

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы
по дисциплине

«Устройства СВЧ и антенны»

для студентов заочной формы обучения
по направлению 6.050901 — Радиотехника

Севастополь
2013

УДК 621.396.67

Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны» для студентов заочной формы обучения направления 6.050901 — Радиотехника / СевНТУ; сост. В.В. Головин, Ю.Н. Тыщук. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — 36 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам заочной формы обучения в изучении дисциплины «Устройства СВЧ и антенны», а также при выполнении контрольной работы, предусмотренной учебным планом.

Методические рекомендации рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций
(протокол № 9 от 23.04.2012 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний к выполнению контрольной работы

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Щекатурин А.А.

Ответственный за выпуск:
заведующий кафедрой радиотехники
и телекоммуникаций
доктор техн. наук, профессор

Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Содержание разделов дисциплины.....	5
2. Контрольные вопросы.....	8
2.1. Контрольные вопросы к подразделу «Линии передачи».....	8
2.2. Контрольные вопросы к разделу «Основные положения теории проволочных антенн».....	9
2.3. Контрольные вопросы к разделу «Теория линейных антенных решеток».....	10
2.4. Контрольные вопросы к разделу «Основные положения теории апертурных антенн».....	10
3. Задания на контрольную работу.....	12
3.1. Задача № 1. Режимы работы линий передачи.....	12
3.2. Задача № 2. Характеристики симметричного вибратора.....	12
3.3. Задача № 3. Линейная антенная решетка.....	13
3.4. Задача № 4. Характеристики параболической антенны.....	15
4. Методические рекомендации.....	17
4.1. Методические рекомендации к выполнению задачи № 1.....	17
4.2. Методические рекомендации к выполнению задачи № 2.....	20
4.3. Методические рекомендации к выполнению задачи № 3.....	23
4.4. Методические рекомендации к выполнению задачи № 4.....	28
Библиографический список.....	32
Приложение А. Образец оформления титульного листа контрольной работы.....	33

ВВЕДЕНИЕ

Цели изучения дисциплины «Устройства СВЧ и антенны»:

- изучение особенностей построения и эксплуатации антенно-фидерных устройств современных радиотехнических комплексов;
- изучение методов оценки влияния параметров антенно-фидерных устройств и условий распространения радиоволн на функционирование радиотехнических комплексов;
- освоение методов измерения параметров антенно-фидерных устройств;

В результате изучения дисциплины студент обязан знать:

- основы построения и принципы функционирования устройств СВЧ и антенн;
- методы анализа и оценки параметров устройств СВЧ и антенн;
- основные тенденции развития теории и техники устройств СВЧ и антенн.

В результате изучения дисциплины студент должен уметь:

- выбрать тип и структуру элементов распределительных устройств антенных систем;
- проводить анализ влияния параметров антенн на характеристики радиочастотных линий;
- выполнять измерения основных радиотехнических параметров и характеристик устройств СВЧ и антенн;
- самостоятельно изучать по научно-технической литературе новые вопросы теории и техники устройств СВЧ и антенн.

Правила оформления контрольной работы

Выбор исходных данных производится по двум последним цифрам зачетной книжки (m — предпоследняя цифра, n — последняя).

Контрольная работа выполняется в виде документа в ученической тетради, либо на листах белой бумаги формата А4, и оформляется в соответствии с требованиями, изложенными в [15].

При выполнении контрольных работ необходимо применять средства вычислительной техники для проведения расчетов, построения графиков и компьютерной верстки материалов.

При оформлении контрольных работ необходимо ссылаться на библиографические источники.

Расчеты должны сопровождаться подробными пояснениями и выкладками, а ответы на теоретические вопросы должны быть краткими и содержать суть излагаемого материала.

1. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Содержание теоретических разделов дисциплины «Устройства СВЧ и антенны» включает рассмотрение теории линий передачи, теории проволочных антенн, теории антенных решеток и дифракционных антенн.

1.1. Линии передачи

Режимы работы линии передачи. Назначение линии передачи, требования к ним, классификация. Основные типы линий передачи, их характеристики, область применения.

Режимы работы, стоячие, бегущие и смешанные волны; коэффициент отражения, коэффициент бегущей волны (КБВ) и коэффициент стоячей волны (КСВ).

Энергетические соотношения в линии передачи; затухание в линии передачи; мощность, поступающая в нагрузку.

При изучении этого раздела особое внимание следует уделить влиянию сопротивления нагрузки на характер распределения амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи, а также взаимосвязи между коэффициентами отражения, КБВ и КСВ, способам их вычисления и измерения. **Рекомендуемая литература:** [1 — 3], [5].

Входное сопротивление линии передачи. Понятие эквивалентного сопротивления линии передачи в произвольном сечении и входного сопротивления. Способы определения входного сопротивления — через сопротивление нагрузки и через КБВ или КСВ. Входное сопротивление линии передачи в режиме стоячей волны и в режиме бегущей волны. Трансформирующие свойства отрезков линии передачи.

При изучении материала по этому разделу необходимо усвоить связь входного сопротивления линии передачи с сопротивлением нагрузки, уметь представить входное сопротивление также через измеряемые на практике параметры КБВ (или КСВ). Следует обратить внимание на возможность трансформации входного сопротивления за счет соответствующего выбора длины линии. **Рекомендуемая литература:** [1 — 3], [5].

Согласование линии передачи с нагрузкой. Цели и задачи согласования. Методы согласования линий передачи с нагрузкой. Узкополосные согласующие устройства (одиночный подвижный шлейф, четвертьволновый трансформатор). Способы расширения полосы согласования. Ступенчатые и плавные переходы. Конструкции двухпроводных, коаксиальных, полосковых и волноводных согласующих трансформаторов и шлейфов.

При изучении этого раздела необходимо усвоить принципы работы согласующих устройств, овладеть методами расчета их параметров, оценить сравнительные достоинства и недостатки рассматриваемых методов согласования. **Рекомендуемая литература:** [1 — 3], [5].

Элементы волноводного тракта. Неоднородности в волноводе — диафрагмы, штыри. Управляющие элементы — аттенюаторы, фазовращатели.

Принцип действия, основные характеристики, область применения.

Волноводные тройники, направленные ответвители, мосты. Основные типы, принципы их работы, характеристики, область применения. Ферритовые устройства — вентили, циркуляторы. Назначение, принцип действия, характеристики.

Основное внимание при изучении элементов волноводного тракта следует обратить на их назначение, принцип действия и конструктивные особенности, а также реализацию этих элементов для волноводных, коаксиальных и полосковых линий. **Рекомендуемая литература:** [1 — 5].

1.2. Основные положения теории проволочных антенн

Введение в теорию антенн. Назначение передающей и приемной антенн в радиоканале, требования к ним. Классификация антенн. Основные характеристики антенн.

Вопросы этого раздела частично рассматривались во введении к дисциплине в целом. В этом разделе конкретизируются назначение и функции передающей и приемной антенн, требования к ним. При рассмотрении основных характеристик антенн необходимо уяснить их физическое содержание. **Рекомендуемая литература:** [6 — 8], [10].

Основы теории проволочных антенн. Формулировка задачи. Поле излучения диполя Герца. Понятие о диаграмме направленности, способы ее изображения. Применение теории длинных линий, теоремы Пойнтинга, принципа взаимности при решении основной задачи для передающей и приемной антенны.

Передающий симметричный вибратор в свободном пространстве. Распределение токов и потенциалов на проводниках вибратора. Поле излучения, диаграмма направленности. Мощность излучения, сопротивление излучения, входное сопротивление. Действующая длина. Коэффициент направленного действия и коэффициент усиления. Основные виды симметричных вибраторов.

При изучении данного раздела необходимо усвоить определения и физический смысл основных понятий теории проволочных антенн и основных характеристик симметричного вибратора. Особое внимание следует обратить на зависимость характеристик симметричного вибратора от относительной длины плеча. **Рекомендуемая литература:** [6 — 10].

1.3. Теория линейных антенных решеток

Линейные излучающие системы. Идеальный линейный излучатель, его поле излучения. Основные режимы излучения. Поле излучения равномерной линейной антенной решетки. Анализ ее диаграммы направленности.

Антенные системы с осевым излучением. Особенности режима осевого излучения. Принцип работы и особенности конструктивного исполнения директорных антенн. Принцип работы и особенности конструктивного исполнения спиральных антенн.

При изучении этого раздела необходимо усвоить основные понятия теории линейных антенных решеток и их основные характеристики.

