

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения

**АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА
СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

Программы, контрольные вопросы и
методические указания к выполнению
контрольных работ

Санкт-Петербург
2005

Составители : канд.техн.наук доц.
канд.техн.наук доц.

Л.А.Федорова
Ю.Н.Данилов

Рецензент: канд.техн.наук доц.

А.Ю.Гулевитский

Методические указания содержат следующие разделы курсов: «Антенны», «Устройства сверхвысоких частот». В зависимости от номера специальности эти разделы могут сочетаться в различных комбинациях. Каждый курс программы содержит указатель литературы и рекомендации к самостоятельной работе и выполнению контрольных заданий.

Программа предусматривает изучение основных понятий, положений и закономерностей теории антенн и устройств СВЧ.

Методические указания предназначены для студентов заочного факультета радиотехнических специальностей.

Подготовлены к публикации кафедрой антенно-фидерных устройств и систем радиовидения по рекомендации методической комиссии факультета радиотехники, электроники и связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ

ЗАПИСКА

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

1.1 Цель дисциплин и их значение для подготовки специалистов

Целью изучения дисциплин является:

- определение физического содержания и зависимости векторов электромагнитного поля через уравнения Максвелла;
- изучение общей теории проволочных, апертурных антенн и антенных решеток;
- изучение антенн широкого применения;
- изучение элементов фидерного тракта и принципов согласования антенн с высокочастотным трактом;
- ознакомление студентов с кругом проблем, стоящих перед разработчиками антенно-фидерных систем наземных и бортовых станций;
- получение практических навыков по расчету и экспериментальному исследованию характеристик излучения антенн и устройств сверхвысоких частот.

Изучение данных дисциплин позволит будущему специалисту овладеть основами теории расчета и проектирования устройств и обоснованного выбора типа антенн применительно к решению различных задач.

1.2 Задачи дисциплин и требования к уровню подготовки

В процессе обучения по вышеуказанным дисциплинам студент должен: получить фундаментальные знания в области теоретических основ излучения антенн, распространения и приема электромагнитных волн; получить представление о типах антенн, используемых в различных диапазонах волн в наземных и бортовых радиотехнических системах; приобрести практическое умение обоснованно выбирать и проектировать элементы фидерного тракта, устройства согласования и антенны для решения поставленной задачи; получить навыки

лабораторных исследований характеристик излучения антенн и согласования тракта, а также проверки работоспособности антенно-фидерных систем в период эксплуатации.

В результате изучения дисциплин студент должен знать:

- физическое содержание электрических характеристик передающих и приемных антенн;
- соотношения между геометрическими и электрическими характеристиками антенн;
- основные положения теории проволочных и апертурных антенн, а также антенных решеток;
- принципы проектирования антенн широкого применения;
- принципы построения фидерных трактов и их согласования с антенной.

1.3 Взаимосвязь данных дисциплин с другими дисциплинами учебного плана

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

- Физика - в разделах «Электричество и магнетизм», «Теория электромагнитного поля»;
- Высшая математика - в разделах «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» - в разделах «Длинные линии», «Колебательные контуры», «Фильтры».

Основная форма изучения указанных дисциплин - самостоятельная работа над учебным материалом, указанным в разделах методического пособия.

Методические указания содержат разделы:

«Устройства сверхвысоких частот» (или «Техника сверхвысоких частот»), «Антенны сверхвысоких частот». Каждый раздел кроме программы содержит контрольные вопросы, контрольные задания и рекомендации по самостоятельной работе и выполнению контрольных работ. Список литературы приводится единый для всех разделов. В каждой теме раздела

указывается рекомендуемая при изучении литература под номером, соответствующим номеру в списке литературы. При изучении перечисленных дисциплин в каждом 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.

2. Учебно-методические материалы по изучаемым дисциплинам

Основная литература

1. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.:Наука, 1973. 607 с.
2. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.
3. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.
4. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь и радио, 1965. 400 с.
5. **Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов.радио, 1974. 536 с.**
6. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб.пособие для вузов. Под ред.Д.И.Воскресенского.М.: Радио и связь, 1994. 591 с.
7. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.:Высш.школа, 1988. 432 с.

Дополнительная литература

8. Ю.Н.Данилов, В.Н.Красюк, Б.Т.Никитин, Л.А.Федорова Техническая электродинамика и антенны. ч.1. Электродинамика. Учеб.пособие. ЛИАП, Л., 1991. 165 с.
9. Ю.Н.Данилов, В.Н.Красюк, Б.Т.Никитин, Л.А.Федорова Техническая электродинамика и антенны. ч.2. Антенны. Учеб.пособие. ЛИАП, С.-Пб., 1992. 196 с.

10. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М.: Высш.школа, 1988. 399 с.

Перечень методических указаний по выполнению лабораторных работ

11. Исследование антенны «волновой канал» /Сост. Б.Т.Никитин, В.Г.Цыбаев; ЛИАП. Л., 1986. 25 с.

12. Исследование рупорных и линзовых антенн /Сост. Ю.Н.Данилов; ЛИАП. Л., 1983. 26 с.

13. Исследование зеркальной антенны/ Сост. Ю.Н.Данилов, Б.Т.Никитин; ГААП.С.-Пб., 1995. 18 с.

14. Исследование волноводно-щелевых антенн /Сост. Б.Т.Никитин, Т.П.Мишура, В.Н.Красюк.ЛИАП. Л., 1990. 34 с.

15. Исследование волноводных четырехплечных соединений /Сост.Л.А.Федорова; ЛИАП. Л., 1990. 24 с.

16. Согласование волновода с нагрузкой /Сост.Л.А.Федорова; ЛИАП. Л., 1991. 30 с.

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

3. Содержание разделов программ дисциплин

3.1. Содержание раздела «Устройства сверхвысоких частот» (эквивалентно разделу «Техника сверхвысоких частот»)

Тема 1. Режимы волн в линиях передачи.

Основные характеристики нагруженных линий передачи: волновое сопротивление, коэффициент отражения, входное сопротивление, коэффициенты бегущей и стоячей волны. Характеристики линии разомкнутой и замкнутой на конце. Режим стоячих волн. Условия существования режима бегущих волн./2, с.240-256; 5, с.444-484; 8, с.123-127/.

Тема 2. Согласование линии передачи с нагрузкой.

Реактивные элементы: штыри, диафрагмы, резонансные окна, шлейфы. Согласование волновода при помощи реактивных штырей. Согласование линии при помощи одного и двух реактивных шлейфов. Согласование при помощи четвертьволнового трансформатора./2, с.252-254; 8, с.123-162/.

