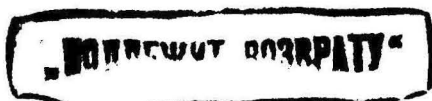


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА.  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Программы, контрольные вопросы и  
методические указания к выполнению  
контрольных работ № 1, 2



Санкт-Петербург  
2006

Составители: д-р физ.- мат. наук, проф. Д. В. Благовещенский,  
канд. техн. наук, доц. Л. А. Федорова  
Рецензент канд. техн. наук, доц. О. С. Астратов

Издание содержит программы разделов курсов: «Электродинамика» и «Распространение радиоволн», которые могут сочетаться в различных комбинациях в зависимости от номера специальности. Программа предусматривает изучение основных понятий, положений и закономерностей электродинамики и распространения радиоволн. Даны контрольные вопросы и методические указания к самостоятельной работе и выполнению контрольных заданий.

Предназначены для студентов заочного факультета радиотехнических специальностей.

Подготовлены кафедрой антенн и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Редактор *А. В. Семенчук*

Компьютерная верстка *Н. С. Степановой*

---

Подписано к печати 30.05.06. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч. -изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 284

---

Редакционно-издательский отдел  
Отдел электронных публикаций и библиографии  
Отдел оперативной полиграфии  
ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67

© ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения», 2006

## 1. ЦЕЛЬ ДИСЦИПЛИН И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Методические указания составлены в помощь студентам, изучающим в соответствии с выбранной специальностью следующие дисциплины: 1) для специальности 200700 «Электродинамика и распространение радиоволн» 2) для специальности 201300 «Электродинамика и техника сверхвысоких частот».

Данные дисциплины объединяют проблемы, основанные на свойствах и особенностях электромагнитного поля. *Главной задачей* является раскрытие физического содержания электромагнитных процессов в различных средах, структуры полей и поведения волновых явлений. Особая роль отводится уравнениям Максвелла, которые наиболее полно описывают всю совокупность электромагнитных явлений в макроскопических масштабах.

*Изучение дисциплин* должно способствовать усвоению физической сущности волновых процессов, причин и источников излучения волн, методов решения задач определения полей на заданных расстояниях. Особую роль играет то обстоятельство, как волны ведут себя в различных однородных и неоднородных средах, на границе раздела сред, как они преломляются и отражаются. Дано представление о различных направляющих структурах, что крайне важно в вопросах техники СВЧ, о замедляющих структурах, на которых построены многие элементы радиоэлектроники, о резонаторах, широко используемых в различных радиосистемах.

Дисциплины рассматривают закономерности распространения радиоволн в околоземном пространстве, в нижней и верхней атмосфере. С физической точки зрения рассматриваются различные явления – рассеяние, дифракция, рефракция и т. д. Важная роль отводится поведению радиоволн в условиях воздействия на них различного рода препятствий.

## 2. ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИН И ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ПОДГОТОВКИ

При изучении дисциплин в соответствии с учебным планом студент *должен знать*:

- основные положения электродинамики, которая является фундаментом для грамотной формулировки и решения задач распространения радиоволн;

- теорию электромагнитного поля, которая расширяет общеобразовательную подготовку и способствует формированию у студентов основ профессионального мировоззрения;

- принципы работы различных электромагнитных и электрических устройств, к числу которых могут быть отнесены широко используемые на практике электромагнитные элементы автоматики, электрические машины, магнитные и электрические элементы вычислительной техники, электронные, радиотехнические, криогенные, сверхпроводящие, голографические и другие устройства.

Кроме этого, студент *должен уметь*:

- спроектировать и рассчитать электромагнитные и электрические устройства на заданные условия работы;

- произвести обоснованный выбор на конкретной радиолинии рабочего диапазона частот;

- выполнить расчет всех необходимых энергетических параметров в радиоканале;

- оценить характер воздействия препятствий на условия приема сигналов.

В процессе усвоения вышеуказанных дисциплин студент также должен приобрести практическое умение обоснованно выбирать и проектировать элементы фидерного тракта, устройства согласования тракта для решения поставленной задачи; получить навыки лабораторных исследований характеристик излучения антенн и согласования тракта, а также проверки работоспособности фидерных систем в период эксплуатации.

