



**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ И
КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧиКР)**

А.Е. Мандель, Л.В.Боков, Ж.М. Соколова

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И
РАПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

**Учебно-методическое пособие по организации самостоятельной
работы студентов
специальности 210302 «Радиотехника»**

2010

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

Утверждаю

Зав. кафедрой СВЧиКР
_____ С.Н. Шарангович
" 1 " 11 2010г.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

Учебно-методическое пособие по организации самостоятельной
работы студентов
специальности 210302 «Радиотехника»

Разработчики:

Профессор каф. СВЧиКР

_____ А.Е. Мандель

Профессор каф. СВЧиКР

_____ Л.А. Боков

Доцент каф. СВЧиКР

_____ Ж.М. Соколова

УДК 37.8+621.371

Рецензент:

Зав. каф..СВЧиКР, профессор

С.Н. Шарангович

А.Е. Мандель, Л.А. Боков, Ж.М. Соколова

Электродинамика и распространение радиоволн: учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы /А.Е. Мандель, Л.А. Боков, Ж.М. Соколова. – Томск: ТУСУР, 2010. –37с

В данном пособии рассмотрены все виды самостоятельной работы при изучении дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн».

Приводится программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылкой на литературу. Представлены темы лабораторных занятий, а также темы практических занятий с примерами решения задач.

Методические указания предназначены для студентов очной, заочной, вечерней и дистанционной форм обучения специальности 210302 «Радиотехника» по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн» и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям подготовки бакалавриата «Радиотехника» и «Телекоммуникации».

УДК 537.8+621.371

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2010

© Мандель А.Е.,Боков Л.А.,
Соколова Ж.М., 2010

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение. | 5 |
| 1. Цели и задачи дисциплины. | 6 |
| 2. Содержание лекционного курса. | 7 |
| 2.1. Разделы дисциплины и виды занятий..... | 7 |
| 2.2. Разделы лекционного курса..... | 8 |
| 3. Лабораторные занятия. | 12 |
| 4. Практические занятия. | 13 |
| 4.1 Темы практических занятий..... | 13 |
| 4.2. Примеры решения задач. Тестовые контрольные задания..... | 13 |
| 4.2.1. Уравнения Максвелла и их применение для решения простейших задач электродинамики..... | 13 |
| 4.2.2. Квазистационарные поля..... | 16 |
| 4.2.3. Плоские электромагнитные волны..... | 19 |
| 4.2.4. Направляемые электромагнитные волны и направляющие системы..... | 22 |
| 4.2.5. Излучение электромагнитных волн | 27 |
| 4.2.6. Распространение радиоволн..... | 30 |
| 5. Экзаменационные вопросы | 31 |
| 5.1. Перечень экзаменационных вопросов | 31 |
| 5.2. Структура экзаменационного билета. | 33 |
| 6. Методика текущего контроля освоения дисциплины. | 33 |
| 7. Применение балльно-рейтинговой системы..... | 33 |
| 8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины. | 35 |

Введение

Самостоятельная работа студентов является частью учебного процесса при подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие профессиональные навыки будущего специалиста, такие как: внутренняя готовность к самообразованию в профессиональной сфере, самостоятельность, инициативность и ответственность, умение работать с источниками информации.

Каждая дисциплина должна иметь методическое сопровождение по самостоятельному изучению разделов и тем, указанных в рабочей программе, по написанию рефератов, выполнению расчетно-графических и лабораторных работ. В связи с этим эффективная организация самостоятельной работы студентов требует проведения целого ряда мероприятий, создающих предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы, а именно:

- обеспечение студентов информационными ресурсами (учебными пособиями, справочниками, банками индивидуальных заданий);
- обеспечение студентов методическими материалами (учебно-методическими практикумами, сборниками задач, указаниями по выполнению лабораторных работ);
- наличие материальных ресурсов (ПК, измерительного и технологического оборудования для выполнения заданий в рамках НИР и ГПО);
- организация консультаций преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и практических результатов, полученных студентом самостоятельно при выполнении НИРС и ГПО (конференции, олимпиады, конкурсы).

Важным элементом в организации самостоятельной работы студентов является контроль. Контроль требует разработки преподавателем контролирующих материалов в текстовом или тестовом исполнении, а при использовании ПК - пакета прикладных программ для проверки знаний студентов. Эффективная система контроля (в т.ч. электронная система контроля), наряду с рейтинговой системой оценки знаний, позволит добиться систематической самостоятельной работы студентов над учебными материалами и повысить качество обучения.

Пособие разработано в соответствии с временными рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобразования РФ от 27.11.2002 "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

1. Цели и задачи дисциплины

1.1. Цели и задачи дисциплины

Дисциплина “Электродинамика и распространение радиоволн” является базовой дисциплиной в образовании радиоинженера. Она дает основу для последующего изучения таких специальных дисциплин, как “Устройства СВЧ и антенны”, “Радиотехнические системы”, “Оптические устройства в радиотехнике”, “Радиооптоэлектронные сети и устройства”, разделов ряда курсов, касающихся высокочастотных узлов приемно-усилительных устройств, передающих устройств, высокоскоростных систем связи, электромагнитной совместимости.

Целью преподавания дисциплины является подготовка специалистов в области создания и обеспечения функционирования радиоэлектронных устройств, основанных на использовании электромагнитных колебаний и волн, и предназначенных для передачи, приема и обработки информации.

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- изучение студентами фундаментальных законов, описывающих электромагнитное поле;
- освоение математического аппарата и методов электродинамического описания явлений и процессов в радиоэлектронных устройствах различного назначения;
- изучение законов распространения электромагнитных волн в свободном пространстве и направляющих системах.

1.2 Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения курса студенты должны:

знать методы решения уравнений Максвелла при описании процессов излучения, распространения и дифракции радиоволн в различных средах и структурах; знать способы и особенности распространения радиоволн различных диапазонов вблизи поверхности Земли, в тропосфере и ионосфере, а также в волноводных структурах.

уметь применять законы электродинамики к решению задач антенно-волноводной техники, задач электромагнитной совместимости радиоаппаратуры и её узлов, оценки параметров систем связи; проводить расчеты полей и на этой основе определять интегральные параметры элементов и узлов аппаратуры.

иметь навыки решения электродинамических задач (в рамках группового проектного обучения).

1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин.

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения дисциплин: «Физика», «Высшая математика».

1.4 Объем дисциплины и виды учебной работы

| Вид обучения | Очное (4 семестр) | Заочное (семестры) | Очно-заочное (семестр) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Вид учебной работы | Всего часов | | |
| Общая трудоемкость дисциплины | 170 | 170 | 170 |
| Лекции | 51 | 16 | 17 |
| Лабораторные занятия | 17 | 12 | 9 |
| Практические занятия | 17 | 4 | 9 |
| Курсовая работа | - | - | 9 |
| Самостоятельная работа | 85 | 138 | 127 |
| Вид итогового контроля | Экзамен | Экзамен | Экзамен |

2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

2.1. Разделы дисциплины и виды занятий

| № п/п | Раздел дисциплины | Лекции (51 час) | Лаб. занятия (17 час) | Практ. занятия (17 час) |
|-------|--|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | Основные законы электродинамики | 6 | | 3 |
| 2 | Энергетические соотношения в электромагнитном поле | 3 | | |
| 3 | Квазистационарные электромагнитные поля | 4 | | 2 |
| 4 | Монохроматические электромагнитные поля и волны | 4 | | |
| 5 | Плоские волны в однородных средах | 5 | | 2 |
| 6 | Краевые задачи электродинамики | 5 | 4 | 2 |
| 7 | Излучение электромагнитных волн | 4 | | 2 |
| 8 | Регулярные волноводы | 5 | 5 | 2 |
| 9 | Объёмные резонаторы | 2 | | |
| 10 | Дифракция электромагнитных волн | 2 | 4 | |
| 11 | Общие вопросы распространения радиоволн | 2 | | |

| | | | | |
|----|---|---|---|---|
| 12 | Распространение земных радиоволн | 4 | 4 | 2 |
| 13 | Влияние тропосферы на распространение радиоволн | 3 | | 1 |
| 14 | Влияние ионосферы на распространение радиоволн | 2 | | 1 |

2.2. Разделы лекционного курса

2.2.1. Основные законы электродинамики - 6 часов

Электромагнитное поле и его основные характеристики. Историческая справка о развитии представлений об электромагнитном поле. Электродинамика, как базовая дисциплина радиоэлектронных специальностей. Основные положения и теоремы векторного анализа, как математической базы электродинамики.

Уравнения Максвелла в интегральной форме. Полный ток и его составляющие. Непрерывность линий полного тока. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме.

Материальные уравнения. Среды с анизотропией свойств. Среды с временной и пространственной дисперсией, их значение в практике. Нелинейные среды, их описание и роль для практики.

Условия для векторов электромагнитного поля на границе раздела сред.

Методические указания. Этот раздел является основополагающим и тщательное его усвоение является обязательным не только для успешного изучения курса, но и для целого цикла дисциплин радиотехнического образования. Основные уравнения - уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальных формах, материальные уравнения и граничные условия для векторов поля должны быть усвоены до автоматизма в их воспроизведении, понимании физического смысла и использовании при решении простейших задач. Материал лучше всего изучать, используя основные пособия (1,2) , а также (5)

2.2.2. Энергетические соотношения в электромагнитном поле - 3 часа

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах. Общее уравнение баланса энергии в электромагнитном поле. Плотность электрической и магнитной энергии. Вектор Пойнтинга .Перенос энергии и групповая скорость в электромагнитном поле.

