

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Пермский
государственный национальный исследовательский
университет"**

Кафедра теоретической физики

Авторы-составители: **Демин Виталий Анатольевич**
Алабужев Алексей Анатольевич

Рабочая программа дисциплины

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Код УМК 74256

Утверждено
Протокол №6
от «08» июня 2020 г.

Пермь, 2020

1. Наименование дисциплины

Электродинамика

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина входит в обязательную часть Блока « Б.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление: **28.03.01** Нанотехнологии и микросистемная техника
направленность Материалы микро- и наносистемной техники

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины **Электродинамика** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника (направленность : Материалы микро- и наносистемной техники)

ОПК.3 Способен применять базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности, в том числе для проведения научных исследований, анализа объектов, систем, процессов, явлений и методов, их экспериментального и теоретического (включая построение их качественных и количественных моделей) изучения и для использования полученных результатов на практике

Индикаторы

ОПК.3.1 Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности

4. Объем и содержание дисциплины

| | |
|---|--|
| Направления подготовки | 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника (направленность: Материалы микро- и наносистемной техники) |
| форма обучения | очная |
| №№ триместров, выделенных для изучения дисциплины | 8 |
| Объем дисциплины (з.е.) | 4 |
| Объем дисциплины (ак.час.) | 144 |
| Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе: | 56 |
| Проведение лекционных занятий | 28 |
| Проведение практических занятий, семинаров | 28 |
| Самостоятельная работа (ак.час.) | 88 |
| Формы текущего контроля | Входное тестирование (1) Итоговое контрольное мероприятие (1) Письменное контрольное мероприятие (2) |
| Формы промежуточной аттестации | Экзамен (8 триместр) |

5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины

Электродинамика. Первый семестр

Введение

Основные этапы развития теории электромагнитного поля. Общий характер построения читаемого курса.

Элементы векторного и тензорного исчисления (краткая сводка основных формул и понятий).

Скалярные, векторные и тензорные величины. Дифференциальные операции первого и второго порядков. Дифференциально-векторные тождества. Интегральные теоремы. Криволинейные системы координат.

Понятие напряженностей электрического и магнитного полей, плотностей тока и заряда. Сила Лоренца.

Закон сохранения заряда

Электростатика

Уравнения электростатического поля. Скалярный потенциал. Уравнения Пуассона и Лапласа.

Граничные условия для потенциала на поверхностях проводников и диэлектриков.

Некоторые общие теоремы электростатики. Теорема единственности решения. Теорема о минимуме и максимуме потенциала. Теорема Ирншоу. Теорема взаимности. Классификация задач электростатики, прямые и обратные задачи.

Прямая задача электростатики для безграничной однородной среды. Функция Грина. Общее решение уравнения Пуассона. Потенциал простого и двойного слоя. Поле произвольной системы зарядов на большом расстоянии от нее. Разложение по мультиполям. Дипольный момент. Тензор квадрупольного момента.

Методы решения прямой задачи при наличии проводников и неоднородных диэлектриков (краевые задачи).

Конструктивные методы: метод изображений; метод заполнения диэлектриком.

Метод разделения переменных. Разделение переменных в уравнении Лапласа в декартовой системе координат (иллюстрация метода). Задача о диэлектрическом шаре в однородном внешнем поле.

Понятие о методе инверсии, методе конформных преобразований, методе возмущений.

Дискретное описание электростатических систем. Линейные соотношения между зарядами и потенциалами проводников. Свойства потенциальных и емкостных коэффициентов. Понятие емкости.

Электростатические цепи.

Магнитостатика

Уравнения, описывающие магнитное поле постоянных токов. Векторный потенциал. Уравнение для векторного потенциала в однородной среде и его решение. Закон Био-Савара.

Поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее. Магнитный дипольный момент. Поле магнитного диполя.

Уравнения Максвелла и общие свойства э.м. полей

Уравнение Максвелла в дифференциальной и интегральной формах для полей, зарядов и токов в вакууме. Постулаты, связывающие э.м. явления с механическими. Пределы применимости уравнений классической электродинамики.

Важнейшие общие свойства уравнений Максвелла и их решений. Скаляры, векторы и псевдовекторы в уравнениях Максвелла. Линейность уравнений и принцип суперпозиции решений. Обратимость уравнений во времени. Принцип перестановочной двойственности и магнитные источники.