Рекомендуемая литература: [6 — 10].

1.4. Основные положения теории апертурных антенн

Классификация апертурных антенн. Плоская апертура и ее характеристики направленности. Метод эквивалентного линейного излучателя для анализа плоских апертур произвольной формы. Основные характеристики апертурных антенн. Конструктивное выполнение апертурных антенн. Примеры апертурных антенн: рупорные, зеркальные, линзовые. Особенности фокусирующих систем. Типы облучателей.

При изучении этого раздела необходимо усвоить основные понятия теории апертурных антенн и их основные характеристики.

Рекомендуемая литература: [6 — 10].

2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

2.1. Контрольные вопросы к подразделу «Линии передачи»

- Приведите соотношения, которые описывают распределение амплитуд напряжения и тока в линии передачи без потерь.
- Дайте определение комплексного коэффициента отражения, его модуля и аргумента.
- Дайте определение КБВ и КСВ, как эти коэффициенты рассчитываются по распределению амплитуды напряжения вдоль линии передачи.
- При каких условиях в линии передачи устанавливаются режимы «стоячей волны» и «бегущей волны».
- Приведите соотношение, устанавливающее связь коэффициента отражения с сопротивлением нагрузки линии передачи.
- Покажите, как связаны КБВ и КСВ с коэффициентом отражения.
- Определите модуль и аргумент коэффициента отражения при сопротивлении нагрузки $Z_n = \rho + j \cdot 0,5\rho$ (ρ — волновое сопротивление линии)
- Определите КБВ и КСВ в линии передачи при сопротивлении нагрузки $Z_n = 2\rho$.
- Определите сопротивление нагрузки линии, если известно, что модуль коэффициента отражения равен $|\Gamma_n| = 0,4$, а аргумент равен $\psi_n = 30^\circ$.
- Приведите соотношение, связывающее входное сопротивление линии передачи с сопротивлением нагрузки.
- Приведите соотношение, связывающее входное сопротивление линии передачи с КСВ.
- Какое значение имеет входное сопротивление линии передачи в режиме бегущей волны?
- Какое значение имеет входное сопротивление при длине линии передачи, кратной половине длины волны?
- Определите входное сопротивление линии передачи длиной $l = 3\lambda/4$ (λ — длина волны) при $Z_n = 2\rho$.
- Определите входное сопротивление линии передачи длиной $l = 5\lambda/4$ (λ — длина волны) при $Z_n = 0,5\rho$.
- Чему равно входное сопротивление короткозамкнутого четвертьволнового отрезка линии?
- Чему равно входное сопротивление четвертьволнового отрезка линии, разомкнутого на конце?
- При каких условиях линия передачи является согласованной с нагрузкой?
- Какие методы используются для согласования линии передачи с нагрузкой?
- Поясните принцип работы согласующего устройства в виде четвертьволнового трансформатора.
- Как выбирается волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора?

- Как определяется место подключения короткозамкнутого шлейфа к линии передачи при согласовании с нагрузкой?
- Из каких соображений выбирается длина короткозамкнутого шлейфа?
- Почему четвертьволновый трансформатор является узкополосным согласующим устройством?
- Почему применение многоступенчатого трансформатора позволяет расширить полосу согласования?
- Поясните назначение аттенюатора и принцип работы аттенюатора поглощающего типа.
- Поясните назначение фазовращателей, приведите пример конструкции и поясните принцип их работы.
- В чем состоит отличие характеристик H -тройников и E -тройников?
- Поясните назначение направленных ответвителей, принцип работы одного из типов ответвителей и его характеристики.
- Поясните принцип работы кольцевого моста.
- Поясните принцип действия и особенности конструкции резонансного ферритового вентиля.
- Дайте определение основных характеристик ферритовых вентилях, укажите область их применения.
- Поясните принцип действия и особенности конструкции ферритовых циркуляторов.

2.2. Контрольные вопросы к разделу «Основные положения теории проволочных антенн»

- Приведите формулы для напряженности поля диполя Герца в дальней зоне и для его диаграммы направленности.
- Дайте определение диаграммы направленности антенны, коэффициента направленного действия, коэффициента усиления.
- Приведите графики распределения тока на плечах симметричного вибратора при $l=0,5\lambda$ и $l=0,75\lambda$ (l — длина плеча симметричного вибратора).
- Приведите формулу для диаграммы направленности симметричного вибратора.
- Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора при увеличении длины его плеч от $l=\lambda/4$ до $l=\lambda/2$?
- При каком значении длины плеча вибратор имеет чисто активное входное сопротивление?
- Дайте определение действующей длины симметричного вибратора.

2.3. Контрольные вопросы к разделу «Теория линейных антенных решеток»

- Методика расчета диаграммы направленности линейной антенной решетки.
- Влияние фазового распределения токов в решетке на ее диаграмму направленности.
- Влияние амплитудного распределения токов в решетке на ее диаграмму направленности.
- Линейные, двумерные и объемные антенные решетки.
- Структура кластеров двумерных антенных решеток.
- Как формируется ДН системы «пассивный рефлектор – активный вибратор» и какова ее зависимость от расстояния между элементами?
- Как формируется ДН системы «активный вибратор – пассивный директор» и какова ее зависимость от расстояния между элементами?
- Что понимается под активной частью собственного сопротивления излучения антенны и от чего оно зависит?
- Что понимается под реактивной частью собственного сопротивления излучения антенны и от чего оно зависит?
- Что понимается под вносимым сопротивлением излучения антенны и от чего оно зависит?
- Охарактеризуйте функциональное назначение антенной решетки спиральных излучателей. Как можно реализовать возможные режимы работы антенной решетки?
- Какие технические задачи можно решать с применением спиральных антенн?

2.4. Контрольные вопросы к разделу «Основные положения теории апертурных антенн»

- Каковы особенности распределения амплитуды и фазы поля в апертуре H -секториального рупора, возбужденного волной H ?
- Каковы особенности распределения амплитуды и фазы поля в апертуре E -секториального рупора, возбужденного волной H ?
- Каковы особенности распределения амплитуды и фазы поля в апертуре пирамидального рупора, возбужденного волной H ?
- Какими факторами обусловлены допуски на квадратичные фазовые ошибки в апертуре рупорной антенны и каково их влияние на ДН?
- Какова оптимальная длина рупора в E - и H -плоскостях по критерию максимума коэффициента направленного действия и каким образом ее можно уменьшить?
- При заданной длине рупора, из каких предпосылок определяются геометрические размеры апертуры рупорной антенны?
- Особенности ДН рупорной антенны в E - и H -плоскостях для квадратной апертуры.
- Принцип работы волноводно-щелевой антенны. Возможные ре-

жимы ее возбуждения.

— Принцип построения волноводно-щелевой антенны (ВЩА) со сканированием ДН.

— Особенности амплитудно-фазового распределения поля в резонансной волноводно-щелевой антенне.

— Особенности амплитудно-фазового распределения поля в нерезонансной волноводно-щелевой антенне.

— Каким образом для ВЩА можно создать максимум излучения в заданном направлении?

— Зависимость ДН волноводно-щелевой антенны от расстояния между излучающими щелями.

— Какова зависимость ширины ДН плоскостной волноводно-щелевой антенны от количества щелей?

— Принцип построения параболической антенны, ее геометрические параметры.

— Сформулировать основные требования к облучателям параболических антенн.

— Особенности амплитудно-фазового распределения в апертуре параболической антенны.

— Каким образом можно добиться уменьшения уровня боковых лепестков поля излучения параболической антенны?

— Какие способы оптимизации ДН параболической антенны Вы знаете?

— Каким образом можно уменьшить влияние зеркала на облучатель?

— Каковы диапазонные свойства параболической антенны?

— Какие параболические антенны называют короткофокусными, а какие – длиннофокусными? Какие типы параболических зеркал наиболее используются и почему?

3. ЗАДАНИЯ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

3.1. Задача № 1. Режимы работы линий передачи

Линия передачи длиной l с волновым сопротивлением ρ нагружена на сопротивление $Z_H = R_H + jX_H$. Известны амплитуда напряжения источника сигнала на входе линии передачи U_{BX} , коэффициент стоячей волны в нагрузке КСВ (K_{CTU}) и относительное расстояние $x_{\max}/\lambda$ от нагрузки до сечения линии передачи, в котором наблюдается амплитуда первой пучности напряжения $U_{\max}$. Исходные данные для расчета выбираются из таблицы 3.1.

