

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Часть 2

Учебно-методическое пособие

по выполнению лабораторного практикума по дисциплине
для студентов очной и заочной форм обучения направлений

11.03.01 - Радиотехника,

11.03.02 - Информационные технологии и системы связи
и специальности

11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.396.67(076.5)

ББК 32.845я73

A720

Р е ц е н з е н т:

А.А. Щекатурин – канд. техн. наук, доцент

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, В. В. Громоздин

A720 Антенные системы : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума по дисциплине для студентов очной и заочной форм обучения направлений 11.03.01 - Радиотехника, 11.03.02 - Информационные технологии и системы связи и специальности 11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы. В 3 частях. Часть 2 / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и информационной безопасности, кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; составители: В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, В. В. Громоздин. – Севастополь : Изд-во СевГУ, 2021. – 46 с. – Текст : электронный.

Цель учебно-методического пособия — оказание помощи студентам дневной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Антенные системы», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования характеристик проволочных антенн.

УДК 621.396.67(076.5)
ББК 32.845я73

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 6 от 24 февраля 2021 г.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании Учёного совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности, протокол № 8 от 24 февраля 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 4. Исследование внешних характеристик симметричного вибратора	6
2. Лабораторная работа № 5. Исследование внешних характеристик директорной антенны.....	17
3. Лабораторная работа № 6. Исследование внешних характеристик цилиндрической спиральной антенны	32
Библиографический список.....	45
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе	46

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы выполняются бригадами из 2-3 студентов.

Перед выполнением лабораторной работы **студенты обязаны:**

- изучить описание предстоящей лабораторной работы;
- изучить методику предстоящих измерений и расчетов;
- выполнить предварительные расчеты, оформить их в соответствии с требованиями кафедры;
- ознакомиться с правилами работы с измерительными приборами, входящими в измерительную установку;
- подготовиться к ответам на контрольные вопросы, относящиеся к данной лабораторной работе.

Бригада, допущенная к работе, готовит лабораторную установку в соответствии с методическими указаниями и до выполнения измерений предъявляет установку для проверки преподавателю.

При выполнении очередного опыта рекомендуется сначала произвести измерения без записей, чтобы убедиться в работоспособности лабораторной установки и выявить общий характер исследуемой зависимости. При этом следует отметить линейные и нелинейные участки зависимости, что позволит правильно выбрать интервал между отсчетами независимой переменной величины (частоты, напряжения и т.п.), пределы ее изменения, а также число отсчетов, достаточных для выявления особенностей исследуемой зависимости. Затем данный опыт нужно повторить с фиксацией результатов эксперимента.

После завершения работы преподаватель просматривает и подписывает протокол выполнения работы, на основании которого студенты оформляют отчеты.

Защита отчета по выполненной лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчета, знание студентами методики проведения экспериментов и умение анализировать характер полученных зависимостей и обосновывать выводы к работе.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями кафедры к оформлению текстовых документов [1].

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задач исследования;
- структурную схему лабораторной установки;
- исходные данные;
- результаты теоретических исследований;
- результаты экспериментов и расчетов;
- выводы.

Образец оформления титульного листа приведен в Приложении А.

При постановке задач исследования необходимо сформулировать цель лабораторной работы и краткое содержание теоретических и

экспериментальных исследований, которые необходимо выполнить в ходе лабораторной работы.

Исходные данные выбираются каждым студентом в соответствии с предпоследней (M) и последней (N) цифрами номера зачетной книжки.

Теоретические исследования выполняются студентом при подготовке к лабораторной работе. Для получения допуска к работе студент должен предъявить отчет, содержащий подготовленный бланк протокола измерений, и ответить на один-два вопроса (по выбору преподавателя) из числа контрольных вопросов для подготовки к выполнению работы.

Выводы должны носить конкретный характер по каждой из поставленных задач. Не следует подменять выводы перечислением выполненных измерений и наблюдений. Необходимо пояснить особенности исследованных зависимостей, оценить соответствие расчетных и экспериментальных данных, а в случае их расхождения — высказать предположения о возможных причинах, вызвавших такое расхождение.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА

1.1. Цель работы

Освоить методику расчета диаграммы направленности и входного сопротивления симметричного вибратора.

Освоить методику экспериментального исследования диаграммы направленности симметричного вибратора.

Теоретически и экспериментально исследовать влияние геометрических параметров симметричного вибратора на его направленные свойства.

1.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 1.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, однокоординатное опорно-поворотное устройство 3, СВЧ генератор 4, цифровой приемник 5, персональный компьютер 6, фиксированный аттенюатор 7, опорное устройство для вспомогательной антенны 8.

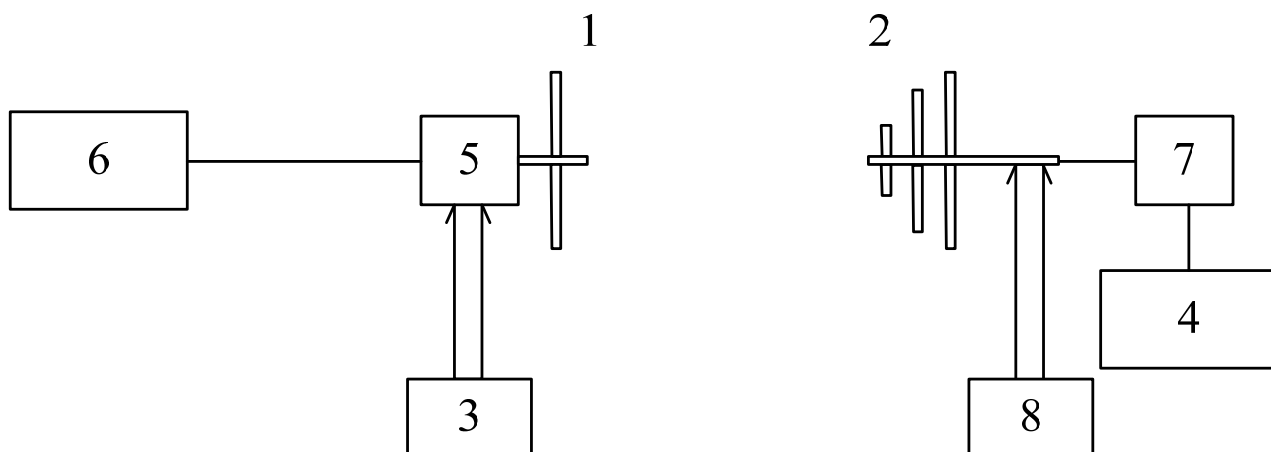


Рис. 1.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности.

Однокоординатные опорно-поворотные устройства позволяют вращать антенны в азимутальной плоскости.

1.3. Исходные данные

Исходными данными к индивидуальным заданиям для теоретических и экспериментальных исследований являются: рабочая частота f , три значения длин плеч симметричного вибратора l_1, l_2, l_3 , указанные в долях длины волны λ (табл. 1.1).

Таблица 1.1 — Исходные данные для теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f , МГц	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_1/λ	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,6
l_2/λ	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,72
l_3/λ	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,05	1,1	1,15	1,2

Радиус проводников симметричного вибратора $a = 3,5$ мм.

1.4. Методика расчета диаграммы направленности и входного сопротивления симметричного вибратора

1.4.1. Расчет диаграммы направленности

Симметричный вибратор (СВ) состоит из двух прямолинейных плеч длиной l , разделенных малым по сравнению с длиной волны зазором (рис. 1.2). 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. Положение точки наблюдения $M(r, \theta, \varphi)$ в сферической системе координат задается модулем радиус-вектора r , углом θ , отсчитываемым от положительного направления оси Z , и углом φ в поперечной плоскости.