## 3. ВЗАИМОСВЯЗЬ ДИСЦИПЛИН

Для усвоения материалов дисциплин «Электродинамика и распространение радиоволн», «Электродинамика и техника СВЧ» студент должен быть подготовлен по следующим дисциплинам:

физика (разделы «Электричество и магнетизм», «Теория электромагнитного поля»);

высшая математика (разделы «Векторный анализ и теория поля», «Уравнения математической физики с частными производными», особенно решения уравнений Лапласа, Пуассона, Гельмгольца, «Дифференциальное и интегральное исчисление», «Теория рядов», «Специальные функции», «Матричное исчисление»);

основы теории цепей» (разделы «Длинные линии», «Колебательные контуры», «Фильтры»).

Основная форма изучения указанных дисциплин – самостоятельная работа над учебным материалом.

Каждый раздел кроме программы содержит контрольные вопросы, контрольные задания и методические указания к самостоятельной работе и выполнению контрольных работ. В каждой теме раздела указывается рекомендуемая при изучении литература под номером, соответствующим номеру в общем списке литературы.

При изучении перечисленных дисциплин в семестре предусматривается:

– курс лекций в объеме, предусмотренном учебным планом, для обычной и ускоренной форм обучения в течение семестра (для иногородних студентов читается установочный курс лекций перед экзаменом);

– выполнение четырех лабораторных работ;

– выполнение *двух письменных контрольных работ для обычной формы обучения и одной работы для ускоренной формы;*

– объединенный зачет по контрольным и лабораторным работам;

– зачет или экзамен в соответствии с учебным планом по изучаемой в семестре дисциплине.

Экзаменационные билеты могут включать все вопросы, приведенные в программах разделов изучаемых дисциплин.

### ***Рекомендуемая литература***

#### *Основная*

1. *Вольман В. И., Пименов Ю. В.* Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.

2. *Баскаков С. И.* Основы электродинамики: Учеб. пособие. М.: Сов. радио, 1973. 248 с.

3. *Никольский В. В.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. 607 с.

4. *Грудинская Г. П.* Распространение радиоволн: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1975. 280 с.

#### *Дополнительная*

5. Техническая электродинамика и антенны. Электродинамика: Учеб. пособие / *Ю. Н. Данилов, В. Н. Красюк, Б. Т. Никитин, Л. А. Федорова*; ЛИАП. Л., 1991. 165 с.

6. *Федоров Н.Н.* Основы электродинамики. М.: Высш. шк., 1988. 399 с.

7. *Черенкова Е. Л., Чернышев О. В.* Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

8. *Благовещенский Д. В.* Распространение радиоволн: Учеб. пособие / ЛИАП. Л., 1995. 127 с.

#### *Методические указания*

##### *к выполнению лабораторных работ*

9. Исследование структуры поля  $H_{10}$  и  $H_{20}$  при различных нагрузках волновода / Сост: *Д. В. Благовещенский, Б. Т. Никитин*; ГААП. СПб., 1996. 43 с.

10. Исследование поляризационных характеристик электромагнитных волн / Сост: *В. С. Калашников, Л. А. Федорова*; ГУАП. СПб., 2005. 22 с.

11. Исследование структуры электромагнитного поля над проводящей плоской поверхностью / Сост: *Л. А. Федорова, Н. А. Гладкий*; ГУАП. СПб., 2003. 32 с.

12. Исследование дисперсии и затухания волн в волноводе / Сост: *Л. А. Федорова, Н. А. Гладкий*; ГУАП. СПб., 2003. 28 с.

13. Исследование поверхностных волн, распространяющихся вдоль плоских замедляющих систем / Сост: *В. С. Калашников*; ГУАП. СПб., 2003. 32 с.

14. Исследование дифракции электромагнитных волн / Сост: *Ю. Н. Данилов*; ЛИАП. СПб., 1988. 21 с.

Из указанного перечня лабораторных работ студент выполняет в каждом семестре четыре работы по указанию преподавателя.

## 4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПРОГРАММ ДИСЦИПЛИН

### *Электродинамика*

#### Тема 1. Основные уравнения электродинамики

Уравнения Максвелла в действительной и комплексной форме. Электромагнитные свойства сред. Граничные условия. Теорема Умова–Пойнтинга. Волновые уравнения. [1. С. 25–86; (2. С. 8–45; 3. С. 149–164].

#### Тема 2. Плоские электромагнитные волны

Уравнение плоской волны. Распространение плоских волн в реальных средах (диэлектрик, полупроводник, проводник). Постоянная распространения, фазовая и групповая скорости, волновое сопротивление. Поляризация электромагнитной волны. Отражение плоской волны на границе раздела двух сред. Распространение электромагнитной волны в подмагниченной ферритовой среде. Эффект Фарадея и Коттона–Муттона. [1. С. 165–208, 453–465; 2. С. 46–61].

