы по направлению 11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника, является обязательной для освоения, преподается на третьем году обучения, в пятом семестре. Освоению дисциплины предшествует освоение дисциплин (модулей) «Электричество и магнетизм», «Теоретическая механика», «Математика». Освоение дисциплины происходит одновременно с освоением дисциплины (модуля) «Методы математической физики».

Целями освоения дисциплины «Электродинамика» являются:

- овладение уравнениями электромагнитного поля в вакууме (уравнения Максвелла);
- осознание фундаментальной природы уравнений Максвелла, их связи с эйнштейновским принципом относительности;
- понимание и умение использовать законы движения заряженных частиц в электромагнитном поле;
- знание свойства электромагнитных волн, основных механизмов излучения электромагнитных волн;
- понимание смысла и умение использовать уравнения электромагнитного поля для описания явлений в сплошных средах;
- выработка у студентов практических навыков описания сложных процессов и закономерностей физики на языке адекватных и хорошо известных моделей.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1. Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы ОПК-1.2. Умеет применять физические законы и математические	Знать принципы применения аппарата классической электродинамики в приложении к профильным физическим дисциплинам. Уметь формулировать задачи в рамках	<i>Задачи</i>	<i>Экзамен: Контрольные вопросы</i>

	методы для решения задач теоретического и прикладного характера ОПК-1.3. Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач	профильных физических и дисциплин, требующие применения аппарата классической электродинамики. Владеть навыками постановки и решения основных типов задач классической электродинамики, требующимися для моделирования профильных задач физики.		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины «Электродинамика»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	6 ЗЕТ
Часов по учебному плану	216
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	64
- занятия практического типа	48
самостоятельная работа	66 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	экзамен

3.2 Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе	
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них	ельная работа в течение

		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Микроскопическая электродинамика. Экспериментальные основы теории электромагнитного поля. Частицы и поля. Электрическое поле. Закон Кулона. Теорема Гаусса. Потенциал электрического поля. Напряженность поля. Принцип суперпозиции. Закон сохранения заряда. Уравнение непрерывности. Магнитное поле. Законы Эрстеда и Био-Савара. Сила Ампера. Ток смещения. Закон Фарадея. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в вакууме в дифференциальной и интегральной форме. Потенциалы электромагнитного поля. Градиентные преобразования. Калибровочная инвариантность. Общие свойства уравнений Максвелла. Уравнение непрерывности. Закон сохранения энергии в электромагнитном поле. Импульс электромагнитного поля. Постоянное электромагнитное поле в вакууме. Методы решения задач электростатики. Теорема Гаусса. Уравнение Пуассона о его общие решения. Метод функции Грина. Энергия электростатического поля. Дипольный момент. Квадрупольный момент. Система зарядов во внешнем поле. Диполь-дипольное взаимодействие. Постоянное магнитное поле. Метод векторного потенциала. Магнитное поле на больших расстояниях от системы с токами. Магнитный момент. Энергия магнитного поля. Электромагнитные волны в вакууме. Плоские волны. Вектор Пойнтинга, плотность энергии волны. Монохроматические волны. Поляризация волн. Собственные колебания поля. Излучение	64	22	15	—	37	27

электромагнитных волн. Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Поле равномерно движущегося заряда. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Дипольное излучение.						
2. Теория относительности. Принцип относительности Эйнштейна. Интервал. Собственное время. Преобразования Лоренца. Закон сложения скоростей. Четырехмерные векторы. Релятивистская механика. Лагранжиан. Заряженная частица в электромагнитном поле. Уравнения движения заряженной частицы. Движение в постоянном однородном электрическом поле. Движение в постоянном магнитном поле. Движение в постоянном однородном электрическом поле. Принцип наименьшего действия в электродинамике. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для полей. Инварианты поля. Действие для электромагнитного поля. Уравнения Максвелла в четырехмерной форме.	48	17	15	–	32	16
3. Макроскопическая электродинамика. Уравнения электромагнитного поля в сплошных средах. Усреднение полей в средах. Уравнение Максвелла в среде. Материальные уравнения. Граничные условия. Электростатическое поле проводников. Энергия электростатического поля проводников. Теорема взаимности. Коэффициенты емкости и электростатической индукции. Метод изображений. Метод инверсии. Сила, действующая на проводник в поле. Электростатическое поле в диэлектриках. Постоянный ток. Линейные проводники. Законы Кирхгофа. Постоянное магнитное поле. Граничные условия. Магнитный поток. Поле контуров с током. Индуктивности. Энергия системы линейных токов. Квазистационарное	65	25	18	–	43	22

электромагнитное поле. Квазистационарное приближение в случае линейных проводников. Скин-эффект. Импеданс. Скин-эффект в цилиндрическом проводнике. Электромагнитные волны в средах. Волны в диэлектриках. Волны в проводниках. Частотная дисперсия. Свойства диэлектрической проницаемости: причинность и аналитичность. Соотношение Крамерса-Кронига. Пространственная дисперсия. Уравнения Максвелла в случае изотропных диэлектриков с пространственной дисперсией. Волны в изотропных средах с дисперсией. Волны в анизотропных средах. Отражение и преломление волн (случай нормального падения). Волноводы. Волны в волноводе прямоугольного сечения. Волны в цилиндрическом волноводе. Электродинамика сверхпроводников.						
В т.ч. текущий контроль	2	2				—
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Образовательные технологии

- 1) чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) методика «вопросы и ответы»;
- 4) выполнение практического задания у доски;
- 5) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 6) работа в парах над практическим заданием;
- 7) работа в малых группах над практическим заданием;
- 8) методика «мозговой штурм».