Тема 3. Элементы волноводных трактов. Дроссельно-фланцевое соединение, вращающееся сочленение, уголки, скрутки, короткозамкнутые поршни, Т-образные соединения. Мосты СВЧ: кольцевой, щелевой и двойной волноводный Т-мост. Направленные волноводные ответвители. Поляризаторы, фазовращатели, аттенюаторы./9, с.152-179; 2, с.292-302/.

Тема 4. Ферритовые устройства СВЧ.

Основные свойства намагниченных ферритов. Вентиль с поперечно-подмагниченным ферритом в прямоугольном волноводе с резонансным поглощением и со смещением поля. Ферритовые устройства с использованием эффекта Фарадея на круглом волноводе: вентиль, циркулятор. Ферритовые фазовращатели. У-циркуляторы с поперечно-намагниченным ферритом. /2, с. 303-319; 8, с. 180-185/.

Тема 5. Применение устройств СВЧ.

Антенные переключатели «прием-передача» на мостах СВЧ с использованием газовых разрядников. Регулируемые делители мощности и фазовращатели на мостах СВЧ. Разделительные фильтры с использованием волноводных мостов. /2, с.283-285; 8, с. 162-168/.

Контрольные вопросы по разделу «Устройства сверхвысоких частот»

1. Какие режимы волн могут существовать в нагруженной линии передачи?
2. Чему равно входное сопротивление четвертьволновой короткозамкнутой линии?
3. В каких пределах могут изменяться КВВ и КСВ?
4. Какие согласующие реактивные элементы Вы знаете?
5. Из каких соображений выбирается место включения реактивного элемента в линию передачи при ее согласовании с нагрузкой?
6. Изложите принцип согласования линии при помощи одного и двух реактивных шлейфов?
7. Как связано волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора с волновыми сопротивлениями согласуемых линий?
8. Объясните принцип действия дроссельно-фланцевого соединения волноводов.
9. Объясните принцип действия Е- и Н- волноводных тройников.
10. Объясните принципы работы волноводных мостов (щелевого, кольцевого, двойного волноводного).
11. Объясните принцип работы волноводного направленного ответвителя с тремя отверстиями связи в общей узкой стенке.
12. Каков принцип действия вентиля «на смещении» поля, резонансного и на эффекте Фарадея?

13. Изложите принцип работы регулируемого фазовращателя на щелевом мосте.
14. Объясните принцип работы разделительного двухчастотного фильтра на щелевых мостах.
15. Изложите принцип работы Y- и X-ферритовых циркуляторов. Приведите примеры практического применения.
16. Изобразите схемы нтенного переключателя с использованием волноводных мостов различного типа и объясните принципы их работы.

3.2. Содержание раздела «Антенны СВЧ»

Тема 1. Симметричный вибратор в свободном пространстве.

Распределение тока и заряда на тонком симметричном вибраторе. Поле излучения симметричного вибратора. Характеристики излучения: диаграмма направленности, действующая длина, входное сопротивление, сопротивление излучения, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления в полосе частот. Диполь Надененко. Симметрирующие устройства при питании вибратора коаксиальным кабелем. /5, с. 48-60, 472-476, 151-153/.

Тема 2. Решетки излучателей.

Классификация решеток. Поле излучения линейной системы излучателей. Теорема перемножения. Характеристики линейной системы с поперечным и продольным относительно оси излучением. Условия появления дифракционных лепестков. Принципы электрического сканирования луча. Фазированные антенные решетки. Плоскостные антенные решетки. /5, с.65-85, 399-418/.

Тема 3. Взаимное влияние вибраторов.

Комплексное сопротивление системы вибраторов. Взаимное сопротивление параллельных полуволновых вибраторов. Расчет полных сопротивлений многовибраторных антенн. Директорная антенна типа «волновой канал». /5, с.93-96, 73-75, 136-141/

Тема 4. Учет влияния Земли на излучение антенн.

Метод зеркальных изображений, условия его применения. Расчет характеристик излучения вибраторов (симметричного и несимметричного, вертикального и горизонтального), расположенных над идеально проводящей безграничной плоскостью. Влияние конечной проводимости Земли на диаграмму направленности. /5, с.97-107/.

Тема 5. Щелевые антенны.

Принцип двойственности и его применение к теории щелевых антенн. Характеристики излучения полуволновой щели в плоском безграничном экране. Типы волноводно-щелевых антенн. Резонансные и нерезонансные антенны. /5, с.230-247/.

Тема 6. Спиральные антенны.

Цилиндрическая спиральная антенна: геометрические параметры, принцип действия, направленные свойства, поляризационные характеристики. Принципы построения частотно-независимых спиральных антенн. Плоская логарифмическая спиральная антенна. /5, с. 317-328/.

Тема 7. Теория апертурных антенн.

Принцип эквивалентных токов. Поле излучения прямоугольного и круглого раскрытов. Влияние распределения амплитуды и фазы поля в раскрыве антенны на характеристики излучения. Коэффициент направленного действия и коэффициент использования поверхности плоских раскрытов. /5, с.39-48, 248-265/.

Тема 8. Рупорные антенны.

Излучение из открытого конца волновода. Е-и Н-плоскостные секториальные рупоры. Структура поля в раскрыве, фазовые искажения, характеристики излучения. Понятие об оптимальном рупоре. Пирамидальный и конический рупоры. Применение рупорных антенн. /5, с. 271-286/.

Тема 9. Линзовые антенны.

Назначение и принцип действия. Уравнения профилей ускоряющей и замедляющей линз. Поле в раскрыве и поле излучения линз. Зонирование, полоса пропускания, применение. /5, с. 287-309/.

Тема 10. Зеркальные антенны.

Принцип действия и виды однозеркальных параболических антенн. Уравнение профиля и геометрические параметры зеркала. Распределение амплитуды поля в раскрыве. Оптимальный угол раскрыва и коэффициент усиления зеркала. Фазовые искажения. Облучатели параболических зеркал. Основные типы двухзеркальных антенн. Зеркальные антенны с диаграммой направленности типа «косеканс». Зеркальные антенны для широкоугольного качания диаграммы направленности. /5, с.333-393/.

Тема 11. Антенны поверхностных волн.

Диэлектрические стержневые антенны. Конструкция, структура поля, способы возбуждения, диаграммы направлен-

ности. Диэлектрические и ребристые замедляющие структуры на проводящей плоскости. /5, с.391-399/.

Тема 12. Приемные антенны.