Методические указания. Этот раздел также является общим и важным для усвоения многих последующих разделов курса и приложений. Нужно хорошо понять физику и математическую основу описания процессов передачи сигналов и электромагнитной энергии вдоль линий связи, в частности, описание процессов излучения. Материал лучше всего изучать используя (1,2,5) .

2.2.3. Квазистационарные электромагнитные поля - 4 часа.

Условие квазистационарности электромагнитных полей и области применения таких полей в радиоэлектронике. Квазистационарные электрические поля. Их описание и методы расчета. Методы прямого интегрирования, разделения переменных и функций комплексного переменного при решении уравнения Лапласа. Метод зеркальных изображений при наличии плоских границ раздела с металлом и диэлектриком. Потенциальные коэффициенты, частичные емкости и их расчет.

Квазистационарные магнитные поля. Векторный потенциал поля и его расчет. Расчет индуктивностей и коэффициентов взаимной индукции в системе многих тел.

Методические указания. Необходимо понять условия применимости рассмотрения поля как квазистационарного. Усвоить методы решения уравнения Лапласа, как основного уравнения квазистационарного электрического поля. Хорошо представлять характер описания электрических связей в системе многих тел. Обратит внимание на различие в расчете внешних и внутренних индуктивностей и усвоить методику их расчета. В качестве литературы могут быть рекомендованы (1,2,5,6) .

2.2.4. Монохроматические электромагнитные поля и волны -4 часа

Комплексные амплитуды поля. Уравнения Максвелла в символической форме. Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Вектор Пойнтинга в символической форме. Уравнения баланса энергии в символической форме.

Методические указания. Обратите внимание на бивекторный характер векторов поля в символической форме и на следствия, вытекающие из этого факта. Следует также четко представлять себе физический смысл вещественной и мнимой части вектора Пойнтинга и уравнения баланса энергии в символической форме. Литература (1,2) .

2.2.5. Плоские волны в однородных средах. - 5 часов

Волновое уравнение. Общее выражение для поля плоской волны, распространяющейся в произвольном направлении. Волновой вектор и волновое число. Фронт волны. Поперечный характер поля плоской волны. Взаимная ориентация векторов поля и волнового вектора. Волновое сопротивление. Общее выражение для поля плоской волны в среде без потерь. Поляризация плоской волны.

Особенности структуры плоской волны в среде с потерями. Коэффициент затухания.

Волны в анизотропных средах. Обыкновенная и необыкновенная волны. Плоские волны в гиротропных средах. Эффект Фарадея.

Лемма Лоренца и теорема взаимности.

Методические указания. Общие вопросы о распространении плоских волн можно изучить пользуясь (1,2,5,6). Волны в анизотропных средах более

детально описаны в (2, 6).

2.2.6. Излучение электромагнитных волн. - 4 часа

Постановка задачи об излучении. Электродинамические потенциалы. Уравнения для электродинамических потенциалов.

Определение электродинамических потенциалов по заданным зарядам и токам. Запаздывание электродинамических потенциалов.

Элементарный электрический излучатель. Его векторный потенциал, поле в дальней и ближней зонах. Диаграмма направленности и сопротивление излучения электрического излучателя.

Элементарный магнитный излучатель. Магнитные токи и заряды. Уравнения Максвелла с учетом магнитных токов и зарядов. Принцип перестановочной двойственности.

Поле элементарного магнитного излучателя. Его диаграмма направленности и сопротивление излучения.

Методические указания. Обратите внимание на физический смысл эффектов запаздывания и учет этих эффектов при их математическом описании. Необходимо также хорошо понимать различия в характере полей источников в ближней и дальней зонах излучателей, роль этих полей в формировании активной и реактивной части входного сопротивления излучателя. В качестве методического пособия можно рекомендовать (1,2,3,5).

2.2.7. Краевые задачи электродинамики - 5 часов.

Падение плоских волн на границу раздела двух сред. Случаи горизонтально и вертикально поляризованных волн. Законы Снеллиуса и формулы Френеля. Явление полной поляризации. Отражение и преломление волн на границе с металлом.

Граничные условия Леонтовича.

Методические рекомендации. Обратите внимание на физику процессов, обуславливающих различие в угловых зависимостях коэффициентов отражения волн различных поляризаций. Литература (1,2,3,5)

2.2.8. Регулярные волноводы - 5 часов.

Понятие регулярного волновода. Классификация волн. Мембранные уравнения и граничные условия для мембранных функций. Типы волн и их критические частоты. Фазовые и групповые скорости волн в волноводе. Дисперсия волн. Волновые сопротивления E и H волн. Затухание волн в волноводах.

Прямоугольный волновод. Основная волна прямоугольного волновода, ее структура поля и параметры. Диаграмма типов волн в прямоугольном волноводе и выбор его размеров. Возбуждение волн в волноводе.

Круглый волновод. Типы волн круглого волновода. Основная волна круглого волновода.

Коаксиальные и полосковые линии передачи.

Методические указания. Необходимо хорошо усвоить структуру полей в

прямоугольном волноводе, знать принципы организации возбуждения того или иного типа волн, обосновывать области применения волноводов различных типов. Литература (1,2,5).

2.2.9. Объёмные резонаторы -2 часа.

Общие принципы построения объёмных резонаторов. Определение резонансной частоты и добротности резонатора. Примеры прямоугольных и цилиндрических объёмных резонаторов.

Методические указания. При изучении можно воспользоваться (1,2,5).

Обратите внимание на общность в расчете резонаторов и волноводов.

2.2.10. Дифракция электромагнитных волн -2 часа.

Понятие явления дифракции электромагнитных волн. Приближение Гюйгенса-Кирхгофа в описании явления дифракции. Зоны Френеля. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Принцип Бабинне. Дифракция Френеля на щели.

Методические указания. В качестве литературы можно рекомендовать (3,7,8) .

2.2.11. Общие вопросы распространения радиоволн - 2 часа.

Классификация радиоволн по диапазону и способу распространения. Формулы идеальной радиопередачи и множитель ослабления. Определение области пространства, существенной при распространении радиоволн.

Методические указания. В качестве литературы можно рекомендовать (3,7,8) .

2.2.12. Распространение земных радиоволн - 4 часа.

Расчет поля при поднятых антеннах в зоне прямой видимости. Интерференционная формула и формула Введенского. Диаграммы направленности поднятых антенн. Учет сферичности земли при распространении радиоволн в зоне освещенности. Приведенные высоты и их использование при расчете поля.

Расчет поля при низко расположенных антеннах. Постановка задачи. Структура поля вблизи поверхности Земли. Формула Шулейкина-Ван-дер-Поля.

Дифракция волн на однородной сферической Земле. Одночленная дифракционная формула и условия её применимости.

Методические указания. В качестве литературы можно рекомендовать (3,7,8) .

2.2.13. Влияние тропосферы на распространение радиоволн - 3 часа

Строение тропосферы. Её электрические параметры. Распространение волн в плавно-неоднородной среде. Явление рефракции. Эквивалентный радиус Земли при учете рефракции.

Сверхрефракция. Тропосферные волноводы. Микроструктура тропосферы. Рассеяние радиоволн на тропосферных неоднородностях. Дальнее тропосферное распространение. Особенности сигналов при ДТР. Особенности

распространения оптических волн в тропосфере. Поглощение и рассеяние оптических волн.

Методы расчета линий связи на основе ДТР.

Методические указания. В качестве литературы можно рекомендовать (3,7,8).

2.2.14. Влияние ионосферы на распространение радиоволн - 2 часа.

Строение ионосферы. Физические причины образования в ионосфере ионизированных слоев. Электрические параметры слоев. Критические и максимальные частоты. Влияние магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере.

Особенности распространения в ионосфере волн различных диапазонов. Выбор оптимальных рабочих частот.

Методические указания. В качестве литературы можно рекомендовать (3,7,8).

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ (17 час.)

Основными целями выполнения лабораторных работ являются:

- изучение устройства и принципа действия источников и средств измерений СВЧ диапазона;
- приобретение студентами практических навыков в проведении измерений в СВЧ диапазоне;
- углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины.

При выполнении лабораторных работ студент должен продемонстрировать знание соответствующего теоретического материала и знакомство с учебно-методической литературой по заданной теме.

Методические указания к лабораторным работам [9-12] имеются в библиотеке ТУСУРа, а также представлены в локальной вычислительной сети кафедры СВЧиКР.

Список лабораторных работ:

| № п/п | № раздела дисциплины | Наименование лабораторных работ |
|-------|----------------------|--|
| 1 | 2.2.7. | Измерение коэффициентов отражения электромагнитных волн от различных поверхностей - 4 часа |
| 4 | 2.2.8. | Исследование линий передачи - 5 часов |
| 3 | 2.2.10. | Исследование зон Френеля и дифракции радиоволн - 4 часа |
| 4 | 2.2.12. | Исследование влияние земли на излучение антенн - 4 часа |

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (17 час.)

Решение задач способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний, а также позволяет глубже понять физическую сущность электромагнитных процессов и явлений, закрепить в памяти основные формулы, значения важнейших величин и параметров.

4.1 Темы практических занятий

| № п/п | № раздела дисциплины | Наименование практических занятий |
|-------|------------------------------|---|
| 1 | 2.2.1. | Уравнения Максвелла и их применение для решения простейших задач электродинамики – 3 часа |
| 2 | 2.2.3. | Квазистационарные поля -2 часа |
| 3 | 2.2.5, 2.2.7. | Плоские электромагнитные волны -4 часа |
| 4 | 2.2.6. | Излучение электромагнитных волн - 2 часа. |
| 5 | 2.2.8. | Направляемые электромагнитные волны и направляющие системы -2 часа |
| 6 | 2.2.12, 2.2.13, 2.2.14 | Распространение земных радиоволн. Влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн - 4 часа. |

Ниже приведен подробный анализ решения некоторых типовых задач, способствующий более глубокому осмыслению студентами изучаемых вопросов, а также примеры тестовых контрольных заданий, с которыми студенты работают на практических занятиях. Подробный анализ решения большого количества типовых задач приведен в учебном пособии [4].