Необходимо выполнить следующее:

- определить комплексный коэффициент отражения в линии передачи в сечении подключения нагрузки Γ_H , найти его модуль и аргумент;
- определить значение сопротивления нагрузки Z_H ;
- определить значение мощности P_H , поступающей в нагрузку;
- определить значение входного сопротивления линии передачи $Z_{BX} = R_{BX} + jX_{BX}$;
- построить график распределения амплитуды напряжения $U(x)$ вдоль линии передачи при подключении к ней нагрузки Z_H .

Таблица 3.1 — Исходные данные для задачи № 1

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l/λ	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	0,9	0,8	1,1
$x_{\max}/\lambda$	0,08	0,12	0,18	0,27	0,32	0,24	0,15	0,22	0,28	0,35
$U_{BX}, \text{В}$	100	110	120	130	140	150	90	80	70	50
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho, \text{Ом}$	50	75	100	150	200	500	600	300	50	100
$K_{CTU} = 2 + \frac{n+m}{6}$										

3.2. Задача № 2. Характеристики симметричного вибратора

Симметричный вибратор длиной $2l$ возбуждается на частоте f . Амплитуда тока на входных зажимах равна I_l . Исходные данные для расчета выбираются из таблицы 3.2.

Необходимо выполнить следующее:

- а) построить в полярной системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности симметричного вибратора в E - и H -плоскости;
- б) определить значение максимальной амплитуды напряженности электрического поля, создаваемого симметричным вибратором на расстоянии R от него;
- в) определить значение действующей длины симметричного вибратора (только в том случае, если $l \leq \lambda/2$);
- г) определить значение мощности излучения симметричного вибратора;
- д) определить значение коэффициента направленного действия симметричного вибратора;
- е) Определить входное сопротивление симметричного вибратора.

Таблица 3.2 — Исходные данные для задачи № 2

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_l, A	0,8	0,9	1,2	2,5	0,6	1,8	1,6	1,5	2,2	1,0
$R, км$	5,0	5,2	5,5	6,0	6,2	6,5	4,0	4,5	3,0	3,5
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$2l, м$	0,30	0,32	0,85	0,50	0,35	0,62	0,75	0,40	0,45	0,90
$f, МГц$	400	600	180	250	270	300	200	240	320	150

3.3. Задача № 3. Линейная антенная решетка

Двухэлементная антенная решетка, состоящая из полуволновых симметричных вибраторов ($l = \lambda/4$ — длина плеч симметричного вибратора), расположенных на расстоянии d/λ , как показано на рис. 3.1. Симметричные вибраторы возбуждаются равноамплитудно со сдвигом фаз токов $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$.

Необходимо выполнить следующее:

- а) в полярной системе координат построить амплитудные диаграммы направленности двухэлементной антенной решетки в плоскостях XOZ , YOZ и XOY ;
- б) определить значение коэффициента направленного действия двух-

элементной антенной решетки в направлении максимума амплитудной диаграммы направленности $\theta_{\max}$.

Исходные данные к расчету:

- разность фаз токов $\Delta\psi = (-1)^n \cdot (10n + 10m)$;
- расстояние между симметричными вибраторами $d/\lambda = 0,2 + \frac{n+m}{20}$;
- расположение симметричных вибраторов в решетке:
 - для четного n и четного m — как на рис. 3.1, а;
 - для четного n и нечетного m — как на рис. 3.1, б.
 - для нечетного n и четного m — как на рис. 3.1, в;
 - для нечетного n и нечетного m — как на рис. 3.1, г.

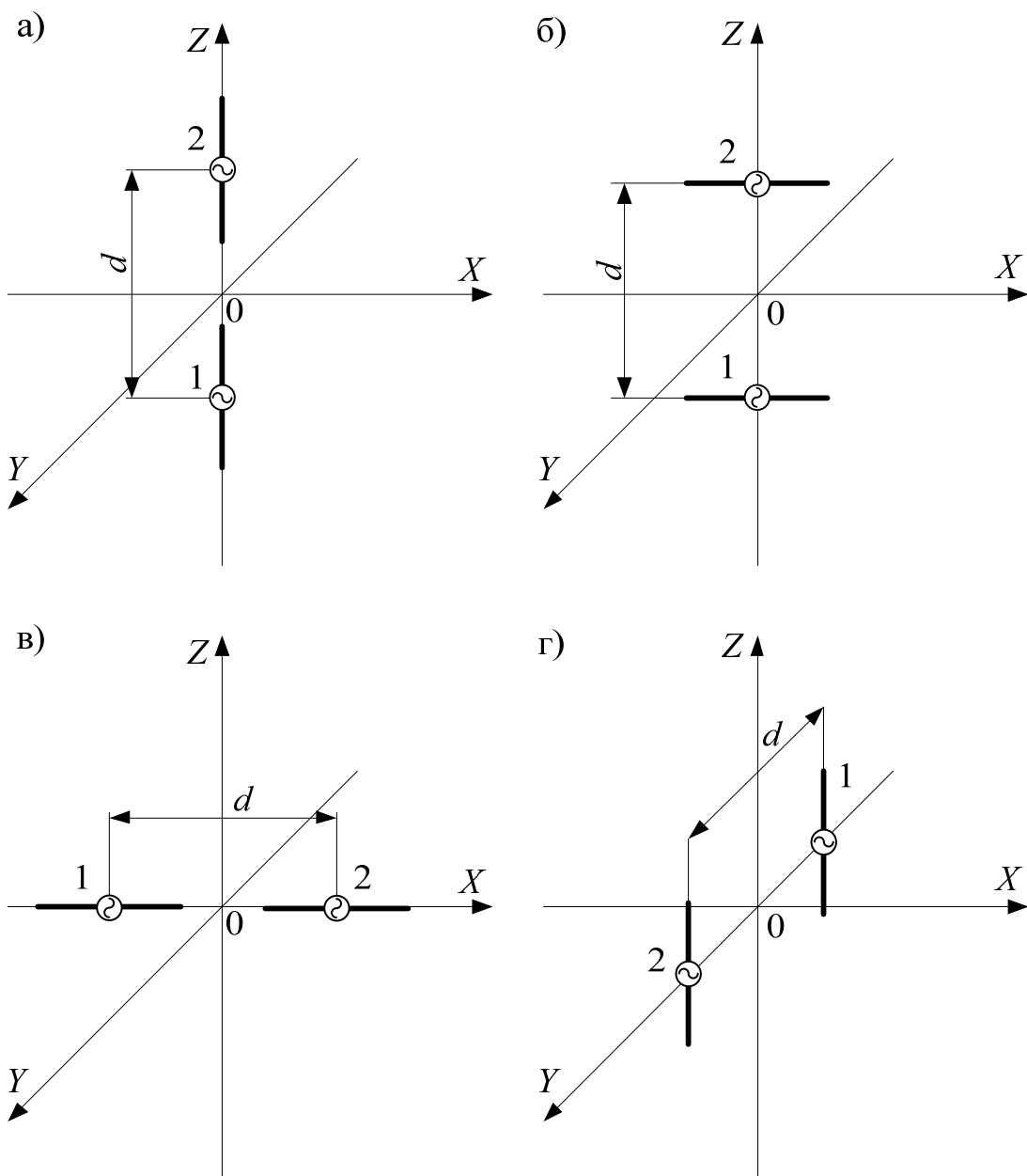


Рис. 3.1 — Схемы размещения симметричных вибраторов

3.5. Задача № 4. Характеристики параболической антенны

Осесимметричная параболическая антенна, схема которой представлена на рис. 3.2, характеризуется геометрическими параметрами: a_E — радиусом раскрыва зеркала (апертуры) в E -плоскости, a_H — радиусом раскрыва зеркала в H -плоскости, f — фокусным расстоянием и ψ_0 — углом раскрыва. В точке фокуса параболического отражателя F располагается облучатель. Исходные данные для расчета выбираются из таблицы 3.3.

