



**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
И КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧ и КР)**

Г.Г. ГОШИН

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

**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
(СВЧ и КР)

Утверждаю:
Зав. кафедрой СВЧ и КР

_____ С.Н. Шарангович

«__» сентября 2010г.

Устройства СВЧ и антенны

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

Разработчик:
профессор кафедры СВЧ и КР
Г. Г. Гошин

2010

УДК 621.396.67

Рецензент:

профессор кафедры СВЧ и КР

С. Н. Шарангович

Гошин Г. Г.

Устройства СВЧ и антенны: Учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы студентов / Г. Г. Гошин. – Томск: ТУСУР, 2010. – 42 с.

Самостоятельная работа формирует важнейшие социально профессиональные компетенции студента. Целью пособия является оказание методической помощи в проведении самостоятельной работы при изучении дисциплины «Устройства СВЧ и антенны», входящей в блок общепрофессиональных дисциплин по направлению «Радиотехника».

Приводится программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылкой на учебную литературу. Представлены темы аудиторных практических и лабораторных занятий. Приведен перечень тем расчетных домашних заданий и даны примеры решения типовых задач. Приведен список экзаменационных вопросов.

Методические указания предназначены для студентов очной, очно-заочной, заочной и дистанционной форм обучения по специальности 210302 «Радиотехника» и могут быть использованы студентами, обучающимися по другим специальностям направления «Радиотехника».

УДК 621.396.67

© Гошин Г. Г.

© ТУСУР, 2010

Содержание

Введение	5
1. Общие положения.....	6
2. Содержание разделов дисциплины.....	7
2.1. Разделы лекционного курса.....	7
2.2. Разделы, вынесенные на самостоятельную работу.....	11
3. Темы практических занятий.....	12
4. Примеры решения типовых задач.....	13
5. Лабораторные занятия	25
6. Методика текущего контроля освоения дисциплины.....	26
7. Вопросы. входящие в экзаменационные билеты.....	27
7.1. Линии передачи, устройства СВЧ.....	27
7.2. Антенны.....	29
8. Рекомендуемая литература	33
Приложение 1. Публикация результатов научно-исследовательских работ....	37
Приложение 2. Основные принципы подготовки презентации в Power Point....	39
Приложение 3. Варианты домашних расчетных заданий	41

ВВЕДЕНИЕ.

Самостоятельная работа студентов является неотъемлемой частью учебного процесса в подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи. Самостоятельная работа – способ активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него профессиональных знаний и умений без непосредственного участия в этом процессе преподавателей. Особое значение самостоятельная работа имеет для студентов дистанционного, заочного и вечернего обучения. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие социально-профессиональные компетенции будущего специалиста.

Компетентностный подход к подготовке специалистов предусматривает эффективное взаимодействие ТУСУРа с работодателями и профессионалами. Кафедра организует консультации, приглашает студентов на научно-технические семинары, на обсуждение рефератов, в которых освещаются проблемные материалы. В пользование студентам представляются библиографические списки, имеющиеся копии из отечественных и зарубежных источников, в том числе в электронном виде. Кафедра организует лекции с приглашением специалистов-практиков и посещение предприятий, владеющих современными технологиями, производственной базой и оборудованием для производства элементов и устройств СВЧ, а также антенн различного назначения.

Неумение решать вопросы самообразования порождает в студенческой среде многообразные негативные последствия: приспособленчество, некритический склад мышления, пассивность (познавательная, трудовая, организаторская), неумение и нежелание брать на себя ответственность за свои поступки и т.п.

Мероприятия, создающие предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы:

- обеспечение информационными ресурсами (справочники, учебные пособия, базы данных, пакеты прикладных программ и т.п.);
- методические материалы (указания по выполнению лабораторных работ, руководства, пособия, сборники задач);
- контролирующие материалы (тесты);
- материальные ресурсы (рабочие места с компьютерами и измерительным оборудованием);
- консультации преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и/или практических результатов, полученных студентом самостоятельно (конференции, олимпиады, конкурсы);

Контролируемая самостоятельная работа направлена на углубление и закрепление знаний студентов, развитие аналитических навыков по тематике курса.

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. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

1.1. Цели и задачи дисциплины.

Дисциплина «Устройства СВЧ и антенны» относится к блоку общепрофессиональных дисциплин, читаемых для студентов специальности 210302 «Радиотехника», и является дисциплиной, устанавливаемой Государственным образовательным стандартом «Государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника по направлению 210300 «Радиотехника», утвержденным 17.03.2000г. (рег. № 151тех/дс). Стандарт определяет цели и задачи дисциплины.

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

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- получение необходимых знаний по физическим и теоретическим основам построения и функционирования устройств СВЧ и антенн;
- получение необходимых знаний по методам расчета основных параметров и характеристик устройств СВЧ и антенн, по основам их проектирования.

1.2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- **знать** физические основы, принципы построения и функционирования устройств СВЧ и антенн, методы расчета их основных параметров и характеристик;
- **уметь** определять и обосновывать целесообразность использования конкретных устройств СВЧ и антенн в зависимости от предъявляемых к ним техническим требованиям;
- **иметь** навыки моделирования и проектирования устройств СВЧ и антенн с использованием стандартных программных продуктов (в рамках группового проектного обучения).

1.3. Объем дисциплины и виды учебной работы.

В зависимости от формы обучения дисциплина изучается на 3-м или 4-м курсах. Виды занятий и отводимые на них часы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Формы обучения и виды учебной работы	Очная форма	Очно-заочная форма	Заочная форма
Общее количество часов	170	170	170
Лекции	45	26	14
Лабораторные занятия	27	9	12
Практические занятия	18	9	4
Самостоятельная работа	80	126	140
Вид итогового контроля	Экзамен	Экзамен	Экзамен

1.4. Разделы дисциплины и виды аудиторных занятий.

По учебному плану на аудиторные занятия дневной формы обучения отводится 90 часов. Общая информация о темах и видах аудиторных занятий, а также отводимого для этих целей количества часов представлена в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции (45 час)	Лабораторные занятия (27 час)	Практические занятия (18 час)
1	Линии передачи	4		4
2	Трансформация сопротивлений в линии с нагрузкой и согласование	4	4	4
3	Объёмные резонаторы, фильтры, согласующие и управляющие устройства СВЧ	4	7	
4	Матричное описание и методы расчета устройств СВЧ	8		2
5	Основы теории антенн	2		
6	Параметры антенных систем в передающем и приёмном режимах	5		2
7	Вибраторные и щелевые антенны	4		2
8	Линейные излучающие системы	5	4	2
9	Апертурные антенны	5	12	2
10	Фазированные антенные решетки	2		
11	Действие СВЧ излучения и проблемы ЭМС	2		

1.5. Объём и виды самостоятельной работы

Самостоятельная работа студентов определяется Государственным образовательным стандартом, а также рабочей программой по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны», утвержденной в ТУСУРе, содержанием учебников, учебных пособий и методических руководств.

К видам самостоятельной работы относятся:

- систематическое чтение и конспектирование учебной литературы;
- самостоятельное углубленное изучение ключевых вопросов учебной программы;
- подготовка к практическим занятиям;
- выполнение индивидуальных расчетных заданий (решение задач);
- написание рефератов по разделам дисциплины, отведенным на самостоятельную проработку;
- подготовка к лабораторным занятиям и составление отчетов;
- подготовка к контрольным работам и экзамену.

Преподаватель знакомит студентов с рабочей программой курса, списком литературы, методикой работы над литературой, порядком и методикой составления конспектов лекций, выполнением индивидуальных расчетных заданий, на-

писанием рефератов и составлением отчетов, подготовкой в случае необходимости презентаций.

По учебному плану на самостоятельную работу дневной формы обучения отводится 80 часов. Наименование работ и отводимое на них количество часов приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	Наименование работ	Кол-во часов	Форма контроля
1.	Подготовка к практическим занятиям и выполнение домашних заданий	8	Задание. Рейтинг
2.	Подготовка к лабораторным работам и оформление отчетов	17	Отчет. Рейтинг
3.	Подготовка к контрольной работе и собеседованию	11	Рейтинг
4.	Изучение вопросов, вынесенных на самостоятельную работу	16	Экзамен
5.	Подготовка к экзамену	28	Экзамен
	Всего часов	80	

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ.

2.1. Разделы лекционного курса.

2.1.1. Линии передачи.

Введение. Основные понятия и определения. Роль и значение антенно-фидерных устройств. Параметры и режимы в линиях передачи (дисперсионная характеристика, затухание, электрическая прочность, волновое сопротивление, КБВ и др.). Математическая модель линий передачи СВЧ. Обзор наиболее распространенных линий (двухпроводные, коаксиальные, полосковые, волноводные, волноводные диэлектрические, с поверхностной волной, волоконно-оптические).

Методические указания. Антенно-фидерные устройства являются неотъемлемой частью любой радиолинии. В разных диапазонах частот используются вполне определенные линии передачи (ЛП) или тракты. Элементы тракта и устройства включают или используют различные типы ЛП. Поэтому одни и те же элементы или устройства в различных частотных диапазонах имеют различные конструктивные реализации. Эти вопросы хорошо изложены как в учебной [1 – 3, 13, 14], так и в справочной литературе [41 – 43]. Необходимо знать и помнить параметры линий, типы распространяющихся в них волн, конструкции.

2.1.2. Трансформация сопротивлений в линии с нагрузкой и согласование.

Формула трансформация сопротивлений. Эквивалентные и резонансные сечения. Реактивные нагрузки (шлейфы). Круговая диаграмма, её построение и применение. Узкополосное согласование. Четвертьволновый согласующий трансформатор. Метод компенсирующих реактивностей согласования произвольных нагрузок. Реактивные согласующие элементы в волноводной технике.

Методические указания. В линиях передачи оптимальным является согласованный режим или режим бегущей волны. Существенное значение согласование имеет на СВЧ. Круговая диаграмма позволят наглядно и с достаточной для практики точностью выполнить согласование, а также решать другие задачи. Ей надо уметь пользоваться. Вопросы этого пункта в учебной литературе освещены достаточно полно (см., например, [1 – 3]).

2.1.3. Объемные резонаторы, фильтры, согласующие и управляющие устройства СВЧ.

Объемные резонаторы на круглом, прямоугольном и коаксиальном волноводах. Типы колебаний, структура поля, резонансные частоты. Добротности собственная и нагруженная. Прототипы фильтров с оптимальными частотными характеристиками. Способы реализации резонансных элементов для фильтров СВЧ. Ступенчатые и плавные согласующие переходы. Классификация управляющих устройств. Механические аттенюаторы и фазовращатели.