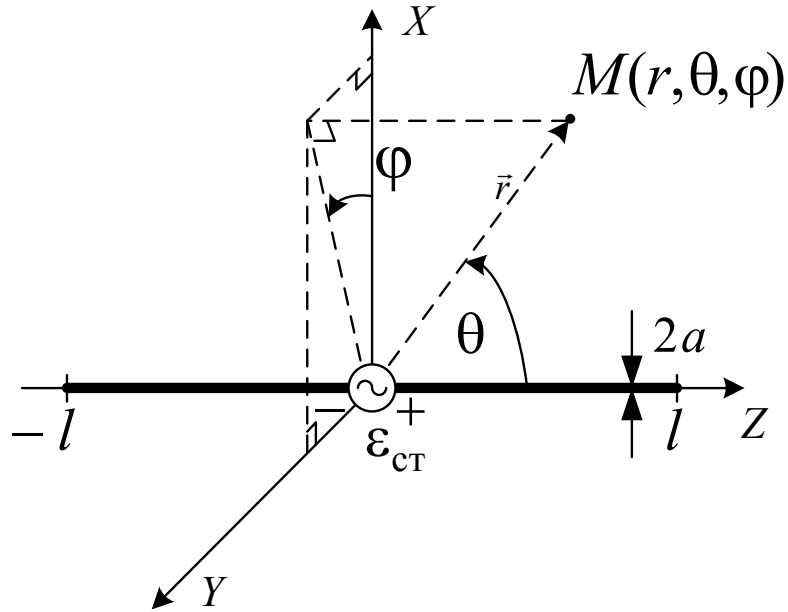


Рис. 1.2 — Схема симметричного вибратора

В первом приближении для описания распределения токов $I(z)$ и потенциалов $U(z)$ вдоль плеч тонкого симметричного вибратора используют модель симметричного вибратора в виде эквивалентной разомкнутой длинной линии (рис. 1.3).

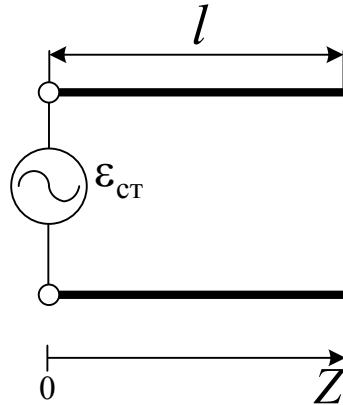


Рис. 1.3 — Эквивалентная схема симметричного вибратора в виде разомкнутой длинной линии

В этом случае $I(z)$ и $U(z)$, как ток и напряжение в разомкнутой линии, задаются выражениями

$$\begin{cases} U(z) = \pm \frac{U_H}{2} \cos[k(l - |z|)] \\ I(z) = j \frac{U_H}{2\rho_B} \sin[k(l - |z|)] \end{cases}, \quad (1.1)$$

где U_H — напряжение на конце эквивалентной длинной линии;

$\rho_B = 120(\ln l/a - 1)$ — волновое сопротивление симметричного вибратора.

В соответствии со схемой СВ (см. рис. 1.2), принят знак «+» для правого плеча, знак «-» — для левого.

Для симметричного вибратора с длинами плеч $l = \lambda/2$ и $l = 3\lambda/4$ распределения тока и потенциалов представлены на рис. 1.4 и 1.5, соответственно.

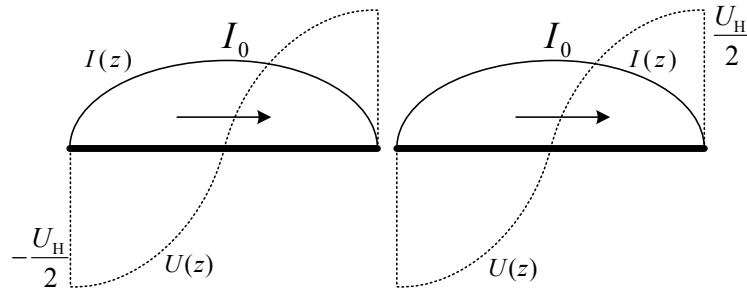


Рис. 1.4 — Распределение тока и потенциалов вдоль плеч симметричного вибратора при длинах плеч $l = \lambda/2$

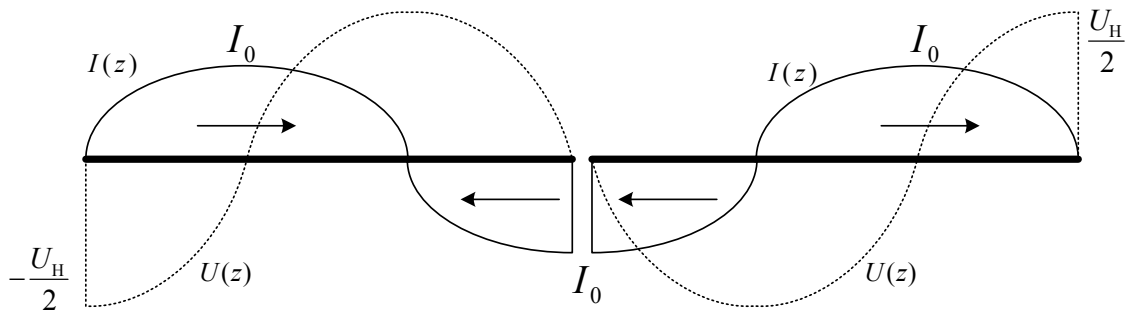


Рис. 1.5 — Распределение тока и потенциалов вдоль плеч симметричного вибратора при длинах плеч $l = 3\lambda/4$

Путем интегрирования распределения тока можно получить выражение для пространственной диаграммы направленности (ДН) по полю $f(\theta, \varphi)$ (1.1)

$$f(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos(\theta)) - \cos(kl)}{\sin(\theta)} \right|, \quad (1.2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Принято анализировать ДН антенны в двух основных сечениях: E -плоскости и H -плоскости. Так как $\vec{E}$, порождаемый электрическими токами, параллелен этим токам, то в нашем случае плоскость XOZ на рис. 1.2 ($\theta = 0^\circ \dots 360^\circ, \varphi = 0^\circ$) является E -плоскостью, а XOY ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$) — H -плоскостью. ДН СВ (1.2) в E - и H -плоскостях рассчитываются с учетом указанных пределов изменения углов θ и φ . Поскольку в (1.2) $f(\theta, \varphi)$ не зависит от угла φ , СВ в H -плоскости имеет круговую ДН. Для анализа характеристик поля излучения СВ в дальнейшем будем рассматривать ДН только в E -плоскости: $f(\theta)$.

При построении ДН в ходе теоретических исследований обычно выполняют ее нормировку к максимальному значению. Направления максимального излучения симметричного вибратора при $l \leq 0,625\lambda$ соответствуют углам $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$, для которых

$$f(\pm 90^\circ) = 1 - \cos kl.$$

Следовательно, нормированную ДН по полю СВ $f^{\text{норм}}(\theta)$ при $l \leq 0,625\lambda$ можно выразить формулой

$$f^{\text{норм}}(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \right|. \quad (1.3)$$

При анализе формы ДН СВ выполняют следующее:

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

$$\cos \theta_{0n} = \pm 1 \pm n \cdot \frac{\lambda}{l}, \text{ где } n=0,1,2,\dots; \quad (1.4)$$

— предварительно оценивают направления максимумов ДН $\theta_{\max m}$ ($m=1,2,\dots$) как биссектрисы углов между двумя соседними направлениями нулевого излучения;

— определяют уровни ДН в максимумах $f(\theta_{\max m})$.