Принцип взаимности и приемные антенны. Эквивалентная схема приемной антенны. Требования, предъявляемые к приемным антеннам. Шумовая температура антенны. /5, с.108-121/.

Контрольные вопросы по разделу «Антенны СВЧ»

1. Каковы основные характеристики излучения антенн?
2. Запишите выражения для распределения тока и заряда в проводах симметричного вибратора. Нарисуйте распределения тока и заряда для вибраторов различной длины.
3. Определите поле излучения симметричного вибратора в свободном пространстве.
4. Как изменяется форма диаграммы направленности симметричного вибратора при изменении его длины?
5. Как изменяется входное сопротивление симметричного вибратора в диапазоне частот?
6. Какими качествами обладает диполь Надененко?
7. Определите коэффициент направленного действия полуволнового и волнового вибраторов.
8. Что понимается под действующей длиной симметричного вибратора?
9. Как рассчитать диаграмму направленности линейной системы идентичных направленных излучателей?
10. Каковы направленные свойства линейной системы идентичных ненаправленных излучателей? Каковы условия возникновения дифракционных максимумов?
11. При каких условиях линейная система излучает вдоль своей оси?
12. Какой вид имеют функция направленности и диаграмма направленности антенны «волновой канал» в зависимости от числа вибраторов ?
13. Как определяется функция направленности плоскостной системы излучателей?
14. Поясните принцип качания луча в неподвижной линейной системе излучателей.
15. Как рассчитать входное сопротивление антенны «волновой канал», состоящей из активного и пассивного полуволновых вибраторов?
16. Как рассчитать входное сопротивление и сопротивление излучения системы активных вибраторов?

17. Как влияет Земля на характеристики излучения вибраторов? В чем заключается метод зеркальных отображений?
18. Какие симметрирующие устройства и зачем применяются при питании вибраторов коаксиальным кабелем?
19. Как используется принцип перестановочной двойственности при расчете характеристик излучения щели в безграничном экране?
20. Поясните принцип действия волноводно-щелевых антенн с различным расположением щелей на широкой и узкой стенках прямоугольного волновода.
21. Как рассчитать функцию направленности волноводно-щелевых антенн следующих типов: щели расположены в шахматном порядке на широкой стенке вдоль оси волновода; поперечные щели на широкой стенке волновода; встречно-наклонные щели на узкой стенке волновода?
22. Поясните принцип действия цилиндрической спиральной антенны. Каковы ее диаграммы направленности, диапазонные и поляризационные характеристики?
23. Каковы свойства и характеристики излучения двухзаходной логарифмической спиральной антенны?
24. Какие методы анализа апертурных антенн Вы знаете? В чем заключаются внутренняя и внешняя задачи теории антенн?
25. В чем заключается принцип эквивалентных токов и как он используется при расчетах параметров антенн?
26. Как рассчитать поле излучения прямоугольной синфазной площадки с постоянным и косинусоидальным законами распределения амплитуды поля?
27. Как рассчитать поле излучения круглой синфазной площадки с постоянным законом распределения амплитуды поля?
28. Как влияют фазовые искажения на диаграмму направленности?
29. Изобразите E-плоскостной секториальный рупор. Как определяется поле в раскрыве рупора и его характеристики излучения?
30. Изобразите H-плоскостной секториальный рупор. Как определяется поле в раскрыве рупора и его характеристики излучения?
31. Что такое оптимальный рупор? Приведите примеры практического использования рупорных антенн.
32. Каков принцип действия металлопластинчатых линзовых антенн? Как рассчитываются уравнение профиля, поле в раскрыве и поле излучения подобных антенн?

33. Каков принцип действия диэлектрических линзовых антенн? Как рассчитываются уравнение профиля, поле в раскрыве и поле излучения подобных антенн?
34. Для чего используется зонирование линзовых антенн? Как изменяются диапазонные свойства линз при зонировании?
35. Запишите уравнение профиля параболического зеркала в полярной и декартовой системах координат. Какие типы параболических однозеркальных антенн Вы знаете?
36. Как рассчитать закон распределения амплитуды поля в раскрыве параболического зеркала?
37. Что понимается под оптимальным углом раскрыва параболического зеркала? Как определить КНД, КИП и КУ зеркальной антенны?
38. Какие методы устранения реакции зеркала на облучатель Вы знаете?
39. Поясните принцип действия антенны Кассегрена. Каковы геометрические соотношения и область применения подобных антенн?
40. Каков принцип действия зеркала с поворотом плоскости поляризации?
41. Каков принцип действия двухзеркальной антенны: основное зеркало – решетчатый параболоид вращения, вспомогательное зеркало – плоский переотражатель в виде ребристой структуры, расположенный за облучателем?
42. Как осуществляется качание луча в широком угловом секторе в неподвижных сферических зеркальных антеннах?
43. Какими способами можно сформировать диаграмму направленности косекансного типа в зеркальных антеннах?
44. Как влияют геометрические параметры диэлектрического конического стержня на его характеристики излучения?
45. Как используется принцип взаимности при расчетах параметров приемных антенн? Как рассчитать мощность, передаваемую антенной в нагрузку?

4. 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 чертежных 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 трех значащих цифр.
9. При расчете диаграммы направленности антенн наличие расчетных таблиц или распечаток расчетов на ЭВМ обязательно. Рассчитанная диаграмма направленности нормируется относительно ее максимального значения.
10. Выбор интервала между расчетными точками диаграммы направленности должен быть таким, чтобы на главный лепесток их приходилось порядка 6...8. На боковом лепестке количество расчетных точек должно быть таким, чтобы можно было установить направление максимального излучения первого бокового лепестка и его уровень.

11. Нормированные диаграммы направленности строятся на миллиметровке в декартовой или полярной системах координат в зависимости от ширины главного лепестка. Декартовая система удобна при построении диаграмм направленности с шириной главного лепестка по уровню половинной мощности менее 30° . При этом по оси абсцисс откладывается угол в градусах, а по оси ординат – нормированная величина поля излучения. Масштаб следует выбирать таким, чтобы графики заполняли лист.

12. На построенной диаграмме направленности антенны отмечается ширина главного лепестка на уровне $0,707$ напряженности поля. На диаграмме облучателя антенны отмечается угол, при котором на краю антенны создается требуемое ослабление поля.

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

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

4.1. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В СЕМЕСТРЕ. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1 ЗАДАЧА № 1

Рассчитать диаграммы направленности (ДН) в Е и Н-плоскостях симметричного вибратора длиной $2l$ расположенного вертикально (горизонтально) над поверхностью идеально проводящей земли на высоте h . Длина вибратора, высота подвеса и ориентация относительно земли для каждого варианта указаны в табл.4.