#### Тема 3. Излучение электромагнитных волн

Решение уравнений электромагнитного поля с помощью электродинамических потенциалов и вектора Герца. Поле излучения диполя Герца. Ближняя, средняя и дальняя зоны. Основные характеристики излучения элементарного электрического вибратора (диаграмма направленности, полная излучаемая мощность, сопротивление излучения, КНД). Принцип двойственности. Элементарный магнитный излучатель и его характеристики излучения. [1. С. 136–165; 2. С. 206–220; 3. С. 234–280, 136–165].

#### Тема 4. Направляемые электромагнитные волны и направляющие системы

Виды линий передачи электромагнитных колебаний, волны типа  $TE$  и  $TM$ . Распространение электромагнитных волн в прямоугольных волноводах. Структуры полей  $TE_{mn}$  и  $TM_{mn}$  в волноводах прямоугольного и круглого сечений. Основные типы волн. Волновое сопротивление, фазовая постоянная, коэффициент затухания, длина волны в линиях передачи. [1. С. 239–312; 2. С. 85–163; 3. С. 356–421].

#### Тема 5. Объемные резонаторы

Общие свойства объемных резонаторов. Прямоугольный и цилиндрический резонаторы. Типы колебаний, резонансная частота и структура поля. Возбуждение резонаторов. [1. С. 369–392; 2. С. 180–200; 3. С. 422–442].

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### *Электродинамика*

1. Каково воздействие электрического и магнитного поля на электрический заряд?
2. В чем физический смысл тока проводимости и плотности тока проводимости?
3. Какова дифференциальная форма закона Ома?
4. В чем физический смысл первого уравнения Максвелла ?
5. В чем физический смысл второго уравнения Максвелла ?
6. В чем физический смысл третьего уравнения Максвелла ?
7. В чем физический смысл четвертого уравнения Максвелла ?
8. В чем суть понятия тока смещения?
9. Что можно сказать о явлении электронной поляризации и векторе поляризации?
10. Записать материальное уравнение для электрического поля.
11. В чем суть явления намагничивания и вектора намагниченности?
12. Записать материальное уравнение для магнитного поля.
13. Что такое анизотропные среды и понятие тензора?
14. В чем суть поляризационных и сторонних токов?
15. Записать уравнения Максвелла для монохроматических колебаний.
16. Что такое комплексная диэлектрическая проницаемость?
17. Что такое угол диэлектрических потерь?
18. Записать уравнение Гельмгольца, его физический смысл.
19. В чем суть понятия вектора Пойнтинга, его физический смысл?
20. Пояснить теорему Пойнтинга, баланс энергий.
21. Записать граничные условия для нормальных составляющих магнитного поля.
22. Записать граничные условия для нормальных составляющих электрического поля.
23. Записать граничные условия для тангенциальных составляющих магнитного поля.
24. Записать граничные условия для тангенциальных составляющих электрического поля.
25. Каковы составляющие электрического и магнитного полей на границе воздух – идеальный металл?
26. В чем общие свойства волновых процессов?
27. Что такое плоские волны? Фаза волны, фазовая скорость?



28. В чем смысл затухания плоских волн?
29. Что такое сферические волны?
30. Что такое цилиндрические волны?
31. Что такое элементарный электрический вибратор? Определение и принцип работы.
32. В чем суть неоднородных уравнений Максвелла?
33. Что такое электрический векторный потенциал электромагнитного поля?
34. Неоднородное уравнение Гельмгольца, в чем его физический смысл?
35. Что такое ближняя и дальняя зоны элементарного электрического излучателя?
36. Какова диаграмма направленности элементарного электрического излучателя?
37. Что такое сопротивление излучения?
38. Что можно сказать о магнитном токе?
39. В чем суть принципа перестановочной двойственности?
40. Что собой представляет щелевой излучатель?
41. Что такое однородная плоская электромагнитная волна с линейной поляризацией?
42. Каковы фазовая скорость и постоянная затухания плоских волн?
43. Как ведут себя плоские электромагнитные волны в хорошо проводящих средах?
44. Что такое плоские электромагнитные волны с вращающейся поляризацией?
45. Плоские электромагнитные волны, распространяющиеся в произвольном направлении. В чем их особенности?
46. Нормальное падение плоской электромагнитной волны на идеально проводящую плоскость. Каковы особенности?
47. Нормальное падение плоской электромагнитной волны на диэлектрическое полупространство. В чем суть?
48. Рассмотреть падение плоской электромагнитной волны на диэлектрик под произвольным углом, общий случай.
49. Рассмотреть падение плоской электромагнитной волны на диэлектрик под произвольным углом, перпендикулярная поляризация.
50. Рассмотреть падение плоской электромагнитной волны на диэлектрик под произвольным углом, параллельная поляризация.
51. Что такое угол Брюстера?