Законы сохранения, следующие из уравнений Максвелла. Закон сохранения заряда (уравнение непрерывности). Закон сохранения энергии (теорема Пойнтинга). Вектор Пойнтинга и понятие потока э.м. энергии. Закон сохранения импульса. Понятие плотности э.м. импульса и тензора натяжений для

поля в вакууме.

Теорема единственности решения уравнений Максвелла при заданных начальных и граничных условиях.

Классификация основных типов э.м. явлений: электростатика, токостатика, магнитостатика, квазистационарные процессы, быстроперемennые (волновые) поля.

Переменные электромагнитные поля; общее описание

Постановка задачи и различные приближения. Описание переменного э.м. поля в общем случае.

Дифференциальные уравнения второго порядка для э.м. полей. Описание с помощью потенциалов.

Градиентная инвариантность. Условие калибровки Лоренца. Волновые уравнения для потенциалов.

Вектор Герца. Магнитные потенциалы.

Гармонические процессы. Комплексная запись полей и уравнений Максвелла. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Связь комплексных полей с потенциалами. Возможность оперирования с произведением комплексных векторов. Комплексная теорема Пойнтинга.

Функция Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения. Представление потенциалов в виде интегралов по области источников. Условие излучения.

Простейшая излучающая система - элементарный электрический вибратор (диполь Герца). Общее выражение для поля излучения, структура поля в квазистатической и волновой зонах. Диаграмма направленности; сопротивление излучения. Поле магнитного диполя (с использованием принципа двойственности).

Общее представление поля излучения произвольной системы заданных гармонических токов в дальней зоне. Вектор излучения как пространственная Фурье-гармоника плотности тока. Основные характеристики направленности излучающей системы.

Потенциалы Лиенара - Вихерта

Излучение движущегося заряда. Радиационное торможение.

Специальная теория относительности

Принцип относительности. Экспериментальные обоснования специальной теории относительности.

Независимость скорости света от движения источника. Преобразования Лоренца для координат и времени. Интервал.

Релятивистская кинематика. Закон сложения скоростей. Преобразование промежутков времени, длин и углов.

Релятивистское обобщение уравнений механики Ньютона. Уравнение движения релятивистской заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле.

Законы преобразования энергии и импульса. Связь энергии, импульса, массы и скорости релятивистской частицы.

Принцип стационарного действия в электродинамике.

Уравнения движения релятивистской заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле в форме Лагранжа.

Четырехмерный формализм Минковского.

Ковариантная запись закона сохранения заряда. Законы преобразования плотностей заряда и тока.

Ковариантная запись калибровочного условия Лоренца и уравнений для потенциалов. Закон преобразования потенциалов.

Тензор электромагнитного поля. Ковариантная запись уравнений Максвелла для полей в вакууме.

Законы преобразования напряженностей поля. Инварианты электромагнитного поля.

Инвариантность фазы. Законы преобразования частоты и волнового вектора электромагнитной волны.

Астрономическая абберация и эффект Доплера.

Излучение быстро движущегося заряда.

Функция Лагранжа для электромагнитного поля при заданных зарядах и токах. Получение уравнений Максвелла из принципа стационарного действия.

Тензор энергии-импульса электромагнитного поля. Ковариантная запись законов сохранения.

Плотность энергии, импульса и момента импульса электромагнитного поля.

6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная:

1. Электромагнитные поля и волны. Сборник задач и упражнений : учебное пособие / Л. А. Боков, А. Е. Мандель, Ж. М. Соколова, Л. И. Шангина. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 185 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/72229.html>
2. Любимов Д. В. Электродинамика. Электромагнитное поле в вакууме: учебное пособие / Д. В. Любимов. — Пермь, 2007, ISBN 5-7944-0811-1. — 91.