Таблица 4.

| Вариант № | Ориентация вибратора | Длина вибратора $2l/\lambda$ | Высота подвеса h/λ |
|-----------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1 | Вертикальная | 0,5 | 0,5 |
| 2 | Вертикальная | 1,0 | 1,0 |
| 3 | Вертикальная | 0,5 | 0,75 |
| 4 | Вертикальная | 1,0 | 0,75 |
| 5 | Вертикальная | 0,5 | 1,0 |
| 6 | Горизонтальная | 0,5 | 0,25 |
| 7 | Горизонтальная | 1,0 | 0,25 |
| 8 | Горизонтальная | 0,5 | 0,5 |
| 9 | Горизонтальная | 1,0 | 0,5 |
| 10 | Горизонтальная | 0,5 | 0,75 |

При решении необходимо:

1. Дать краткое обоснование применения метода зеркальных изображений к данной задаче.
 2. Получить выражение для «множителя земли».
 3. Определить направления максимального и нулевого излучения в интервале углов $0-90^{\circ}$.
 4. Рассчитать ДН симметричного вибратора в Е и Н-плоскостях без учета влияния земли и с учетом влияния земли в интервале углов $0-90^{\circ}$ через 5° .
- Построить нормированные ДН в полярной системе координат для углов $0-180^{\circ}$ и показать на ней относительное положение вибратора. /5/, с.97 - 104.

ЗАДАЧА № 2

Рассчитать ДН в Е и Н - плоскостях линейной системы из n симметричных вибраторов длиной $2l$, расположенных параллельно друг другу на расстоянии d и возбуждаемых токами постоянной амплитуды с фазой Ψ . Параметры линейной системы приведены в табл.5.

При решении необходимо:

1. Рассчитать ДН в Е - плоскости симметричного вибратора в свободном пространстве в интервале углов $0-90^{\circ}$ через 5° и построить ее в полярной системе координат для углов $0-360^{\circ}$.
 2. Получить выражение для множителя решетки при заданных параметрах и рассчитать его в интервале углов $0-90^{\circ}$.
 3. Рассчитать ДН линейной системы в Е - плоскости с учетом направленных свойств вибратора в интервале углов $0-90^{\circ}$ через 5° .
 4. Построить ДН антенны для углов $0-180^{\circ}$, определить ширину главного лепестка на уровне половинной мощности (уровень $0,707$ по напряженности электрического поля) и уровень излучения первого бокового лепестка в децибелах.
 5. Разработать систему питания антенны коаксиальным фидером таким образом, чтобы выполнялись условия возбуждения с заданным сдвигом по фазе Ψ между токами в соседних излучателях при равенстве амплитуд токов.
- /5/, с.65-85.

Таблица 5.

| Вариант № | $2l/\lambda$ | n | d/λ | Ψ , град. |
|-----------|--------------|-----|-------------|----------------|
| 1 | 0,5 | 2 | 0,25 | 0 |
| 2 | 0,5 | 2 | 0,25 | 90 |
| 3 | 0,5 | 3 | 0,25 | 90 |
| 4 | 0,5 | 4 | 0,25 | 90 |
| 5 | 1,0 | 2 | 0,25 | 90 |
| 6 | 0,5 | 4 | 0,5 | 0 |
| 7 | 1,0 | 6 | 0,75 | 0 |
| 8 | 0,5 | 4 | 0,5 | 180 |
| 9 | 0,5 | 8 | 0,75 | 0 |
| 10 | 1,0 | 2 | 1,0 | 180 |

Некоторые расчетные формулы к контрольной работе № 1.

Диаграмма направленности симметричного вибратора в свободном пространстве в Е-плоскости:

$$f_E(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta},$$

здесь угол θ отсчитывается от оси симметричного вибратора длиной $2l$.

Диаграмма направленности симметричного вибратора длиной $2l = 0,5\lambda$ в Е-плоскости:

$$f_E(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)}{\sin \varphi},$$

здесь угол φ отсчитывается от нормали к оси вибратора.

Диаграмма направленности линейной системы излучателей (множитель решетки):

$$f_n(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{n}{2}(kd \sin \theta - \psi)\right]}{n \sin\left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \psi)\right]},$$

здесь n – число излучателей в линейке; d – расстояние между ними; Ψ – сдвиг по фазе между токами в соседних излучателях; θ – угол, отсчитываемый от нормали к оси системы.

Множитель земли для вертикально расположенного вибратора:

$$f(\varphi) = \cos(kh \sin \varphi).$$

Множитель земли для горизонтально расположенного вибратора:

$$f(\varphi) = \sin(kh \sin \varphi),$$

здесь угол φ отсчитывается от поверхности земли; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; h – высота подвеса вибратора; λ – длина волны в свободном пространстве.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

При расчетах необходимо пользоваться следующими буквенными обозначениями, которые являются обязательными:

λ – длина волны в свободном пространстве; Λ – длина волны в волноводе; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; a и b – размеры широкой и узкой стенок прямоугольного волновода соответственно; D – диаметр круглого раскрыва антенны; D_E и D_H – размеры прямоугольного раскрыва антенны в E и H – плоскостях соответственно; f – фокусное расстояние; ψ_0 – угол раскрыва антенны (от оси до края раскрыва); r – расстояние от фокуса до криволинейной поверхности зеркала или линзы (полярная координата профиля антенны); $\rho = (r \sin \Psi)$ – текущая координата на раскрыве; $\rho_0 = 0,5D$ – радиус раскрыва; ρ/ρ_0 – нормированная координата раскрыва; $2\theta_{P/2}$ и $2\varphi_{P/2}$ – ширина диаграммы направленности главного лепестка на уровне половинной мощности в главных плоскостях E и H соответственно; A – коэффициент, учитывающий закон распределения амплитуды поля на раскрыве; Δ – уровень поля на краю раскрыва; l_c – длина цилиндрической спирали вдоль оси; α и S – угол подъема и шаг катушки цилиндрической спирали; n – количество излучателей в линейной системе; d – расстояние между излучателями; h – высота подвеса излучателя над проводящей поверхностью; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы; N и t – коэффициент

преломления и геометрическая толщина линзы соответственно; $J_0(U)$ и $J_1(U)$ - функции Бесселя соответствующего порядка; $A_{p+1}(U)$ -лямбда -функции $(p+1)$ порядка от аргумента $U = (0,5 \text{ kD} \sin\theta)$ при $p = 0, 1, 2, \dots$ даны в Прил.1.