Методические указания. Объемные резонаторы являются колебательными контурами СВЧ диапазона и представляют собой короткозамкнутые отрезки волноведущих структур. Теория фильтров основана на аппроксимации их электрических характеристик в заданном диапазоне частот и расчету параметров прототипа, используя методы теории цепей. Ступенчатые и плавные согласующие переходы позволяют выполнить согласование в широкой полосе частот. Их расчет проводят по той же методике, что и расчет фильтров. Конкретная реализация всех устройств зависит от диапазона частот и применяемых типов ЛП. Использовать учебную [1 – 4, 10, 18] и справочную [42 – 44] литературу.

2.1.4. Матричное описание и методы расчета устройств СВЧ.

Волновой и классический подходы. Виды матриц (рассеяния, сопротивлений, проводимостей, передачи) и соотношения между ними. Ограничения на элементы матриц, налагаемые условиями взаимности, симметрии и отсутствия потерь. Примеры составления матриц для четырёх-, шести- и восьмиполосников. Каскадное соединение многополосников. Принцип декомпозиции. Алгоритм объединения устройств в общий тракт. Делители и направленные ответвители.

Методические указания. Волновой подход и волновая матрица рассеяния в теории цепей с распределенными параметрами нашли широкое применение в диапазоне СВЧ. При изучении материала обратить внимание на важность установления фундаментальных свойств многополосников, знание которых позволяет существенно упростить их расчет. Рассматриваемые вопросы широко освещены в литературе и для их изучения можно, например, использовать [1, 2, 14 – 18].

2.1.5. Основы теории антенн.

Электромагнитное поле излучающей системы в дальней, промежуточной, ближней зонах и его свойства. Принцип электродинамического подобия. Принципы построения сверхширокополосных антенн. Фундаментальные ограничения в области антенн.

Методические указания. Рассматриваемые вопросы в теории антенн относятся к фундаментальным. Характеристики направленности антенн рассчитыва-

ются и измеряются в дальней зоне, где они не зависят от расстояния. Ближняя зона примыкает непосредственно к антенне и определяет её входной импеданс. От поля ближней зоны зависит также полоса пропускания антенны, ее диапазонные свойства. При изучении материала пользоваться работами [1, 2, 7, 18, 31 – 34]. Принципы построения сверхширокополосных антенн достаточно подробно освещены в [20, 24]. Фундаментальные ограничения в области антенн изложены в [30].

2.1.6. Параметры и характеристики антенн в передающем и приёмном режимах.

Диаграмма направленности, её ширина, уровень бокового излучения. Поляризация и фазовые характеристики. Мощность излучения, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления. Действующая длина линейной антенны. Взаимосвязь между параметрами. Входные параметры антенны. Частотные свойства. Эквивалентная схема приёмной антенны. Энергетические соотношения в цепи приемной антенны на низких и высоких частотах. Эффективная площадь и шумовая температура приёмной антенны.

Методические указания. Сформулированные в этом пункте вопросы рассматриваются в большинстве учебных изданий, например в [1, 2, 7, 18,]. Вопросы не являются сложными для понимания, но все понятия и определения параметров и характеристик антенн необходимо знать и помнить. Следует также помнить о важности согласования антенно-фидерных трактов на высоких частотах.

2.1.7. Вибраторные и щелевые антенны.

Распределение тока в вибраторе. Симметричный вибратор, его диаграмма направленности, сопротивление излучения, КНД. Расчет входного сопротивления вибратора методом эквивалентных схем. Связанные вибраторы. Учет влияния Земли. Петлеобразный вибратор Пистолькорса. Широкополосные вибраторы. Особенности несимметричных вибраторов. Щелевая антенна в плоском экране. Диаграмма направленности и проводимость излучения щели. Щелевой излучатель в стенке прямоугольного волновода. Применения вибраторных и щелевых антенн.

Методические указания. Вибраторные антенны являются одними из наиболее распространенных типов антенн и находят различные применения в диапазонах от ВЧ до СВЧ включительно. Они просты в изготовлении и могут использоваться как самостоятельно, так и в составе сложных антенных систем. Последнее можно сказать и о щелевых антеннах, у которых есть ещё одно преимущество, – они являются не выступающими и находят применение в качестве бортовых антенн ряда транспортных средств. Материал по этим антеннам приводится во многих изданиях, например в [1, 2, 7, 10, 21, 25].

2.1.8. Линейные антенные системы.

Линейный излучатель с бегущей волной тока. Режимы излучения – поперечный, наклонный, осевой. Ширина луча, КНД. Влияние вида амплитудно-фазового распределения на параметры линейной антенны. Равномерная линейная антенная решетка. Подавление дифракционных максимумов. Антенны бегущей волны – спиральные, диэлектрические, директорные. Волноводно-щелевые антенные ре-

шетки. Применения.

Методические указания. Большая часть пункта (до антенн бегущей волны) относится к теории непрерывных и дискретных линейных систем с бегущей волной тока. Этот материал хорошо освещён в учебной литературе, например в [2, 7, 22]. Что касается антенн бегущей волны и волноводно-щелевых антенных решеток, то можно пользоваться литературой [1, 6, 10, 19].

2.1.9. Апертурные антенны.

Диаграмма направленности, КНД, эффективная поверхность плоского раскрыва. Апертурный метод расчета характеристик излучения. Волноводные и рупорные антенны. Линзовые антенны на замедляющих и ускоряющих линзах. Проектирование одно- и двухзеркальных антенн, оптимизация их характеристик. Спутниковые передающие антенны с контурными диаграммами (зонами обслуживания). Применения.

Методические указания. Апертурные антенны отличаются высокой направленностью и позволяют получать довольно узкие диаграммы направленности. Они находят широкое применение в диапазоне СВЧ, в том числе в качестве спутниковых антенн для связи и телевидения. В инженерной практике их расчет проводится приближенно апертурным методом, который достаточно подробно изложен в монографиях и учебной литературе [1, 2, 8, 9, 19, 20, 26, 27]. Более точные результаты можно получить, используя численные методы [35], в том числе специализированные пакеты прикладных программ [47 – 53]. Материал по спутниковым антеннам с контурными зонами обслуживания пока можно найти в журнальных статьях [36, 37].

2.1.10. Фазированные антенные решетки.

Плоские фазированные антенные решетки (ФАР). Способы размещения излучателей в апертуре ФАР и условия отсутствия дифракционных максимумов. Коэффициент усиления и характеристика согласования излучателя в составе ФАР. Ограничения на сектор сканирования и полосу рабочих частот ФАР из-за взаимной связи излучателей. Применения.

Методические указания. Фазированные антенные решетки отличаются не только высокой направленностью, но по сравнению с зеркальными антеннами и большими возможностями. Они позволяют получать многолучевые диаграммы направленности с независимо управляемыми лучами или обеспечивают широкоугольное сканирование пространства. Большой вклад в развитие теории и создание методов расчета ФАР внес коллектив под руководством Д. И. Воскресенского. Написанные этим коллективом книги в достаточном количестве имеются в библиотеке (см., например, [1, 11, 19]).

2.1.11. Действие СВЧ излучения и проблемы электромагнитной совместимости.

Действие излучения СВЧ диапазона на окружающую среду и человека. Защитные мероприятия при работе с устройствами на большом уровне мощности. Электромагнитная совместимость антенн и устройств СВЧ; пути решения проблемы (экранирование, применение развязывающих структур и поглощающих

материалов, формирование диаграмм направленности с низким уровнем заднего и боковых лепестков). Безэховые камеры для измерений характеристик направленности антенн.

Методические указания. Излучение диапазона СВЧ и более высоких частот обладает проникающим действием на живые организмы. При малых уровнях мощности находит применение в терапии, а при больших уровнях требует проведения различных защитных мероприятий [28]. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств, антенн и устройств СВЧ относится к числу тех проблем, которые необходимо решать при разработке и проектировании радиотехнических систем [1, 29].

2.2. Разделы, вынесенные на самостоятельную работу.

2.2.1. Типовые элементы и узлы трактов СВЧ

Переходы между однотипными линиями с различными геометрическими размерами поперечного сечения (волноводные, коаксиальные, полосковые). Переходы с одного типа линии на другой (коаксиально-волноводные, коаксиально-полосковые). Волноводные соединения, изгибы и повороты. Коаксиальные соединители. Нагрузки поглощающие объёмные и резистивные пленочные.

Методические указания. К типовым узлам и элементам, как и к включенным в тракт СВЧ устройствам, предъявляются требования их согласования с трактом в заданном диапазоне частот. Поскольку все они представляют собой включенные в тракт неоднородности, вблизи которых существуют не распространяющиеся волны высших типов и связанные с ними реактивные поля. Например, согласованные переходы между однотипными линиями с различными геометрическими размерами поперечного сечения могут быть плавными и ступенчатыми. При этом, чем длиннее переход, тем больше полоса согласования. В узкой полосе частот для согласования применяют реактивные элементы. Для изучения материала можно пользоваться учебной [1 – 4, 15, 16, 18, 19] и справочной [42 – 44] литературой.

2.2.2. Устройства СВЧ на ферритах

Ферриты и их свойства. Невзаимные устройства на основе эффекта Фарадея и с поперечно-подмагниченным ферритом (вентили). Трехплечий и четырёхплечий (фазовый) циркуляторы. Фазовращатели – взаимные и на основе поперечно-подмагниченного феррита).

Методические указания. Как известно, свойства феррита, помещенного в магнитное поле, зависят от амплитуды и направления приложенного поля. На этом явлении разработан ряд волноводных устройств СВЧ, нашедших широкое применение в радиотехнике. При изучении материала обратить внимание на физическую сторону явления, конструкции и характеристики устройств. Использовать литературу [1 – 3, 19].

2.2.3. Антенны малых электрических размеров

Общие свойства антенн малых электрических размеров. Элементарные излучатели линейной и круговой поляризации – электрический и магнитный диполи

Герца, рамка, турникетный излучатель, источник однонаправленного излучения (элемент Гюйгенса).

Методические указания. Антенны малых электрических размеров относятся к слабо направленным. На низких частотах они реально являются таковыми, поскольку их размеры могут быть значительно меньше длины волны. Электрически малые антенны используются также в измерениях в качестве датчиков напряженности электромагнитного поля. Этот материал можно найти в источниках [6, 7].

2.2.4. Особенности антенн различных диапазонов и назначения

Характерные особенности антенн в зависимости от применяемого диапазона волн. Антенны длинных, средних, коротких волн. Антенны УКВ. Активные приёмные антенны. Особенности бортовых антенных систем.

Методические указания. Конструкции антенн зависят не только от используемого диапазона частот, но и от назначения и предъявляемых требованиях к их характеристикам. При изучении материала обратить внимание на типы применяемых в различных диапазонах антенн, их конструктивных особенностях и способов возбуждения. Помнить о роли согласования в антенно-фидерном тракте на высоких частотах. Материал следует изучать, используя источники [5 – 10, 21, 23].

3. ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Решение задач способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний и позволяет закрепить в памяти формулы по расчету основных параметров фидеров (линий передачи), устройств СВЧ и антенн. При решении пользоваться сборником задач [12]. Варианты домашних заданий с номерами задач приведены в Приложении 3. Темы практических занятий сведены в таблицу 4.