За направление главных максимумов ДН симметричного вибратора принимают углы $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$. Если дополнительные (побочные) максимумы в ДН СВ $f(\theta_{\max m})$ будут больше уровня излучения в главном направлении, то нормировку ДН необходимо производить к этим максимальным значениям.

Принято строить ДН СВ в полярной системе координат в нормированном виде (рис. 1.6).

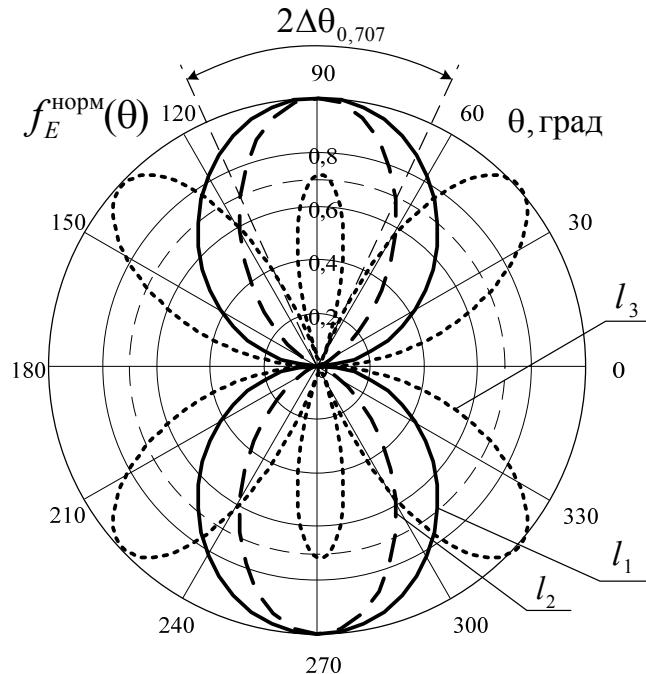


Рис. 1.6 — Нормированные диаграммы направленности СВ в E -плоскости при $l_1 = 0,25\lambda$, $l_2 = 0,5\lambda$, $l_3 = 0,75\lambda$

На рис. 1.6 видно, что при $l > \lambda/2$ на плечах симметричного вибратора появляются противофазные участки тока, которые неблагоприятно сказываются на характеристиках излучения антенны:

- уменьшается интенсивность излучения в главном направлении ДН;
- уменьшается ширина главного лепестка ДН;
- увеличивается относительный уровень бокового излучения.

Для случаев, когда наибольший уровень излучения наблюдается при $\theta = \pm 90^\circ$, ширину главного лепестка нормированной ДН, представленной по полю, будем определять по уровню 0,707 от максимума, как показано на рис. 1.5 на примере ДН симметричного вибратора при $l = 0,5\lambda$.

Диаграмма направленности антенны по мощности $F(\theta)$ связана с ДН антенны по полю $f(\theta)$ соотношением

$$F(\theta) = f^2(\theta).$$

Для ДН по мощности $F(\theta)$ ширину главного лепестка определяют по уровню 0,5 («половинной мощности»).

На практике часто используют нормированные ДН, выраженные в децибелах. Нормированные диаграммы направленности по полю пересчитывают по формулам

$$f_{\text{дБ}}(\theta) = 20 \lg f^{\text{норм}}(\theta). \quad (1.5)$$

Для пересчета нормированной диаграммы направленности по мощности используют выражение

$$f_{\text{дБ}}(\theta) = 10 \lg F^{\text{норм}}(\theta).$$

Таким образом, ДН в децибелах становится единственной, ширину ее главного лепестка определяют по уровню -3 дБ.

1.4.2. Методика расчета входного сопротивления симметричного вибратора

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.

Идеальная двухпроводная линия передачи не излучает электромагнитного поля в пространство, поэтому представленная на рис. 1.3 модель симметричного вибратора в виде эквивалентной длинной линии требует уточнения.

Введем понятие сопротивления излучения R_Σ , как величины, имеющей размерность сопротивления и связывающей излучаемую антенной мощность P_Σ с током I_0 в пучности его распределения вдоль плеч СВ

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

Величину P_Σ найдем путем интегрирования потока мощности излучения

по сфере произвольного радиуса r

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

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 СВ в точке наблюдения.

Тогда для сопротивления излучения СВ можно получить формулу

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

Обозначим через $R_{\Sigma l}$ сопротивление излучения, отнесенное к входным зажимам симметричного вибратора. При синусоидальном распределении токов

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

Теперь можем уточнить модель эквивалентной длинной линии. Для «коротких» СВ ($l/\lambda \leq 0,25$) в каждый проводник введем половину $R_{\Sigma l}$ у входных зажимов (рис. 1.7, а), а для «длинных» СВ ($l/\lambda > 0,25$) — половину R_{Σ} в точках, отстоящих на $\lambda/4$ от концов плеч (рис. 1.7, б).

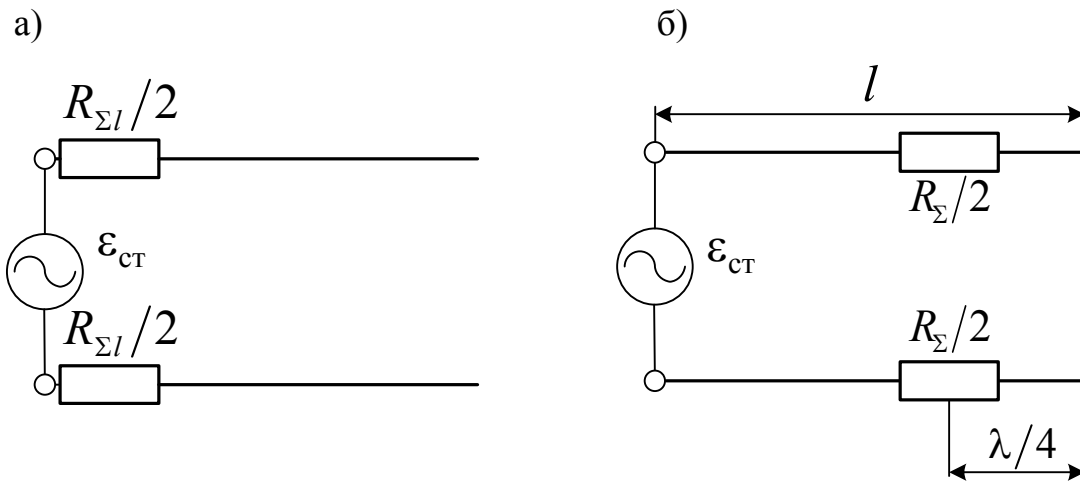


Рис. 1.7 — Уточненная модель эквивалентной длинной линии для $l/\lambda \leq 0,25$ (а) и $l/\lambda > 0,25$ (б)

Для входного сопротивления СВ получим формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{\text{BX}} = R_{\Sigma l} - j\rho_{\epsilon} \operatorname{ctg}(kl), \text{ при } l \leq \lambda/4; \\ Z_{\text{BX}} = \frac{R_{\Sigma} - j0,5\rho_{\epsilon} \left(1 - \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_{\epsilon}} \right)^2 \right) \sin(2kl)}{\sin^2(kl) + \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_{\epsilon}} \right)^2 \cos^2(kl)}, \text{ при } l > \lambda/4. \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Для оценки характеристик вибраторных антенн часто вводят расчётный параметр, называемый **действующей длиной антенны** — это длина воображаемого СВ с равномерным распределением тока, создающего в направлении максимального излучения (при $\theta = \pm 90^\circ$) поле, равное по уровню полю данной антенны в направлении её максимального излучения.