4.2. Примеры решения задач. Тестовые контрольные задания

4.2.1. ТЕМА: Уравнения Максвелла и их применение для решения простейших задач электродинамики

Задача №1

В свободном пространстве выражение электрического поля имеет вид $\vec{E} = E_0(\vec{x}^0 y - \vec{y}^0 x) \cos \omega t$. Определить магнитное поле \vec{H} .

Решение: Для решения задачи используем 2-е уравнение Максвелла.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \begin{bmatrix} \vec{x}^0 & \vec{y}^0 & \vec{z}^0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ y & -x & 0 \end{bmatrix} E_0 \cos \omega t = -\vec{z}^0 2E_0 \cos \omega t.$$

Интегрируя затем $\operatorname{rot} \vec{E}$ по времени, определим вектор \vec{B} .

$$\vec{B} = \int \vec{z}^0 2E_0 \cos \omega t \cdot dt = \vec{z}^0 \frac{2E_0}{\omega} \sin \omega t.$$

Используя материальное уравнение, находим вектор \vec{H}

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}, \Rightarrow \vec{H} = \vec{z}^0 \frac{2E_0}{\mu\omega} \sin \omega t.$$

Проверим, существует ли в природе такое поле. Для этого подчиним полученное магнитное поле первому уравнению Максвелла: $\text{rot } \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t$.

Так как \vec{H} не зависит от координат, то $\text{rot } \vec{H} = 0$. Следовательно, $\varepsilon \cdot \partial \vec{E} / \partial t = 0$. Откуда $\vec{E} = 0$. Поэтому, заданного в таком виде переменного электромагнитного поля в природе не существует.

Задача №2

По прямолинейному круглому проводнику радиуса R протекает ток силой I . Найти выражения, определяющие напряженность магнитного поля внутри проводника (область 1, $0 \leq r \leq R$) и вне проводника (область 2: $-R \leq r \leq \infty$).

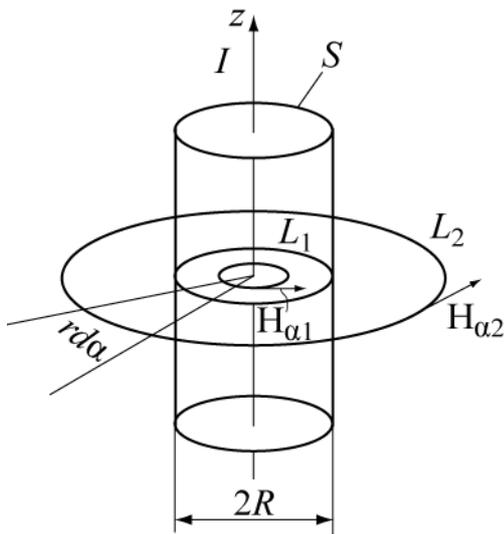


Рис.1

Построить график зависимости $H(r)$. Определить значения H при следующих данных: радиус проводника $R=1$ см, величина тока $I=1$ А, $r_1=0,5$ см и $r_2=1$ м.

Решение. Для решения этой задачи используется первое уравнение Максвелла в интегральной форме, т.е. закон полного тока (1.1).

Формулировка этого закона утверждает, что циркуляции вектора \vec{H} по контуру L определяется величиной полного тока,

охватываемого этим замкнутым контуром, как показано на рис. 1. Так как элемент длины контура в цилиндрической системе координат равен $d\vec{\ell}_a = \vec{\alpha}^0 r d\alpha$, то

$$\oint_L \vec{H} d\vec{\ell} = \int_0^{2\pi} H_\alpha r d\alpha = H_\alpha \cdot 2\pi r = I,$$

В области 2 контур L_2 охватывает полный ток I , поэтому

$$H_{\alpha 2} = \frac{I}{2\pi r};$$

Определим величину тока в области 1 (внутри проводника), охватываемой контуром L_1 , исходя из постоянства плотности тока по сечению. Приравнявая значение плотности полного тока в пределах всей площади πR^2 ,

равное $j = \frac{I}{\pi R^2}$, и плотности тока на любом сечении с радиусом проводника r

($j = \frac{I_1}{\pi r^2}$), получим значение тока в любой точке для первой области $I_1 = \frac{I r^2}{R^2}$.

Напряженность магнитного поля в первой области будет равна

$$H_{\alpha 1} = \frac{I r}{2\pi R^2}.$$

График зависимости $H(r)$ представлен на рис. 2.

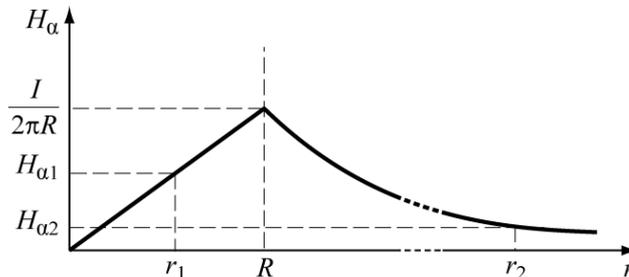


Рис.2

Результат численного расчёта дает: $H_1 = 8$ А/м, $H_2 = 0,16$ А/м.

Решение этой задачи позволяет получить решения для следующих вариантов:

1. Если направление тока в проводе заменить на противоположное, чему равна напряженность магнитного поля?

2. Как изменится величина напряженности магнитного поля во внешней области, если провод заменить полым цилиндром с внутренним радиусом равным $R/2$, а ток оставить неизменным? Чему будет в этом случае напряженность магнитного поля в области $0 < r < R/2$?

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

Вектор электрической индукции определяется выражением $\vec{D} = y^2 \vec{i} - x \vec{j}$.

Определить объёмный заряд, создающий это поле.

ОТВЕТЫ: 1) 0 2) $2y-2x$ 3) $y^2 - x^2$ 4) $4y\vec{i} - 2x\vec{j}$ 5) правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Вектор \vec{E} электромагнитного поля равен $\vec{E} = E_0 \vec{x}_0 \sin(\omega t - \omega \sqrt{\epsilon \mu} \cdot z)$.

Определить вектор \vec{H} .

ОТВЕТЫ:

1) $\vec{H} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0 \vec{y}_0 \sin(\omega t - \omega \sqrt{\epsilon \mu} \cdot z)$ 2) $\vec{H} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0 \vec{z}_0 \sin(\omega t - \omega \sqrt{\epsilon \mu} \cdot z)$

3) $\vec{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} E_0 \vec{x}_0 \cos(\omega t - \omega \sqrt{\epsilon \mu} \cdot z)$ 4) $\vec{H} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0 \vec{x}_0 \cos(\omega t - \omega \sqrt{\epsilon \mu} \cdot z)$

5) $\vec{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} E_0 \vec{y}_0 \cos(\omega t - \omega \sqrt{\epsilon \mu} \cdot z)$

ВОПРОС 3.

Каков физический смысл третьего уравнения Максвелла $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = 0$?

1. Снаружи замкнутой поверхности S нет источников поля;
2. Внутри замкнутой поверхности S нет ни источников, ни стоков поля, поток вектора \vec{D} через S равен нулю;
3. Такой вид уравнения Максвелла смысла не имеет;
4. Внутри замкнутой поверхности S нет источников поля;
5. Снаружи замкнутой поверхности S отсутствуют стоки поля.

ВОПРОС 4.

В объёме V имеется заряд $Q=2\text{к}$ и заряд Q_2 . Определить Q_2 , если известно, что поток вектора \vec{D} через поверхность S , охватывающую объём V , равен 1к .

ОТВЕТЫ:

1. $Q_2=-5\text{к}$, 2. $Q_2=-3\text{к}$, 3. $Q_2=-2\text{к}$, 4. $Q_2=-1\text{к}$, 5. $Q_2=-4\text{к}$.

ВОПРОС 5.

Вектор \vec{D} направлен под углом $\alpha_1 = 30^\circ$ к границе раздела двух сред, диэлектрические проницаемости которых относятся так $\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}$. Определить угол α_2 между вектором \vec{D} и границей раздела во второй среде.

ОТВЕТЫ: 1) $\alpha_2=0$ 2) $\alpha_2=45^\circ$ 3) $\alpha_2=60^\circ$ 4) $\alpha_2=30^\circ$ 5) $\alpha_2=90^\circ$

4.2.2. ТЕМА: Квазистационарные поля

Задача №1

Две плоские металлические пластины разделены тонким слоем однородного диэлектрика толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ . На верхнюю пластину подан потенциал U , нижняя пластина заземлена (конденсатор) (рис. 2.1). Найти распределение потенциала между пластинами, напряженность поля \vec{E} , вектор электрического смещения \vec{D} , заряд на одной из пластин конденсатора q , емкость C . Линейные размеры пластин много больше размера d .

Решение

Выбираем прямоугольную систему координат, в которой ось y перпендикулярна поверхности пластин. В этом случае, можно считать потенциал ϕ зависящим только от координаты y . Решение проводим с помощью уравнения Лапласа с применением граничных условий для потенциала на границе диэлектрик-металл.