Таблица 4

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических занятий (каждое занятие по 2 часа)
1	2.1.1	Расчет волноводных линий передачи
2	2.1.1	Расчет линий передачи с Т-волной
3	2.1.2	Трансформация сопротивлений в линии. Круговая диаграмма Вольперта-Смита
4	2.1.2	Согласование произвольных нагрузок. Контрольная работа
5	2.1.6	Расчет параметров антенн
6	2.1.7	Расчет вибраторных и щелевых антенн
7	2.1.8	Расчет линейных антенн и систем
8	2.1.9	Расчет апертурных антенн
9	2.1 – 2.2	Собеседование, подведение итогов

Ниже приведены примеры решения типовых задач, по две на каждую из восьми тем практических занятий.

4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ.

Задача1. Прямоугольный волновод с размерами поперечного сечения $a = 2,286$ см, $b = 1,016$ см возбуждается на частоте $f = 15$ ГГц. Определить, какие из распространяющихся типов магнитных волн возбуждаются в волноводе и каковы их длины.

Решение:

Сначала находим длину волны в свободном пространстве:

$$\lambda = c/f = 2 \text{ см.}$$

Из теории известно, что для распространяющихся типов волн должно выполняться условие $\lambda/\sqrt{\varepsilon\mu} < \lambda_{кр}^{mn}$. Критические длины волн в прямоугольном вол-

новоде определяются по формуле [12]: $\lambda_{кр}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}$.

В нашем случае

$$\lambda_{кр}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{2,286}\right)^2 + \left(\frac{n}{1,016}\right)^2}} = \frac{4,64}{\sqrt{(1,016m)^2 + (2,286n)^2}}.$$

Результаты вычислений заносим в таблицу:

m	n	$(1,016m)^2$	$(2,286n)^2$	$\lambda_{кр}, \text{ см}$
1	0	$(1,016)^2$	0	4,57
2	0	$(2,032)^2$	0	2,286
3	0	$(3,048)^2$	0	1,54
0	1	0	$(2,286)^2$	2,032
0	2	0	$(4,57)^2$	1,016

Длины волн в волноводе рассчитываем по формуле $\lambda_{\varepsilon} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр}^{mn})^2}}$.

Окончательно, распространяющимися типами волн будут:

$$H_{10} : \lambda_{кр}^{10} = 4,57 \text{ см, } \lambda_{\varepsilon} = 2,22 \text{ см;}$$

$$H_{20} : \lambda_{кр}^{20} = 2,286 \text{ см, } \lambda_{\varepsilon} = 4,13 \text{ см;}$$

$$H_{01} : \lambda_{кр}^{01} = 2,032 \text{ см, } \lambda_{\varepsilon} = 11,31 \text{ см.}$$

Задача 2. Определить длину волны (в волноводе), характеристическое сопротивление и коэффициент затухания в медном ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м) круглом воздушном волноводе диаметром $2a = 25,4$ мм при распространении в нем на частоте 10 ГГц волны типа E_{01} .

Решение:

Критическая длина волны E_{01} определяется по формуле $\lambda_{кр} = \frac{2\pi a}{v_{mn}}$,

где a — радиус волновода; v_{mn} — n -й корень уравнения $J_m(x) = 0$. Значения корней v_{mn} функций Бесселя $J_m(x)$ приведены в Табл. П.9 [12].

Тогда $\lambda_{кр} = 1,31 \cdot 2a = 1,31 \cdot 25,4 = 33,3$ мм.

Длина волны в волноводе равна

$$\lambda_{в} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{3}{\sqrt{1 - \left(\frac{3}{3,33}\right)^2}} = 6,91 \text{ см.}$$

Характеристическое сопротивление волновода находится по формуле [12]: $Z_c^{E_{mn}} = \frac{w_0}{\epsilon} \sqrt{\epsilon\mu - (\lambda/\lambda_{кр}^{mn})^2}$, где $w_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$ — волновое (характеристическое) сопротивление свободного пространства, Ом. Проводим вычисления

$$Z_c^{E_{01}} = 120\pi \sqrt{1 - (\lambda/2,62a)^2} = 377 \cdot 0,435 \cong 164 \text{ Ом.}$$

Коэффициент затухания на волне типа E_{01} рассчитываем по формуле [12]:

$$\alpha_m = \frac{8,69 R_s}{w_0 a \sqrt{1 - \left(\lambda/\lambda_{кр}\right)^2}},$$

из которой следует

$$\alpha_m \cong \frac{8,69 \cdot 0,026}{377 \cdot 1,27 \sqrt{1 - (3/3,33)^2}} \cong 0,001 \text{ дБ/м.}$$

При этом было учтено найденное по формуле (1.16) из [12] значение поверхностного сопротивления для меди $R_s = 0,026$ Ом.

Задача 3. Центрирование внутреннего проводника воздушного коаксиального волновода осуществляют с помощью диэлектрических шайб (рис. 1).

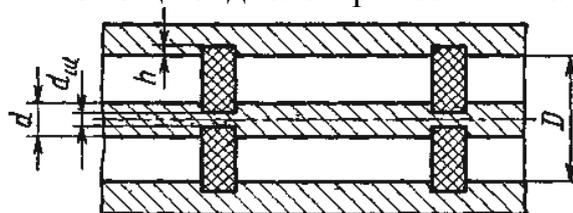


Рис. 1. Коаксиальный волновод

Рассчитать диаметр D волновода и глубину h кольцевых проточек в нем, исходя из условия отсутствия отражений. Волновое сопротивление линии $W_B = 70$ Ом, диаметр внутреннего проводника $d = 4,5$ мм, диаметр отверстия в шайбе $d_{ш} = 3,0$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость материала шайбы $\varepsilon = 2,3$. Потерями пренебречь.

Решение

Воздушную коаксиальную линию с шайбами приближенно можно рассматривать как последовательное соединение отрезков двух регулярных линий, одна из которых является воздушной коаксиальной линией с размерами d и D , а другая – коаксиальной линией, полностью заполненной диэлектриком и имеющей размеры $d_{ш}$ и $(D+2h)$. Мощность из одной линии в другую может быть передана без отражения, если их волновые сопротивления равны: $W_B = W_{ВД}$, где $W_{ВД}$ – волновое сопротивление линии, заполненной диэлектриком. Из формулы для волнового сопротивления коаксиального тракта в [12] имеем

$$W_B = 60 \ln\left(\frac{D}{4,5}\right) = 70 \text{ Ом}, \quad W_{ВД} = 60 \sqrt{\frac{1}{2,3}} \ln\left(\frac{D+2h}{3,0}\right).$$

Из первой формулы следует $D = 14,45$ мм. Приравняв затем оба этих выражения, получаем уравнение для нахождения h

$$70 = 39,56 \ln\left(\frac{14,45 + 2h}{3,0}\right),$$

корень которого равен $h = 1,58$ мм. Полученное решение является приближенным, кроме сказанного выше, ещё и потому, что не учитывает локальные возмущения поля из-за скачков диаметров проводников.

Задача 4. Рассчитать погонный коэффициент затухания в СПЛ с диэлектрической подложкой. Параметры линии: ширина проводника $b = 1,2$ мм, расстояние между проводником и заземленной пластиной $d = 1$ мм, толщина проводника $t = 0,05$ мм. Проводники выполнены из меди. Рабочая частота 6 ГГц. Параметры диэлектрика: $\varepsilon = 2,55$; $\text{tg}\delta = 8 \cdot 10^{-4}$.

Решение:

Общие потери складываются из потерь в металле и потерь в диэлектрике. Коэффициент ослабления α_d за счет потерь в диэлектрике определяется формулой [12]: $\alpha_d \cong \frac{27,3\sqrt{\varepsilon} \cdot \text{tg}\delta}{\lambda}$, из которой получаем $\alpha_d \cong 0,69$ дБ/м. Коэффициент ослабления α_m за счет потерь в металле определяется формулой [12]

$$\alpha_m = \frac{8,69R_s}{120\pi d} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{7 - 50t/d + b/d}{3,2(0,1 + t/d)(4 + b/d)}, \text{ из которой получаем } \alpha_m \cong 0,85 \text{ дБ/м.}$$

Полные погонные потери равны $\alpha_1 = \alpha_m + \alpha_d = 1,54 \text{ дБ/м}$.

Задача 5. Фидер, имеющий волновое сопротивление $W_\phi = 100 \text{ Ом}$ и длину $l = 0,3\lambda_B$, нагружен на сопротивление $Z_H = (50 + i80) \text{ Ом}$. Определить входное сопротивление фидера, пользуясь круговой диаграммой.

Решение:

Сначала определим нормированное сопротивление нагрузки

$$\bar{Z}_H = \frac{Z_H}{W_\phi} = \frac{50 + i80}{100} = 0,5 + i0,8.$$

Ему на круговой диаграмме соответствует точка, которая находится на пересечении окружности $\bar{R}_H = 0,5$ с дугой $\bar{X}_H = +0,8$. Окружность с центром в центре круговой диаграммы, проходящая через эту точку, соответствует значению КБВ в фидере, равному примерно 0,28. Найденную на диаграмме точку перемещаем по окружности $K_{БВ} = 0,28$ в направлении к генератору на относительное расстояние $l = 0,3\lambda_B$. В полученной точке пересекаются: окружность радиуса $\bar{R}_{ВХ} = 0,36$ и дуга $\bar{X}_{ВХ} = -0,49$. Искомое входное сопротивление имеет значение

$$Z_{ВХ} = W_\phi (\bar{R}_{ВХ} + i\bar{X}_{ВХ}) = 100(0,36 - i0,49) \text{ Ом} = (36 - i49) \text{ Ом}.$$

Задача 6. Линия передачи с волновым сопротивлением $W_\phi = 500 \text{ Ом}$ работает на волне длиной $\lambda_B = 20 \text{ см}$. Известно, что расстояние от нагрузки до ближайшего минимума напряжения составляет 7,2 см и в линии $K_{БВ} = 0,5$. Определить сопротивление Z_H и проводимость Y_H нагрузки.

Решение:

Сначала определяем сопротивление нагрузки. На диаграмме сопротивлений от линии минимумов напряжений по окружности $K_{БВ} = 0,5$ перемещаемся на расстояние $\frac{l}{\lambda_B} = \frac{7,2}{20} = 0,36$ в сторону нагрузки и эту точку соединяем с центром диаграммы. Пересечение соединяющей линии с окружностью $K_{БВ} = 0,5$ и даст значение нормированного сопротивления $\bar{Z}_H = 0,9 + i0,73$. После умножения на волновое сопротивление $W_\phi = 500 \text{ Ом}$ получим $Z_H = (450 + i365) \text{ Ом}$. Значение нормированной проводимости нагрузки на диаграмме сопротивлений находится в диаметрально противоположной точке на окружности $K_{БВ} = 0,5$ и равно $\bar{Y}_H = 0,72 - i0,64$. После деления на волновое сопротивление $W_\phi = 500 \text{ Ом}$ получим искомое значение проводимости нагрузки $Y_H = (1,44 \cdot 10^{-3} - i1,28 \cdot 10^{-3}) \text{ См}$.