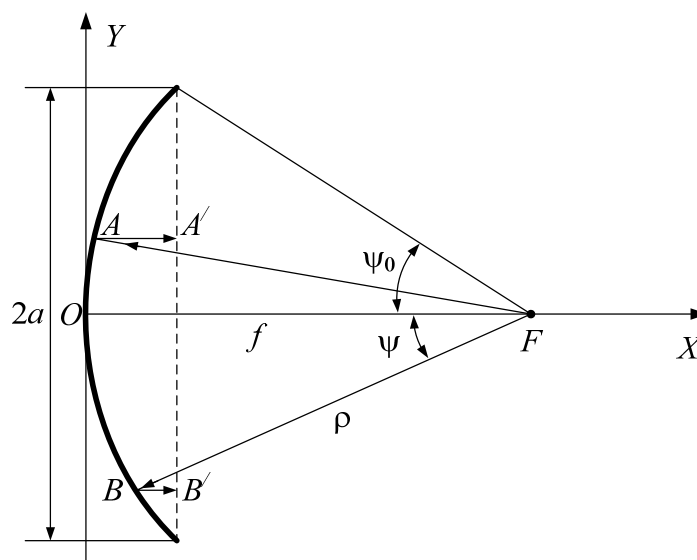


Рис. 3.2 — Схема параболической антенны

Необходимо выполнить следующее:

а) выбрать геометрические параметры параболического зеркала: a_E , a_H , f , ψ_0 .

а) в декартовой системе координат построить диаграммы направленности параболической антенны в плоскостях E и H ;

б) рассчитать допуск на изготовление профиля зеркала;

в) рассчитать допуски на установку облучателя.

Таблица 3.3 — Исходные данные для задачи № 4

M_3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_0 , ГГц	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$2\theta_{0,5}^E$, град	4,0	2,5	6,0	5,0	4,0	1,5	2	2,0	10,0	1,5
$2\theta_{0,5}^H$, град	6,0	5,0	4,0	2,0	2,0	7,5	20	4,0	2,0	2
N_3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
УБЛ, дБ	−18	−20	−22	−30	−24	−25	−19	−21	−28	−26
Вид облучателя	ВР	ВЭ	Р	ВР	ВЭ	Р	ВР	ВЭ	Р	Р

Примечание. УБЛ — уровень бокового излучения.

Виды облучателей:

- а) ВР — полуволновый вибратор с рефлектором в виде стержня;
- б) ВЭ — полуволновый вибратор с рефлектором в виде сплошного экрана;
- в) Р — рупорный.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

4.1. Методические рекомендации к выполнению задачи № 1

Пусть двухпроводная линия длиной l , ко входу которой подключен генератор, нагружена на комплексное сопротивление Z_H . Поместим начало отсчета координат x в плоскости подключения нагрузки (рис. 4.1).

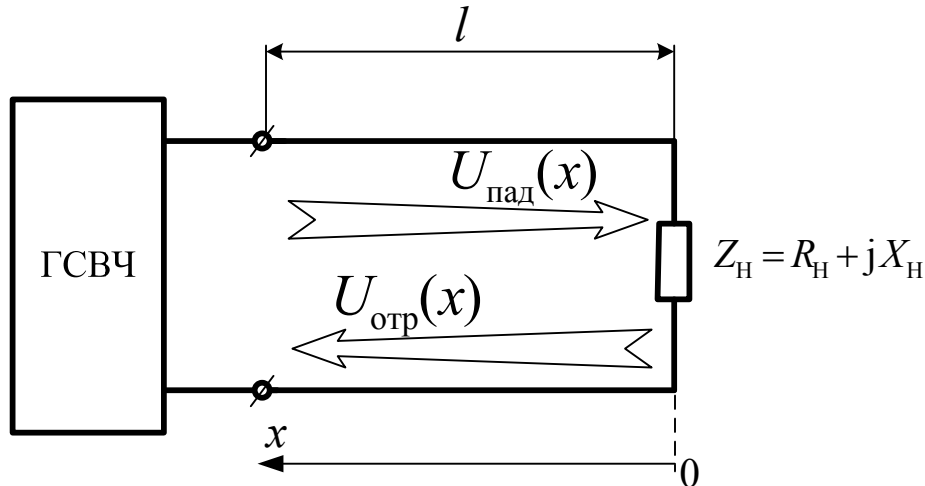


Рис. 4.1 — Модель двухпроводной линии передачи, нагруженной на сопротивление Z_H

Генератор СВЧ (ГСВЧ) создает падающую волну с комплексной амплитудой $U_{\text{пад}}(x)$, которая распространяется в направлении нагрузки (см. рис. 4.1). Если энергия генератора не полностью поглощается нагрузкой, то образуется отраженная волна с комплексной амплитудой $U_{\text{отр}}(x)$, которая распространяется в направлении генератора (см. рис. 4.1).

Распределение комплексной амплитуды напряжения вдоль линии передачи можно описать с помощью уравнения

$$U(x) = U_{\text{пад}}(x) + U_{\text{отр}}(x). \quad (4.1)$$

В линии передачи без потерь амплитуды падающей $U_{\text{пад}}(x)$ и отраженной $U_{\text{отр}}(x)$ волн от переменной x не зависят, поэтому:

$$|U_{\text{пад}}(x)| = |U_{\text{пад}}|; \quad |U_{\text{отр}}(x)| = |U_{\text{отр}}|.$$

Тогда комплексные амплитуды падающей и отраженной волн можно записать в виде:

$$\begin{cases} U_{\text{пад}}(x) = |U_{\text{пад}}| e^{jkx}; \\ U_{\text{отр}}(x) = |U_{\text{отр}}| e^{-jkx}; \end{cases} \quad (4.2)$$

Режим работы линии передачи характеризуется комплексным коэффициентом отражения по напряжению $\Gamma(x)$, который вводят как отношение

$$\Gamma(x) = \frac{U_{\text{отр}}(x)}{U_{\text{пад}}(x)} = \frac{|U_{\text{отр}}|}{|U_{\text{пад}}|} e^{-j2kx}. \quad (4.3)$$

Коэффициента отражения в плоскости подключения нагрузки определяется по формуле

$$\Gamma_H = \Gamma(x=0) = |\Gamma_H| e^{j\Psi_H}, \quad (4.4)$$

где Ψ_H — аргумент коэффициента отражения в плоскости подключения нагрузки.

Аналогично формулам (4.1) и (4.2) можно записать выражения для распределения вдоль линии передачи комплексных амплитуд падающей и отраженной волн тока. Так как комплексные амплитуды отраженных волн тока и напряжения отличаются по фазе на 180° , то комплексный коэффициент отражения по току $\Gamma_I(x)$ связан с $\Gamma(x)$ соотношением

$$\Gamma_I(x) = -\Gamma(x).$$

С учетом выражений (4.3) и (4.4) можно (4.1) преобразовать следующим образом:

$$\begin{cases} U(x) = U_{\text{пад}}(x)[1 + \Gamma(x)]; \\ I(x) = I_{\text{пад}}(x)[1 - \Gamma(x)]. \end{cases} \quad (4.5)$$

После подстановки (4.3) и (4.4) в (4.5) получим выражения для распределений амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи:

$$\begin{cases} |U(x)| = U_{\text{пад}} \sqrt{1 + |\Gamma_H|^2 + 2|\Gamma_H| \cos(\Psi_H - 2kx)}; \\ |I(x)| = I_{\text{пад}} \sqrt{1 + |\Gamma_H|^2 - 2|\Gamma_H| \cos(\Psi_H - 2kx)}. \end{cases} \quad (4.6)$$

Рассмотрим особенности распределения напряжения и тока вдоль линии передачи. Из (4.6) следует, что амплитуда напряжения максимальна в сечениях x_{max} , которые удовлетворяют условию

$$\Psi_H - 2kx_{\text{max}} = 2\pi n, \quad (4.7)$$

где $n=0,1,2,\dots$

Местоположение первого относительно нагрузки максимума напряжения из (4.7) определяется по следующей формуле

$$x_{\text{max}1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda. \quad (4.8)$$

Амплитуда напряжения минимальна в сечениях x_{min} , которые удовлетворяют условию

$$\Psi_H - 2kx_{\text{min}} = \pm\pi + 2\pi n, \quad (4.9)$$

где $n=0,1,2,\dots$

Положение первого относительно плоскости подключения нагрузки минимума амплитуды напряжения в линии передачи определяется по одной из формул:

$$\begin{cases} x_{\min 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda + \lambda/4 = x_{\max 1} + \lambda/4, \text{ если } x_{\max 1} \in [0; \lambda/4); \\ x_{\min 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda - \lambda/4 = x_{\max 1} - \lambda/4, \text{ если } x_{\max 1} \in [\lambda/4; \lambda/2). \end{cases} \quad (4.10)$$