5. Учебно-методическое обеспечение, формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых учувствует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций)

Индикаторы компетенции	ОЦЕНКА СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИИ						
	Плохо	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо	Отлично	Превосходно
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала или невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа.	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок.	Уровень знаний в объеме, полностью соответствующем программе подготовки, допущены одна-две несущественных ошибки.	Уровень знаний в объеме, полностью соответствующем программе подготовки, либо, возможно, превышающем ее. Без ошибок.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений или невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа.	При решении стандартных задач и/или выполнении стандартных практических заданий не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками и/или выполнены все практические задания, но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками и/или выполнены все практические задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с некоторыми недочетами и/или выполнены все практические задания, в полном объеме, но некоторые с небольшими недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами и/или выполнены все практические задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи и/или выполнены все практические задания, в полном объеме без недочетов.
<u>Навыки (владения)</u>	Отсутствие владения материалом или невозможность оценить наличие навыков вследствие	При решении стандартных задач и/или выполнении стандартных практических заданий не	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач и/или выполнения стандартных практических заданий с	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач и/или выполнении практических заданий с некоторыми	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач и/или выполнении практических заданий без ошибок и	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач и/или выполнении нестандартных практических заданий без	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач и/или выполнению нестандартных практических заданий.

	отказа обучающегося от ответа.	продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	некоторыми недочетами.	недочетами.	недочетов.	ошибок и недочетов.	
Характеристика сформированности компетенции	Компетенция совершенно не сформирована. Отсутствуют знания, умения, навыки, необходимые для решения практических (профессиональных) задач.	Компетенция не сформирована. Имеющихся знаний, умений, навыков явно недостаточно для решения практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции соответствует минимальным требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков в целом достаточно для решения практических (профессиональных) задач, но требуется дополнительная практика по большинству практических задач.	Сформированность компетенции в целом соответствует требованиям, но есть недочеты. Имеющихся знаний, умений и навыков в целом достаточно для решения практических (профессиональных) задач, но требуется дополнительная практика по некоторым профессиональным задачам.	Сформированность компетенции в целом соответствует требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков в целом достаточно для решения стандартных практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции полностью соответствует требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков в полной мере достаточно для решения сложных практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции превышает стандартные требования. Имеющихся знаний, умений, навыков в полной мере достаточно для применения творческого подхода к решению сложных практических (профессиональных) задач.

6.2 Описание шкал оценивания

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Электродинамика» является экзамен.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

6.3 Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания на экзамене являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

«Плохо» – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

«Неудовлетворительно» – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

«Удовлетворительно» – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

«Хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Очень хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Отлично» – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

«Превосходно» – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

6.4 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции

6.4.1. При проведении экзамена обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Электродинамика»:

1. Закон Кулона. Теорема Гаусса.
2. Потенциал электрического поля. Напряженность поля. Принцип суперпозиции.
3. Закон сохранения заряда. Уравнение непрерывности.
4. Магнитное поле. Законы Эрстеда и Био-Савара. Сила Ампера.
5. Ток смещения.
6. Закон Фарадея. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в вакууме в дифференциальной и интегральной форме.
7. Общие свойства уравнений Максвелла. Уравнение непрерывности.
8. Закон сохранения энергии в электромагнитном поле.
9. Теорема Гаусса. Уравнение Пуассона. Методы решения. Метод функции Грина.
10. Энергия электростатического поля.
11. Плоские волны.
12. Вектор Пойнтинга, плотность энергии волны.
13. Монохроматические волны.
14. Поляризация волн.
15. Излучение электромагнитных волн.
16. Поле движущихся зарядов.
17. Заряженная частица в электромагнитном поле.
18. Уравнения движения заряженной частицы.
19. Движение в постоянном однородном электрическом поле.
20. Движение в постоянном магнитном поле.
21. На основании каких положений выводятся уравнения электромагнитного поля в среде?
22. Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Связь потенциалов и векторов поля в среде.
23. Сформулировать и записать граничные условия для полей и потенциалов.
24. Материальные уравнения и пределы их применимости.
25. Законы сохранения в электродинамике покоящихся сред.
26. Какими уравнениями описывается электростатическое поле в проводниках и диэлектриках?
27. Записать систему уравнений поля для постоянных токов и граничные условия для проводящих сред.
28. Записать уравнения для магнитного поля постоянных токов.
29. Записать уравнения квазистационарного поля в интегральной и дифференциальной формах.
30. Сформулировать закон индукции в движущихся проводниках и средах.
31. Локальный закон Ома в электродинамике.
32. Определить коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции для линейных и нелинейных проводников.
33. Записать выражения для потока и энергии магнитного поля.
34. В чем состоит скин-эффект и какова глубина проникновения поля в проводник.
35. Записать уравнения для электромагнитной волны в однородной изотропной среде. Отличия и сходство в процессах распространения волн в среде и вакууме.
36. Диэлектрическая проницаемость среды.