Дополнительная:

1. Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. Сборник задач по электродинамике / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин ; ред. М. М. Бредов. — Москва: Регулярная и хаотическая динамика, 2002, ISBN 5-93972-155-9. — 640. — Библиогр.: с. 633-639
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. учебное пособие для вузов : в 5 т. Т. 3. Электричество / Д. В. Сивухин. — 5-е изд., стер. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006, ISBN 5-9221-0673-2. — 656. — Имен. указ.: с. 646-647. — Предм. указ.: с. 648-654
3. Лобов Н. И., Любимов Д. В. Электродинамика сплошных сред: учебно-методическое пособие / Н. И. Лобов, Д. В. Любимов. — Пермь, 2012, ISBN 978-5-7944-1889-7, 2-е изд., стер. — 1. <https://elis.psu.ru/node/25313>
4. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. учебное пособие для студентов физических специальностей университетов : в 10 т. Т. 2. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; ред. Л. П. Питаевский. — 8-е изд., стер. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006, ISBN 5-9221-0056-4. — 536

9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

<http://library.psu.ru/node/738> Электронные ресурсы научной библиотеки ПГНИУ

<https://elis.psu.ru/> Электронная мультимедийная библиотека ELiS

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

Образовательный процесс по дисциплине **Электродинамика** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем:

- доступ в режиме on-line в Электронную библиотечную систему (ЭБС)
- доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.
- Интернет-сервисы и электронные ресурсы (поисковые системы, электронная почта и т.д.)

Перечень необходимого лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения:

- приложение, позволяющее просматривать PDF-файлы
- офисный пакет приложений «LibreOffice».

Дополнительный перечень используемых информационных технологий определяется преподавателями дисциплины.

При освоении материала и выполнении заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ (student.psu.ru).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

- система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).
- система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.
- система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для лекционных занятий требуется аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения практических занятий - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для групповых (индивидуальных) консультаций - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения текущего контроля - аудитория, оснащенная меловой (и) или маркерной доской.
Самостоятельная работа студентов: аудитория, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», с обеспеченным доступом в электронную информационно-

образовательную среду университета, помещения Научной библиотеки ПГНИУ

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютера с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине
Электродинамика**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции.
Индикаторы и критерии их оценивания**

ОПК.3

Способен применять базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности, в том числе для проведения научных исследований, анализа объектов, систем, процессов, явлений и методов, их экспериментального и теоретического (включая построение их качественных и количественных моделей) изучения и для использования полученных результатов на практике

| Компетенция (индикатор) | Планируемые результаты обучения | Критерии оценивания результатов обучения |
|---|---|--|
| <p>ОПК.3.1 Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности</p> | <p>Знать основные уравнения и законы электростатики и магнитостатики, закон Био-Савара, описание переменного э.м., условия калибровки, основы СТО и описания динамики тел на околосветовых скоростях. Уметь вычислять электрические поля зарядов и их систем, находить поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее, использовать комплексную запись полей и уравнений Максвелла, функцию Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения, применять преобразования Лоренца. Владеть методами теории потенциала, методами описания излучающих систем, понятиями и методами электродинамики движущихся тел</p> | <p align="center">Неудовлетворител</p> <p>Не знает основные уравнения и законы электростатики и магнитостатики, закон Био-Савара, описание переменного э.м., условия калибровки, основы СТО и описания динамики тел на околосветовых скоростях. Не умеет вычислять электрические поля зарядов и их систем, находить поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее, использовать комплексную запись полей и уравнений Максвелла, функцию Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения, применять преобразования Лоренца. Не владеет методами теории потенциала, методами описания излучающих систем, понятиями и методами электродинамики движущихся тел</p> <p align="center">Удовлетворительн</p> <p>Общие, но не структурированные знания основных уравнений и законов электростатики и магнитостатики, закона Био-Савара, описания переменного э.м., условий калибровки, основ СТО и описания динамики тел на околосветовых скоростях. Демонстрирует частично сформированное умение вычислять электрические поля зарядов и их систем, находить поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее, использовать комплексную запись полей и уравнений Максвелла, функцию Грина и общее решение неоднородного волнового</p> |