52. Пояснить явление полного внутреннего отражения.
53. Косое падение плоской электромагнитной волны с параллельной поляризацией на металлическую плоскость. В чем особенности?
54. Косое падение плоской электромагнитной волны с перпендикулярной поляризацией на металлическую плоскость. Каковы особенности?
55. Дать классификацию направляемых волн.
56. Что такое фазовая скорость направляемых волн?
57. Каковы типы направляющих систем?
58. Каковы типы волн в волноводах?
59. Что такое критическая длина волны в волноводе?
60. Связь между продольными и поперечными составляющими поля направляемых волн.
61. Как себя ведут волны типа  $E$  в прямоугольном волноводе?
62. Вычисление критической длины волны и длины волны в волноводе.
63. Что собой представляет волна типа  $H$  в прямоугольном волноводе?
64. Что собой представляет волна типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе?
65. Как себя ведут токи на стенках прямоугольного волновода?
66. Что такое излучающие и неизлучающие щели для прямоугольного волновода?
67. В чем состоят основы применения прямоугольных волноводов?
68. Круглый металлический волновод, переход от прямоугольного к круглому волноводу.
69. Что такое волны типов  $H_{11}$ ,  $H_{01}$  и  $E_{01}$  в круглом волноводе?
70. Рассказать о применении круглых волноводов.
71. В чем суть затухания электромагнитной волны в волноводах?
72. В чем особенности дифракции плоской электромагнитной волны на отверстиях в плоском безграничном экране?
73. Каковы свойства и параметры ферритов?
74. В чем суть эффекта Фарадея в ферритовой среде?
75. Распространение электромагнитной волны в неограниченной поперечно-намагниченной ферритовой среде. Каковы особенности?
76. Какие колебания возможны в объемных резонаторах?
77. Что такое добротность закрытых резонаторов?

## *Распространение радиоволн*

### Тема 1. Общие вопросы распространения радиоволн и линии радиосвязи

Свободное распространение радиоволн. Влияние Земли на распространение радиоволн. Влияние атмосферы на распространение радиоволн. Область, существенная для распространения радиоволн. Применение принципа Гюйгенса–Френеля. Формула Кирхгофа. Зоны Френеля при отражении. Классификация радиоволн по способу распространения. Понятие «множителя ослабления». Принципы расчета линий радиосвязи. [4. С. 7–38].

### Тема 2. Распространение земных волн

Распространение радиоволн над плоской поверхностью Земли при поднятых приемной и передающей антеннах. Электрические параметры Земли. Интерференционный «множитель ослабления». Структура радиоволн в точке приема. Пределы применимости отражательной трактовки. [4. С. 38–90].

### Тема 3. Влияние тропосферы на распространение радиоволн

Строение, параметры и коэффициент преломления тропосферы. Явление тропосферной рефракции. Виды рефракции. Распространение тропосферных радиоволн. Сверхрефракция и тропосферные волноводы. Дальнее распространение за счет рассеяния на тропосферных неоднородностях. Поглощение радиоволн в тропосфере. [4. С. 91–126].

### Тема 4. Влияние ионосферы на распространение радиоволн

Состав и строение верхних слоев атмосферы. Механизмы и источники ионизации. Распределение электронной концентрации с высотой. Преломление и отражение радиоволн в ионосфере. Максимальная и критическая частота. [4. С. 127–190].

### Тема 5. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов

Особенности распространения сверхдлинных и длинных радиоволн. Особенности распространения средних волн. Распространение коротких радиоволн. Распространение УКВ и волн оптического диапазона. [4. С. 190–218, 251–258].

## Тема 6. Распространение радиоволн в космическом пространстве

Общие принципы использования ИСЗ для осуществления дальней связи. Используемые диапазоны частот. Потери передачи. Искажение сигналов. Доплеровский сдвиг частот. Задержка сигналов. [4. С. 222–250].