При этом максимальные и минимальные значения амплитуд напряжения и тока в линии передачи определяются соотношениями, следующими из (4.6)

$$\begin{cases} U_{\max} = |U_{\text{пад}}|(1 + |\Gamma_H|); & I_{\max} = |I_{\text{пад}}|(1 + |\Gamma_H|); \\ U_{\min} = |U_{\text{пад}}|(1 - |\Gamma_H|); & I_{\min} = |I_{\text{пад}}|(1 - |\Gamma_H|). \end{cases} \quad (4.11)$$

Для удобства описания режимов работы линии передачи вводят понятие коэффициента стоячей волны КСВ ($K_{\text{СТУ}}$), как отношение максимальной и минимальной амплитуд напряжения в линии передачи

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

С учетом (4.11) можно получить соотношения, связывающие КСВ и $|\Gamma_H|$:

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{1 + |\Gamma_H|}{1 - |\Gamma_H|}; \quad |\Gamma_H| = \frac{K_{\text{СТУ}} - 1}{K_{\text{СТУ}} + 1} \quad (4.12)$$

Сопротивление $Z(x)$, соответствующее заданному сечению x линии передачи определяется с учетом (4.5) следующими соотношениями

$$Z(x) = \frac{U(x)}{I(x)} = \rho \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)}. \quad (4.13)$$

Из (4.13) можно получить выражение для определения сопротивления нагрузки

$$Z(x=0) = Z_H = \rho \frac{1 + \Gamma_H}{1 - \Gamma_H}. \quad (4.14)$$

На основании (4.14) коэффициент отражения в нагрузке Γ_H можно считать по формуле

$$\Gamma_H = \frac{Z_H - \rho}{Z_H + \rho}. \quad (4.15)$$

При заданной длине отрезка линии передачи l величина $Z(x=l) = Z_{\text{ВХ}}$ называется входным сопротивлением линии передачи.

После преобразования (4.3) и (4.13) получим

$$Z_{\text{ВХ}} = Z(x=l) = \rho \frac{Z_H + j\rho \operatorname{tg} kl}{\rho + jZ_H \operatorname{tg} kl}. \quad (4.16)$$

Для вычисления мощности P_H , поступающей в нагрузку, можно воспользоваться следующим выражением

$$P_H = P_{\text{ВХ}} (1 - |\Gamma_H|^2), \quad (4.17)$$

где $P_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}^2 / \rho$ — мощность сигнала, подводимого ко входу линии передачи.

4.2. Методические рекомендации к выполнению задачи № 2

Симметричный вибратор (СВ) состоит из двух прямолинейных плеч длиной l , разделенных малым по сравнению с длиной волны зазором (рис. 4.2). Источник сторонней ЭДС $\varepsilon_{\text{ст}}$ для упрощения модели СВ считают подключенным между входными зажимами. За начало отсчета вдоль оси Z принимается середина зазора между входными зажимами. Угол на точку наблюдения θ отсчитывается от положительного направления оси Z .

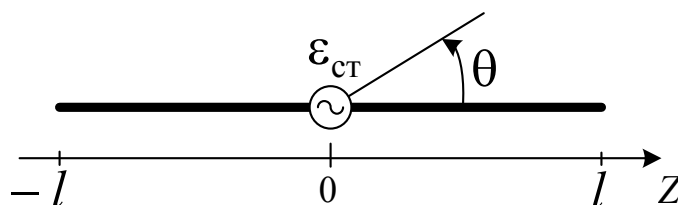


Рис. 4.2 — Схема симметричного вибратора

Под действием ЭДС генератора в проводниках симметричного вибратора возбуждается ток, являющийся источником электромагнитного поля.

Для расчета напряженности поля формируемого симметричным вибратором в дальней зоне можно воспользоваться выражением

$$E = j \frac{60 I_l}{R \sin(kl)} f(\theta) \exp(-jkR), \quad (4.18)$$

где I_l — амплитуда тока на входных зажимах симметричного вибратора;

R — расстояние от симметричного вибратора до рассматриваемой точки в дальней зоне антенны;

l — длина плеча симметричного вибратора;

$k = 2\pi/\lambda$ — волновое число;

$f(\theta)$ — амплитудная диаграмма направленности (ДН) симметричного вибратора.

Для тонкого вибратора (диаметр поперечного сечения проводников плеч СВ много меньше длины волны) характерно синусоидальное распределение тока вдоль плеч. В этом случае амплитудная диаграмма направленности (ДН) $f(\theta)$ в плоскостях, проходящих через ось антенны (**E-плоскости**), определяется выражением:

$$f(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)}{\sin \theta} \right|. \quad (4.19)$$

При построении ДН обычно выполняют ее нормировку к максимальному значению. Направления максимального излучения симметричного вибратора при $l \leq 0,625\lambda$ соответствуют углам $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$, тогда:

$$f\left(\pm \frac{\pi}{2}\right) = 1 - \cos kl. \quad (4.20)$$

Следовательно, нормированные диаграммы направленности $f^{\text{норм}}(\theta)$ симметричного вибратора при $l \leq 0,625\lambda$ рассчитываются с учетом (4.20) по формуле:

$$f^{\text{норм}}(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \right|. \quad (4.21)$$

С учетом (4.20) и (4.18) максимальную амплитуду напряженности поля излучения симметричного вибратора на расстоянии от R него с учетом можно рассчитать на основании выражения

$$|E_{\max}| = \frac{60I_l[1 - \cos(kl)]}{R \sin(kl)}. \quad (4.22)$$

Для построения ДН симметричного вибратора необходимо провести ее анализ, а именно:

— определить направления нулей ДН θ_{0n} из условия

$$\cos \theta_{0n} = \pm 1 \pm n \cdot \frac{\lambda}{l}, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots; \quad (4.23)$$

— предварительно оценить направления максимумов ДН $\theta_{\max m}$ как бисектрисы углов между двумя соседними направлениями нулевого излучения (m — порядковый номер максимумов ДН);

— определить $f(\theta_{\max m})$.

За направление главных максимумов в ДН симметричного вибратора принимаются углы $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$. Если дополнительные (побочные) максимумы в ДН симметричного вибратора $f(\theta_{\max m})$ будут больше уровня излучения в главном направлении, то нормировку ДН необходимо производить к этим максимальным значениям. В этом случае следует говорить о том, что симметричный вибратор имеет недопустимую форму диаграммы направленности, исключающую возможность применения рассматриваемого СВ как антенны.

Входное сопротивление симметричного вибратора произвольной длины является комплексным, то есть состоит из активной и реактивной составляющих $Z_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + jX_{\text{ВХ}}$. Величины этих составляющих зависят от электрической длины и радиуса поперечного сечения плеч симметричного вибратора.

Один из подходов к определению входного сопротивления симметричного вибратора связан с использованием понятия «сопротивление излучения» R_Σ . Сопротивление излучения — это величина, имеющая размерность сопротивления и связывающая излучаемую антенной мощность P_Σ с током I_0 пучности на проводнике [12, С. 146 — 150]

$$R_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{I_0^2}.$$

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{120\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} E_m^2(\theta) R^2 \sin \theta d\theta,$$

где R, θ, φ — координаты точки наблюдения;

$E_m(\theta) = \frac{60I_0}{R} \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}$ — амплитуда напряженности электрического поля, создаваемого симметричным вибратором в точке наблюдения.

Тогда значение сопротивления излучения симметричного вибратора можно определить по формуле

$$R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} \frac{(\cos(kl \cos \theta) - \cos kl)^2}{\sin \theta} d\theta. \quad (4.24)$$

При относительной длине плеча СВ $l/\lambda \leq 0,25$ рассчитывается сопротивление излучения, отнесенное к входным зажимам симметричного вибратора, $R_{\Sigma l}$ по формуле

$$R_{\Sigma l} = R_{\Sigma} / \sin^2(kl). \quad (4.25)$$

С учетом приведенных рассуждений входное сопротивление симметричного вибратора можно определять по формулам [12, С. 146 — 150]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{ex} = R_{\Sigma l} - j\rho_e \operatorname{ctg}(kl), \text{ при } l \leq \lambda/4 \\ \\ Z_{ex} = \frac{R_{\Sigma} - j0,5\rho_e \left(1 - \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_e} \right)^2 \right) \sin(2kl)}{\sin^2(kl) + \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_e} \right)^2 \cos^2(kl)}, \text{ при } l > \lambda/4 \end{array} \right. \quad (4.26)$$

В случае вибраторных антенн иногда удобно пользоваться расчётным параметром, называемым действующей длиной антенны. Действующей длиной l_d симметричного вибратора называется длина воображаемого вибратора с равномерным распределением тока ($I(z) = I_0 = \text{const}$), создающего в направлении максимального излучения (при $\theta = 90^\circ, 270^\circ$) поле, равное полю данной антенны в направлении её максимального излучения. При этом токи в точках питания обеих антенн считаются равными.