| Компетенция (индикатор) | Планируемые результаты обучения | Критерии оценивания результатов обучения |
|----------------------------|------------------------------------|---|
| | | <p style="text-align: center;">Удовлетворительн</p> <p>уравнения, применять преобразования Лоренца. Имеет представление о методах теории потенциала, методах описания излучающих систем, понятиях и методах электродинамики движущихся тел</p> <p style="text-align: center;">Хорошо</p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных уравнений и законов электростатики и магнитостатики, закона Био-Савара, описания переменного э.м., условий калибровки, основ СТО и описания динамики тел на околосветовых скоростях. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения вычислять электрические поля зарядов и их систем, находить поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее, использовать комплексную запись полей и уравнений Максвелла, функцию Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения, применять преобразования Лоренца. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет методами теории потенциала, методами описания излучающих систем, понятиями и методами электродинамики движущихся тел</p> <p style="text-align: center;">Отлично</p> <p>Сформированные систематические знания основных уравнений и законов электростатики и магнитостатики, закона Био-Савара, описания переменного э.м., условий калибровки, основ СТО и описания динамики тел на околосветовых скоростях. Сформированное умение вычислять электрические поля зарядов и их систем, находить поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее, использовать комплексную запись полей и уравнений Максвелла, функцию Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения, применять преобразования Лоренца. Успешное и систематическое применение методов теории потенциала, описания излучающих систем, понятий и</p> |

| Компетенция (индикатор) | Планируемые результаты обучения | Критерии оценивания результатов обучения |
|------------------------------------|--|--|
| | | Отлично методов электродинамики движущихся тел |

Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : СУОС +

Вид мероприятия промежуточной аттестации : Экзамен

Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации : Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

Максимальное количество баллов : 100

Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 43 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 43 балла

| Компетенция (индикатор) | Мероприятие текущего контроля | Контролируемые элементы результатов обучения |
|---|--|---|
| Входной контроль | Введение Входное тестирование | Основы электромагнетизма и векторного анализа |
| ОПК.3.1 Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности | Электростатика Письменное контрольное мероприятие | знание закона Кулона, владение теорией потенциала |
| ОПК.3.1 Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности | Уравнения Максвелла и общие свойства э.м. полей Письменное контрольное мероприятие | Знание закона Био-Савара, умение находить магнитные поля систем постоянных токов. Знание уравнений электромагнитных волн. |
| ОПК.3.1 Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности | Специальная теория относительности Итоговое контрольное мероприятие | Знание уравнений Максвелла, владение методами нахождения полей движущихся источников. Знание основ СТО |

Спецификация мероприятий текущего контроля

Введение

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **0**

Проходной балл: **0**

| Показатели оценивания | Баллы |
|--|-------|
| Дифференцирование векторов: градиент, дивергенция, | 4 |

| | |
|--|---|
| ротор | |
| Закон Кулона, поле электрического диполя, Закон Био-Савара-Лапласа | 3 |
| Преобразование векторных произведений | 2 |
| Индексная форма записи | 1 |

Электростатика

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **13**

| Показатели оценивания | Баллы |
|--|-------|
| знание закона Кулона | 7 |
| знание теории потенциала, интеграла Пуассона | 6 |
| владение методами расчета энергии электростатических полей | 6 |
| умение рассчитывать поля систем зарядов | 6 |
| знание принципа суперпозиции | 5 |

Уравнения Максвелла и общие свойства э.м. полей

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **13**

| Показатели оценивания | Баллы |
|---|-------|
| Умение вычислять энергию магнитных полей | 7 |
| Умение находить дипольный магнитный момент системы токов | 6 |
| Знание уравнений Даламбера, уравнений Максвелла. Умение получать волновые уравнения, описывать распространение электромагнитных волн в различных средах | 6 |
| Умение рассчитывать поля систем стационарных токов | 6 |
| Знание закона Био-Савара | 5 |

Специальная теория относительности

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**

Проходной балл: **17**

| Показатели оценивания | Баллы |
|---|-------|
| Умение рассчитывать поля систем движущихся зарядов | 10 |
| Владение основными методами описания систем зарядов, движущихся с околосветовыми скоростями. Умение описывать сокращение длины, замедление времени, эффект Доплера, | 10 |

| | |
|--|---|
| | |
| сложение скоростей. | |
| Владение навыками расчёта потенциалов движущихся зарядов, знание понятий запаздывающего потенциала, потенциалов Лиенара-Вихерта. | 7 |
| Умение находить интенсивности излучения электромагнитных волн | 7 |
| Знание основных концепций специальной теории относительности | 6 |