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

#### *Распространение радиоволн*

1. Каково поведение радиоволны в свободном пространстве?
2. Как определить напряженность поля в точке приема и мощность в приемной антенне?
3. В чем суть зон Френеля?
4. Что собой представляют земные волны, каково их поглощение?
5. Описать физику отражения радиоволн на границе воздух – земля.
6. Каковы особенности отражения волн от шероховатой поверхности?
7. Дать классификацию распространения земных волн.
8. Каково поле излучателя, поднятого над плоской Землей?
9. Каково поле излучателя вблизи поверхности Земли?
10. Что такое дифракция волн вокруг Земли?
11. В чем смысл береговой рефракции?
12. Каковы состав и строение тропосферы?
13. Как себя ведут диэлектрическая проницаемость и показатель преломления тропосферы?
14. Что такое рефракция радиоволн в тропосфере?
15. Какова суть поглощения радиоволн в тропосфере?
16. Что собой представляют линии связи с дальним тропосферным распространением?
17. Каковы общие свойства ионосферы?
18. Каковы механизмы и источники ионизации в ионосфере?
19. Каковы основные ионизированные области ионосферы?
20. Как себя ведут диэлектрическая проницаемость и проводимость ионизированного газа?
21. Каковы скорости распространения радиоволн в ионизированном газе?
22. Пояснить физику поглощения радиоволн в ионизированном газе.
23. За счет чего существует поглощение и отражение радиоволн в ионосфере?

24. В чем особенности распространения радиоволн при наличии магнитного поля?
25. Каковы методы исследования ионосферы?
26. В чем особенности распространения коротких, средних и длинных радиоволн?
27. В чем особенности распространения УКВ?
28. Из каких соображений выбирается частота космической линии связи?
29. Какие искажения сигналов возможны при космической связи?

## **5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ**

По читаемым дисциплинам в семестре предусмотрено выполнение двух контрольных работ для обычной формы обучения и одной контрольной работы (первой) – для ускоренной формы. Каждая контрольная работа состоит из ряда задач в десяти вариантах. Студенты решают задачи своего варианта в соответствии с последней цифрой шифра. Без выполнения контрольных работ студент не допускается к сдаче зачета или экзамена по читаемой в семестре дисциплине.

Контрольные работы должны быть оформлены в соответствии с общими требованиями для заочных вузов и факультета:

1. На обложке тетради контрольной работы необходимо указать: фамилию, имя и отчество; шифр студенческого билета; номер контрольной работы и наименование дисциплины; адрес места жительства.

2. При выполнении каждой задачи контрольной работы необходимо записать общие условия, в которых указать значения параметров, взятых из таблиц в соответствии с шифром, и вид поляризации, где это необходимо.

3. Порядок выполнения задачи должен идти в указанной последовательности с указанием номеров пунктов.

4. При выводе расчетных формул должны быть представлены все преобразования и сделаны соответствующие пояснения.

5. При выводе формул обязательно придерживаться указанных в заданиях буквенных обозначений параметров. Если в используемой литературе буквенные обозначения параметров другие, их следует изменить на требуемые обозначения.

6. Все буквенные обозначения должны сопровождаться письменными разъяснениями.

7. Когда это необходимо расчеты должны сопровождаться соответствующими рисунками, выполненными аккуратно с помощью чертёжных инструментов.

8. При расчете по сложным формулам необходимо составить таблицы, в графы которых должны быть помещены промежуточные и конечные цифровые результаты с указанием размерности. Расчет проводится с точностью не менее трехзначных цифр.

9. Все формулы, рисунки, графики и таблицы должны иметь собственную сквозную нумерацию.

10. В конце работы должен быть приведен полный список используемой литературы, оформленный по правилам библиографии с указанием названия, авторов, издательства и года издания.

## Контрольные работы, выполняемые по дисциплине «Электродинамика и РРВ»

### Контрольная работа № 1

#### Задача 1

В однородной среде (диэлектрик с потерями), которая характеризуется следующими параметрами: абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, абсолютная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_a$  и проводимость  $\sigma$  (табл. 1), распространяется плоская электромагнитная волна с частотой  $f$  и начальной амплитудой электрического поля  $E_m = 1$  В/м.

Необходимо определить:

1. Расстояние  $Z$ , при котором амплитуда электрического поля  $E$  уменьшается в 5 раз, т. е. при выполнении условия:  $\exp(-\alpha Z) = 0,2$ .
2. Расстояние  $Z$ , при котором набег фазы составит  $\beta Z = 0,75\pi$ .
3. Сдвиг фазы  $\varphi_c$  между полями  $E$  и  $H$  и начальную амплитуду (при  $t = 0$  и  $Z = 0$ ) магнитного поля  $H_m$ .
4. Величину среднего значения вектора Умова-Пойнтинга  $\Pi_{cp}$  на расстоянии, рассчитанном в п. 1, т. е. когда поле  $E_m = 0,2$  В/м.
5. Длину волны в диэлектрике  $\lambda_e$ .
6. Графически построить мгновенные значения полей  $E$  и  $H$  на расстоянии одной длины волны для момента времени  $t = 0$ .