Действующая длина l_d симметричного вибратора определяется по формулам [6, С. 41 — 43]

$$\begin{cases} l_D = \frac{2}{k} \frac{(1 - \cos kl)}{\sin kl}, \text{ при } l \leq \frac{\lambda}{4} \\ l_D = \frac{2}{k} (1 - \cos kl), \text{ при } \frac{\lambda}{2} > l > \frac{\lambda}{4} \end{cases} \quad (4.27)$$

Направленные свойства антенн часто характеризуют коэффициентом направленного действия (КНД). КНД — это величина, которая показывает, во сколько раз напряженность поля реальной антенны в направлении максимума излучения больше напряженности поля эквивалентной ненаправленной антенны, при условии одинаковых мощностей излучения.

В расчетную формулу для КНД входит функция нормированной диаграммы направленности по мощности. Будем определять КНД для симметричных вибраторов произвольной длины в направлении $\theta = \pm 90^\circ$. **В этом случае** необходимо производить нормировку к множителю $1 - \cos kl$ при любой длине плеча. Тогда КНД можно рассчитать по формуле [6, С. 12 — 23]

$$D = \frac{2(1 - \cos kl)^2}{\int_0^\pi \frac{[\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]^2}{\sin \theta} d\theta}. \quad (4.28)$$

В случае, когда требуется определить КНД в произвольном направлении θ' в формулу (4.28) в числителе вместо множителя $1 - \cos kl$ необходимо подставить значение $f(\theta')$.

Для инженерных расчетов КНД при длине плеч симметричного вибратора $l \leq 0,5\lambda$ можно пользоваться приближенной формулой [6, С. 41 — 43]

$$D \approx \frac{30k^2 l_D^2}{R_\Sigma}. \quad (4.29)$$

4.3. Методические рекомендации к выполнению задачи № 3

4.3.1. Методика расчета диаграммы направленности линейной фазированной антенной решетки

Для создания антенны с высокими направленными свойствами используют антенные решетки, которые могут быть построены из первичных излучателей от простейших симметричных вибраторов до сложных дифракционных антенн (например, параболических). Самой сложной задачей при разработке таких антенных систем является определение условий возбуждения (амплитуд и фаз токов) элементов антенной решетки при заданном их расположении в пространстве (например, на криволинейной поверхности). В любом случае, какие бы условия не были заданы, ДН антенной решетки, состоящей из идентичных излучателей, будет определяться согласно теореме умножения по формуле [6, С. 74 — 76]

$$f_{рез}(\theta, \varphi) = f_{эл}(\theta, \varphi) f_{реш}(\theta, \varphi), \quad (4.30)$$

где $f_{эл}(\theta, \varphi)$ — ДН элемента антенной решетки;

$f_{реш}(\theta, \varphi)$ — множитель решетки (ДН системы изотропных излучателей).

В выражении (4.30) неизвестным является множитель решетки $f_{реш}(\theta, \varphi)$, определение которой представляет сложную задачу. Однако для знакомства с простейшими системами (линейными, плоскостными) и заданными условиями возбуждения элементов решетки можно воспользоваться результатами, полученными для эквидистантной линейной решетки, состоящей из изотропных излучателей. Излучатели располагаются на одной линии равноудаленно друг от друга, их возбуждение осуществляется с равным амплитудным и линейным фазовым распределением возбуждающих токов. Наклон фазового распределения определен заданным направлением максимума излучения решетки — θ_0 , отсчитываемого от нормали к линейке излучателей. Тогда, воспользовавшись известными результатами [6, С. 77 — 78], можно записать

$$f_{реш}(\theta, \varphi) = \left| \frac{\sin \left[\frac{N k d}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{N \sin \left[\frac{k d}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right|, \quad (4.31)$$

где $N \geq 2$ — число первичных излучателей антенной решетки;

d — расстояние между первичными излучателями;

$\sin \theta_0 = \Delta\psi / k d$, $\Delta\psi$ — сдвиг по фазе между токами, возбуждающими соседние излучатели антенной решетки.

Подробный анализ (4.31) приведен в [6], поэтому отметим характерные для практики условия возбуждения излучателей.

а) Случай синфазного возбуждения $\Delta\psi = 0$. Максимум излучения совпадает с направлением нормали $\theta_0 = 0$ к полотну антенной решетки.

б) Случай возбуждения $\Delta\psi = \pi/2$. Тогда при $d = \lambda/4$, имеет место излучение в направлении $\theta_0 = \pi/2$.

4.3.2. Методика расчета диаграммы направленности двухэлементной антенной решетки симметричных вибраторов

Рассмотрим два активных симметричных вибратора расположенных в пространстве, как показано на рис.4.3. Симметричные вибраторы возбуждаются токами I_1 и I_2 , соответственно рис. 4.3. При этом отношение токов I_1 и I_2 равно

$$I_2 / I_1 = a \exp(j\Delta\psi),$$

где $a = |I_2| / |I_1|$ — отношение амплитуд токов I_2 и I_1 ;

$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$ — разность фаз токов I_2 и I_1 .

При $\Delta\psi > 0$, ток I_2 опережает по фазе ток I_1 и, наоборот, при $\Delta\psi < 0$ ток I_2 отстает по фазе от тока I_1 .

Формулы для определения поля излучения симметричных вибраторов можно записать в виде [6, С. 51 — 55]:

$$E_1 = j \frac{60 I_1}{\sin kl} f(\theta, \varphi) \exp(-jk r_1) / r_1 ;$$

$$E_2 = j \frac{60 I_2}{\sin kl} f(\theta, \varphi) \exp(-jk r_2) / r_2 ,$$

где $f(\theta, \varphi)$ — ДН симметричного вибратора, которая в плоскости XOZ (E -плоскость) определяется как $f(\theta, 0)$ по формуле (4.21), а в плоскости XOY (H -плоскость) ДН симметричного вибратора изотропная и определяется по формуле $f_H(\pi/2, \varphi) = 1$.

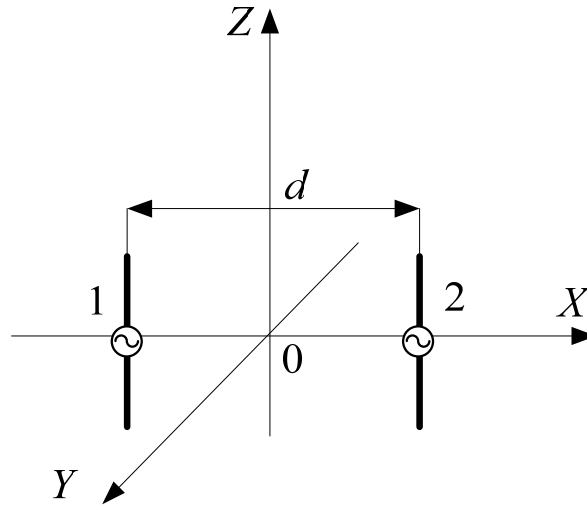


Рис. 4.3 — Схема размещения симметричных вибраторов в решетке

На основании системы отсчета, показанной на рис. 4.4, результирующее поле $E_{рез}$ в зоне излучения будет равно:

$$E_{рез} = E_1 + E_2 = E_1 (1 + E_2/E_1) = E_1 [1 + a \exp(j\Delta\psi) \cdot \exp(-jk(r_2 - r_1))],$$

здесь $r_2 - r_1 = \Delta r = -d \sin \theta$ — геометрическая разность хода лучей (см. рис. 4.4).