При этом токи в точках питания обеих антенн считаются равными.

Используя выражение (1.3) для ДН СВ, для действующей длины $l_{\text{Д}}$ можно получить выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Д}} = \frac{2}{k} \frac{(1 - \cos kl)}{\sin kl}, \text{ при } l \leq \frac{\lambda}{4}; \\ l_{\text{Д}} = \frac{2}{k} (1 - \cos kl), \text{ при } \frac{\lambda}{2} > l > \frac{\lambda}{4}. \end{array} \right. \quad (1.7)$$

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

Обычно КНД СВ определяют в направлениях $\theta = \pm 90^\circ$ по формуле

$$D = \frac{2(1 - \cos kl)^2}{\int_0^\pi \frac{[\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]^2}{\sin \theta} d\theta}. \quad (1.8)$$

Если требуется определить КНД в произвольном направлении θ' , то в формулу (1.8) в числителе вместо множителя $1 - \cos kl$ вводят значение $f(\theta')$.

Для инженерных расчетов КНД при длине плеч симметричного вибратора $l \leq 0,5\lambda$ можно пользоваться приближенной формулой

$$D \approx \frac{30k^2 l_{\text{Д}}^2}{R_{\Sigma}}. \quad (1.9)$$

1.5. Порядок выполнения работы

1.5.1. Теоретические исследования

Для симметричного вибратора с относительной длиной плеча l/λ , работающего на частоте f , необходимо выполнить следующее.

а) Для трех значений длин плеч симметричного вибратора рассчитать по формулам (1.2), (1.3) и построить **нормированные** амплитудные ДН антенны в E -плоскости, проанализировав при этом местоположение нулей (1.4) и максимумов ДН.

б) Рассчитать для трех значений длин плеч входное сопротивление симметричного вибратора (1.6). Построить графики зависимостей $R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ симметричного вибратора в зависимости от длины его плеч в диапазоне значений от l_1 до l_3 с шагом $\Delta l = 0,05(l_3 - l_1)$.

в) Определить для трех значений длин плеч действующие длины (если возможно) (1.7) и КНД (1.8) симметричного вибратора.

1.5.2. Экспериментальные исследования

а) Согласно индивидуальному заданию выставить длину плеч симметричного вибратора, равную l_1 .

б) Включить генератор Г4-76А и установить на нем частоту, соответствующую исходным данным.

в) Установив исследуемую антенну на опорно-поворотное устройство.

г) Запустить на персональном компьютере программу управления цифровым приемником «Антенные измерения» (рис. 1.8). Включить цифровой приемник, нажав кнопку «►» в верхней части программы. При этом в нижней части программы будет отображаться спектр принимаемого сигнала. В центре принимаемой полосы частот находится «пораженная» частота, уровень которой постоянный и не зависит от того, какой сигнал подается на приемник. **НЕОБХОДИМО СЛЕДИТЬ ЗА ТЕМ, ЧТОБЫ ЧАСТОТА ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА НЕ СОВПАДАЛА С «ПОРАЖЕННОЙ» ЧАСТОТОЙ!!!**

д) Установить в программе частоту работы приемника, соответствующую частоте, установленной на генераторе. Уточняя частоту приема добиться наличия в отображаемом на экране спектре наличия сигнала, передаваемого вспомогательной антенной.

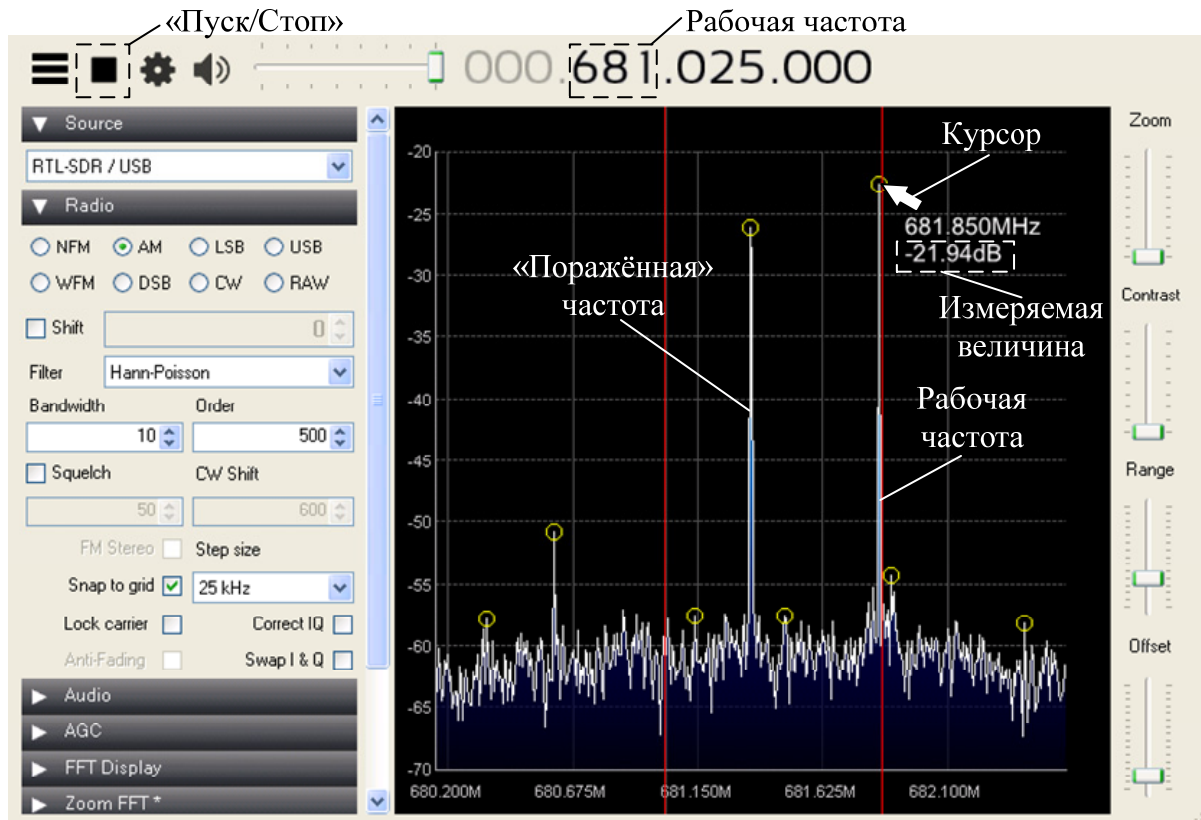


Рис. 1.8 — Интерфейс программы управления цифровым приемником

е) Вращая исследуемую антенну на опорно-поворотном устройстве, добиться того, чтобы уровень принимаемого сигнала был минимален. При этом данное положение принимается за $\theta_{\min}=0^\circ$. **При этом ось антенны должна совпадать с направлением на вспомогательную антенну.**

ж) Провести измерения ДН симметричного вибратора. Для этого из положения, соответствующего минимуму ДН $\theta_{\min}$, нужно поворачивать исследуемую антенну вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства от 0° до 360° с шагом 10° . При каждом положении антенны необходимо определять $\alpha'(\theta)$ с помощью программы управления цифровым приемником путем совмещения курсора с максимумом измеряемой составляющей спектра принимаемого сигнала. **Необходимо учитывать, что измерения проводятся в дБ.** Результаты измерения $\alpha'(\theta)$ и соответствующий ему угол θ необходимо занести в табл. 1.2.

з) Выставить длину плеч симметричного вибратора, равную l_2 , и повторить действия по пп. е, ж.