Задача 7. Определить волновые сопротивления и диаметр внутреннего проводника участков двухступенчатого коаксиального воздушного ($\epsilon = 1$) трансформатора, предназначенного для согласования коаксиальной линии передачи, имеющей волновое сопротивление $W_B = 75$ Ом, с антенной, входное сопротивление которой $R_{вх} = 150$ Ом. Внутренний диаметр наружного проводника линии всюду одинаков и равен $D = 20$ мм.

Решение:

Волновые сопротивления трансформирующих секций определяем по формулам [12]:

$$W_{тp1} = \sqrt{W_B \sqrt{W_B R_{вх}}} = \sqrt{75 \sqrt{75 \cdot 150}} \text{ Ом} \approx 89 \text{ Ом},$$

$$W_{тp2} = \sqrt{R_{вх} \sqrt{W_B R_{вх}}} = \sqrt{150 \sqrt{75 \cdot 150}} \text{ Ом} \approx 126 \text{ Ом}.$$

Чтобы определить диаметр внутреннего проводника трансформатора, воспользуемся формулой (1.20) из [12] для волнового сопротивления коаксиальной линии:

$$W_{тp1} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d_1}; \quad \ln \frac{D}{d_1} = \frac{W_{тp1}}{60} = \frac{89}{60} \approx 1,48; \quad \frac{D}{d_1} \approx 4,4.$$

Откуда следует $d_1 = \frac{D}{4,4} = \frac{20}{4,4} \text{ мм} \approx 4,52 \text{ мм}.$

$$W_{тp2} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d_2}; \quad \ln \frac{D}{d_2} = \frac{W_{тp2}}{60} = \frac{126}{60} \approx 2,08; \quad \frac{D}{d_2} \approx 8.$$

Тогда $d_2 = \frac{D}{8} = \frac{20}{8} \text{ мм} \approx 2,44 \text{ мм}.$

Длина каждой секции должна равняться четверти длины волны в линии.

Задача 8. Реактивная проводимость симметричной емкостной диафрагмы, установленной в волноводном воздушном тракте сечением $2,3 \times 1$ см, составляет $B_C = 6,36 \cdot 10^{-4}$ См. На какой частоте согласован тракт, если ширина окна диафрагмы равна $\Delta b = 0,5$ см?

Решение: Из формулы (4.6) для B_C из [12]

$$B_C \approx 9,2 \frac{b}{W_B \lambda_B} \lg \csc \left(\frac{\pi \Delta b}{2b} \right) = \frac{9,2b \lg \csc(\pi \Delta b / 2b)}{60\pi^2 \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}} =$$

$$= \frac{9,2a[1 - (\lambda/2a)^2]}{60\pi^2 \lambda} \lg \csc(\pi \Delta b / 2b)$$

находим

$$\lambda = -\frac{41\pi a B_C}{\lg \operatorname{csc}\left(\frac{\pi \Delta b}{2b}\right)} + \sqrt{\left[\frac{41\pi B_C a}{\lg \operatorname{csc}\left(\frac{\pi \Delta b}{2b}\right)}\right]^2 + (2a)^2} =$$

$$= \left\{ \frac{-41\pi \cdot 2,3 \cdot 6,36 \cdot 10^{-4}}{\lg \operatorname{csc}\left(\frac{\pi \cdot 0,5}{2 \cdot 1}\right)} + \right.$$

$$\left. + \sqrt{\left[\frac{41\pi \cdot 6,36 \cdot 10^{-4} \cdot 2,3}{\lg \operatorname{csc}\left(\frac{\pi \cdot 0,5}{2 \cdot 1}\right)}\right]^2 + (2 \cdot 2,3)^2} \right\} = 3,5 \text{ см.}$$

Отсюда следует, что волноводный тракт согласован на частоте

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{3,5} \text{ Гц} = 8570 \text{ МГц.}$$

Задача 9. Проволочная передающая антенна характеризуется параметрами: полоса частот $\Delta f = 300$ кГц; коэффициент перекрытия диапазона $K_{\Pi} = 1,2$. Чему равен коэффициент усиления (КУ) антенны на средней частоте диапазона в направлении максимума ДН, если сопротивление излучения антенны $R_{\Sigma} = 15$ Ом, сопротивление потерь $R_{\Pi} = 3$ Ом, а действующая длина антенны $l_{\text{эф}} = 100$ м?

Решение:

Согласно формуле (5.18) из [12] имеем $K_{\Pi} = f_{\max}/f_{\min} = 1,2$; откуда $f_{\max} = 1,2 f_{\min}$. Подставив это соотношение в формулу (5.17) из [12], получим

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{cp}}} = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} = 2 \frac{1,2 - 1}{1,2 + 1} \cong 0,182, \text{ т.е. } f_{\text{cp}} = \frac{\Delta f}{0,182} = \frac{300 \text{ кГц}}{0,182} \cong 1,65 \text{ МГц.}$$

При этом средняя длина волны равна $\lambda_{\text{cp}} \cong 182$ м.

КУ находим по формуле (5.16) из [12] через КНД и КПД. Для КНД из формулы (5.14) в [12] имеем

$$D_0 = \frac{\pi w}{R_{\Sigma \text{ВХ}}} \left(\frac{l_{\text{эф}}}{\lambda}\right)^2 \cong \frac{120\pi^2}{15} \left(\frac{100}{182}\right)^2 \cong 23,834.$$

КПД по формуле (5.15) из [12] равен $\eta = \frac{15}{15+3} \cong 0,833$. Подставив найденные значения КНД и КПД в (5.16), окончательно получим $G_0 \cong 23,834 \cdot 0,833 \cong 19,86$.

Задача 10. Электрически малая рамочная антенна установлена под углом $\theta = \pi/6$ к направлению на передатчик, работающий на волне $\lambda = 50$ м и создающий в месте приема напряженность электрического поля $E = 250$ мВ/м. Параметры антенны: $G_0 = 1,5$; $R_{\text{вх}} = 6$ Ом; $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$. Угол между плоскостями поляризации рамки и проходящей волны $\chi = 0,2$ рад. Определить ЭДС, наводимую в приемной антенне, и величину мощности, отдаваемую антенной в нагрузку с сопротивлением $Z_{\text{н}} = (24 + i20)$ Ом.

Решение:

ЭДС, возбуждаемую в антенне, определяем по формулам (5.19), (5.20) из [12]:

$$\mathcal{E} = E\lambda \sqrt{\frac{G_0 R_{\text{вх}}}{\pi w}} \bar{F}(\theta, \varphi) \cos \chi = \frac{250 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{\pi} \sqrt{\frac{1,5 \cdot 6}{120}} \sin(\pi/6) \cos 0,2 = 0,535 \text{ В.}$$

Максимальная мощность, отдаваемая антенной в согласованную нагрузку, находится по формуле (5.21) из [12]:

$$P_{\text{max}} = \frac{G_0}{960} \left(\frac{E\lambda}{\pi} \right)^2 = \frac{1,5}{960} \left(\frac{250 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{\pi} \right)^2 \approx 24,8 \text{ мВт.}$$

Мощность, отдаваемую антенной в заданную нагрузку, находим по формуле (5.22) из [12]:

$$P = \frac{4R_{\text{вх}} R_{\text{н}}}{(R_{\text{вх}} + R_{\text{н}})^2 + (X_{\text{вх}} + X_{\text{н}})^2} P_{\text{max}} = \frac{4 \cdot 6 \cdot 24}{(6 + 24)^2 + 20^2} \cdot 24,8 = 11 \text{ мВт.}$$

Задача 11. К несимметричному вертикальному заземленному вибратору, работающему на резонансной длине волны, подводится мощность $P = 10$ кВт. Частота передатчика $f = 750$ кГц. Определить эффективную высоту, КПД, ток у основания антенны и максимальную напряженность электрического поля на расстоянии $r = 12$ км от вибратора. Сопротивление потерь в антенне $R_{\text{п}} = 7$ Ом.

Решение:

Высоту вибратора, работающего на резонансной длине волны без учета эффекта укорочения, находим из формулы $\lambda_0 = 4l$, вычислив предварительно длину волны передатчика:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{750 \cdot 10^3} = 400 \text{ м; } l = \frac{\lambda}{4} = \frac{400}{4} = 100 \text{ м.}$$

Эффективную высоту такого вибратора определяем по известной формуле

$$l_{\text{эф}} \cong 0,64l = 0,64 \cdot 100 = 64 \text{ м.}$$

Сопротивление излучения четвертьволнового вибратора, отнесенное к максимуму тока, в два раза меньше сопротивления излучения симметричного полуволнового вибратора, т.е. $R_{\Sigma \text{max}} \approx 37$ Ом. По формулам (6.32) и (6.33) из [12] получаем

$$I = I_{\max} \sin kl = \sqrt{\frac{2P}{R_{\Sigma \max} + R_{\Pi}}} \sin \frac{2\pi l}{\lambda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \cdot 10^3}{37 + 7}} \sin \frac{2\pi}{4} = 21,4 \text{ А.}$$

КПД антенны рассчитываем по формуле (6.40) из [12], а напряженность электрического поля – по формуле

$$E_{\theta} = \frac{60I_{\max}}{r} \cdot \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}, \text{ полагая в максимуме } \theta = \pi/2:$$

$$\eta = \frac{37}{37 + 7} \approx 0,84; \quad E_{\max} = \frac{60I_{\max}}{r} = \frac{60 \cdot 21,4}{12 \cdot 10^3} = 107 \text{ мВ/м.}$$

Задача 12. Рассчитать цилиндрическую спиральную антенну осевого излучения, работающую в диапазоне длин волн от $\lambda_{\min} = 6$ см до $\lambda_{\max} = 10$ см. В процессе расчета для крайних длин волн рабочего диапазона определить число витков спирали, шаг намотки, КНД, входное сопротивление антенны и ширину ДН.

Решение:

Сначала определяем среднюю длину волны рабочего диапазона

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{\lambda_{\min} + \lambda_{\max}}{2} = \frac{6 + 10}{2} = 8 \text{ см.}$$

Так как антенна должна иметь максимум излучения вдоль оси, то длину витка спирали принимаем равной средней длине волны диапазона. Поэтому $l_1 = \lambda_{\text{cp}} = 8$ см.

Выбираем угол намотки спирали α равным 15° , имея в виду, что оптимальные значения этого угла лежат в пределах от 12 до 20° . Определяем шаг намотки $s = 2\pi a \sin \alpha = 8 \sin 15^\circ = 8 \cdot 0,259 = 2,07$ см.