37. Записать формулы Крамерса-Кронига и определить их значение.
38. Записать дисперсионное уравнение для электромагнитных волн в среде с пространственной дисперсией.
39. Определить законы и величины, характеризующие отражение и преломление электромагнитных волн.
40. В чем состоят особенности распространения электромагнитных волн в волноводах.

6.4.2. При проведении зачета обучающимся предлагаются следующие вопросы:

1. Электростатические поля однородно заряженной плоскости, нити, шара.
2. Электростатическое поле атома водорода в основном состоянии.
3. Магнитное поле линейного проводника.
4. Магнитный момент кругового проводника с током.
5. Результирующая поляризация двух линейно поляризованных волн с одинаковой частотой.
6. Интенсивность излучения и диаграмма направленности излучения заряженного линейного осциллятора.
7. «Время жизни» атома водорода по классическим законам электродинамики.
8. Закон движения заряженной релятивистской частицы в однородном электрическом поле.
9. Закон движения релятивистской частицы в однородном магнитном поле.
10. Потенциал поля равномерно движущегося электрона.
11. Поляризация диэлектрического шара в постоянном однородном поле.
12. Поле точечного заряда в диэлектрике.
13. Поле точечного заряда над плоским проводником.
14. Емкость сферического и цилиндрического конденсаторов.
15. Поле линейного проводника с током, помещенного на плоскую границу раздела двух магнитных сред.
16. Потери энергии на тепловыделение за счет скин-эффекта.

6.4.3. Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

1. Для релятивистской частицы доказать, что мощность силы $\vec{v} \cdot \vec{F}$, $\vec{F} = e\vec{E}$, равна скорости изменения энергии.
2. Два разноименных одинаковых по величине заряда жестко закреплены на расстоянии l друг от друга. Найти силу и момент силы, действующих на данную систему, помещенную в поле точечного заряда на расстоянии $R \gg l$.
3. Определить квадрупольный момент однородно заряженного эллипсоида относительно его центра.
4. Найти электрическое поле однородно заряженного по объему эллипсоида на больших расстояниях с точностью до четвертого порядка по $1/R$.
5. Показать, что однородное магнитное поле \vec{H} , направленное по оси z , может быть описано векторным потенциалом $\vec{A}_1 = (0, Hx, 0)$. Найти градиентное преобразование, которое переводит \vec{A}_1 в новый потенциал $\vec{A}_2 = \frac{1}{2}(-Hy, Hx, 0)$.

6. Определить электрическое и магнитное поле гармонически колеблющегося диполя на расстояниях r , много больших размера диполя a , но не обязательно больших длины излучаемой волны λ .
7. В пространстве между параллельными бесконечными металлическими плоскостями $x=0$ и $x=L$ распределен заряд с объемной плотностью $\rho(x) = \rho_0 \sin(\pi x/L)$. Найти потенциал и электрическое поле между плоскостями.
8. В круглой рамке радиуса R течет ток силы I . Найти напряженность магнитного поля \vec{H} на оси z , проходящей через центр рамки перпендикулярно ее плоскости.
9. Определить излучение диполя \vec{d} , вращающегося в одной плоскости и с постоянной угловой скоростью ω .
10. Найти распределение переменного электрического поля $\vec{E}(x)e^{-i\omega t}$ внутри проводящего плоского слоя толщины $2a$ с проводимостью $\sigma \gg \omega$. Поле на поверхности слоя считать заданным: $E_y(\pm a) = E_0$.
11. Имеется тонкий равномерно заряженный стержень длины $2L$. Решая уравнение Пуассона, найти потенциал и электрическое поле, создаваемое зарядами на стержне.
12. Идеально проводящий электрод радиуса a погружен наполовину в электролит с проводимостью σ . Слой электролита радиуса b , концентрический с электродом и прилегающий к нему, имеет проводимость σ_1 ($\sigma_1 > \sigma$). Найти сопротивление электролита между электродом и бесконечностью.
13. Две монохроматические волны поляризованы по кругу в противоположные стороны и распространяются в одном направлении. Амплитуды и частоты волн одинаковы, а фазы отличаются на постоянную величину. Определить суммарную волну.
14. Центр проводящего шара, заряд которого q , находится на плоской границе раздела двух бесконечных однородных диэлектриков с проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Найти потенциал φ электрического поля, а также распределение заряда σ на шаре.
15. В круглой рамке радиуса R течет ток силы I . Найти напряженность магнитного поля \vec{H} на оси z , проходящей через центр рамки перпендикулярно ее плоскости.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.
2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.
2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Автор: доцент кафедры теоретической физики к.ф.-м.н., доцент Д.В. Хомицкий

Рецензент:

заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники д.ф.-м.н., профессор Д.А. Павлов

Заведующий кафедрой теоретической физики д.ф.-м.н., доцент В.А. Бурдов

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н. А.А. Перов