и) Выставить длину плеч симметричного вибратора, равную l_3 , и повторить действия по пп. е, ж.

1.5.3. Обработка результатов измерений

а) Пересчитать уровни отсчетов $\alpha'(\theta)$ в разы по формуле

$$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{\frac{\alpha'(\theta) - \alpha'_{\max}}{20}}.$$

Полученная зависимость представляет собой нормированную диаграмму

направленности антенны $f^{\text{норм}}(\theta)$. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 1.2).

Таблица 1.2 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Угол ДН θ , град	0°	10°	...
$\alpha'(\theta)$, дБ	–53	–45	...
$f^{\text{норм}}(\theta)$	0,0022	0,0036	...

б) В полярной системе координат построить диаграммы направленности для трех значений длин плеч симметричного вибратора, используя значения $f^{\text{норм}}(\theta)$ из табл. 1.2.

в) Определить значения ширины главного лепестка по уровню 0,707 для экспериментально измеренных и рассчитанных ДН и построить их зависимости от относительной длины плеча l/λ .

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1 Вопросы для допуска к лабораторной работе

- Дать определение диаграммы направленности антенны по полю.
- Дать определение коэффициента направленного действия.
- Дать определение сопротивления излучения симметричного вибратора.
- Построить диаграмму направленности полуволнового симметричного вибратора в E - и H -плоскостях. Пояснить, как определяется ширина главного лепестка ДН антенны.
- Дать определение действующей длине симметричного вибратора.
- Какие требования предъявляются к полигону для измерения ДН антенны?
- Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора, если длину его плеч увеличивать от $0,1\lambda$ до $0,5\lambda$?
- Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора, если длину его плеч увеличивать от $0,5\lambda$ до λ ?
- Как связаны между собой диаграммы направленности, выраженные по полю и по мощности?
- При каких длинах плеч симметричного вибратора на них будут отсутствовать противофазные участки тока?
- Как изменятся характеристики поля излучения симметричного вибратора, если на его плечах появятся противофазные участки тока?
- Как изменяется КНД симметричного вибратора с увеличением длины его плеч?
- При каких длинах плеч симметричный вибратор будет обладать чисто активным входным сопротивлением?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

2.1. Цель работы

Изучить принцип действия, методику расчета и анализа характеристик директорной антенны. Приобрести навыки в настройке, регулировке и измерении характеристик излучения директорной антенны, состоящей из двух элементов.

2.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 2.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, однокоординатное опорно-поворотное устройство 3, СВЧ генератор 4, детекторную секцию 5, селективный микровольтметр 6, опорное устройство для вспомогательной антенны 7.

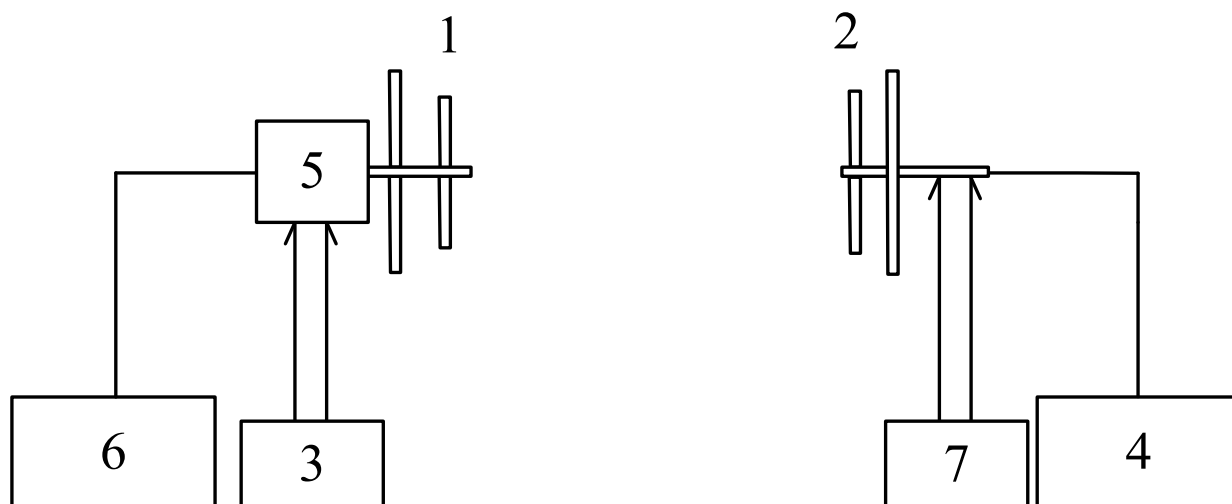


Рис. 2.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности.

Однокоординатные опорно-поворотные устройства позволяют вращать антенны в азимутальной плоскости.

2.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: радиус проводников, образующих плечи симметричных вибраторов в директорной антенне a ; электрическая длина интервала между активным и пассивным излучателями d/λ ; рабочая частота директорной антенны f ; минимально допустимое значение коэффициента направленного действия (КНД) $D_{\text{доп}}$; тип пассивного вибратора: рефлектор (Р) или директор (Д) (табл. 2.1).

Таблица 2.1 — Исходные данные для теоретических и экспериментальных исследований

M , предпоследняя цифра номера ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f , МГц	400	410	425	450	435	500	475	485	490	460
d/λ	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,30
N , последняя цифра номера ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_{\text{доп}}$	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
тип пассивного вибратора	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д

Примечание: радиус проводников директорной антенны $a = 3,5$ мм.

2.4. Методика расчета диаграммы направленности и входного сопротивления директорной антенны

Директорная антенна представляет собой линейную систему параллельных симметричных вибраторов, расположенных перпендикулярно оси антенны. Питание от генератора получает лишь один из симметричных вибраторов, который называется активным. Возбуждение остальных симметричных вибраторов, называемых пассивными (директоры и рефлектор), осуществляется волной, распространяющейся вдоль системы излучателей. Источником этой волны является активный излучатель. В результате того, что возбужденные пассивные излучатели становятся источниками излучения, диаграмма направленности (ДН) директорной антенны существенно изменяется по сравнению с ДН одиночного симметричного вибратора. Схема директорной антенны изображена на рис. 2.2.

Принцип действия директорной антенны основан на сложении в пространстве полей нескольких излучателей, амплитуды и фазы токов в которых подобраны таким образом, чтобы в главном направлении создаваемые отдельными излучателями поля суммировались, а в противоположном — вычитались.

Амплитуда и фаза тока в пассивных излучателях определяется расстояниями d_{di} (i — номер директора, отсчитываемый со стороны активного излучателя) и d_p от соответствующего пассивного до активного излучателя и настройкой, которая осуществляется изменением длины плеч директоров и рефлектора.