При вычислении осевой длины антенны исходим из того, что оптимальное значение коэффициента замедления на минимальной длине волны должно быть равным

$$\xi = c/V_{\phi} \approx 1,2. \text{ Поэтому } \xi = 1 + \frac{\lambda_{\min}}{2L} = 1,2, \text{ что соответствует } L = \frac{\lambda_{\min}}{2 \cdot 0,2} = \frac{6}{0,4} = 15 \text{ см.}$$

Число витков спирали равно $N = \frac{L}{s} = \frac{15}{2,07} = 7,25$. Округляем N до семи и уточняем осевую длину спирали $L = Ns = 7 \cdot 2,07 = 14,5$ см.

КНД в направлении максимума излучения для крайних длин волн рабочего диапазона вычисляем по формуле (6.87) из [12]:

$$D_0 \approx 15 \left(\frac{l_1}{\lambda_{\min}} \right)^2 \frac{L}{\lambda_{\min}} = 15 \left(\frac{8}{6} \right)^2 \frac{14,5}{6} = 64,3 = 18,1 \text{ дБ;}$$

$$D_0 \approx 15 \left(\frac{l_1}{\lambda_{\max}} \right)^2 \frac{L}{\lambda_{\max}} = 15 \left(\frac{8}{10} \right)^2 \frac{14,5}{10} = 17,4 = 12,4 \text{ дБ.}$$

Ширину ДН находим по формулам (6.86) из [12]:

$$\begin{aligned}
(2\theta_{0,5})_{\theta} &\cong 85\sqrt{\lambda_{\min}/L} = 85\sqrt{6/14,5} \cong 54,8^{\circ}; \\
(2\theta_{0,5})_{\theta} &\cong 85\sqrt{\lambda_{\max}/L} = 85\sqrt{10/14,5} \cong 70,8^{\circ}; \\
(2\theta_{0,5})_{\varphi} &\cong 108\sqrt{\lambda_{\min}/L} = 108\sqrt{6/14,5} \cong 69,6^{\circ}; \\
(2\theta_{0,5})_{\varphi} &\cong 108\sqrt{\lambda_{\max}/L} = 108\sqrt{10/14,5} \cong 90^{\circ}.
\end{aligned}$$

Входное сопротивление антенны для крайних длин волн рабочего диапазона в соответствии с формулой Крауса равно:

$$R_{\text{вх}} \approx 140 \frac{l_1}{\lambda_{\min}} = 140 \frac{8}{6} = 186 \text{ Ом}; \quad R_{\text{вх}} \approx 140 \frac{l_1}{\lambda_{\max}} = 140 \frac{8}{10} = 112 \text{ Ом}.$$

Задача 13. Рассчитать оптимальный пирамидальный остроконечный рупор, который при возбуждении его прямоугольным волноводом МЭК-100 на волне длиной $\lambda = 3$ см имеет КНД в направлении максимума излучения не менее 40.

Решение:

Размеры сечения рупора в горловине определяются внутренними размерами стандартного волновода МЭК-100: $a = 22,85$ мм; $b = 10,16$ мм.

Площадь раскрыва рупора S_p определяем по формуле (7.30) в [12], из которой

находим $S_p = \frac{D_0 \lambda^2}{6,2} = \frac{40 \cdot 9}{6,2} \cong 58 \text{ см}^2$. Размеры сторон раскрыва рупора a_p и b_p находим, исходя из оптимального соотношения между ними – формула (7.27) в [12]:

$$b_p = 0,8a_p = \frac{0,8S_p}{b_p} = \frac{46,5}{b_p}, \quad \text{т.е.} \quad b_p = \sqrt{46,5} \cong 6,82 \text{ см}; \quad a_p = \frac{6,82}{0,8} \cong 8,52 \text{ см}.$$

Длина оптимального рупора определяется как $L_{\text{опт}} = \frac{a_p^2}{3\lambda} = \frac{(8,52)^2}{3 \cdot 3} \cong 8,07 \text{ см}$.

Диаграммы направленности можно рассчитать по формулам (7.31) и (7.32) в [12], а их ширину оценить по формулам:

$$\begin{aligned}
2\theta_{0,5}^H &= 1,4\lambda/a_p = 1,4 \cdot 3/8,52 \cong 0,493 \text{ рад}; \\
2\theta_{0,5}^E &= 0,93\lambda/b_p = 0,93 \cdot 3/6,82 \cong 0,409 \text{ рад}.
\end{aligned}$$

Задача 14. Определить параметры антенны с зеркалом в виде параболического цилиндра и КБВ в фидере облучателя. Диаметр цилиндра $d_p = 20$ см, длина образующей $a_p = 80$ см, фокусное расстояние $f_a = 30$ см. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 3$ см, КНД облучателя в осевом направлении $D_{\text{обл}} = 4$.

Решение:

По формулам (7.53) – (7.56) из [12] находим:

$$2\theta_{0,5}^{xOz} \approx 1,27 \frac{\lambda}{d_p} = 1,27 \cdot \frac{3}{20} \approx 0,19 \text{ рад} ;$$

$$2\theta_{0,5}^{yOz} \approx 0,89 \frac{\lambda}{a_p} = 0,89 \frac{3}{80} \approx 0,033 \text{ рад} .$$

$$D_0 \approx 10 \frac{a_p d_p}{\lambda^2} = 10 \cdot \frac{80 \cdot 20}{3^2} \approx 1780 ;$$

$$K_{\text{БВ}} = \frac{1 - \frac{D_{\text{обл}}}{2\pi} \sqrt{\lambda/f_a}}{1 + \frac{D_{\text{обл}}}{2\pi} \sqrt{\lambda/f_a}} = \frac{1 - \frac{4}{2\pi} \sqrt{3/30}}{1 + \frac{4}{2\pi} \sqrt{3/30}} = 0,67 .$$

Задача 15. Определить сопротивление излучения линейной антенной решетки, состоящей из $N = 3$ синфазных полуволновых продольных (соосных) вибраторов, расположенных на расстоянии $d = \lambda/4$ от плоского рефлектора. Принять, что расстояние между вибраторами ничтожно мало, а рефлектор является идеально проводящим и имеет бесконечную протяженность.

Решение:

Действие рефлектора можно рассматривать как действие фиктивных вибраторов $1' - 3'$, представляющих собой зеркальное изображение реальных вибраторов $1-3$. Тогда для вибратора 1 согласно формуле (8.22) из [12] можно записать

$$R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 11} + R_{\Sigma 12} + R_{\Sigma 13} + R_{\Sigma 11'} + R_{\Sigma 12'} + R_{\Sigma 13'} .$$

Из табл. 8.1 в [12] находим величины вносимых сопротивлений излучения:

$$R_{\Sigma 12} = 26,4 \text{ Ом при } d/\lambda = 0 \text{ и } h/\lambda = 0,5;$$

$$R_{\Sigma 13} = -4,1 \text{ Ом при } d/\lambda = 0 \text{ и } h/\lambda = 1;$$

$$R_{\Sigma 11'} = 12,5 \text{ Ом при } d/\lambda = 0,5 \text{ и } h/\lambda = 0;$$

$$R_{\Sigma 12'} = 11,9 \text{ Ом при } d/\lambda = 0,5 \text{ и } h/\lambda = 0,5;$$

$$R_{\Sigma 13'} = 0,8 \text{ Ом при } d/\lambda = 0,5 \text{ и } h/\lambda = 1.$$

Знаки изменены
на противоположные.

Считая собственное сопротивление излучения вибратора 1 равным $R_{\Sigma 11} = 73 \text{ Ом}$, находим $R_{\Sigma 1} = 120,6 \text{ Ом}$. Точно такое же сопротивление излучения имеют вибраторы $1', 3, 3'$, так как в решетке они расположены симметрично. Сопротивления излучения вибраторов 2 и $2'$ также одинаковы:

$$R_{\Sigma 2} = R_{\Sigma 2'} = R_{\Sigma 22} + 2R_{\Sigma 21} + 2R_{\Sigma 21'} + 2R_{\Sigma 22'} = 73 + 2 \cdot 26,4 + 2 \cdot 11,9 + 2 \cdot 6,25 = 162,1 \text{ Ом}$$

Сопротивление излучения всей антенной решетки составит

$$R_{\Sigma c} = 4R_{\Sigma 1} + 2R_{\Sigma 2} = 4 \cdot 120,6 + 2 \cdot 162,1 = 806,6 \text{ Ом} .$$

Задача 16. Рассчитать волноводную щелевую антенную решетку, которая должна работать на волне основного типа, иметь КНД в направлении максимума диаграммы $D_0 = 12,6$ и излучать мощность $P_{\Sigma} = 50 \text{ кВт}$. Рабочая длина волны

$$\lambda = 2 \text{ см.}$$

Решение:

Выбираем стандартный волновод с внутренними размерами $a = 23 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$. Длина волны в волноводе равна

$$\lambda_B = \frac{3,2}{\sqrt{1 - (3,2/4,6)^2}} = \frac{3,2}{0,71} = 4,5 \text{ см.}$$

Характеристическое сопротивление и проводимость волновода равны

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} = 531 \text{ Ом}; \quad G_c = \frac{1}{Z_c} = 0,188 \cdot 10^{-2} \text{ См.}$$

Число щелей в волноводе находим по формуле (8.41) в [12]:

$$N = \frac{D_0}{3,2} = \frac{12,6}{3,2} \approx 4.$$

Для определенности выберем продольные полуволновые $2l = \lambda_B/2$ щели, прорезанные в широкой стенке волновода с интервалом в половину длины волны в волноводе. Проводимость одной щели равна

$$G_1 = G_c \frac{1}{N} = \frac{0,188 \cdot 10^{-2}}{4} = 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Для согласования щели с волноводом смещаем ее относительно осевой линии на величину $x_1 = a/2 - x_0$, определяемую согласно (8.37) в [12] из уравнения

$$\bar{G}_1 = 2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_B}{\lambda} \sin^2\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2\lambda_B}\right).$$

Если число щелей N , то в согласованном режиме $\bar{G}_1 = \frac{1}{N}$. В данном случае

$$\bar{G}_1 = \frac{1}{4} = 0,25. \text{ Отсюда находим } x_1:$$

$$\sin\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) = \sqrt{\frac{\bar{G}_1}{2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_B}{\lambda} \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2\lambda_B}\right)}} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 10 \cdot 32}{2,09 \cdot 23 \cdot 45 \cos^2\left(\frac{\pi \cdot 32}{2 \cdot 45}\right)}} = 0,4386;$$

$$x_1 = \frac{a}{\pi} \arcsin 0,4386 = \frac{23 \cdot 0,454}{3,1416} = 3,3 \text{ мм.}$$

Определим ширину щели b . Она должна быть меньше $\lambda_B/10 = 4,5 \text{ мм}$, но достаточной, чтобы исключить возможность электрического пробоя. Полагая, что вся мощность излучения антенны P_Σ распределяется поровну между щелями, находим значение напряжения в максимуме распределения на каждой щели

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{2P_{\Sigma}}{NG_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3}}} = 7,36 \text{ кВ.}$$

При двукратном запасе прочности и пробивной напряженности электрического поля $E_{\text{проб}} = 30 \text{ кВ/см}$ получим

$$b = \frac{2U_{\max}}{E_{\text{проб}}} = \frac{2 \cdot 7,36}{30} \cong 4,9 \text{ мм.}$$

За счет небольшого сокращения запаса прочности ширину щели можно уменьшить до выбранного выше предела.