Уравнение Лапласа для данной задачи будет иметь вид $\frac{d^2\phi}{dy^2}=0$, а его решение $\phi = Ay + B$, где A и

B неизвестные постоянные подлежащие определению. Для их определения используем два граничных условия:

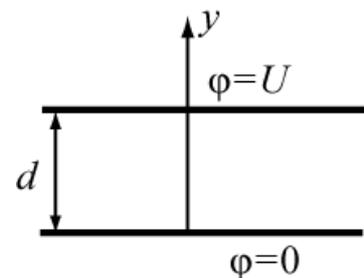


Рис. 1

а) при $y=0$ $\varphi=0$; б) при $y=d$ $\varphi=U$.

В результате получим $B=0$, $A=\frac{U}{d}$ и выражение потенциала $\varphi=\frac{U}{d}y$.

Как следует из решения, потенциал линейно возрастает от 0 до U при изменении координаты y от 0 до d .

Напряженность и индукция электрического поля определяются формулами $\vec{E}=-grad\varphi=-\vec{y}^0 \frac{d\varphi}{dy}=-\vec{y}^0 \frac{U}{d}$, $\vec{D}=-\vec{y}^0 \varepsilon \frac{U}{d}$.

Поверхностная плотность заряда определяется из граничных условий: на верхней (нормаль направлена против оси y) пластине при $y=d$ $\xi=-\varepsilon \frac{d\varphi}{dn}=\varepsilon \frac{d\varphi}{dy}=\varepsilon \frac{U}{d}$, на нижней пластине

(нормаль и орт \vec{y}^0 одинаково направлены) при $y=0$ получим $\xi=-\varepsilon \frac{d\varphi}{dy}=-D_n=-\varepsilon \frac{U}{d}$.

Заряд на верхней пластине конденсатора $q=\xi S$, емкость конденсатора

$$C=\frac{q}{U_1-U_2}=\frac{q}{U}=\frac{\varepsilon S}{d}.$$

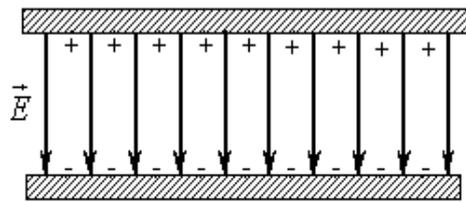


Рис. 2

На рисунке 2 изображено: распределение электрических зарядов на поверхностях электродов и однородное электрическое поле между пластинами.

Задача №2

Получите выражение в точке М для потенциала φ , создаваемого точечным зарядом q , расположенным над идеально проводящей плоскостью на высоте h (рис.1).

Решение:

Используем метод зеркального отображения и принцип суперпозиции. Метод зеркального отображения заключается в том, что металлическая поверхность заменяется зеркально отображенным зарядом $(-q)$.

Согласно принципа суперпозиции, записываем выражение для потенциала в точке М от двух зарядов:

$$\varphi=\varphi_{(q)}+\varphi_{(-q)}=\frac{q}{4\pi\varepsilon a}-\frac{q}{4\pi\varepsilon 5a}=\frac{4q}{20\pi\varepsilon a}=\frac{q}{5\pi\varepsilon a}.$$

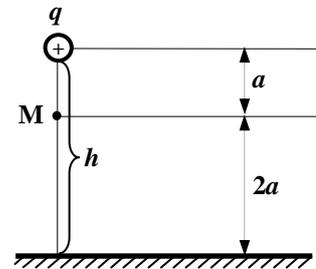


Рис. 1

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1

Какой из приведенных ниже векторов может быть вектором

напряженности электростатического поля?

ОТВЕТЫ: 1. $\vec{A} = 7 \cdot x^4 \cdot \vec{i} + 6 \cdot y^3 \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$; 2. $\vec{A} = y^2 \cdot x^2 \cdot \vec{i} + z^2 \cdot x^2 \cdot \vec{j} + y^2 \cdot \vec{k}$;
3. $\vec{A} = x^2 \cdot \vec{j} - y \cdot \vec{k}$; 4. $\vec{A} = [\vec{k}, \vec{r}]$; 5. $\vec{A} = 7 \cdot y \cdot x^4 \cdot \vec{i} + 6 \cdot y^3 \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$;

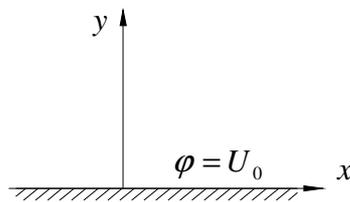
ВОПРОС 2

В поле $\vec{E} = 3 \cdot E_0 \cdot x \cdot \vec{i} + 2 \cdot E_0 \cdot y \cdot \vec{j} - E_0 \cdot \vec{k}$ перемещается единичный заряд из точки $A(0,1,0)$ в точку $B(0,5,0)$. Определить совершенную при этом работу.

ОТВЕТЫ: 1. $-4 \cdot E_0$; 2. $9 \cdot E_0$; 3. $4 \cdot E_0$; 4. $24 \cdot E_0$; 5. $-9 \cdot E_0$;

ВОПРОС 3

Вблизи поверхности пластины с потенциалом $\varphi = U_0$, распределение потенциала описывается выражением $\varphi = U_0 + 3 \cdot U_0 \cdot y \cdot x^2 - U_0 \cdot y^3$ Какие распределения зарядов создают этот потенциал?



ОТВЕТЫ:

1. В поле присутствует точечный заряд в т.(0,0);
2. Только объемные заряды над пластиной;
3. Поверхностные заряды на пластине и объемные вне ее;
4. Только поверхностные заряды на пластине;
5. Отсутствуют поверхностные заряды на пластине и объемные вне её.

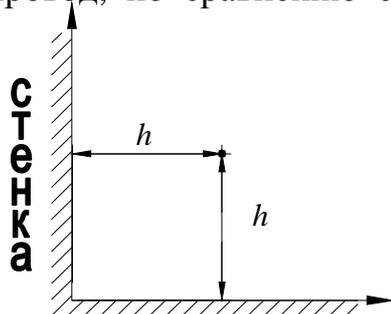
ВОПРОС 4

Как изменится ёмкость плоского конденсатора, если диэлектрическую проницаемость заполняющей его среды увеличить в 2 раза, а площадь обкладок уменьшить в 4 раза?

ОТВЕТЫ: 1. Не изменится; 2. Увеличится в 8 раз; 3. Уменьшится в 2 раза; 4. Увеличится в 2 раза; 5. Уменьшится в 8 раз.

ВОПРОС 5:

На расстоянии h от равномерно заряженного провода, повешенного над землёй на высоту h , построили стену. Считая поверхность стены проводящей, определить во сколько раз изменится электрическая сила, действующая на провод, по сравнению с случаем, когда стены не было.



ОТВЕТЫ: 1. Не изменится; 2. Увеличится в 2 раза; 3. Уменьшится в 2 раза; 4. Увеличится в $\sqrt{2}$ раз; 5. Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз.

4.2.3. ТЕМА: Плоские электромагнитные волны

Задача №1

Плоская электромагнитная волна распространяется в свободном пространстве (вакууме). Задана комплексная амплитуда магнитного поля

$$\vec{H}(y) = -\vec{z}_0 H_0 e^{-i(ky + \pi/3)}.$$

Определить: 1) Комплексную амплитуду электрического поля,

2) Мгновенные значения векторов \vec{E} и \vec{H} ,

3) Амплитуды полей E_0 и H_0 , если при $t=0$ в точке $y=0$ величина вектора \vec{E} равна 1 В/м,

4) Величину векторов \vec{E} и \vec{H} в момент времени $t=10^{-6}$ с в точке с координатой $y=100$ м, если частота волны $f=1$ МГц.

Решение:

1) Очевидно, что в данном случае волна распространяется в положительном направлении оси «у», в эту же сторону направлен вектор Пойнтинга. Изобразим систему координат (правовинтовую) и векторы \vec{H} и \vec{P} в некоторой точке пространства.

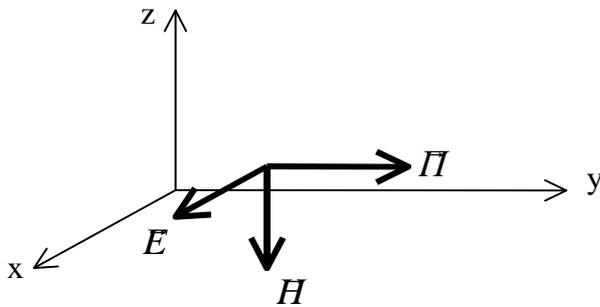


Рис.4.1

Подберем такое направление вектора \vec{E} , чтобы векторное произведение $[\vec{E} \cdot \vec{H}]$ было направлено вдоль оси «у». Направление векторного произведения определяется по правилу правого винта, т.е. направлением движения винта при его вращении от первого вектора ко второму по меньшему углу. Очевидно, что вектор \vec{E} будет

направлен по оси x (рис. 4.1). Так как в идеальном диэлектрике векторы \vec{E} и \vec{H} синфазные, то комплексная амплитуда вектора \vec{E} будет иметь вид:

$$\vec{E}(y) = \vec{x}_0 E_0 e^{-i(ky + \pi/3)}.$$

Амплитуда E_0 определится через H_0 и волновое сопротивление среды

$$E_0 = H_0 \cdot W_0.$$

2) Мгновенные значения напряженностей E и H определяются через комплексные амплитуды как

$$\vec{E}(y, t) = \text{Re} \left[\vec{E}(y) \cdot e^{i\omega t} \right] = \text{Re} \left[\vec{x}_0 E_0 \cdot e^{i(\omega t - ky - \pi/3)} \right] = \vec{x}_0 E_0 \cos(\omega t - ky - \pi/3).$$

Аналогично $\dot{H}(y, t) = -\vec{z}_0 H_0 \cos(\omega t - ky - \pi/3)$.