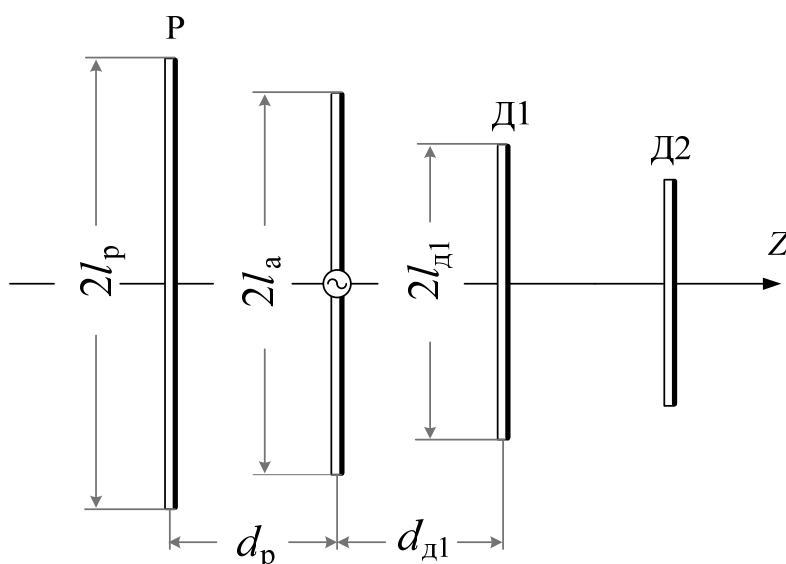


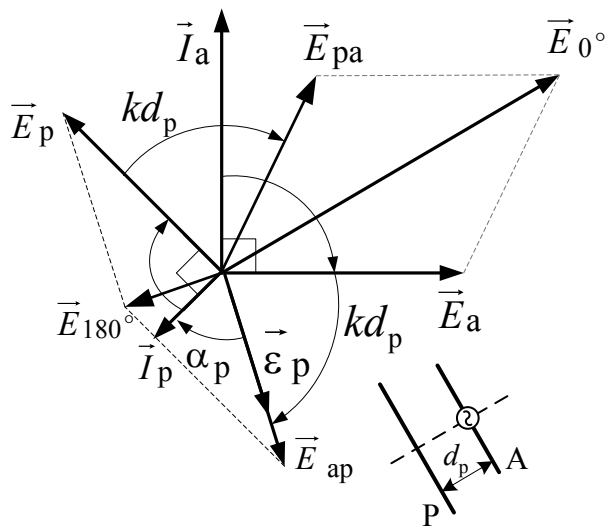
Рис. 2.2 — Структурная схема директорной антенны

Пассивный излучатель, имеющий наибольшую длину (в среднем на 5 — 10 % длиннее активного), называют рефлектором (Р), так как он отражает энергию в сторону активного излучателя и гасит излучение «назад», то есть в свою сторону. Пассивные излучатели, длина которых в среднем на 10 — 15 % короче длины активного излучателя, называют директорами (Д), так как они концентрируют результирующее излучение в свою сторону и гасят излучение в сторону активного излучателя.

Принцип действия директорной антенны наглядно поясняется с использованием векторных диаграмм. Поле, излучаемое директорной антенной в направлении положительной и отрицательной осей Z , представляет собой векторную сумму полей активного излучателя, директора и рефлектора. Фазовый сдвиг излучаемых пассивными излучателями полей по отношению к полю активного излучателя, определяется фазами токов, возбуждающих пассивные излучатели, по отношению к фазе тока в активном излучателе. При рассмотрении фазовых соотношений необходимо учитывать, что активный излучатель имеет резонансную длину, т.е. его входное сопротивление чисто активно R_a ; длина рефлектора больше резонансной, поэтому его входное сопротивление, наряду с активной составляющей R_p , имеет реактивную составляющую X_p , носящую индуктивный характер; длина директора меньше резонансной, поэтому его входное сопротивление имеет активную составляющую R_d и реактивную составляющую емкостного характера X_d . Чтобы найти необходимые фазовые соотношения, целесообразно воспользоваться векторными диаграммами.

Рассмотрим работу системы *пассивный рефлектор — активный излучатель*. Покажем с помощью векторных диаграмм (рис. 2.3, а), что в направлении от рефлектора к активному симметричному вибратору поля излучателей складываются, а в противоположном направлении — вычитаются.

а)



б)

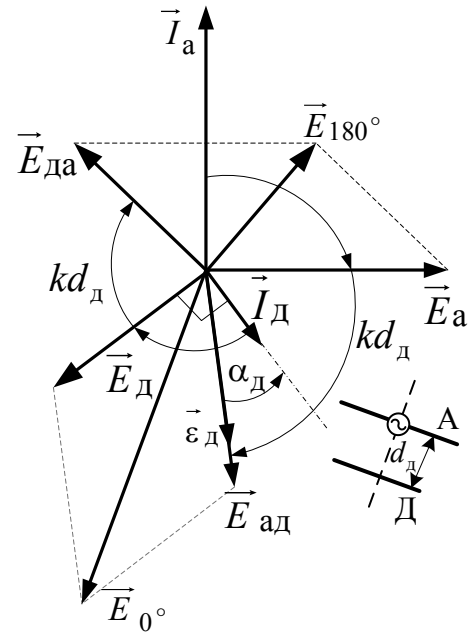


Рис. 2.3 — Векторные диаграммы для поля излучения директорных антенн, образованных системой двух излучателей: пассивный *рефлектор* и активный излучатель (а); пассивный *директор* и активный излучатель (б)

Для определения напряженности электрического поля в вышеуказанных направлениях необходимо знать, как сдвинуты по фазе друг относительно друга вектор напряженности электрического поля $\vec{E}_a$ активного симметричного вибратора у его поверхности и вектор напряженности электрического поля рефлектора $\vec{E}_p$ у его поверхности. Установить соотношение фаз можно с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 2.3, а.

Пусть вектор тока $\vec{I}_a$ в активном вибраторе занимает положение на комплексной плоскости как показано на рис. 2.3, а. Из теории антенн известно, что при длине плеча симметричного вибратора $l_a \leq 0,25\lambda$ напряженность поля, создаваемого вибратором на расстоянии d в направлении, перпендикулярном оси излучателя (ось Z (см. рис. 2.2)), определяется выражением

$$E = -j \frac{60I_0}{d} \exp(-jkd),$$

где d — расстояние от симметричного вибратора до точки наблюдения;

I_0 — пучность тока на плечах симметричного вибратора;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ — длина волны излучения.

В этом случае электрическое поле активного вибратора у его поверхности $\vec{E}_a$ отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$. По пути до рефлектора это поле запаздывает по фазе на угол kd_p и наводит на рефлекторе электродвижущую

силу (ЭДС) $\vec{\varepsilon}_p$, совпадающую по фазе с электрическим полем у поверхности рефлектора $\vec{E}_{ap}$ и определяемую в соответствии с выражением

$$\vec{\varepsilon}_p = \vec{E}_{ap} \cdot l_{др},$$

где $\vec{E}_{ap}$ — поле активного симметричного вибратора у поверхности рефлектора; $l_{др}$ — действующая длина рефлектора.

Так как реактивное входное сопротивление рефлектора носит индуктивный характер ($X_p > 0$), то ток в рефлекторе $\vec{I}_p$ запаздывает по фазе относительно $\vec{\varepsilon}_p$ на угол $\alpha_p = \arctg(X_p / R_p)$, где $\alpha_p > 0$.

Напряженность электрического поля $\vec{E}_p$, создаваемого у поверхности рефлектора этим током, отстает от тока $\vec{I}_p$ по фазе на угол $\pi/2$.

На пути до активного вибратора поле рефлектора запаздывает по фазе на угол kd_p и становится приблизительно синфазным с полем активного излучателя. Поэтому результирующее поле в положительном направлении оси Z $\vec{E}_{0^\circ} = \vec{E}_{pa} + \vec{E}_a$ усиливается. Поля $\vec{E}_p$ и $\vec{E}_{ap}$ приблизительно противофазны, поэтому результирующее поле в направлении рефлектора (отрицательное направление оси Z) $\vec{E}_{180^\circ} = \vec{E}_p + \vec{E}_{ap}$ относительно мало.