#### Задача 2

Плоская линейно поляризованная электромагнитная волна частотой  $f$  падает под углом  $\theta$  на плоскую границу раздела: воздух – идеальный

диэлектрик. Параметры сред:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\epsilon_1 = \epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$  Ф/м, значения  $\epsilon_2 = \epsilon_a / \epsilon_0$  приведены в табл. 1, проводимость сред  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ .

При решении необходимо:

1. Нарисовать направления падающей, отраженной и преломленной электромагнитных волн, а также ориентацию векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  при заданной поляризации. Указать углы падения, отражения и преломления.

2. Определить угол преломления  $\theta_{\text{пр}}$ , коэффициенты отражения и преломления.

3. Определить угол Брюстера.

Таблица 1

Вариант	$f$ , Гц	$\epsilon_a / \epsilon_0$	$\sigma$ , См / м	$\theta$ , град	Вид поляризации
1	$10^5$	2	$10^{-6}$	30	Вектор $\mathbf{E}$ лежит в плоскости падения
2	$10^5$	3	$3 \cdot 10^{-5}$	35	
3	$10^5$	4	$10^{-3}$	45	
4	$10^6$	5	$2 \cdot 10^{-3}$	50	
5	$10^6$	6	$10^{-4}$	0	
6	$10^7$	7	$6 \cdot 10^{-3}$	60	Вектор $\mathbf{E}$ перпендикулярен плоскости падения
7	$10^8$	6	$5 \cdot 10^{-2}$	30	
8	$10^9$	5	$10^{-1}$	45	
9	$10^{10}$	4	1	35	
10	$10^4$	3	$5 \cdot 10^{-6}$	60	

### Задача 3

Элементарный электрический излучатель (диполь Герца) длиной  $l$ , который возбужден током амплитудой  $I_m$  с частотой  $f$  (табл. 2) находится в воздушной среде.

При решении необходимо:

1. Определить амплитуды векторов напряженности электрического и магнитного полей на расстоянии  $20\lambda$  (в дальней зоне) и под углом  $60^\circ$  к оси диполя.

2. Определить полную мощность излучения  $P_\Sigma$ .

3. Определить сопротивление излучения  $R_\Sigma$  диполя Герца.

4. Изобразить на рисунке в полярной системе координат нормированные диаграммы направленности электрического вибратора в плоскостях  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ .

Таблица 2

Вариант	$I_m, A$	$l, м$	$f, Гц$
1	5	5	$3 \cdot 10^6$
2	10	1	$15 \cdot 10^6$
3	15	1,5	$10^7$
4	20	30	$5 \cdot 10^5$
5	5	2	$10^7$
6	10	50	$3 \cdot 10^5$
7	15	2,5	$6 \cdot 10^6$
8	20	15	$5 \cdot 10^5$
9	5	1	$10^7$
10	10	0,5	$15 \cdot 10^6$

*Расчетные формулы к контрольной работе № 1*

К задаче 1

Постоянная распространения  $\gamma = \beta - j\alpha$ ,

где фазовая постоянная

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_a \epsilon_a}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_a^2}} + 1 \right)}$$

и коэффициент затухания

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_a \epsilon_a}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_a^2}} - 1 \right)}$$

$$\text{Волновое сопротивление среды } W = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_k}} = |W| e^{j\varphi_c},$$

где  $\epsilon_k = (\epsilon_a - j \sigma/\omega)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость; аргумент комплексного волнового сопротивления  $\varphi_c = \arctg \alpha/\beta$ ; модуль волнового сопротивления



$$|W| = \frac{\omega \mu_a}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}.$$

Фазовая скорость волны  $V_\phi = \omega/\beta$ ; длина волны в среде  $\lambda_g = 2\pi/\beta$ .

Векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  плоской волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$ , в комплексной форме

$$\mathbf{E} = x_0 E_m e^{-j\gamma Z},$$

$$\mathbf{H} = y_0 (E_m / W) e^{-j\gamma Z};$$

в действительной форме

$$\mathbf{E} = x_0 E_m e^{-\alpha Z} \cos(\omega t - \beta Z),$$

$$\mathbf{H} = y_0 (E_m / |W|) e^{-\alpha Z} \cos(\omega t - \beta Z - \varphi_c).$$

Среднее значение вектора Пойнтинга

$$\Pi_{cp} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = z_0 \frac{1}{2} (E_m^2 / |W| \cos \varphi_c).$$

К задаче 2

Коэффициент отражения от границы раздела двух сред:

– горизонтальная поляризация (вектор  $\mathbf{E}$  перпендикулярен плоскости падения)

$$\Gamma_r = \frac{W_2 \cos \theta - W_1 \cos \theta_{пр}}{W_2 \cos \theta + W_1 \cos \theta_{пр}},$$

– вертикальная поляризация (вектор  $\mathbf{E}$  лежит в плоскости падения волны)

$$\Gamma_v = \frac{W_1 \cos \theta - W_2 \cos \theta_{пр}}{W_1 \cos \theta + W_2 \cos \theta_{пр}},$$

где  $W_1$  и  $W_2$  – волновые сопротивления первой и второй среды соответственно;  $\theta$ ,  $\theta_{отр}$ ,  $\theta_{пр}$  – соответственно, углы падения, отражения и преломления электромагнитной волны на границе раздела двух сред.

Законы Снеллиуса:

$$1) \theta = \theta_{\text{отр}};$$

$$2) \frac{\sin \theta}{\sin \theta_{\text{пр}}} = \frac{V_{\phi 1}}{V_{\phi 2}} = \frac{\beta_2}{\beta_1}.$$

Угол Брюстера:

$$\operatorname{tg} \theta_{\text{бр}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1}}}.$$

К задаче 3

Составляющие векторов поля диполя Герца в сферической системе координат  $(R, \theta, \varphi)$ :

$$H_{\varphi} = \frac{I_m l}{4\pi} \sin \theta e^{-jkR} \left( \frac{1}{R^2} + j \frac{k}{R} \right),$$

$$E_R = \frac{-jI_m l}{2\pi\omega\epsilon} \cos \theta e^{-jkR} \left( \frac{1}{R^3} + j \frac{k}{R^2} \right),$$

$$E_{\theta} = \frac{-jI_m l}{4\pi\omega\epsilon} \sin \theta e^{-jkR} \left( \frac{1}{R^3} + j \frac{k}{R^2} - \frac{k^2}{R} \right),$$

$$H_{\theta} = H_R = E_{\varphi} = 0,$$

где  $k$  – волновое число  $2\pi/\lambda$ ;  $R$  – расстояние от начала координат до заданной точки.

$$\text{Мощность излучения } P_{\Sigma} = \frac{I_m^2 l^2 k^3}{12\pi\omega\epsilon}.$$

Сопротивление излучения для воздуха  $R_{\Sigma} = 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$ .

### Контрольная работа № 2

Задача 1

Электромагнитная волна с частотой  $f$  распространяется в волноводе прямоугольного сечения с размерами широкой и узкой стенок  $a$  и  $b$ . Среда, заполняющая внутреннюю полость волновода, имеет парамет-

ры:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м ( $\mu = 1$ ),  $\epsilon = \epsilon_a / \epsilon_0$  (табл. 3) и  $\sigma = 0$  (отсутствие потерь).

При решении необходимо:

1. Определить длину волны в волноводе  $V_{10}$  для волны  $H_{10}$ .
2. Определить волновое (характеристическое) сопротивление волновода для волны  $H_{10}$ .
3. Определить фазовую  $V_\phi$  и групповую  $V_{гр}$  скорости распространения волны  $H_{10}$ .
4. Изобразить на рисунке структуру поля волны  $H_{10}$ .
5. Найти вектор Пойнтинга для волны  $H_{10}$ .

### Задача 2

Определить типы волн, которые могут распространяться в волноводе с воздушным заполнением и поперечными размерами, приведенными в табл. 3, на частоте возбуждения  $2f$ . Изобразить графически две наивысшие структуры волн, существующих при указанных условиях.

Таблица 3

Вариант	$a$ , см	$b$ , см	$f$ , ГГц	$\epsilon = \epsilon_a / \epsilon_0$	$\sigma$ , См/м
1	2,3	1,0	10	1	$2 \cdot 10^7$
2	7,1	3,5	32	1	$2 \cdot 10^7$
3	7,1	3,5	15	4	$2 \cdot 10^7$
4	2,3	1,0	5	4	$3 \cdot 10^7$
5	5,2	2,5	7,5	1	$3 \cdot 10^7$
6	3,6	1,7	3	4	$3 \cdot 10^7$
7	5,8	2,9	3,75	1	$6 \cdot 10^7$
8	3,6	1,7	4	4	$6 \cdot 10^7$
9	2,5	1,2	7,5	4	$7 \cdot 10^7$
10	1,15	0,5	15	4	$5 \cdot 10^7$

### Задача 3

Радиоволна с длиной волны 5 см распространяется от передатчика к приемнику.