Следовательно,

$$E_{рез} = E_1 [1 + a \exp(j(\Delta\psi + k d \sin \theta))].$$

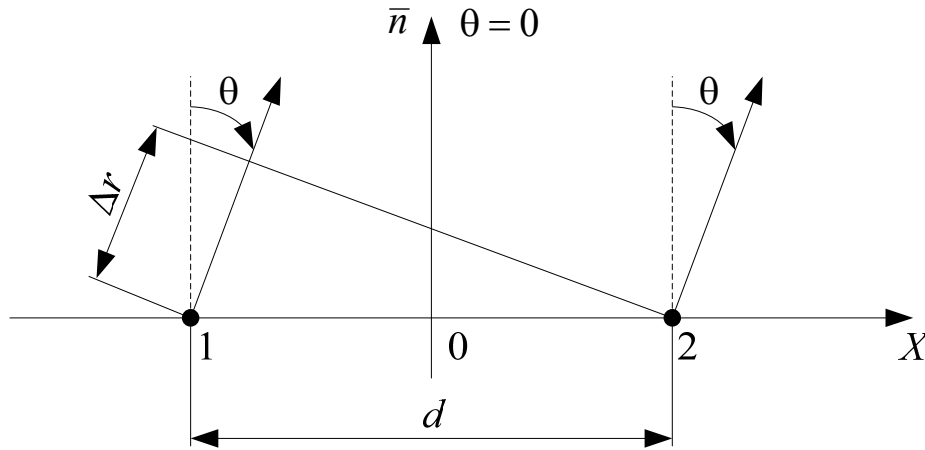


Рис. 4.4 — К выводу формулы множителя решетки

Выделяя модуль

$$|E_{\text{рез}}| = |E_1| \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos(\Delta\psi + kd \sin \theta)},$$

получим результирующее выражение для определения диаграммы направленности двухэлементной решетки

$$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi), \quad (4.32)$$

где $f_{\text{реш}}(\theta) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos(\Delta\psi + kd \sin \theta)}$ — множитель двухэлементной решетки;

$f_{\text{эл}}(\theta, \varphi)$ — диаграмма направленности симметричного вибратора, которая определяется по формуле (4.21), если симметричный вибратор размещен параллельно нормали к решетке (см. рис. 4.3, 4.4); если симметричный вибратор размещен по отношению к нормали под углом 90° , то диаграмма направленности СВ рассчитывается по формуле

$$f_{\text{эл}}(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta (1 - \cos kl)} \right|. \quad (4.33)$$

При $a = 1$, когда симметричные вибраторы возбуждаются токами с равными амплитудами, выражение (4.32) можно преобразовать к виду

$$f_{\text{реш}}(\theta) = 2 \left| \cos \left(\frac{\Delta\psi + kd \sin \theta}{2} \right) \right|. \quad (4.34)$$

На основании формул (4.32), (4.21), (4.32) и (4.33) можно рассчитать диаграмму направленности двухэлементной решетки симметричных вибраторов, показанных на рис. 3.1.

При расчетах необходимо использовать данные таблиц 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1. — Формулы для расчета диаграммы направленности двух-элементной антенной решетки

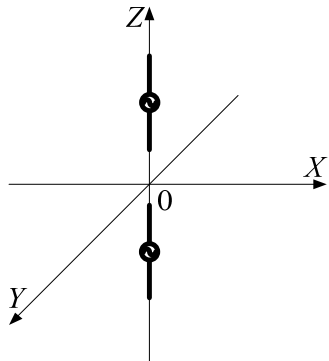
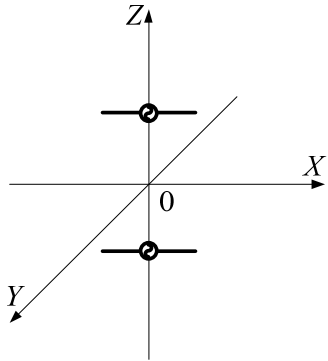
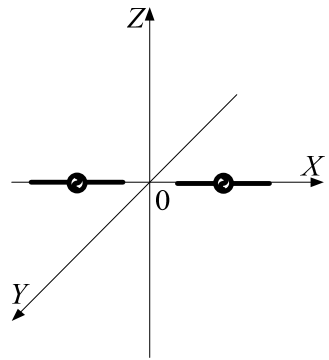
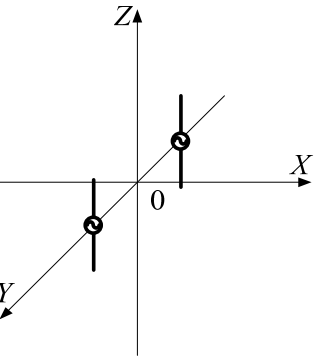
Схема размещения СВ		
Плоскость	Формулы для расчета диаграммы направленности антенной решетки	
—	$f_{\text{эл}}(\theta) = \left \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta (1 - \cos kl)} \right $	$f_{\text{эл}}(\theta) = \left \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \right $
XOZ	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$
YOZ	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$
XOY	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = 1$	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi)$

Таблица 4.2. — Формулы для расчета диаграммы направленности двух-элементной антенной решетки

Схема размещения СВ		
Плоскость	Формулы для расчета диаграммы направленности антенной решетки	
—	$f_{\text{эл}}(\theta) = \left \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta (1 - \cos kl)} \right $	$f_{\text{эл}}(\theta) = \left \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \right $
XOZ	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi)$
YOZ	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = 1$	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$
XOY	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$	$f_{\text{рез}}(\theta, \varphi) = f_{\text{реш}}(\theta, \varphi)$

4.4. Методические рекомендации к выполнению задачи № 4

Принцип работы параболической зеркальной антенны (см. рис. 3.2) основан на том, что сумма расстояний от фокуса F до зеркала и от зеркала до апертуры является величиной постоянной ($FA+AA'=FB+BB'...$). Следовательно, если в фокусе расположен источник сферической волны, то после отражения от зеркала волна преобразуется в плоскую, и излучающий раскрыв антенны возбуждается синфазно.

Геометрические параметры параболической антенны (радиус раскрыва a , фокусное расстояние f и угол раскрыва ψ_0) связаны соотношением

$$a = 2f \operatorname{tg} \frac{\psi_0}{2}. \quad (4.35)$$

Если $\psi_0 < \pi/2$ ($a < 2f$), параболоид называют длиннофокусным, при $\psi_0 > \pi/2$ ($a > 2f$) — короткофокусным.

Параболический профиль зеркала в декартовой системе координат описывается в прямоугольной системе координат уравнением

$$y^2 = 4fx.$$

В полярной системе координат соотношение, описывающее профиль зеркала, имеет вид

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \psi}.$$

Направленные свойства антенны определяются размерами зеркала и амплитудно-фазовым распределением поля по раскрыву антенны. Фазовое распределение поля на апертуре является равномерным. Амплитудное распределение поля зависит, главным образом, от диаграммы направленности облучателя. В большинстве случаев амплитуда поля на раскрыве спадает от максимального значения в центре до некоторого значения на краю раскрыва зеркала (рис. 5.2/4.5). Осесимметричное распределение амплитуды поля на поверхности апертуры зеркала может быть аппроксимировано функцией вида:

$$f(r, \alpha) = 1 - (1 - \Delta) \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^2, \quad (4.36)$$

где Δ — относительная амплитуда поля по краю раскрыва.

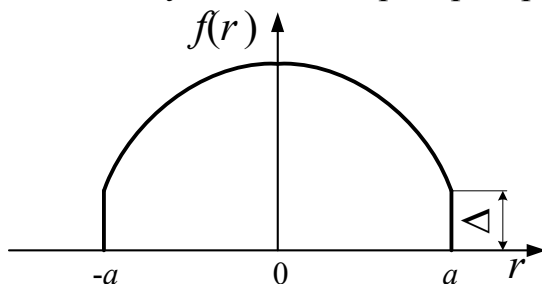


Рис. 4.5 — Нормированное распределение амплитуды поля в апертуре зеркала

Часто перед расчетом диаграммы направленности параболической ан-

тенны необходимо производить приближенную оценку некоторых важных параметров ДН, таких как:

- ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности — $2\theta_{0,5}^E$ (в плоскости E , при $\varphi=0$) и $2\theta_{0,5}^H$ (в плоскости H , при $\varphi=\pi/2$);
- уровень первого бокового лепестка в дБ по напряженности поля, определяемый величиной $\gamma_{\text{бок}}$

$$\gamma_{\text{бок, дБ}} = 20 \lg \frac{|E_{\text{бок, дБ}}|}{|E_{\text{max}}|}.$$

Так для распределения $f(r, \alpha)$, определяемого по формуле (4.36), основные характеристики диаграммы направленности параболической антенны можно оценить по данным, приведенным в таблице 4.3

Таблица 4.3 — Численные параметры ДН

Δ	$2\theta_{0,5}^{E,H}$, град	$\gamma_{\text{бок}}$, дБ
0,1	$67,4\lambda/(2a)$	–24,3
0,2	$66,4\lambda/(2a)$	–23
0,3	$64,8\lambda/(2a)$	–22
0,4	$63,6\lambda/(2a)$	–21,5
0,5	$62,8\lambda/(2a)$	–20,5
0,6	$61,4\lambda/(2a)$	–19,9
0,7	$60,2\lambda/(2a)$	–19,36
0,8	$59,8\lambda/(2a)$	–18,8
0,9	$59\lambda/(2a)$	–18,0
1,0	$58,5\lambda/(2a)$	–17,6

При распределении поля в апертуре параболического зеркала соответствующего рис. 4.5 коэффициент использования поверхности раскрыва зеркала определяется по формуле

$$\nu_a = \frac{3 \cdot (1 + \Delta)^2}{4 \cdot [1 + \Delta(1 + \Delta)]}. \quad (4.37)$$

Рекомендуемые значения фокусного расстояния f и радиуса раскрыва зеркала a можно определить из таблицы 4.4.