Радиус эквивалентного электрического вибратора равен четверти ширины щели

$a_{\text{экв}} = \frac{b}{4} = \frac{4,5}{4} \approx 1,1 \text{ мм.}$ Для определения волнового сопротивления эквивалентного вибратора воспользуемся формулой (6.15) в [12]:

$$W_{\text{вщ}} = 120 \left(\ln \frac{l}{a_{\text{экв}}} - 1 \right) = 120 \left(\ln \frac{\lambda_{\text{в}}}{4a_{\text{экв}}} - 1 \right) = 120 \left(\ln \frac{45}{4 \cdot 1,1} - 1 \right) \approx 160 \text{ Ом.}$$

Геометрическая длина полуволновой щели с учетом эффекта укорочения – формула (6.30) в [12], определяется как

$$2l = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} - 2\Delta l = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} - \frac{13,6\lambda_{\text{в}}}{W_{\text{вщ}}} = \frac{45}{2} - \frac{13,6 \cdot 45}{160} = 18,7 \text{ мм.}$$

Расчет ДН в плоскости, проходящей через продольную ось волновода перпендикулярно его широкой стенке, можно провести по теореме о перемножении диаграмм направленности, рассматривая антенну как решетку N синфазных эквивалентных полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $\lambda_{\text{в}}/2$ друг от друга:

$$\bar{F}(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \frac{\sin \frac{N\Delta\Phi}{2}}{N \sin \frac{\Delta\Phi}{2}},$$

где $\Delta\Phi$ – сдвиг по фазе, обусловленный геометрической разностью хода лучей (волн) от двух соседних щелей, которая равна $\frac{\lambda_{\text{в}}}{2} \cos\theta$; θ – угол между осью волновода и направлением в точку наблюдения. Этот сдвиг равен

$$\Delta\Phi = k \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{2} \cos\theta \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} \cos\theta = \frac{2\pi}{3,2} \cdot \frac{4,5}{2} \cos\theta = 4,42 \cos\theta \text{ рад.}$$

Окончательно
$$\bar{F}(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \frac{\sin(8,84 \cos\theta)}{\sin(2,21 \cos\theta)}.$$

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.

На лабораторные занятия по учебному плану для очной формы обучения отводится 27 часов, которые распределяются следующим образом: выполнение 6-ти лабораторных работ по 4 часа каждая и последнее занятие с защитой отчетов по предыдущей работе, подведением итогов и выставлением баллов текущего рейтинга. Темы лабораторных работ приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ п/п	Наименование лабораторных работ
1	Исследование параметров волноводных элементов
2	Исследование объёмного резонатора
3	Исследование ферритовых циркуляторов
4	Исследование диэлектрических антенн
5	Исследование диаграммы направленности параболической антенны по измерениям поля в дальней и ближней зонах
6	Исследование коэффициента усиления рупорных антенн
7	Исследование влияния распределения поля в раскрыве антенны на её диаграмму направленности

Работы выполняются бригадами по 2 – 3 студента в каждой. Темы выдаются преподавателем в конце каждого занятия (кроме первого). При подготовке к работе необходимо пользоваться методическими указаниями, разработанными сотрудниками кафедры СВЧ и КР. В них сформулирована цель работы, приведены основные теоретические сведения и контрольные вопросы для самопроверки, расчетное задание, описание экспериментальной установки, порядок проведения работы, требования к оформлению отчета и его защиты, дается список литературы. Перечень методических указаний приведен в литературе к данному пособию.

Для допуска к выполнению работы необходимо рассказать о её цели и содержании, об основных теоретических сведениях, ответить на контрольные вопросы, рассказать о ходе проведения эксперимента и работе с аппаратурой. Включение приборов проводится после разрешения преподавателя. По завершению работы преподавателю необходимо показать протоколы (таблицы) с результатами эксперимента и получить следующее задание. Отчет составляется один на бригаду. Выводы в отчете по проделанной работе должны содержать выявленные закономерности, а не перечисление выполненных действий. Допускается сдача отчета и его защита в начале следующего занятия.

6. МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ 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 балльно-рейтинговой системе оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает текущий контроль выполнения элементов объема дисциплины с подведением текущего рейтинга 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). Ниже приведены таблицы распределения максимального рейтинга по элементам контроля (табл. 6) и распределения баллов в семестре (табл. 7).

Таблица 6

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 занятий	29	2	0,41	1-17	12
Контрольные работы на практических занятиях	1	1	8	15	8
Расчетные домашние задания	8	2	2	1-15	16
Выполнение лабораторных работ и защита отчетов	6	4	4	6 - 15	24
Компонент своевре-	16	2	0,62	1-17	10

менности					
Сдача экзамена (максимум)					30
Итого					100

Таблица 7

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	4	4	4	12
Контрольные работы на практических занятиях	0	8	0	8
Расчетные домашние задания	8	6	2	16
Выполнение лабораторных работ и защита отчетов	8	8	8	24
Компонент своевременности	3	4	3	10
Итого максимум за период:	23	30	17	70
Сдача экзамена (максимум)				30
Нарастающим итогом	23	53	70	100

Основными элементами контроля являются экзамен и контрольная работа. 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. Экзаменационные вопросы по двум основным разделам дисциплины приводятся ниже.

7. ВОПРОСЫ, ВХОДЯЩИЕ В ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ.

7.1. Линии передачи, устройства СВЧ.

1. Линии передачи: определение; регулярные, нерегулярные, однородные, не однородные. Открытые, закрытые – их достоинства и недостатки, применения. Примеры.
2. Радиолиния: понятие, структурная схема, примеры. Достоинства и недостатки по сравнению с фидерными линиями. Принцип электродинамического подобия и его использование при расчетах и экспериментальных исследованиях.
3. Основные параметры и характеристики фидеров: типы волн, дисперсионная характеристика, затухание, электрическая прочность, предельная и допустимая мощности, волновое сопротивление, погонные параметры.
4. Математическая модель линий передачи СВЧ. Основные требования, предъявляемые к фидерным линиям. Частотные зависимости затухания в проводни-

ках и диэлектриках.

5. Объясните, почему обычно работают на волне одного типа, в частности основного. В каких случаях работают на волнах высших типов? В каких линиях имеет место дисперсия и в чем проявляется? Как она влияет на распространение сигналов?
6. Двухпроводная и коаксиальная линии: волна основного типа, ее длина и фазовая скорость, волновое сопротивление, погонные параметры. Условие работы на волне основного типа в коаксиальной линии. Маркировка коаксиальных кабелей.
7. Полосковые и микрополосковые линии: разновидности, волна основного типа, ее длина и фазовая скорость, волновое сопротивление, погонные параметры, структура поля.
8. Волноводы прямоугольного сечения. Типы волн, критические длины волн. Волна основного типа, условие ее существования, структура поля, характеристическое и волновое сопротивления, передаваемая мощность. Технология изготовления и стандарты. Применения.
9. Волноводы круглого сечения. Типы волн, критические длины волн. Волна основного типа, условие ее существования, структура поля, характеристическое и волновое сопротивления, передаваемая мощность. Технология изготовления. Применения.
10. Линии передачи с поверхностной волной. Понятие поверхностной волны, ее длина и фазовая скорость, структура поля. Примеры реализаций ЛП с поверхностной волной и применения.
11. Волоконно-оптические линии. Строение волокон, их размеры, длины волн, физические явления при распространении, технологии производства. Понятие солитона и солитонные режимы. Преимущества, применения, перспективы.
12. Диапазоны длин волн. Понятие СВЧ. Типы применяемых в различных диапазонах фидеров. Понятия эквивалентных линий и схем. Волновой и классический подходы, связь между ними.
13. Коэффициент отражения от нагрузки, КБВ, КСВ, сопротивление линии и соотношение между ними. Поведение модуля коэффициента отражения в идеальных и реальных ЛП. Резонансные сечения, значения в них напряженностей полей и сопротивлений.
14. Коэффициент отражения от нагрузки, КБВ, КСВ, сопротивление линии и соотношение между ними. Поведение модуля коэффициента отражения в идеальных и реальных линиях. Режимы в ЛП и их связь с сопротивлением нагрузки.
15. Формула трансформации сопротивлений с пояснениями. Эквивалентные сечения и расстояния между ними. Входное сопротивление отрезка фидера, значения в случае реактивных нагрузок. Понятие шлейфов, их входные сопротивления, применения.
16. Формула трансформации сопротивлений с пояснениями. Резонансные сечения и расстояния между ними. Поведение в них компонент напряженности электри-

- ческого и магнитного полей, связь с модулем коэффициента отражения от нагрузки. Сопротивление линии в резонансных сечениях и связь их с КСВ и КБВ.
17. Узкополосное согласование активных нагрузок. Четвертьволновые понижающие и повышающие трансформаторы, их включения в ЛП и выбор значений сопротивлений. Эквивалентные схемы, распределения напряжения, КБВ или КСВ вдоль ЛП при согласовании.
 18. Узкополосное согласование комплексных нагрузок. Метод компенсирующих реактивностей, последовательное и параллельное включения их в ЛП. Эквивалентные схемы. Пояснения на круговой диаграмме Вольперта – Смита.
 19. Узкополосное согласование комплексных нагрузок. Метод компенсирующих реактивностей, их реализация в волноводной технике, эквивалентные схемы.
 20. Типовые элементы трактов СВЧ: эквиваленты антенн, реактивные нагрузки, четвертьволновые металлические изоляторы.
 21. Типовые элементы трактов СВЧ: волноводные соединения, повороты, коаксиально-волноводные переходы и переходы с прямоугольного волновода на круглый.
 22. Объемный резонатор: устройство, разновидности, применения. Сравнение с колебательным контуром. Включение в тракт, связь с внешними цепями.
 23. Объемные резонаторы: типы колебаний, резонансные длины волн, добротности. Устройство и применение коаксиального резонатора.
 24. Ступенчатые и плавные согласующие переходы. Классификация управляющих устройств. Механические аттенюаторы и фазовращатели.
 25. Многополюсники СВЧ: плоскости отсчета фаз, волновой и классический подходы описания, нормировка токов и напряжений, падающие и отраженные волны.
 26. Волновая матрица рассеяния: физический смысл элементов, испытательные режимы. Применения.
 27. Матрицы сопротивлений и проводимостей: физический смысл элементов, испытательные режимы. Применения.
 28. Идеальные и реальные матрицы. Матрица рассеяния идеального вентиля, физический смысл ее элементов.
 29. Фундаментальные свойства матриц: взаимности, симметрии, недиссипативности; понятия, математические формулировки, необходимость учета.
 30. Недиссипативный четырехполюсник: матрицы сопротивлений и рассеяния. Реактивный многополюсник.
 31. Ферриты и их свойства. Невзаимные устройства на основе эффекта Фарадея и с поперечно-подмагниченным ферритом (вентили). Фазовращатели.
 32. Циркулятор: понятие, матрицы рассеяния, устройство, назначение и применения.
 33. Направленный ответвитель: понятие, матрица рассеяния, устройство, назначение и применения.