3) Определим E_0 из условия задачи

$$E(y=0, t=0) = E_0 \cos(-\pi/3) = 1 \text{ В/м.}$$

Отсюда

$$E_0 = 2 \text{ В/м} \text{ и } H_0 = \frac{E_0}{W_0} = \frac{2}{120\rho} = 5.305 \cdot 10^{-3} \text{ А/м.}$$

4) Чтобы определить мгновенное значение векторов \vec{E} и \vec{H} в заданной точке ($y=100\text{м}$) в момент времени $t=10^{-6}$ с подсчитаем значение фазы волны в этой точке для данного момента времени. Для этого найдем значение волнового числа k . Поскольку фазовая скорость в вакууме равна c - скорости света, то

$$k = \omega/c = \frac{2\pi 10^6}{3 \cdot 10^8} = \frac{2\pi}{3} 10^{-2} \text{ 1/м.}$$

Фаза волны в данной точке пути в заданный момент времени определится как

$$\varphi = \omega t - ky - \pi/3 = 2\pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} - \frac{2\pi}{3} 10^{-2} \cdot 100 - \pi/3 = \pi.$$

Мгновенные значения векторов \vec{E} и \vec{H} при $y=100\text{м}$ и $t=10^{-6}$ с =будут равны

$$\vec{E} = \vec{x}_0 E_0 \cos \pi = -\vec{x}_0 2 \text{ В/м}, \quad \vec{H} = -\vec{z}_0 H_0 \cos \pi = \vec{z}_0 5.305 \cdot 10^{-3} \text{ А/м.}$$

Задача №2

Плоская электромагнитная волна с частотой $f=1$ МГц распространяется в морской воде с параметрами $\epsilon_r = 81$, $\sigma = 1 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$. Определить фазовую скорость, длину волны, коэффициент затухания и волновое сопротивление среды.

Решение:

Учтем, что по условию задачи известна относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , а в формулы для параметров волны входит полная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, где $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$. Кроме того, не задана магнитная проницаемость воды, но известно, что вода не является ферромагнитным веществом и, поэтому $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Определим $tg\Delta$:

$$tg\Delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} = \frac{36\pi \cdot 10^9}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 81} = \frac{2 \cdot 10^3}{9} \approx 2.22 \cdot 10^2.$$

Так как $tg\Delta \gg 1$, то на этой частоте морская вода ведет себя как проводник, т.е. амплитуда плотности тока проводимости много больше амплитуды плотности тока смещения. Определим k' и k'' :

$$k' \approx k'' \approx \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2}} = 1.987 \frac{1}{\text{м}}.$$

Таким образом, коэффициент затухания равен $k'' = 1.987 \frac{1}{\text{м}}$. Определим фазовую скорость и длину волны

$$v_\phi = \frac{\omega}{k'} = \frac{2\pi \cdot 10^6}{1.987} = 3.162 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \lambda = \frac{2\pi}{k'} = \frac{2\pi}{1.987} = 3.162 \text{ м}.$$

Сравним эти значения с фазовой скоростью в вакууме (а) и в дистиллированной воде с параметрами $\epsilon_r = 81$, $\sigma = 0$ (б).

$$а) \quad v_\phi = c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad \lambda_0 = \frac{c}{f} = 300 \text{ м};$$

$$б) \quad v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{81}} = 3.333 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad \lambda = \frac{v_\phi}{f} = 33.33 \text{ м}.$$

Видно, что увеличение диэлектрической проницаемости и проводимости вещества приводит к уменьшению фазовой скорости и соответственно уменьшению длины волны в данном веществе.

Определим волновое сопротивление среды.

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\mu \cdot \cos \Delta}{\epsilon}} \cdot e^{i \frac{\Delta}{2}}.$$

Поскольку $\text{tg} \Delta \approx 222 \gg 1$, то $\cos \Delta = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \Delta}} \approx \frac{1}{\text{tg} \Delta}$ и $\Delta \approx 90^\circ$.

$$\dot{Z}_c \approx \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r \text{tg} \Delta}} \cdot e^{i\pi/4} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 36\pi \cdot 10^9}{81 \cdot 222}} e^{i\pi/4} \approx 2.811 \cdot e^{i\pi/4} \text{ Ом}.$$

Полученное значение волнового сопротивления означает, что отношение амплитуд полей E и H составляет 2.811 Ом и электрическое поле опережает по фазе магнитное на 45° .

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1:

Найти вектор \vec{E} плоской электромагнитной волны, если:
 $H = -y_0 \cdot H_m \cdot \sin(\varpi \cdot t - k \cdot x)$.

ОТВЕТЫ: 1. $\vec{E} = \frac{\epsilon \cdot \varpi}{k} \cdot \vec{z}_0 \cdot H_m \cdot \sin(\varpi \cdot t - k \cdot x)$; 2. $\vec{E} = \frac{k}{\epsilon \cdot \varpi} \cdot \vec{z}_0 \cdot H_m \cdot \cos(\varpi \cdot t - k \cdot x)$;

3. $\vec{E} = -\frac{k}{\epsilon \cdot \varpi} \cdot \vec{z}_0 \cdot H_m \cdot \sin(\varpi \cdot t - k \cdot x)$; 4. $\vec{E} = -\frac{\epsilon \cdot \varpi}{k} \cdot \vec{z}_0 \cdot H_m \cdot \cos(\varpi \cdot t - k \cdot x)$;

5. $\vec{E} = \frac{k}{\epsilon \cdot \varpi} \cdot \vec{z}_0 \cdot H_m \cdot \sin(\varpi \cdot t - k \cdot x)$;

ВОПРОС 2:

Мощность плоской электромагнитной волны уменьшается на метре пути в 20 раз. Какова постоянная затухания волны?

ОТВЕТЫ: 1. 20 дБ/м ; 2. 15 дБ/м ; 3. 13 дБ/м ; 4. 26 дБ/м ; 5. 10 дБ/м ;

ВОПРОС 3:

Вертикально поляризованная волна падает на границу раздела под углом Брюстера. Каким при этом будет коэффициент отражения?

ОТВЕТЫ: 1. $\frac{1}{2}$; 2. $\frac{1}{4}$; 3. 1; 4. $\frac{1}{3}$; 5. 0;

ВОПРОС 4:

В каком направлении распространяется плоская электромагнитная волна, если она записывается в форме: $\vec{H} = H_0 \cdot \vec{y}_0 \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{2\pi}{2\lambda}x + \frac{2\pi\sqrt{3}}{2\lambda}z\right)}$?

ОТВЕТЫ: 1. Под углом 30° к оси $-Z$ и 60° к оси $+X$;
 2. Под углом 60° к оси $+Z$ и 30° к оси $-X$;
 3. Под углом 60° к оси $+X$ и 30° к оси $-Z$;
 4. Под углом 30° к оси $-Z$ и 60° к оси $+Y$;
 5. Под углом 30° к оси $-Y$ и 60° к оси $+X$;

ВОПРОС 5:

В каком отношении находятся мощности, переносимые волной с круговой поляризацией P_K и линейно поляризованной волной P_L , если амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волн одинаковы?

ОТВЕТЫ: 1. $P_K = P_L$; 2. $P_K = 2 \cdot P_L$; 3. $P_K = \frac{1}{2} \cdot P_L$; 4. $P_K = \sqrt{2} \cdot P_L$; 5. $P_K = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot P_L$;

4.2.4. ТЕМА: Направляемые электромагнитные волны и направляющие системы

Задача

В прямоугольном волноводе возбуждена волна типа H_{11} . Размеры поперечного сечения a и b (рис.1).

Требуется получить уравнение силовых линий электрического поля.

Решение

Электромагнитное поле является векторным полем и графически представляется линиями векторов \vec{E} и \vec{H} . Выражение векторной линии \vec{E} в прямоугольной системе координат имеет вид

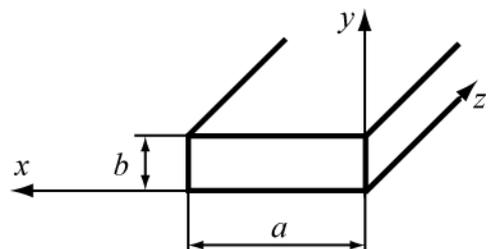


Рис.1.

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z}. \quad (1)$$

Для решаемой задачи проекции векторов электрического поля равны

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{\chi^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad E_y = \frac{j\omega\mu}{\chi^2} \frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad E_z = 0. \quad (2)$$

Из (1), согласно (2), уравнение векторной линии электрического поля волны H_{11} записывается в виде

$$E_y dx - E_x dy = 0. \quad (3)$$

Подставляя в (3) компоненты из (2), получим

$$\left\{ \frac{\partial H_z}{\partial x} dx + \frac{\partial H_z}{\partial y} dy \right\} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет полный дифференциал, т.е. $dH_z = 0$, решение которого с учетом для волны H_{11} должно иметь вид

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} y\right) = \text{const} = C \quad \text{или} \quad \cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} y\right) = \text{const} = C \quad (5)$$

$$\text{или} \quad x = \frac{a}{\pi} \arccos \frac{C}{\cos\left(\frac{\pi}{b} y\right)} \quad (6)$$

Уравнение (6) является уравнением линии вектора \vec{E} волны H_{11} , лежащей в плоскости $z = \text{const}$, т.к. оно получается из уравнения силовых линий.

Как должно производиться построение силовых линий вектора \vec{E} ?