Путем аналогичных рассуждений можно рассмотреть работу директорной антенны, образованной системой *пассивный директор — активный излучатель*. Пусть вектор тока $\vec{I}_a$ в активном вибраторе занимает положение на комплексной плоскости, как показано на рис. 2.3, б. Электрическое поле активного симметричного вибратора у его поверхности $\vec{E}_a$ отстает по фазе от тока $\vec{I}_a$ на угол $\pi/2$. При своем распространении в направлении директора поле запаздывает по фазе на угол kd_d и наводит в директоре ЭДС $\vec{\varepsilon}_d$, совпадающую по фазе с электрическим полем у поверхности директора $\vec{E}_{ad}$. Так как реактивное сопротивление директора носит емкостной характер ($X_p < 0$), то ток в директоре $\vec{I}_d$ опережает по фазе $\vec{\varepsilon}_d$ на угол $\alpha_d = \arctg(X_d / R_d)$, где $\alpha_d < 0$. Напряженность электрического поля $\vec{E}_d$, созданного у поверхности директора током $\vec{I}_d$, отстает от этого тока по фазе на угол $\pi/2$. На пути до активного вибратора поле директора запаздывает по фазе на угол kd_d и становится приблизительно противофазным с полем активного симметричного вибратора. Поэтому результирующее поле $\vec{E}_{180^\circ} = \vec{E}_{da} + \vec{E}_a$ ослабляется в направлении от директора к активному излучателю. Поля $\vec{E}_{ad}$ и $\vec{E}_d$ приблизительно синфазны, поэтому результирующее поле $\vec{E}_{0^\circ} = \vec{E}_{ad} + \vec{E}_d$ усиливается в направлении от активного излучателя к директору.

Более точно определить на плечах симметричных вибраторов директорной антенны амплитуды и фазы токов можно на основании эквивалентной схемы, изображенной на рис. 2.4, где введены следующие обозначения: ε_a — возбуждающая ЭДС; $Z_{\Sigma 11}, Z_{\Sigma 22}, Z_{\Sigma 12}, Z_{\Sigma 21}$ — комплексные собственные и взаимные сопротивления излучения активного и пассивного вибраторов; Z_H — комплексное сопротивление нагрузки пассивного вибратора.

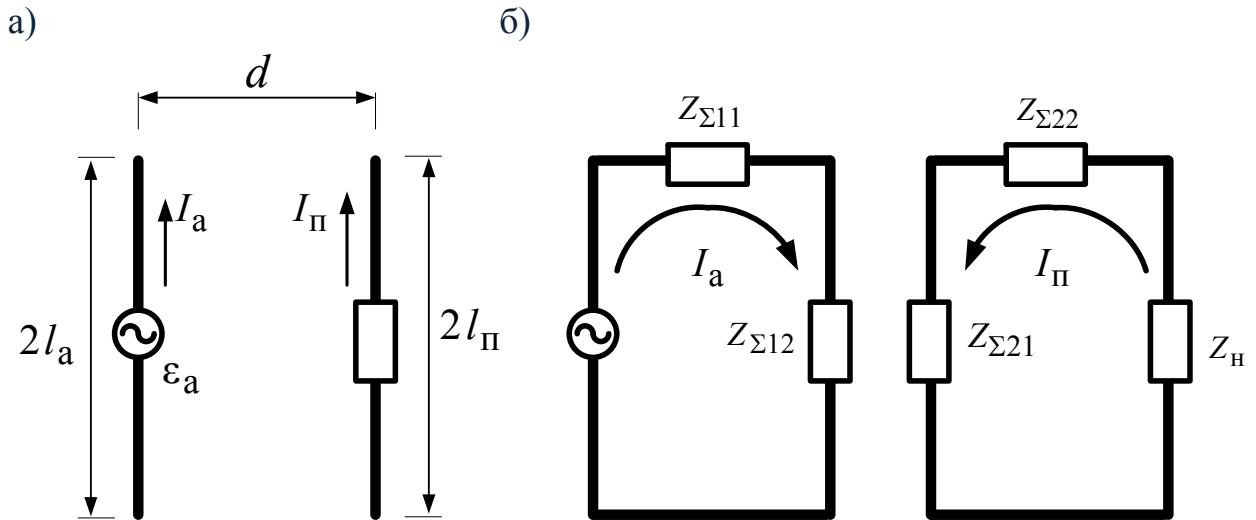


Рис. 2.4 — Модель директорной антенны (а) и ее схема замещения (б)

Амплитуда и фаза комплексного тока в пассивном вибраторе I_Π зависят от его расстояния до активного вибратора, определяющего вносимое сопротивление $Z_{\Sigma 12} = R_{\Sigma 12} + jX_{\Sigma 12}$, и от его настройки $X_H = \text{Im}(Z_{\Sigma 22} + Z_H)$. Причем настройка пассивного вибратора может осуществляться либо изменением длины плеча пассивного вибратора, либо включением в разрыв пассивного вибратора дополнительного реактивного сопротивления Z_H . Так для $Z_H = 0$ длина плеча пассивного рефлектора оказывается больше $0,25\lambda$, а длина плеча директора меньше $0,25\lambda$.

Отношение амплитуд q и разность начальных фаз $\Delta\psi$ токов в пассивном и активном симметричных вибраторах, модели которых показаны на рис. 2.4, а, можно вычислить по следующим формулам:

$$q = \sqrt{\frac{R_{\Sigma 12}^2 + X_{\Sigma 12}^2}{R_{\Sigma 22}^2 + X_H^2}}; \quad (2.1)$$

$$\Delta\psi = \pi + \arctg\left(\frac{X_{\Sigma 12}}{R_{\Sigma 12}}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_{\Sigma 22}}\right). \quad (2.2)$$

Зависимости q и $\Delta\psi$ от сопротивления настройки X_H для пассивного и активного вибраторов, расположенных на различных расстояниях относительно друг друга d/λ , показаны на рис. 2.5, 2.6.

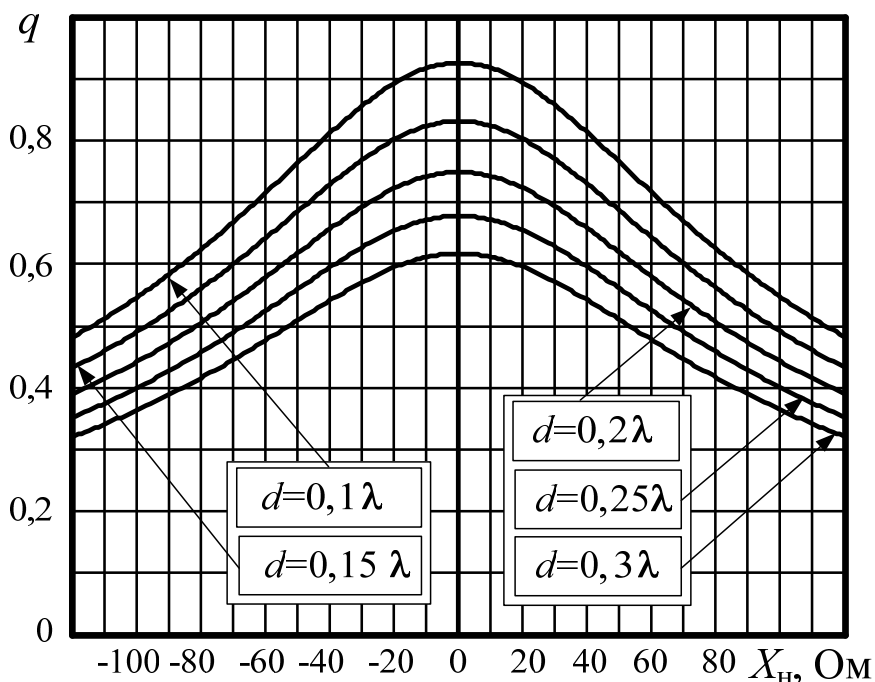


Рис. 2.5 — Зависимости отношения амплитуд токов в пассивном и активном симметричных вибраторах от сопротивления настройки пассивного излучателя