1. Определить предельное расстояние прямой видимости между антеннами, установленными на мачтах высотой 50 м, для двух случаев: а) тропосферной рефракцией пренебречь; б) учесть нормальную тропосферную рефракцию.

2. Найти значение эквивалентного радиуса Земли при нормальной тропосферной рефракции.

3. Определить размеры двух областей, существенных для распространения радиоволн, (т. е. рассчитать радиусы первой и шестой зон Френеля) в середине трассы длиной 10 км.

*Расчетные формулы к контрольной работе № 2*

К задачам 1 и 2

Критическая длина волны в прямоугольном волноводе с заполнением

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}},$$

где  $a$ ,  $b$  – размеры широкой и узкой стенок волновода соответственно;  $m$  и  $n$  – число полуволн, укладываемых вдоль широкой и узкой стенок волновода.

Условие распространения волны типа  $H_{mn}$  или  $E_{mn}$  по волноводу  $\lambda_0 / \sqrt{\epsilon\mu} < \lambda_{\text{кр}}$ , где  $\lambda_0$  – длина волны генератора, определяется через скорость света  $C$  и частоту  $f$  из соотношения  $\lambda_0 = C / f$ .

Длина волны в волноводе:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon\mu - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}.$$

Фазовая и групповая скорости в волноводе:

$$V_{\text{ф}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}},$$

$$V_{\text{гр}} = C \sqrt{\epsilon\mu - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}.$$

Волновое сопротивление волновода:

$$\text{для волны типа } H: W_2^H = \sqrt{\frac{\mu_a}{\mu_a}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\mu} \left( \frac{\nu_0}{\nu_p} \right)^2}},$$

$$\text{для волны типа } E: W_2^E = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}.$$

Вектор Пойнтинга определяется по формуле

$$\Pi = 1/2 \left[ E_y \cdot \mathbf{1}_y \times H_x^* \cdot \mathbf{1}_x \right],$$

где  $H^*$  – комплексно сопряженная величина поля  $H$ , а составляющие поля основного типа волны  $H_{10}$  в волноводе имеют вид

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-jhz},$$

$$H_x = j\left(\pi h H_0 / a g^2\right) \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-jhz},$$

$$E_y = -j\left(\pi \omega \mu_0 H_0 / a g^2\right) \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-jhz},$$

$$E_x = E_z = H_y = 0.$$

### К задаче 3

Расстояние прямой видимости между двумя антеннами с высотами подвеса  $h_1$ , и  $h_2$  определяется следующим образом:

в случае отсутствия тропосферной рефракции:

$$r_0 = 3,57 \cdot [ (h_1)^{1/2} + (h_2)^{1/2} ], \text{ км};$$

в случае учета нормальной тропосферной рефракции:

$$r_0 = 4,12 \cdot [ (h_1)^{1/2} + (h_2)^{1/2} ], \text{ км}.$$

Для нормальной тропосферной рефракции значение эквивалентного радиуса Земли

$$a_3 = a / [1 + a (dN/dh) \cdot 10^{-6}],$$

где радиус земного шара  $a = 6,37 \cdot 10^6$  м и градиент  $dN/dh = -4 \cdot 10^{-2}$  1/м.

Кольцевая область, построенная на плоскости, перпендикулярной линии, соединяющей передатчик и приемник, с радиусом  $R_n$  называют зоной Френеля номера  $n$ . Радиус  $R_n$  вычисляется по формуле

$$R_n = [(d_1 d_2 \lambda n) / (d_1 + d_2)]^{1/2},$$

где  $n$  – целое число;  $d_1$  – расстояние от передатчика до указанной выше плоскости;  $d_2$  – расстояние от плоскости до приемника.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель дисциплин и их значение для подготовки специалистов .....	3
2. Задачи дисциплин и требования к уровню подготовки .....	4
3. Взаимосвязь дисциплин .....	4
Рекомендуемая литература .....	5
4. Содержание разделов программ дисциплин .....	7
Контрольные вопросы. Электродинамика .....	8
Контрольные вопросы. Распространение радиоволн .....	12
5. Методические указания к выполнению контрольных заданий .....	13
Контрольные работы, выполняемые по дисциплине	
«Электродинамика и РРВ» .....	14
<i>Контрольная работа № 1</i> .....	14
<i>Контрольная работа № 2</i> .....	18