ЗАДАЧА № 1

Рассчитать антенну радиолокационной станции по данным табл.6.

Для этого необходимо:

1. Руководствуясь заданной длиной волны λ , выбрать тип линии передачи электромагнитных колебаний и стандартные геометрические размеры поперечного сечения линии.
2. По заданной ширине диаграммы направленности рассчитать диаметр раскрыва антенны или размер раскрыва в одной из главных плоскостей.
3. Определить необходимые геометрические размеры облучателя и изобразить их на рисунке.
4. Рассчитать и построить нормированные диаграммы направленности облучателя в Е и Н-плоскостях.
5. Рассчитать геометрические параметры зеркала (линзы): угол раскрыва, фокусное расстояние, профиль, толщину линзы.
6. Построить профиль антенны в полярной системе координат в соответствующем масштабе.
7. Рассчитать и построить в декартовой системе координат закон распределения нормированной амплитуды поля E/E_{\max} от координаты раскрыва ρ/ρ_0 , создаваемый на раскрыве диаграммой направленности облучателя.
8. Рассчитать теоретические функции E/E_{\max} , аппроксимирующие истинное распределение поля на раскрыве, задаваясь значениями $\rho/\rho_0 = 0 \dots 1$ с шагом 0,2 при степенях $p=1, 2, 3$ для конкретного значения уровня поля на краю Δ .
9. Выбрать аппроксимирующую функцию со степенью p , наиболее хорошо совпадающую с истинным законом распределения поля.
10. Рассчитать диаграмму направленности антенны, используя полученную степень аппроксимации и уровень поля на краю Δ .

Таблица 6.

| В н а р и а т | Тип антенны РЛС | Исходные данные | Лите- рату- ра |
|---------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| 1 | Диэлектрическая линзовая антенна с рупорным облучателем | $\lambda = 4$ см Размеры раскрыва рупора: $D_E = 0,89 \lambda$, $D_H = 1,25\lambda$. Ширина диаграммы линзы $2\theta_{P/2} = 2\varphi_{P/2} = 5^\circ$; $A = 84^\circ$; $\varepsilon = 2,6$; $f = D$. Размеры волновода МЭК-70: $a \times b = (34,85 \times 15,799)$, мм. | 5, с.271 -303, 359 |
| 2 | Параболическая зеркальная антенна с двух вибраторным облучателем, возбуждаемым прямоугольным волноводом | $\lambda = 3,5$ см ; Размеры волновода МЭК-81: $a \times b = (28,499 \times 12,624)$, мм. Расстояние между вибраторами $d_E = 0,25\lambda$. Ширина диаграммы зеркала: $2\theta_{P/2} = 2\varphi_{P/2} = 2,5^\circ$; $A = 84^\circ$; $\Psi_0 = 70^\circ$. | 5, с.72- 75, 333 - 362. |
| 3 | Параболическая зеркальная антенна с облучателем в виде пирамидального рупора | $\lambda = 3$ см Размеры волновода МЭК-100: $a \times b = (22,86 \times 10,16)$, мм. Ширина диаграммы зеркала: $2\theta_{P/2} = 2\varphi_{P/2} = 3^\circ$. $A = 84^\circ$; $\Psi_0 = 67^\circ$; $\Delta = 0,2$. | 5, с.271 -286, 333- 362. |
| 4 | Параболическая зеркальная антенна с облучателем в виде цилиндрической спирали с осевым излучением | $\lambda = 15$ см Длина спирали $l = 20$ см; угол намотки $\alpha = 14^\circ$; число витков $n = 5$. Ширина диаграммы зеркала $2\theta_{P/2} = 2\varphi_{P/2} = 4^\circ$; $\Psi_0 = 60^\circ$; $A = 84^\circ$. | 5, с.317 -323, 333- 362. |
| 5 | Параболическая зеркальная антенна с четырехвибраторным | $\lambda = 2$ см Размеры волновода МЭК-140: $a \times b = (15,799 \times 7,899)$, мм. Расстояние между парами | 5, с.73- 75, 333- |

| | | | |
|----|--|---|--|
| | облучателем, возбуждаемым открытым концом волновода | вибраторов в Е и Н-плоскостях соответственно: $d_E = 0,25\lambda$ и $d_H = 0,43\lambda$. Ширина диаграммы зеркала: $2\theta_{P/2}^0 = 2\varphi_{P/2}^0 = 1,5^\circ$; $\Psi_0 = 67^\circ$; $A = 84^\circ$. | 362. |
| 6 | Параболический цилиндр, облучаемый синфазной волноводно-щелевой антенной с продольными щелями на широкой стенке | $\lambda = 3,5$ см Расстояние между щелями: $d = \Lambda/2$; число щелей $n = 40$. Размеры волновода МЭК-81: $a \times b = (28,499 \times 12,624)$, мм. Ширина диаграммы в плоскости параболы $2\varphi_{P/2}^0 = 10^\circ$; $A = 61,9^\circ$; $\Delta = 0,2$. | 5, с.245 -248, 65- 82, 333- 389. |
| 7 | Диэлектрическая линзовая антенна, облучаемая линейной решеткой полуволновых синфазных вибраторов над широкой стенкой волновода, параллельных его оси | $\lambda = 5,5$ см; $n = 50$; $d = \Lambda/2$; $h = 0,25\lambda$ (высота подвеса вибраторов над волноводом). Размеры волновода МЭК-58: $a \times b = (40,39 \times 20,183)$, мм. Ширина диаграммы линзы: $2\varphi_{P/2}^0 = 7^\circ$; $f = D$; $A = 61,9^\circ$; $\varepsilon = 2,61$. | 5, с.67- 82, 287- 309. |
| 8 | Диэлектрическая линза с коническим рупорным облучателем | $\lambda = 2,5$ см. Диаметр рупора $D = 1,66 \lambda$. Ширина диаграммы линзы: $2\varphi_{P/2}^0 = 3^\circ$ - в Е-плоскости. $A = 84^\circ$; $\Psi_0 = 20^\circ$; $\varepsilon = 2,5$. | 5, с.271 -286, 287- 309, 359. |
| 9 | Параболический цилиндр, облучаемый волноводно-щелевой антенной со встречно-наклонными щелями на узкой стенке волновода | $\lambda = 3,2$ см; $n = 20$ шт.; $d = \Lambda/2$ Размеры волновода МЭК-100: $a \times b = (22,86 \times 10,16)$, мм. Ширина диаграммы параболы $2\varphi_{P/2}^0 = 12^\circ$; $A = 61,9^\circ$; $\Psi_0 = 70^\circ$. | 5, с.245 -248, 67- 82, 333- 389. |
| 10 | Металлопластинчатая линза, облучаемая пирамидальным рупором | $\lambda = 2,5$ см. Размеры раскрыва рупора: $D_E = 1,8 \lambda$; $D_H = 2,6 \lambda$. Размеры волновода МЭК-120: | 5, с.271 -286, 287- |

| | | |
|--|--|------|
| | $a \times b = (19,05 \times 9,529)$, мм. | 309, |
| | Ширина диаграммы линзы: | 359. |
| | $2\theta_{P/2} = 2\varphi_{P/2} = 1^\circ$; | |
| | $A = 84^\circ$; $\Psi_0 = 25^\circ$; $N = 0,5$. | |