Силовая линия соответствует любому определенному значению постоянной C , которое может принимать, согласно (5), величину в пределах $-1 \leq C \leq 1$.

Каждому значению C , взятому в этих пределах, соответствует одна силовая линия электрического поля волны H_{11} .

Найдем линии вектора \vec{E} при некоторых значениях C .

I. Пусть $C=0$. Что представляет собой силовая линия вектора \vec{E} при $C = 0$?

Физически – отсутствие поля E на этой линии, а местоположение точек этого

случая находится из (5). Если $C = 0$, то $\cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} y\right) = 0$,

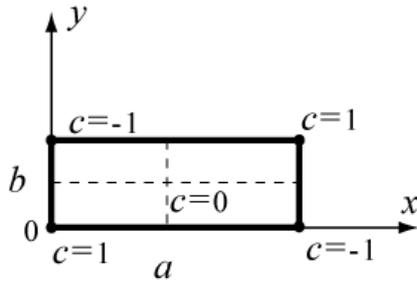


Рис.2

что имеет место только при

а). $\cos \frac{\pi x}{a} = 0$, т.е. при $x = \frac{a}{2}$; а $y \rightarrow$ любое

значение в интервале от $0-b$,

б). $\cos \frac{\pi y}{b} = 0$, т.е. $y = \frac{b}{2}$; а $x \rightarrow$ любое

значение в интервале от $0-a$.

Вывод: Если $C=0$, то векторными линиями будут две взаимно ортогональные линии, проходящие через координаты $x = \frac{a}{2}$ и $y = \frac{b}{2}$ (рис. 2).

II. Пусть $C = \pm 1$. Что представляет собой силовая линия поля при $C = \pm 1$?

Как следует из (5) при

$$C = 1 : x = 0, y = 0 \quad \text{и} \quad x = a, y = b;$$

$$C = -1 : x = 0, y = b \quad \text{и} \quad x = a, y = 0.$$

Таким образом, при $C = \pm 1$ силовые линии поля вырождаются в точки (рис. 2).

III. Пусть значение C будет любым. Например, $C = \pm 0,2$.

Тогда из (6) имеем
$$x = \frac{a}{\pi} \arccos \frac{\pm 0,2}{\cos\left(\frac{\pi}{b} y\right)}$$

Изменяя координату y в пределах $0 \leq y \leq b$, получим координаты точек

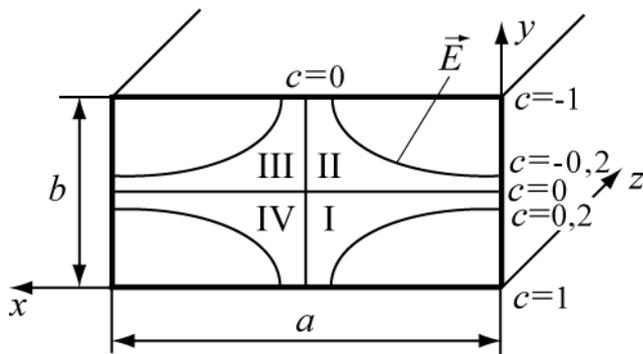


Рис.3

x , соответствующие заданной константе C .

Семейство силовых линий поля E волны H_{11} на поперечном сечении прямоугольного волновода для этого случая изображено на рис. 3.

Следует заметить, что, в силу граничного условия $E_{\tau} = 0$, силовые линии вектора \vec{E} в точке соприкосновения со стенками волновода всегда ортогональны к стенкам.

Найдите сами силовые линии вектора \vec{E} , пользуясь (6), для значений

$C = \pm 0,5; \pm 0,7; \pm 0,9$. Результаты расчета внесите в таблицу 1 (для примера приведен расчет при $C = 0,6$) и изобразите их на рисунке поперечного сечения волновода.

Таблица 1

| C | 0,6 | | | | | |
|---|-----|-----|-----|---------------|--------|-----|
| | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| $\cos \frac{\pi y}{b} = \cos \alpha_0$ | | | | | | |
| $\alpha^0 = \frac{\pi}{b} y$ | | | | 44^0 | 53^0 | |
| Координата $y = \frac{\alpha^0 b}{180}$ | | | | 0,24b | 0,29b | |
| $C / \cos(\frac{\pi}{b} y)$ | | | | 0,85 | 1 | |
| $\arccos(C / \cos(\frac{\pi}{b} y)) = \psi$ | | | | 30^0 | 0^0 | |
| Координата $x = (a \cdot \psi) / \pi$ | | | | $1/6 \cdot a$ | 0 | |

В области I константа C (рис. 3) имеет положительное значение, например $C = 0,2$, но значение y не превышает $b/2$.

В области II константа C имеет отрицательное значение, например, $C = -0,2$, но $0,5 \cdot b < y < b$, и $\cos \frac{\pi y}{b} = \cos \alpha_0$ имеет отрицательные значения, а отношение $\frac{C}{\cos(\pi y/b)}$ остается положительным. Угол $\alpha^0 > 90^0$, поэтому $\cos(\pi y/b)$ удобно в этих случаях представлять в виде $\cos(180^0 - \alpha)$.

Если известно расположение силовых линий электрического поля волны, то можно изобразить линий магнитного поля на поперечном сечении волновода. Следует учесть, что линии полей \vec{E} и \vec{H} взаимно ортогональны.

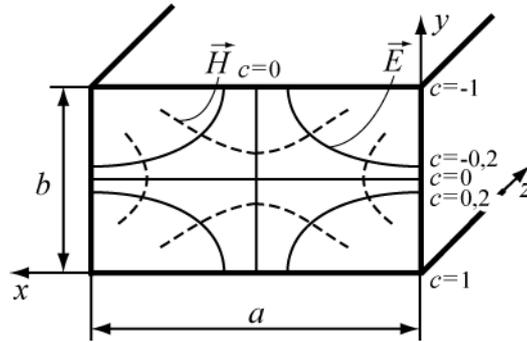


Рис.4

Поэтому, зная расположение силовых линий \vec{E} (или \vec{H}), легко начертить семейство силовых линий \vec{H} (или наоборот), сохраняя их ортогональность в каждой точке. На рис. 4 представлены поля \vec{E} и \vec{H} волны типа H_{11} .

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

В волноводе с поперечными размерами $2 * 1$ см длина распространяющейся волны $\lambda=8$ см. Как следует изменить диэлектрическую проницаемость среды, заполняющей волновод, чтобы λ уменьшилась вдвое? Тип волны H_{10} .

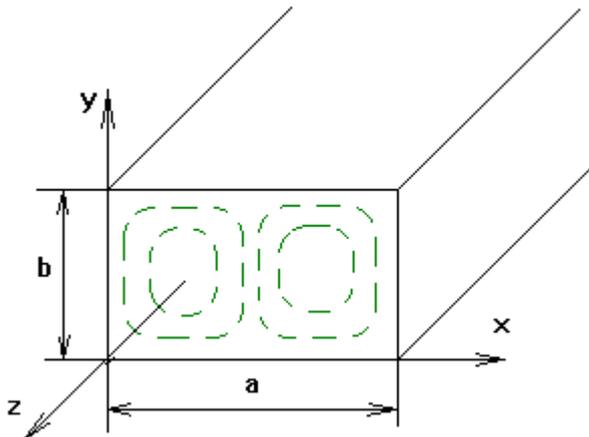
ОТВЕТЫ: 1. $\epsilon_2=20\epsilon_1$. 2. $\epsilon_2=10\epsilon_1$. 3. $\epsilon_2=1,6\epsilon_1$. 4. $\epsilon_2=2\epsilon_1$. 5. $\epsilon_2=0,5\epsilon_1$.

ВОПРОС 2.

В каком отношении находятся фазовые скорости v_ϕ волн H_{11} и E_{11} , возбуждаемых в прямоугольном волноводе?

ОТВЕТЫ: 1. $v_\phi H_{11} = \pi v_\phi E_{11}$. 2. $v_\phi H_{11} = 3v_\phi E_{11}$. 3. $v_\phi H_{11} = 2v_\phi E_{11}$.
4. $v_\phi H_{11} = v_\phi E_{11}$. 5. $v_\phi H_{11} = 0,5v_\phi E_{11}$.

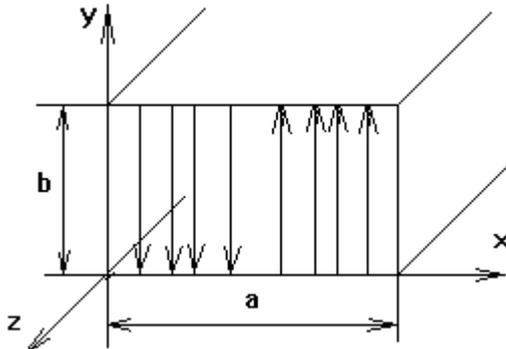
ВОПРОС 3. На рисунке изображено распределение силовых линий магнитного поля. Какому типу волны оно принадлежит?



ОТВЕТЫ: 1. E_{21} 2. E_{12} 3. H_{12} 4. H_{21} 5. H_{11}

ВОПРОС 4.

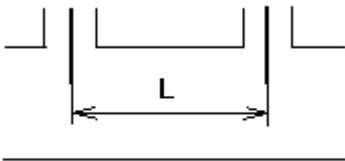
Какому типу волн принадлежит картина электрического поля, изображенного на рисунке?



ОТВЕТЫ: 1. E_{20} 2. E_{02} 3. H_{20} 4. H_{02} 5. H_{11}

ВОПРОС 5.

В волновод с сечением $2 \times 1 \text{ см}^2$ введены два возбуждающих штыря с противофазным питанием. На каком расстоянии они должны быть включены, чтобы наилучшим образом возбудить волну H_{10} , если $\lambda = 3,2 \text{ см}$?