34. Каскадное соединение многополюсников. Принцип декомпозиции. Алгоритм объединения устройств в общий тракт.

7.2. Антенны.

1. Дальняя, промежуточная и ближняя зоны антенны. Их границы и свойства полей
2. Назначение и классификация антенн, понятия, определения.
3. Внутренняя и внешняя задачи теории антенн.
4. Амплитудная ДН, ее форма и ширина, графическое изображение.
5. Теорема о перемножении ДН одностипных облучателей.
6. Фазовая диаграмма антенны. Фазовый центр и центр излучения.
7. Мощность и сопротивление излучения антенны.
8. Входное сопротивление антенны, связь с сопротивлением излучения.
9. Электрическая прочность. Предельная и допустимая мощности.
10. Поляризация, ее виды, необходимость учета при приеме.
11. КНД, КПД и КУ антенны, определения, взаимосвязи.
12. Действующая длина и диапазон рабочих частот антенны.
13. Принцип электродинамического подобия и его использование при исследовании антенн.
14. Принципы построения сверхширокополосных антенн.
15. Фундаментальные ограничения в области антенн.
16. Приемные антенны. Эквивалентная схема. Формулы Неймана для ЭДС.
17. Приемные антенны. Условия приема максимальной мощности.
18. Принцип взаимности и его использование применительно к расчету характеристик приемных антенн.
19. Эффективная площадь антенны, связь с КНД и действующей длиной линейной антенны.
20. Шумовая температура антенны, связь с КПД, пути ее снижения.
21. Особенности работы антенн на низких и высоких частотах.
22. Энергетические соотношения в приемных антеннах на СВЧ в согласованном и рассогласованном режимах.
23. Формула идеальной радиопередачи с пояснениями.
24. Общие свойства антенн малых электрических размеров. Элементарные излучатели линейной и круговой поляризации.
25. Симметричный электрический вибратор. Распределение тока, ДН, сопротивление излучения, КНД.
26. Симметричный электрический вибратор. Распределение тока, действующая длина, эффект укорочения длины вибратора, входное сопротивление.
27. Конструкции симметричных линейных вибраторных антенн. Способы питания посредством двухпроводной и коаксиальной линий. Применения.
28. Петлеобразный вибратор Пистолькорса. Способы питания посредством двухпроводной и коаксиальной линий, ДН, применения.
29. Конструкции несимметричных вибраторов. Способы возбуждения, ДН, применения.
30. Способы расширения рабочего диапазона вибраторных антенн.

31. Щелевые излучатели. Принцип двойственности и его использование при их расчете.
32. Линейный излучатель с бегущей волной тока. Режимы излучения – поперечный, наклонный, осевой. Влияние вида амплитудно-фазового распределения на параметры линейной антенны.
33. Цилиндрическая и коническая спиральные антенны. Режимы излучения, поляризация. Конструкции, принцип действия, их сравнительная характеристика, применения.
34. Диэлектрические стержневые антенны. Конструкции, принцип действия, применения.
35. Директорные антенны. Метод расчета. Конструкции, принцип действия, применения.
36. Логопериодические антенны. Конструкции, принцип действия, применения.
37. Эквидистантные линейные АР. Множитель направленности. Взаимное влияние элементов.
38. Эквидистантные линейные АР. Способы подавления дифракционных максимумов
39. Волноводные щелевые антенные решетки. Типы щелей. Резонансные и нерезонансные АР. Устройство, принцип действия, применения.
40. Фазированные антенные решетки. Устройство, принцип действия, применения.
41. Волноводные излучатели. Метод расчета. Конструкции, принцип действия, применения.
42. Рупорные антенны. Конструкции, принцип действия, применения.
43. Линзовые антенны на замедляющих линзах. Устройство, принцип действия, применения.
44. Линзовые антенны на ускоряющих линзах. Устройство, принцип действия, применения.
45. Антенна на основе линзы Люнеберга. Конструкция, принцип действия, применение.
46. Параболические однозеркальные антенны. Апертурный метод расчета. Конструкции, принцип действия, применения.
47. Параболические двухзеркальные антенны Кассегрена и Грегори. Метод расчета. Конструкции, принцип действия, применения.
48. Спутниковые передающие антенны с контурными диаграммами (зонами обслуживания).
49. Характерные особенности антенн в зависимости от применяемого диапазона волн. Антенны длинных, средних, коротких волн.
50. Антенны УКВ. Активные приёмные антенны.
51. ЭМС антенн и пути решения проблемы.

Контрольная работа проводится после изучения первого раздела дисциплины и включает вопросы из экзаменационных первой части этого раздела.

8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

Основная литература:

1. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радиотехника, 2006. – 375с. (20 экз.)
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432с. (22 экз.)
3. Техническая электродинамика: Учебное пособие для вузов/ Ю.В. Пименов и др. – М.: Радио и связь, 2002. – 536 с. (48 экз.)
4. Сверхширокополосные микроволновые устройства/ под ред. А. П. Креницкого, В. П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 2001. – 560 с. (33 экз.)
5. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1989. – 352с. (17 экз.)
6. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1977. – 440с. (77 экз.)
7. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – М.: Энергия, 1975. – 528с. (33 экз.)
8. Антенны УКВ/ под ред. Г.З. Айзенберга. Ч.1. – М.: Связь, 1977. – 384с. (87экз.)
9. Антенны УКВ/ под ред. Г.З. Айзенберга. Ч.2. – М.: Связь, 1977. – 288с. (54экз.)
10. Коротковолновые антенны / под ред. Г.З. Айзенберга. – М.: Радио и связь, 1985. – 563с. (8 экз.)
11. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток/ под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2003. – 632с. (21экз.)
12. Гошин Г.Г. Антенны и фидеры. Сборник задач с формулами и решениями. Томск: ТУСУР, 2003. – 242с. (49 экз.)

Дополнительная литература:

13. Максимов В.М. Устройства СВЧ. Основы теории и элементы тракта: Учебное пособие для вузов. – М.: Сайнс-Пресс, 2002. – 72с. (23 экз.)
14. Микроэлектронные устройства СВЧ/ под ред. Г.И. Веселова. – М.: ВШ, 1988. – 280с. (29 экз.)
15. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: РИЦ «Техносфера», 2006. – 216с.
16. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы./ Под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника. 2006. – 208с.
17. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами / под ред. В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 1984. – 288с.
18. Нефёдов Е.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: ИЦ «Академия», 2009. – 384с.
19. Антенны и устройства СВЧ: Учебное пособие для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радио и связь, 1994. – 592с. (9 экз.)
20. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, диапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440с. (26 экз.)

21. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Ч. II. Основы и практика – М.: РадиоСофт, 2006. – 269с. (50 экз.)
22. Логопериодические вибраторные антенны: Учебное пособие для вузов/ Б.М. Петров, Г.М. Костромитин, Е.В. Горемыкин. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 239с. (30 экз.)
23. Буянов Ю.И., Смирнов В.П. Активные антенны. Томск: ТГПИ, 1976. – 90с. (2 экз.)
24. Сверхширокополосные антенны. Сборник статей / под ред. Л.С. Бененсона. М.: Мир, 1964. – 380с.
25. Войтович Н.И., Соколов А.Н. Вибраторные антенны. Учебное пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2001. – 76с.
26. Проектирование антенных устройств радиорелейных линий связи. Учебное пособие. / И.П. Заикин, А.В. Тоцкий, С.К. Абрамов. – Харьков: ХАИ, 2006. – 90с.
27. Федорова Л.А., Мельникова А.Ю. Расчет и проектирование линзовых антенн. Методические указания. Санкт Петербург: СПбГУАП, 2002. – 36с.
28. Минин Б.А. СВЧ и безопасность человека. М.: Сов. радио, 1974. – 352с.
29. Ямпольский В. Г. Антенны и ЭМС. – М.: Радио и связь, 1983. – 271с. (5 экз.)
30. Хансен Р.Ч. Фундаментальные пределы в области антенн. ТИИЭР, 1981, т.69, № 2, с. 35 – 49.
31. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. и др. О возможности расширения полосы пропускания малогабаритных излучателей. Радиотехника и электроника, 1999, т.44, №2, с. 178 – 184.
32. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Комбинированная антенна с расширенной полосой пропускания. Радиотехника и электроника, 2005, т.50, №5, с. 585 – 594.
33. Беличенко В.П., Якубов В.П., Запасной А.С. Добротности излучения электрически малых антенн и интерференционные потоки энергии в комбинированных антеннах. / Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды международной научной конференции. Таганрог:ТТИ ЮФУ, 2009, с. 129 – 133.
34. Лемжин М.И. Электродинамический анализ электромагнитного поля в промежуточной и ближней зонах турникетной антенны. Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2009, т.12, № 1, с. 18 – 23.
35. Ключев Д.С. Электродинамический анализ зеркальных антенн методом сингулярных интегральных уравнений. Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2009, т.12, № 3, с. 86 – 90.
36. Шишлов А.В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности: эффективность и предельные возможности. Радиотехника, 2006, № 4, с. 45 – 50.
37. Шишлов А.В. Теория и проектирование зеркальных антенн для радиосистем с контурными зонами обслуживания. Радиотехника, 2007, № 4, с. 39 – 49.

38. Гошин Г.Г. Интеллектуальная собственность и основы научного творчества. Томск: ТУСУР, 2007. – 160с.
39. Чернышёв А.А., Кирпиченко Л.И. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления: Образовательный стандарт вуза. Томск: ТУСУР, 2003. – 36с.
40. Ефанов.В.И. Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи: методические указания к самостоятельной работе. – Томск: ТУСУР, 2009. – 41 с.

Справочная литература:

41. Ганстон. М.А.Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ. – М.: Связь, 1976. – 152с.
42. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 360с.
43. Справочник по элементам полосковой техники / под ред. А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979. – 336с.
44. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. М: Радио и связь, 1982. – 328с.
45. Справочник по антенной технике, т.1 / под ред. Я.Н. Фельда и Е.Г. Зелкина. – М.: ИПРЖР, 1997. – 256с.
46. Таблицы входных сопротивлений вибраторных антенн: Справочник / А.В. Сочилин, С.И. Эминов. – М.: Радиотехника, 2005. – 78с. (20 экз.)