Некоторые расчетные формулы к контрольной работе № 2

Облучатели антенн

Диаграмма направленности двух параллельных полуволновых симметричных вибраторов, образующих систему антенна-рефлектор при расстоянии между ними $d = 0,25\lambda$ и сдвиге токов по фазе на $\Psi = 90^\circ$, рассчитывается в Е- и Н-плоскостях соответственно по формулам:

$$f_E(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cos\left[\frac{\pi}{4}(1 - \cos \theta)\right],$$

$$f_H(\varphi) = \cos\left[\frac{\pi}{4}(1 - \cos \varphi)\right],$$

здесь углы θ и φ отсчитываются от оси линейной системы вибратор-рефлектор.

Диаграмма направленности четырех вибраторного облучателя в Е-плоскости соответствует диаграмме системы антенна-рефлектор, а в Н-плоскости рассчитывается по выражению:

$$f_H(\varphi) = \left[\cos\frac{\pi}{4}(1 - \cos \varphi)\right] \left[\cos\left(\frac{1}{2}kd_H \sin \varphi\right)\right].$$

Диаграммы направленности симметричного вибратора, расположенного на высоте h над поверхностью волновода, рассчитываются по формулам:

$$f_E(\theta) = \left[\left(\cos\frac{\pi}{2} \sin \theta\right) / \cos \theta\right] \left[\sin(kh \cos \theta)\right],$$

$$f_H(\varphi) = \sin(kh \cos \varphi),$$

здесь углы отсчитываются от нормали к оси вибратора.

Диаграмма направленности системы из n направленных излучателей рассчитывается по теореме перемножения как произведение диаграммы направленности одного излучателя $f_1(\theta)$ на множитель решетки - диаграмму направленности системы из n воображаемых ненаправленных излучателей $f_n(\theta)$. Выражение для $f_n(\theta)$ приведено в расчетных формулах к контрольной работе № 1.

Диаграмма направленности одной полуволновой щели на проводящем экране в Н-плоскости рассчитывается по формуле для диаграммы направленности полуволнового симметричного вибратора в Е-плоскости.

Ширина диаграммы направленности линейной системы синфазных излучателей связана с их числом n и расстоянием между ними d соотношением:

$$2 \theta_{P/2} = 51^\circ \frac{\lambda}{nd}.$$

При расстоянии между излучателями $d = \Lambda/2$ длину волны в прямоугольном волноводе с волной типа H_{10} можно рассчитать по выражению:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}.$$

Диаграммы направленности пирамидального рупора с радиальной длиной, обеспечивающей допустимые фазовые искажения в раскрыве, можно рассчитать по выражениям:

$$f_E(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin U}{U},$$

$$f_H(\varphi) = \frac{1 + \cos \varphi}{2} \frac{\cos U}{1 - (2\pi/U)^2}.$$

Диаграммы направленности конического рупора с волной типа H_{11} рассчитываются по выражениям:

$$f_E(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \Lambda_1(U),$$

$$f_H(\varphi) = \frac{1 + \cos \varphi}{2} \frac{2J_0(U) - \Lambda_1(U)}{1 - (U/1,84)^2},$$

где $U = \frac{kD}{2} \sin \theta$; D - диаметр раскрыва рупора; $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число; углы θ и φ отсчитываются от нормали к плоскости раскрыва рупора.

Зеркальные и линзовые антенны

Ширина диаграммы направленности антенны связана с размерами раскрыва D , длиной волны λ и амплитудным коэффициентом A соотношением:

$$2\theta_{P/2} = A^0 \frac{\lambda}{D}$$

Фокусное расстояние f параболической антенны связано с углом раскрыва ψ_0 соотношением:

$$f = \frac{D}{4} \operatorname{ctg} \frac{\psi_0}{2}$$

Профиль параболической антенны в полярной системе координат рассчитывается по выражению:

$$r(\psi) = \frac{2f}{1 + \cos \psi}.$$

Переход от угловых координат ψ зеркала к нормированным координатам раскрыва ρ/ρ_0 осуществляется с учетом того, что $\rho_0 = D/2$ а

$$\rho = r(\psi) \sin \psi.$$

Распределение амплитуды поля на круглом раскрыве зеркальной параболической антенны:

$$E/E_{\max} = \left[\cos^2 \frac{\psi}{2} \right] f_{\text{обл}}(\psi),$$

на прямоугольном раскрыве:

$$E/E_{\max} = \left[\cos \frac{\psi}{2} \right] f_{\text{обл}}(\psi).$$

Теоретическая функция, аппроксимирующая распределение амплитуды поля на синфазном раскрыве антенны, рассчитывается по формулам:

- для круглого раскрыва

$$E/E_{\max} = \Delta + (1 - \Delta) [1 - (\rho/\rho_0)^2]^p,$$

-для прямоугольного раскрыва

$$E/E_{\max} = \Delta + (1 - \Delta) \cos^p (\pi\rho/2\rho_0),$$

где $p = 0, 1, 2, 3 \dots$

Определив степень p аппроксимирующей поле на раскрыве функции, можно рассчитать диаграмму направленности антенны.