ОТВЕТЫ: 1. $L = 2,65 \text{ см}$. 2. $L = 1,32 \text{ см}$. 3. $L = 5,3 \text{ см}$. 4. $L = 3,2 \text{ см}$. 5. $L = 1,6 \text{ см}$.

4.2.5. ТЕМА: Излучение электромагнитных волн**Задача №1**

Найти амплитуду тока в диполе Герца и сопротивление излучения, если длина диполя 5 см и в точке с координатами $r = 1 \text{ км}$, $\theta = \pi/2$ амплитуда напряженности электрического поля $E_\theta = 10^{-4} \text{ В/м}$. Частота колебаний 150 МГц .

Решение:

Определим излучаемую длину волны. Поскольку параметры среды не заданы, то будем полагать, что это – воздух (или вакуум)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{150 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{с}}} = 2 \text{ м}.$$

Определим величину kr для оценки. $kr = \frac{2\pi}{\lambda} r = \pi \cdot 10^3$.

Поскольку $kr \gg 1$, то точка наблюдения находится в дальней зоне,

запишем ее для амплитуды E_θ , опуская фазовые множители i и e^{-ikr}

$$E_\theta = \frac{kI_{cm}lW_0}{4\pi r} \sin\theta. \quad \text{Отсюда} \quad I_{cm} = \frac{4\pi r E_\theta}{klW_0 \sin\theta}.$$

Подставляя значения r , θ и $W_0 = 120\pi \text{ Ом}$, получим амплитуду тока в диполе $I_{cm} = \frac{1}{15\pi} \text{ А} \approx 2.12 \cdot 10^{-2} \text{ А}$.

Сопротивление излучения диполя определяется как

$$R_\Sigma = \frac{2\pi W_0}{3} \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 = 5\pi^2 \cdot 10^{-2} \approx 0.5 \text{ Ом}.$$

Задача №2

Диполь Герца длиной 1м питается током частотой 1 МГц и амплитудой 2А. Определить напряженности электрического и магнитного полей на расстоянии 10м и 10 км и построить зависимости их амплитуд от углов θ и α при этих расстояниях.

Решение:

Аналогично решению предыдущей задачи, определим величины kr для двух значений $r_1=10\text{м}$ и $r_2=10\text{км}$.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} = 300 \text{ м}, \quad kr_1 = \frac{2\pi}{\lambda} r_1 \approx 0.209, \quad kr_2 \approx 209,$$

Таким образом, расстояние r_1 соответствует ближней зоне, а r_2 – дальней.

Поля в ближней зоне с учетом, что для воздуха $\frac{1}{\omega\epsilon} = \frac{W_0}{k}$ будет:

$$\begin{aligned} H_\alpha &= \frac{I_{cm}}{4\pi r^2} \sin\theta = \frac{1 \cdot 2}{4\pi 10^2} \sin\theta \approx 1.59 \cdot 10^{-3} \sin\theta \text{ А/м}, \\ \dot{E}_\theta &= i \frac{I_{cm}}{4\pi\omega\epsilon r^3} \sin\theta = i \frac{I_{cm} W_0}{4\pi k r^3} \sin\theta = i \frac{9}{\pi} \sin\theta \approx i 2.86 \sin\theta \text{ В/м}, \\ E_r &= i \frac{I_{cm}}{2\pi\omega\epsilon r^3} \cos\theta = i \frac{I_{cm} W_0}{2\pi k r^3} \cos\theta = i \frac{18}{\pi} \cos\theta \approx i 5.73 \cos\theta \text{ В/м}. \end{aligned}$$

Таким образом, на расстоянии 10 м от диполя будут присутствовать две компоненты вектора \vec{E} и одна – вектора \vec{H} . Их диаграммы направленности в ближней зоне в полярной системе координат имеют вид, приведенный на рис.1.

На рисунке 1 диполь выделен жирной линией. Следует обратить внимание на то, что в ближней зоне существует значительное продольное электрическое поле E_r и на сдвиг по фазе между полями E и H .

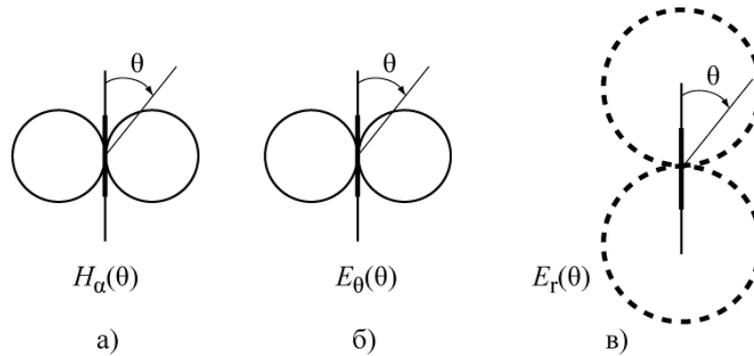


Рис. 1

Определим амплитуду H_α

$$H_\alpha = \frac{kI_{cm}l}{4\pi r} \sin \theta = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 1}{300 \cdot 4\pi \cdot 10^4} \sin \theta = 3.33 \cdot 10^{-7} \cdot \sin \theta \text{ А/м}.$$

В дальней зоне электрическое поле имеет одну составляющую E_θ , которую можно определить через H_α и волновое сопротивление

$$E_\theta = W_0 \cdot H_\alpha = 120\pi \cdot 3.33 \cdot 10^{-7} \cdot \sin \theta = 1.256 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \theta \text{ В/м}.$$

Диаграмма направленности в дальней зоне описывается функцией $\sin \theta$ и имеет вид изображенный на рис. 1 а для H_α или рис. 1 б для E_θ .

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

Два диполя параллельны между собой и перпендикулярны линии, их соединяющей. Расстояние между ними $L = 10\lambda$. Токи одинаковые по амплитуде и противофазные. На каком расстоянии r от первого диполя поле равно нулю?

ОТВЕТЫ: 1. $r = 3 \cdot \lambda$; 2. $r = 4 \cdot \lambda$; 3. $r = 5 \cdot \lambda$; 4. $r = 6 \cdot \lambda$; 5. $r = 7 \cdot \lambda$;

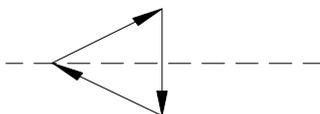
ВОПРОС 2.

Найти сопротивление излучателя диполя Герца при $l = 5 \text{ см}$ и $\lambda = 3 \text{ м}$. Определить мощность излучения, если амплитуда тока в диполе равна 10 А .

ОТВЕТЫ: 1. $R_\Sigma = 0,41 \text{ Ом}$; $P_\Sigma = 5,8 \text{ Вт}$; 2. $R_\Sigma = 0,37 \text{ Ом}$; $P_\Sigma = 7,3 \text{ Вт}$;
3. $R_\Sigma = 0,31 \text{ Ом}$; $P_\Sigma = 8,5 \text{ Вт}$; 4. $R_\Sigma = 0,27 \text{ Ом}$; $P_\Sigma = 9 \text{ Вт}$; 5. $R_\Sigma = 0,22 \text{ Ом}$; $P_\Sigma = 11 \text{ Вт}$.

ВОПРОС 3.

Три диполя Герца составляют равносторонний треугольник. Токи синфазны одинаковыми амплитудами, их направления показаны на рисунке. Чему равно поле E , излучаемое всей системой в точке, расположенной на биссектрисе угла треугольника в дальней зоне?



ОТВЕТЫ: 1. $E = 2E_0$ 2. $E = 1,5E_0$ 3. $E = E_0$ 4. $E = 0$ 5. $E = 3E_0$

ВОПРОС 4.

Найти магнитную составляющую поля излучения диполя Герца для $l = 5\text{ см}$ в экваториальной плоскости на расстоянии $r = 2 \cdot 10^4\text{ м}$ от диполя и при частоте $f = 400\text{ МГц}$. Амплитуда тока $I_m = 20\text{ А}$.

ОТВЕТЫ: 1. $0,016 \cdot 10^{-3}\text{ А/м}$ 2. $0,021 \cdot 10^{-3}\text{ А/м}$ 3. $0,01 \cdot 10^{-3}\text{ А/м}$ 4. $0,015 \cdot 10^{-3}\text{ А/м}$ 5. $0,033 \cdot 10^{-3}\text{ А/м}$

ВОПРОС 5

Найти сопротивление излучения диполя Герца при $l = 5\text{ см}$ и $\lambda = 3\text{ м}$. Амплитуда тока в диполе равна 10 А .

ОТВЕТЫ: 1. $R_\Sigma = 0,41\text{ Ом}$; 2. $R_\Sigma = 0,37\text{ Ом}$; 3. $R_\Sigma = 0,31\text{ Ом}$; 4. $R_\Sigma = 0,27\text{ Ом}$; 5. $R_\Sigma = 0,22\text{ Ом}$.

4.2.6. Тема : Распространение радиоволн

Пример тестовых контрольных заданий

Вопрос 1.

Определите мощность сигнала в приемной антенне при распространении радиоволн в свободном пространстве, если передающая антенна излучает сигнал мощностью 100 Вт и находится на расстоянии 10 км от приемной. Коэффициент направленного действия обеих антенн 1000 , длина радиоволны 40 см . (Считать $\pi \approx 10$).

Ответы: 1. 1 мВт 2. $0,5\text{ мВт}$ 3. 10 мВт 4. $0,1\text{ мВт}$

Вопрос 2.