Руководства к программным продуктам:

47. Sergey N. Makarov. Antenna and EM Modeling with MATLAB. – N.-Y. : J. Wiley and Sons. – 274p.
48. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. – Москва, 2008. – 276с.
49. Банков С.Е., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS. – Москва, 2009.
50. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ устройств с помощью HFSS Ansoft. – Москва, 2009. – 256с.
51. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн: Все о программе MMANA – М. : РадиоСофт, 2002. – 80 с. (10экз.)
52. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучающих структур с помощью FEKO. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 246с.
53. CST Microwave Studio. Workflow and Solver Overview. CST Studio Suite. – 91с. (www.cst.com)

Методические указания по выполнению лабораторных работ:

54. Соколова Ж.М. Исследование элементов волноводного тракта и согласование сопротивлений нагрузок. ТУСУР, 2006. – 17с.
55. Соколова Ж.М. , Падусова Е.В. Исследование объёмного резонатора. ТУСУР,

2005. – 26с.

56. Замотринский В.А., Падусова Е.В., Соколова Ж.М., Никифоров А.Н. Исследование ферритовых вентилях и циркуляторов. ТУСУР, 2007. – 23с.

57. Замотринский В.А., Никифоров А.Н. Исследование диаграммы направленности параболической антенны в дальней и ближней зонах. ТУСУР, 2007. – 18с.

58. Замотринский В.А., Никифоров А.Н. Исследование влияния распределения поля в раскрыве антенны на её диаграмму направленности. ТУСУР, 2007. – 24с.

59. Замотринский В.А., Никифоров А.Н. Исследование коэффициента усиления рупорных антенн. ТУСУР. 2008. – 18с.

60. Замотринский В.А., Никифоров А.Н. Исследование диэлектрических антенн. ТУСУР, 2007. – 14с.

Публикация результатов научно-исследовательских работ

Как правило, публикуют работы, содержащие завершённые исследования, содержащие новые научные результаты и конкретные выводы, имеющие теоретическое или практическое значение. Прежде чем приступить к оформлению рукописи, необходимо выбрать те журналы или предполагаемые конференции, тематика которых соответствует теме публикации. Затем необходимо ознакомиться с требованиями, предъявляемыми к объёму представляемой рукописи и ее оформлению, срокам представления. Следует учитывать, что журналы и тематические сборники научных трудов относятся к рецензируемым изданиям, т.е. в них проводится не только формальная экспертиза, но и экспертиза по существу с целью выяснения новизны и достоверности представленного материала. Если у рецензента появляются вопросы или замечания, то на них необходимо дать ответы. Все это увеличивает срок появления публикации. В тоже время, принимаемые в большинстве случаев доклады на конференции не рецензируются и вся ответственность за новизну и достоверность результатов ложится на автора.

Подготовку материала завершённого исследования к печати можно проводить в такой последовательности. Сначала составляется план-проспект и систематизируется материал исследования, при этом следует придерживаться положения о том, что уже опубликованные или второстепенные сведения не следует помещать в подготавливаемое издание. Затем подобранный материал разбивают на разделы и подразделы. Излагают материал в научном стиле, для которого характерны ясность изложения, точность словоупотребления, лаконизм, строгое соблюдение научной терминологии, позволяющей в возможно краткой и экономной форме давать четкие определения и характеристики научных фактов, понятий, процессов и явлений. Последовательное изложение результатов исследования, логичность, взаимосвязь научных положений и выводов, выразительность изложения материала – характерные черты научного стиля.

Структура подготовленного к опубликованию документа, например в виде статьи, предполагает следующие основные разделы: введение, основная (содержательная) часть, выводы или заключение, список литературы. Во введении проводится аналитический обзор литературы, из которого логически следует обоснование темы работы и ее актуальность, могут содержаться сведения общего характера. Основная часть начинается с постановки задачи исследования, с построения новой или использования известной модели, с выбора метода решения. Затем излагается схема решения или проводится непосредственное решение задачи, результаты которого представляются в аналитическом или графическом виде, дается оценка точности решения и обосновывается его достоверность. В заключении делаются основные выводы по работе и рекомендации по использованию результатов, могут намечаться пути продолжения исследований. В конце работы приво-

дится список использованных литературных источников. Все ссылки на цитируемые работы даются в квадратных скобках по тексту с указанием их авторов, названий и наименований первоисточников (журнал, сборник, материалы конференций и т.п.).

Аналогичные требования предъявляются и к рукописным работам, к которым относятся курсовые и дипломные проекты. Составляя отчет по курсовой работе или оформляя пояснительную записку к курсовому проекту и заимствуя результаты других, необходимо делать на них ссылку. Другими словами, должна быть видна четкая граница между тем, что заимствовано и что сделано лично. Это может касаться использования формул, графиков, выводов. Подобные заимствования относятся к сфере познания, уместны и необходимы, но нельзя забывать делать ссылки на первоисточники. Подобная забывчивость называется плагиатом, а плагиат наказуем, поскольку нарушает авторское право.

Эта информация взята из [38]. При оформлении работ следует руководствоваться [39].

Основные принципы подготовки презентации в Power Point

1. *Принцип контраста* – включать контрастные элементы, т.е. использовать разный размер шрифтов, разные цвета, символы.

Контраст – это то, что привлекает внимание.

2. *Принцип повторяемости* – в одной теме использовать повторение некоторых элементов оформления, например, использовать одинаковые рамки, цвет поля, тип шрифта. Это создает ощущение организованности и единства.

3. *Принцип упорядоченности* – элементы на странице не должны быть расположены произвольно (хаотично), они должны иметь некоторую видимую связь между собой.

4. *Принцип близости* – элементы, связанные общим смыслом, должны быть сгруппированы вместе, образуя как бы некоторую визуальную единицу.

Кроме этого, существуют некоторые конкретные правила представления текстовой и статистической информации на слайдах:

Занимайте не больше четырех-шести строк. Не включая заголовков и подзаголовков, текстовая информация должна занимать не более 4-6 строк. Чтение большего количества строк отвлекает внимание слушателей и затрудняет понимание.

Используйте не более 40 символов в строке, включая пробелы. Если использовать большее количество символов, то на слайде будет недостаточно свободного пространства, которое необходимо оставлять для того, чтобы слушатели могли быстро «схватывать» информацию. Кроме того, плотно заполненный слайд выглядит не структурированным. Необходимо оставлять свободное пространство по краям и с боков.

Не пишите предложения, а только ключевые слова. Поскольку показ слайдов сопровождается объяснениями, нет никакой необходимости перегружать их словами.

Используйте как заглавные, так и строчные буквы. Исследования показывают, что использование заглавных и строчных букв облегчает чтение и распознавание слов. При использовании же только заглавных букв чтение и распознавание слов замедляются.

Используйте одинаковые и стандартные шрифты. Использование слишком замысловатых и непривычных шрифтов (или их чередование) потребует дополнительных усилий, затруднит чтение и восприятие информации.

Используйте цвет, большие буквы для того, чтобы выделить главное. Можно усилить контрастность, используя цвет, буквы большего размера или добавляя простые изображения (картинки). Крупные буквы и яркий цвет направляют взгляд слушателей на то, что необходимо подчеркнуть.

Не увлекайтесь спецэффектами. Они должны применяться обоснованно. Помните, что от «летающих» букв рябит в глазах.

Проверьте соответствие слайдов тексту доклада. Очень неприятно видеть удивленного докладчика, у которого неожиданно закончились слайды.

Пользуйтесь дополнительными возможностями Power Point. В частности, у него есть возможность включить «представление докладчика». При этом слушателям будут видны только слайды, а на мониторе докладчика будут выводиться также заметки к слайду, идти отсчет времени и показываться следующие слайды.

Презентация - это не текст доклада. Докладчик, превращающий свой доклад в комментарии к слайдам или того хуже - декламирующий текст со слайдов, выглядит неприглядно. Слайды должны дополнять сказанное им, а не повторять. В крайнем случае слайды могут конспективно фиксировать основные пункты, помогая следить за речью.

Принято завершать презентацию слайдом с контактными данными или завершающей фразой. Например, «Спасибо за внимание!». Тогда аудитория не будет шокирована внезапно оборвавшимся показом слайдов.

Эта информация заимствована из [40].

Приложение 3.

Варианты домашних расчетных заданий

Номера вариантов заданий	Номера тематических разделов и задач для самостоятельного решения из сборника – Г.Г. Гошин, Антенны и фидеры. Томск: ТУСУР, 2003.							
	2	1	3	3// 4	5	6	7	8
1	30, 44	13,50	5, 45	75//41	10, 33	13, 41	22, 57	8, 48
2	31, 45	36, 49	6, 65	76//32	11, 24	12, 69	21, 58	9, 36
3	32, 46	35, 48	7, 48	80//38	12, 32	18, 60	46, 68	22, 42
4	33, 47	30, 45	8, 64	85//46	13, 27	19, 55	29, 49	24, 59
5	34, 48	34, 47	41, 59	78//51	14, 26	14, 63	38, 55	25, 27
6	23, 49	33, 46	38, 72	89//52	15, 29	11, 34	45, 84	23, 47
7	7, 43	28, 43	9, 37	86//54	16, 36	15, 32	53, 73	35, 68
8	3, 22	27, 40	12, 61	79//44	3, 23	17, 67	42, 94	26, 41
9	14, 20	11, 28	13, 23	88//33	24, 34	10, 70	43, 87	11, 30
10	16, 32	7, 17	14, 62	83//34	11, 32	21, 78	44, 95	28, 58
11	5, 41	8, 18	18, 54	78//36	9, 31	22, 61	56, 88	29, 73
12	10, 48	10, 20	30, 63	89//35	8, 25	23, 62	49, 69	16, 74
13	12, 37	4, 19	42, 57	79//37	7, 28	25, 39	45, 66	15, 37
14	13, 38	6, 21	33, 58	86//47	6, 14	28, 80	19, 50	10, 49
15	11, 23	9, 14	31, 50	81//43	5, 27	35, 75	13, 48	6, 50
16	18, 40	5, 15	29, 67	85//48	17, 30	29, 59	37, 100	14, 60
17	19, 42	12, 22	35, 69	74//39	4, 16	9, 73	52, 85	17, 51
18	6, 50	1, 32	15, 24	80//45	3, 34	8, 71	32, 78	5, 43
19	15, 21	31, 42	16, 25	83//50	2, 33	38, 72	31, 79	7, 44
20	9, 35	33, 39	19, 26	88//49	1, 26	6, 74	33, 83	1, 45

Примечание: в четвёртом задании первая колонка номеров относится к третьему разделу сборника задач, а вторая – к четвёртому разделу.

Учебное издание

Гошин Геннадий Георгиевич

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы студентов специальности 210302 «Радиотехника» по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»

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.