Диаграмма направленности антенны с круглым излучающим раскрывом рассчитывается по формуле:

$$f(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \left[\Delta A_1(U) + \frac{1 - \Delta}{p+1} A_{p+1}(U) \right] / \left[\Delta + \frac{1 - \Delta}{p+1} \right].$$

Диаграмма направленности антенны с прямоугольным раскрывом при степени аппроксимирующей функции $p = 1$ рассчитывается по формуле:

$$f(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \left[\Delta \frac{\sin U}{U} + \frac{2(1 - \Delta)}{\pi} \frac{\cos U}{1 - \left(\frac{2U}{\pi}\right)^2} \right] / \frac{\Delta + 2(1 - \Delta)}{\pi}.$$

Уравнение профиля диэлектрической линзовой антенны в полярной системе координат:

$$r(\psi) = f \frac{N - 1}{N \cos\psi - 1},$$

-для металлопластинчатой линзы:

$$r(\psi) = f \frac{1 - N}{1 - N \cos\psi}.$$

Толщина диэлектрической линзы:

$$t = - \frac{f}{N + 1} + \sqrt{\frac{f^2}{(N + 1)^2} + \frac{D^2}{4(N^2 - 1)^2}},$$

-металлопластинчатой линзы:

$$t = \frac{f}{N + 1} - \sqrt{\frac{f^2}{(N + 1)^2} + \frac{D^2}{4(1 - N^2)^2}}.$$

Угол раскрыва диэлектрической линзы:

$$\psi_0 = 2 \operatorname{arctg} \frac{2t(N-1)}{D},$$

-металлопластинчатой линзы:

$$\psi_0 = 2 \operatorname{arctg} \frac{2t(1-N)}{D}.$$

Распределение поля, создаваемое облучателем, на круглом раскрыве диэлектрической линзы, рассчитывается по формуле:

$$\frac{E}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{(N \cos \psi - 1)^3}{(N-1)^2(N - \cos \psi)}} f_{\text{обл}}(\psi),$$

-на прямоугольном раскрыве диэлектрической линзы:

$$\frac{E}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{(N \cos \psi - 1)^2}{(N-1)(N - \cos \psi)}} f_{\text{обл}}(\psi).$$

Распределение поля, создаваемое облучателем на круглом раскрыве металлопластинчатой линзы, рассчитывается по формуле:

$$\frac{E}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{(1 - N \cos \psi)^3}{(1-N)^2(\cos \psi - N)}} f_{\text{обл}}(\psi),$$

-на прямоугольном раскрыве металлопластинчатой линзы:

$$\frac{E}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{(1 - N \cos \psi)^2}{(1-N)(\cos \psi - N)}} f_{\text{обл}}(\psi).$$

Приложение 1

| U | $J_0(U)$ | $J_1(U)$ | $\Lambda_1(U)$ | $\Lambda_2(U)$ | $\Lambda_3(U)$ |
|-----|----------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 1,0 | 0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,1 | 0,997 | 0,0499 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 0,2 | 0,990 | 0,0995 | 0,995 | 0,997 | 0,997 |
| 0,3 | 0,978 | 0,1483 | 0,988 | 0,992 | 0,994 |
| 0,4 | 0,960 | 0,1960 | 0,980 | 0,987 | 0,990 |
| 0,5 | 0,938 | 0,2422 | 0,969 | 0,979 | 0,984 |
| 0,6 | 0,912 | 0,2867 | 0,956 | 0,970 | 0,978 |
| 0,7 | 0,861 | 0,3289 | 0,939 | 0,960 | 0,970 |
| 0,8 | 0,846 | 0,3688 | 0,922 | 0,948 | 0,961 |
| 0,9 | 0,807 | 0,4059 | 0,902 | 0,934 | 0,950 |
| 1,0 | 0,765 | 0,4400 | 0,880 | 0,919 | 0,939 |
| 1,1 | 0,719 | 0,4710 | 0,856 | 0,903 | 0,927 |
| 1,2 | 0,671 | 0,4982 | 0,830 | 0,885 | 0,913 |
| 1,3 | 0,620 | 0,5220 | 0,803 | 0,866 | 0,899 |
| 1,4 | 0,567 | 0,5419 | 0,774 | 0,846 | 0,883 |
| 1,5 | 0,512 | 0,5579 | 0,744 | 0,825 | 0,867 |
| 1,6 | 0,455 | 0,5698 | 0,712 | 0,803 | 0,850 |
| 1,7 | 0,398 | 0,5777 | 0,680 | 0,780 | 0,832 |
| 1,8 | 0,340 | 0,5815 | 0,646 | 0,756 | 0,813 |
| 1,9 | 0,282 | 0,5811 | 0,612 | 0,731 | 0,794 |
| 2,0 | 0,224 | 0,5767 | 0,577 | 0,706 | 0,774 |
| 2,1 | 0,167 | 0,5682 | 0,541 | 0,679 | 0,753 |
| 2,2 | 0,110 | 0,5559 | 0,505 | 0,653 | 0,732 |
| 2,3 | 0,055 | 0,5400 | 0,470 | 0,626 | 0,710 |
| 2,4 | 0,002 | 0,5201 | 0,433 | 0,598 | 0,688 |
| 2,5 | -0,048 | 0,4970 | 0,398 | 0,571 | 0,665 |
| 2,6 | -0,097 | 0,4708 | 0,362 | 0,543 | 0,642 |
| 2,7 | -0,142 | 0,4416 | 0,327 | 0,515 | 0,619 |
| 2,8 | -0,185 | 0,4100 | 0,293 | 0,487 | 0,596 |
| 2,9 | -0,224 | 0,3754 | 0,259 | 0,460 | 0,573 |
| 3,0 | -0,260 | 0,3390 | 0,226 | 0,432 | 0,549 |
| 3,1 | -0,292 | 0,3009 | 0,194 | 0,405 | 0,526 |
| 3,2 | -0,320 | 0,2613 | 0,164 | 0,378 | 0,502 |
| 3,3 | -0,344 | 0,2206 | 0,134 | 0,351 | 0,480 |
| 3,4 | -0,364 | 0,1792 | 0,105 | 0,325 | 0,456 |
| 3,5 | -0,380 | 0,1373 | 0,078 | 0,299 | 0,433 |
| 3,6 | -0,392 | 0,0955 | 0,053 | 0,274 | 0,410 |
| 3,7 | -0,399 | 0,0538 | 0,029 | 0,250 | 0,388 |
| 3,8 | -0,402 | 0,0128 | 0,007 | 0,227 | 0,366 |