Какой из приведенных параметров в формуле Шулейкина- Ван-дер-Поля называется численным расстоянием.

Ответы: 1. $\rho = \pi \cdot r / \lambda \cdot |\epsilon|$ 2. $\rho = \pi \cdot r^2 / \lambda \cdot |\epsilon|$ 3. $\rho = \pi \cdot r^2 / \lambda^2 \cdot |\epsilon|$ 4. $\rho = |\epsilon| \cdot r / \lambda \cdot \pi$

Вопрос 3

Определить критическую частоту для вертикально падающей на ионосферу волны. Максимальная электронная концентрация $N_{\text{max}} = 5 \cdot 10^6\text{ эл/см}^3$

Ответы: 1. 20 МГц 2. 40 МГц 3. 80 МГц 4. 30 МГц

Вопрос 4

Какая из приведенных формул является интерференционной формулой Введенского.

Ответы: 1. $E_m = \frac{\sqrt{60PD} \cdot 4\pi h_1 h_2}{\lambda \cdot r^2}$ 2. $E_m = \frac{\sqrt{60PD} \cdot 4\pi h_1 h_2}{\lambda^2}$

Вопрос 5

На какую величину различаются фазы волн, пришедших в точку приема из первой и пятой зон Френеля.

Ответы: 1. 4π 2. 2π 3. 5π 4. 8π

5. Экзаменационные вопросы

Подготовка к экзаменам содействует систематизации, обобщению и закреплению знаний, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий, и должна вестись в течение всего семестра. Организация самостоятельной работы в семестре является залогом успешной сдачи зачетов и экзаменов.

5.1.Перечень экзаменационных вопросов

Основные законы электродинамики

1. Векторы электромагнитного поля.
2. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах.
3. Полный ток и его составляющие.
4. Классификация сред, материальные уравнения
5. Граничные условия для электромагнитного поля. Нормальные и тангенциальные составляющие векторов.

Энергетические соотношения в электромагнитном поле

6. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах.
7. Общее уравнение баланса энергии в электромагнитном поле.

Квазистационарные электромагнитные поля

8. Уравнения Максвелла для электростатического поля
9. Электростатический потенциал. Граничные условия в электростатике
10. Уравнения для электростатического потенциала. Теорема единственности.

Монохроматические электромагнитные поля и волны

11. Уравнения Максвелла в символической форме. Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.
12. Волновые уравнения и их решение. Плоские однородные волны в не поглощающих средах.
13. Плоские однородные волны в поглощающих средах.
14. Поляризация плоских волн.

Краевые задачи электродинамики

15. Нормальное падение плоской волны на границу раздела двух сред. Формулы Френеля

16. Наклонное падение плоских волн на границу раздела двух сред. Формулы Френеля для горизонтально и вертикально поляризованных волн

17. Полное отражение от диэлектрической границы. Плоские неоднородные волны

18. Наклонное падение плоских электромагнитных волн на границу с диэлектриком. Угол Брюстера

19. Наклонное падение плоских электромагнитных волн на границу поглощающей среды. Приближенные граничные условия Леонтовича

Регулярные волноводы

20. Понятие о направляющей системе. Классификация направляемых волн.

21. Условия распространения электромагнитных волн в направляющих системах. Критическая частота, критическая длина волны.

22. Связь между продольными и поперечными составляющими поля в однородной направляющей системе.

23. Прямоугольный волновод. Основная волна прямоугольного волновода, ее структура поля и параметры.

Излучение электромагнитных волн

24. Постановка задачи об излучении. Электродинамические потенциалы.

25. Уравнения для электродинамических потенциалов.

26. Определение электродинамических потенциалов по заданным зарядам и токам.

27. Элементарный электрический излучатель.

28. Поле электрического излучателя в ближней и дальней зонах. Диаграмма направленности электрического излучателя. Сопротивление излучения электрического излучателя.

29. Элементарный магнитный излучатель.. Поле элементарного магнитного излучателя.

Общие вопросы распространения радиоволн

30. Классификация радиоволн по диапазону и способу распространения.

31. Формулы идеальной радиопередачи и множитель ослабления.

32. Определение области пространства, существенной при распространении радиоволн.

Распространение земных радиоволн

33. Интерференционная формула и формула Введенского.

34. Учет сферичности земли при распространении радиоволн в зоне освещенности. Приведенные высоты.

35. Расчет поля при низко расположенных антеннах.. Формула Шулейкина-Ван-дер-Поля.

Влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн

36. Строение тропосферы. Ее электрические параметры.

37. Распространение волн в плавно-неоднородной среде. Явление рефракции. Эквивалентный радиус Земли при учете рефракции. Сверхрефракция. Тропосферные волноводы.

Рассеяние радиоволн на тропосферных неоднородностях. Дальнее

тропосферное распространение. Особенности сигналов при ДТР.

38. Строение ионосферы. Физические причины образования в ионосфере ионизированных слоев. Электрические параметры ионосферы.

39. Критические и максимальные частоты.

40. Влияние магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере.

41. Особенности распространения в ионосфере волн различных диапазонов. Выбор оптимальных рабочих частот.

5.2. Структура экзаменационного билета.

Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов по основным разделам курса «Электродинамика и распространение радиоволн».

6 МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Текущий контроль освоения дисциплины осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на бально-рейтинговой системе оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (раздел 8) и **итоговый** контроль.

Правила формирования пятибалльных оценок за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТx|_{x=1,2} = \frac{(Сумма _ баллов, _ набранная _ к _ КТx) * 5}{Требуемая _ сумма _ баллов _ по _ балльной _ раскладке}.$$

Итоговый контроль освоения дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

Формирование итоговой суммы баллов осуществляется путем суммирования семестровой (до 70 баллов) и экзаменационной составляющих (до 30 баллов).

7. ПРИМЕНЕНИЕ БАЛЬНО-РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЫ

Распределения баллов по элементам контроля

| Элементы учебной деятельности | Кол-во элементов | Длительность элемента, час. | Кол - во баллов за 1 элемент контроля | Срок контроля, (неделя с начала семестра) | Кол - во баллов (всего) |
|---|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------|
| Посещение лекций | 25 | 2 | | 1-17 | 9 |
| Выполнение контрольных работ на практических занятиях | 5 | 1 | 4 | 3, 5, 7, 9, 13 | 20 |
| Выполнение и защита результатов лабораторных работ | 4 | 4 | 5 | 6-17 | 20 |
| Коллоквиум | 1 | 2 | 12 | 15 | 12 |
| Компонент своевременности | | | | 1-17 | 9 |
| Сдача экзамена(максимум) | | | | | 30 |
| Итого | | | | | 100 |

Таблица распределения баллов в течение семестра

| Элементы учебной деятельности | Максимальный балл на 1-ую контрольную точку с начала семестра | Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ | Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра | Всего за семестр |
|---|---|---|---|------------------|
| Посещение занятий | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Контрольные работы на практических занятиях | 8 | 8 | 4 | 20 |
| Выполнение и защита результатов | | 10 | 10 | 20 |

| | | | | |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| лабораторных работ | | | | |
| Коллоквиумы | | | 12 | 12 |
| Компонент своевременности | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Итого максимум за период: | 14 | 24 | 32 | 70 |
| Сдача экзамена (максимум) | | | | 30 |
| Нарастающим итогом | 14 | 38 | 70 | 100 |

Тема коллоквиума

Электромагнитные поля и волны

8.УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

При изучении дисциплины “Электродинамика и распространение радиоволн” рекомендуется использовать учебные пособия [1-4] из списка основной учебной литературы охватывающие все разделы программы, а также использовать дополнительную литературу для более глубокого изучения отдельных разделов курса [5-8]. Перечисленные ниже источники имеются в библиотеке ТУСУРа и доступны студентам.

8.1.Основная литература

- 1.Б.М. Петров Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. - М.: Горячая линия- Телеком, 2007.-558 с. **(100)**
2. Л.А.Боков Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003-214 с. **(50)**
3. А.Е.Мандель, В.А.Замотринский Распространение радиоволн: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006.--164 с. **(50)**
4. Замотринский В.А., Падусова Е.В., Соколова Ж.М., Шангина Л.И. Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006.-175с. **(40)**

8.2. Дополнительная литература

5. В.В. Никольский, Т.И. Никольская Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов - М., Наука, 1989.-543 с. **(30)**
6. С.И.Баскаков Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов - М.:высшая школа, 1992.-416 с. **(50)**
7. Черенкова Е.Л. , Чернышов О.В. Распространение радиоволн: Учебник для ВУЗов- М. : Радио и связь, 1984. – 271 с. **(3)**
8. Г.П.Грудинская. Распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов -М., Высшая школа, 1975.-279 с. **(3)**

9. Замотринский В.А. Исследование влияния земли на излучение антенн: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для студентов специальности 210302// - Томск: ТУСУР, 2006. - 14 с.
10. Замотринский В.А., Никифоров А.Н. Измерение коэффициентов отражения от различных типов поверхности: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для студентов специальности 210302// - Томск: ТУСУР, 2007. - 16 с.
11. Ж.М. Соколова, Е.В. Падусова Исследование линий передачи: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для студентов специальности 210302// - Томск: ТУСУР, 2005. - 26 с.
12. Замотринский В.А., Шангина Л.И. Исследование зон Френеля и дифракция радиоволн: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для студентов специальности 210302// - Томск: ТУСУР, 2007. - 18 с.

Учебное издание

Мандель Аркадий Евсеевич

Боков Лев Алексеевич

Соколова Жанна Моисеевна

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Учебно-методическое пособие по организации самостоятельной
работы студентов по дисциплине
«Электродинамика и распространение радиоволн»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.