При синфазном возбуждении апертуры антенны в виде параболоида вращения ее диаграмма направленности рассчитывается по следующему выражению

$$F(\theta, \varphi) = (1 + \cos \theta) \int_0^{2\pi} \int_0^a f(r, \alpha) \exp[jkr \sin \theta \cos(\varphi - \alpha)] r dr d\alpha \quad (4.38)$$

где $k=2\pi/\lambda$ — волновое число; θ, φ — сферические координаты точки наблюдения, при этом θ отсчитывается от нормали к апертуре.

Таблица 4.4 — Рекомендуемое соотношение для выбора значений f и a

Тип облучателя	f/a
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде стержня	0,68...0,8
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде сплошного экрана	0,8...1,0
Рупорный облучатель	1,0...1,25

Если ввести нормированную координату раскрыва $r_H = r/a$, то распределение амплитуды поля в апертуре определяется по формуле

$$f(r_H, \alpha) = 1 - (1 - \Delta) \cdot (r_H)^2, \quad (4.39)$$

После преобразований получим следующее выражение для ДН

$$F(\theta, \varphi) = a^2 (1 + \cos \theta) \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r_H, \alpha) \exp[jka r_H \sin \theta \cos(\varphi - \alpha)] r_H dr_H d\alpha. \quad (4.40)$$

Результирующий коэффициент использования поверхности $v_{рез}$ определяется по формуле

$$v_{рез} = v_a \eta, \quad (4.41)$$

где $\eta = P_\Sigma / P_{\Sigma_{обл}}$ — коэффициент полезного действия, равный отношению мощности, излученной зеркалом, к мощности, излученной облучателем.

Уменьшение P_Σ по сравнению с $P_{\Sigma_{обл}}$ происходит, в основном, из-за неполного перехвата зеркалом энергии, излучаемой облучателем, а также затенения зеркала облучателем и элементами его крепления.

Реально достижимый в осесимметричной параболической антенне результирующий коэффициент использования поверхности составляет $v_{рез} \approx 0,5...0,6$.

Коэффициент направленного действия параболической антенны можно определить, воспользовавшись графическим методом.

Для этого по данным, полученным при расчете ДН антенны, строятся графики нормированных функций $F_E^{норм}(\theta) = [f_E^{норм}(\theta)]^2$ и $F_H^{норм}(\theta) = [f_H^{норм}(\theta)]^2$ в пределах главного лепестка (рис. 4.6).

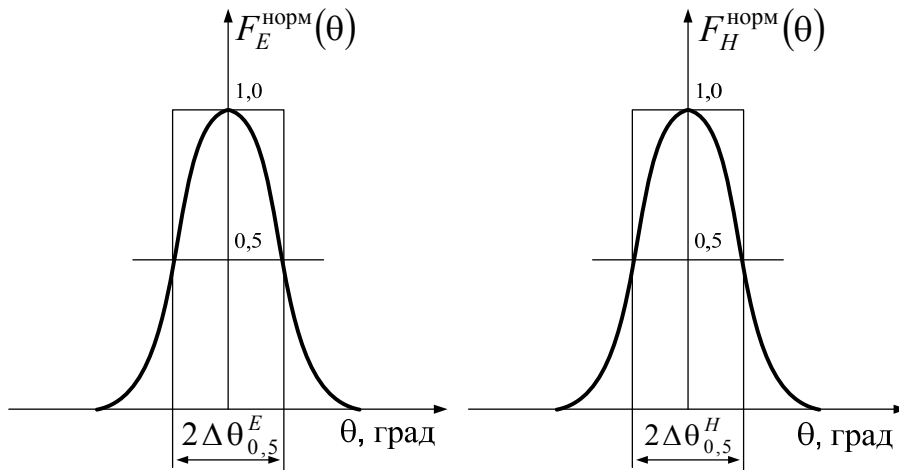


Рис. 4.6 — Определение ширины главного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности

При вычислении КНД значения $2\Delta\theta_{0,5}^E$ и $2\Delta\theta_{0,5}^H$ в градусах подставляются в следующую формулу

$$D = \frac{41300}{2\Delta\theta_{0,5}^E 2\Delta\theta_{0,5}^H}. \quad (4.42)$$

Коэффициент усиления параболической антенны можно определить из соотношения

$$G = \eta D, \quad (4.43)$$

где η — КПД зеркальной антенны, учитывающий тепловые потери энергии в облучателе, на зеркале, в элементах крепления облучателя и т. п.

КПД антенны можно определить по формуле (4.41).

Расчет технических допусков на отклонение формы отражающей поверхности зеркала от параболической производится из условия, чтобы обеспечивалась синфазность возбуждения излучающего раскрыва с точностью до $\pi/2$. Этому условию соответствует допустимое отклонение

$$\delta_{\text{доп}} \leq \pm \lambda/16. \quad (4.44)$$

Допустимое смещение облучателя вдоль фокальной оси зеркала относительно точки фокуса зеркала определяется по формуле

$$\delta_{11} \leq \frac{\lambda}{4(1 - \cos \psi_0)}. \quad (4.45)$$

Допустимое смещение облучателя относительно фокуса в фокальной плоскости относительно точки фокуса зеркала рассчитывается по формуле

$$\delta_{\perp} \leq f \sin(\delta\theta_{\text{max}}), \quad (4.46)$$

где $\delta\theta_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4a} \left(4 \frac{f^2}{a^2} - 1 \right)$ — предельно допустимое отклонение максимума

главного луча ДН параболической антенны от направления фокальной оси зеркала, вызванное смещением облучателя, при котором расширение главного лепестка еще незначительно.

Библиографический список

1. Вольман В.И. Техническая электродинамика/ В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. — М.: Связь, 1971. — 487с.
2. Семенов Н.А. Техническая электродинамика/ Н.А. Семенов. — М.: Связь, 1973. — 480с.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. — М.: Высш. школа, 1970. — 439 с.
4. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление /Под ред. Е.П. Котова и В.Д. Каплуна. — М.: Сов. радио, 1979. — 248 с.
5. Хмель В.Ф. Антенны и устройства СВЧ/ В.Ф. Хмель// Сб. задач. — Киев: Вища школа, 1990. — 232с
6. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства/ Г.Н. Кочержевский. — М.: Радио и связь, 1989. — 352с.
7. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства / А.З. Фрадин. — М.: Связь, 1977. — 440 с.
8. Марков Г. Т. Антенны/ Г. Т. Марков, Д.М. Сазонов. — М.: Энергия, 1975. — 528 с.
9. Корбанский И.Н. Антенны/ И.Н. Корбанский. — М.: Энергия, 1973. — 336 с.
10. Лавров А.С. Антенно-фидерные устройства / А.С. Лавров, Г.Б. Резников. — М.:Сов. радио, 1974. —386 с.
11. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин / Под ред. Г.З. Айзенберга / в 2-х частях. — М.: Связь, 1977.
12. Устройства СВЧ и антенны/ Под ред. Д.И. Воскресенского — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
13. Антенны и устройства СВЧ (Проектирование фазированных антенных решеток) / Под ред. Д.И. Воскресенского — М.: Радио и связь, 1981. — 432 с.
14. Вершков М.В. Судовые антенны/ М.В. Вершков, О.Б. Миротворский. — Л.: Судостроение, 1990. — 304 с.
15. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / В.Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — 20 с.

Приложение А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет

Факультет радиоэлектроники
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА
по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

КР защищено с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь

20__ г.

Заказ № 194 от 03.07.2012 г. Тираж 25 экз.

Изд-во СевНТУ.