| | | | | | |
|-----|--------|---------|--------|--------|--------|
| 3,9 | -0,402 | -0,0272 | -0,014 | 0,204 | 0,344 |
| 4,0 | -0,397 | -0,0660 | -0,033 | 0,182 | 0,323 |
| 4,1 | -0,389 | -0,1032 | -0,050 | 0,161 | 0,302 |
| 4,2 | -0,376 | -0,1386 | -0,066 | 0,141 | 0,281 |
| 4,3 | -0,361 | -0,1718 | -0,080 | 0,122 | 0,262 |
| 4,4 | -0,342 | -0,2030 | -0,092 | 0,103 | 0,242 |
| 4,5 | -0,320 | -0,2310 | -0,103 | 0,086 | 0,224 |
| 4,6 | -0,296 | -0,2565 | -0,111 | 0,070 | 0,206 |
| 4,7 | -0,270 | -0,2790 | -0,119 | 0,055 | 0,188 |
| 4,8 | -0,240 | -0,2984 | -0,124 | 0,040 | 0,171 |
| 4,9 | -0,210 | -0,3150 | -0,128 | 0,027 | 0,155 |
| 5,0 | -0,177 | -0,3275 | -0,131 | 0,015 | 0,140 |
| 5,1 | -0,144 | -0,3370 | -0,132 | 0,004 | 0,125 |
| 5,2 | -0,110 | -0,3432 | -0,132 | -0,006 | 0,111 |
| 5,3 | -0,076 | -0,3459 | -0,130 | -0,016 | 0,098 |
| 5,4 | -0,041 | -0,3453 | -0,128 | -0,024 | 0,086 |
| 5,5 | -0,007 | -0,3414 | -0,124 | -0,031 | 0,074 |
| 5,6 | 0,027 | -0,3343 | -0,119 | -0,037 | 0,063 |
| 5,7 | 0,060 | -0,3241 | -0,114 | -0,043 | 0,052 |
| 5,8 | 0,092 | -0,3110 | -0,107 | -0,047 | 0,043 |
| 5,9 | 0,122 | -0,2951 | -0,100 | -0,051 | 0,034 |
| 6,0 | 0,151 | -0,2770 | -0,092 | -0,054 | 0,025 |
| 6,1 | 0,177 | -0,2560 | -0,084 | -0,056 | 0,018 |
| 6,2 | 0,202 | -0,2329 | -0,075 | -0,058 | 0,011 |
| 6,3 | 0,224 | -0,2080 | -0,066 | -0,058 | 0,005 |
| 6,4 | 0,243 | -0,1816 | -0,057 | -0,059 | -0,001 |
| 6,5 | 0,260 | -0,1538 | -0,047 | -0,058 | -0,006 |
| 6,6 | 0,274 | -0,1249 | -0,038 | -0,057 | -0,011 |
| 6,7 | 0,285 | -0,0953 | -0,028 | -0,056 | -0,015 |
| 6,8 | 0,293 | -0,0652 | -0,019 | -0,054 | -0,018 |
| 6,9 | 0,298 | -0,0349 | -0,010 | -0,052 | -0,021 |
| 7,0 | 0,300 | -0,0047 | -0,001 | -0,049 | -0,023 |
| 7,1 | 0,299 | 0,0251 | -0,007 | -0,046 | -0,025 |
| 7,2 | 0,295 | 0,0543 | 0,015 | -0,043 | -0,027 |
| 7,3 | 0,288 | 0,0826 | 0,022 | -0,039 | -0,028 |
| 7,4 | 0,278 | 0,1096 | 0,029 | -0,036 | -0,029 |
| 7,5 | 0,266 | 0,1352 | 0,036 | -0,033 | -0,029 |
| 7,6 | 0,251 | 0,1592 | 0,042 | -0,029 | -0,029 |
| 7,7 | 0,234 | 0,1813 | 0,047 | -0,025 | -0,029 |
| 7,8 | 0,215 | 0,2013 | 0,052 | -0,022 | -0,029 |
| 7,9 | 0,194 | 0,2191 | 0,055 | -0,018 | -0,028 |
| 8,0 | 0,171 | 0,2346 | 0,058 | -0,014 | -0,027 |
| 8,1 | 0,147 | 0,2476 | 0,061 | -0,010 | -0,026 |
| 8,2 | 0,122 | 0,2579 | 0,063 | -0,007 | -0,025 |

| | | | | | |
|------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 8,3 | 0,096 | 0,2657 | 0,064 | -0,004 | -0,024 |
| 8,4 | 0,069 | 0,2707 | 0,065 | -0,001 | -0,022 |
| 8,5 | 0,042 | 0,2731 | 0,064 | 0,002 | -0,020 |
| 8,6 | 0,015 | 0,2727 | 0,063 | 0,005 | -0,019 |
| 8,7 | -0,012 | 0,2697 | 0,062 | 0,008 | -0,017 |
| 8,8 | -0,089 | 0,2640 | 0,060 | 0,010 | -0,015 |
| 8,9 | -0,065 | 0,2559 | 0,057 | 0,012 | -0,014 |
| 9,0 | -0,090 | 0,2453 | 0,054 | 0,014 | -0,012 |
| 9,1 | -0,114 | 0,2324 | 0,051 | 0,016 | -0,010 |
| 9,2 | -0,137 | 0,2174 | 0,047 | 0,017 | -0,008 |
| 9,3 | -0,158 | 0,2004 | 0,043 | 0,018 | -0,007 |
| 9,4 | -0,176 | 0,1816 | 0,039 | 0,019 | -0,005 |
| 9,5 | -0,194 | 0,1612 | 0,034 | 0,020 | -0,004 |
| 9,6 | -0,209 | 0,1395 | 0,029 | 0,021 | -0,002 |
| 9,7 | -0,222 | 0,1166 | 0,024 | 0,021 | -0,001 |
| 9,8 | -0,232 | 0,0930 | 0,019 | 0,021 | 0,001 |
| 9,9 | -0,240 | 0,0684 | 0,014 | 0,021 | 0,002 |
| 10,0 | -0,246 | 0,0435 | 0,009 | 0,020 | 0,003 |
| 10,1 | -0,249 | 0,0184 | 0,004 | 0,019 | 0,004 |
| 10,2 | -0,250 | -0,0066 | -0,001 | 0,019 | 0,005 |
| 10,3 | -0,248 | -0,0313 | -0,006 | 0,018 | 0,005 |
| 10,4 | -0,243 | -0,0554 | -0,011 | 0,017 | 0,006 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| 1. Пояснительная записка..... | 1 |
| 2. Учебно-методические материалы..... | 3 |
| 3. Содержание разделов программ дисциплин..... | 4 |
| 3.1. Содержание раздела «Устройства СВЧ»..... | 4 |
| 3.2. Содержание раздела «Антенны СВЧ»..... | 6 |
| 4. Методические указания к выполнению контрольных заданий..... | 10 |
| 4.1. Контрольные работы, выполняемые в семестре..... | 12 |
| Контрольная работа №1..... | 12 |
| Некоторые расчетные формулы к КР №1..... | 14 |
| Контрольная работа №2..... | 15 |
| Некоторые расчетные формулы к КР №2..... | 19 |
| Приложение..... | 24 |