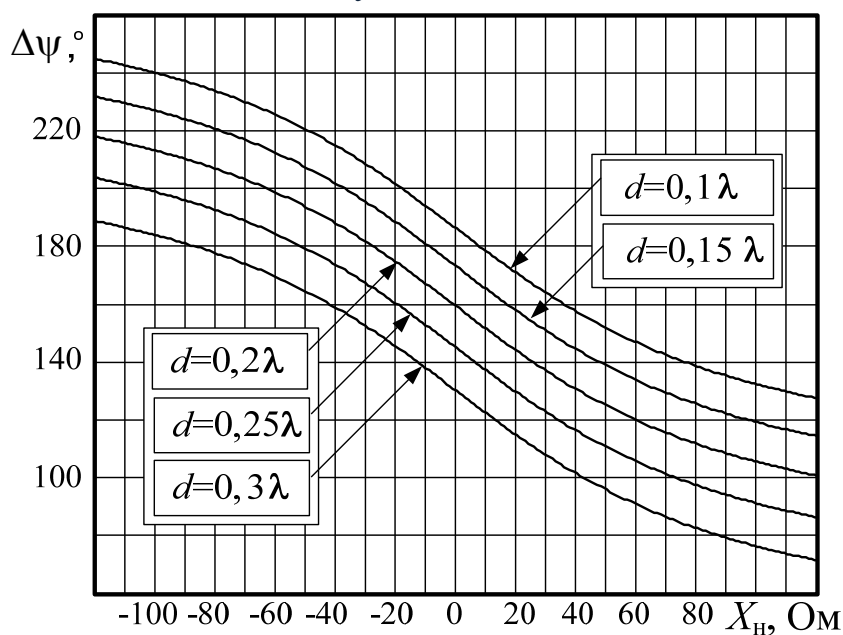


Рис. 2.6 — Зависимости разности фаз токов в пассивном и активном симметричных вибраторах от сопротивления настройки пассивного излучателя

Из рис. 2.5, 2.6 следует, что в случае $d/\lambda = 0,25$ для сложения полей в направлении активного вибратора, необходимо опережение фазы тока в пассивном вибраторе (**рефлекторе**) на угол $\Delta\psi = 90^\circ$, при этом сопротивление настройки X_H должно составлять 100 — 120 Ом. Если же пассивный вибратор выполняет роль **директора**, то отставание фазы тока в нем на 90° (или опережение более 270°) достигается при $X_H < -120$ Ом.

В качестве активного симметричного вибратора выбирается излучатель с длиной плеч $l_a = \frac{\lambda}{4}$, входное сопротивление которого составляет $Z_{ВХА} = R_a + jX_a = 73 + j42,5$ Ом. Для согласования полуволнового симметричного вибратора с питающей его линией передачи необходимо выполнить «резонансное укорочение», что позволит получить $Z_{ВХА} = R_a = 73$ Ом. Таким образом, с учетом резонансного укорочения длина плеч активного полуволнового излучателя выбирается согласно выражения

$$l_a = 0,25\lambda \left[1 - \frac{2X_a}{\pi\rho} \right]; \quad (2.3)$$

где ρ — волновое сопротивление симметричного вибратора с длиной плеча $l = 0,25\lambda$ и радиусом проводников a рассчитывается по формуле

$$\rho = 120 \left[\ln \left(\frac{l}{a} \right) - 1 \right]. \quad (2.4)$$

Для того чтобы пассивный вибратор имел заданную величину сопротивления настройки X_n , его длина выбирается на основании соотношения

$$l_n = 0,25\lambda \left[1 - \frac{2(X_{\Sigma 22} - X_n)}{\pi\rho} \right], \quad (2.5)$$

где $X_{\Sigma 22} = 42,5$ Ом — собственное реактивное сопротивление полуволнового вибратора.

Ненормированная диаграмма направленности двухэлементной директорной антенны рассчитывается по формуле

$$f(\theta, \varphi) = f_{эл}(\theta, \varphi) \cdot f_{реш}(\theta, \varphi), \quad (2.6)$$

где

$$f_{эл}(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl_a \sin \theta \sin \varphi) - \cos kl_a}{\sqrt{1 - (\sin \theta)^2 (\sin \varphi)^2}} \right|. \quad (2.7)$$

$$f_{реш}(\theta, \varphi) = \sqrt{1 + q^2 + 2q \cos(\Delta\psi \pm kd \cos \theta)}. \quad (2.8)$$

Для E -плоскости пределы изменения угловых координат составляют

$$\theta \in [0, 2\pi], \quad \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Для H -плоскости пределы изменения угловых координат составляют

$$\theta \in [0, 2\pi], \quad \varphi = 0.$$

Выбор знака в формуле (2.8) зависит от типа пассивного вибратора:

— для системы излучателей «пассивный директор — активный излучатель» выбирается знак «+»;

— для системы излучателей «пассивный рефлектор — активный излучатель» выбирается знак «-»;

Коэффициент направленного действия в направлении максимального излучения директорной антенны, как и любой антенны, может быть рассчитан

по формуле

$$D = \frac{4\pi f^2(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}})}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi f^2(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}, \quad (2.9)$$

где $f(\theta, \varphi)$ — ненормированная диаграмма направленности антенны; $f(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}})$ — значение ненормированной ДН в направлении главного максимума излучения, положение которого определяется угловыми координатами $\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}}$.

На рис. 2.7, 2.8 показаны зависимости КНД от сопротивления настройки $X_{\text{н}}$ пассивного излучателя при различных значениях d/λ .

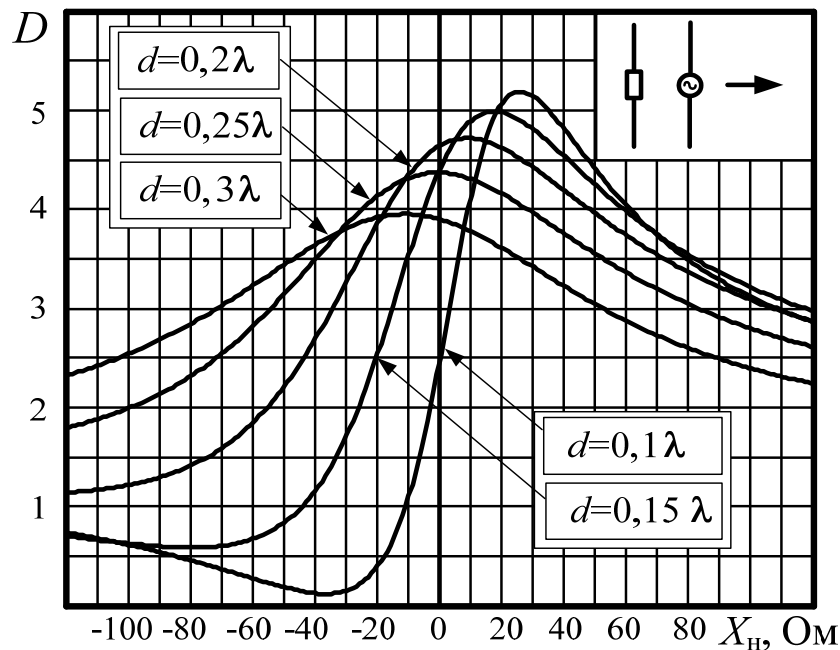


Рис. 2.7 — Зависимость КНД от сопротивления настройки рефлектора

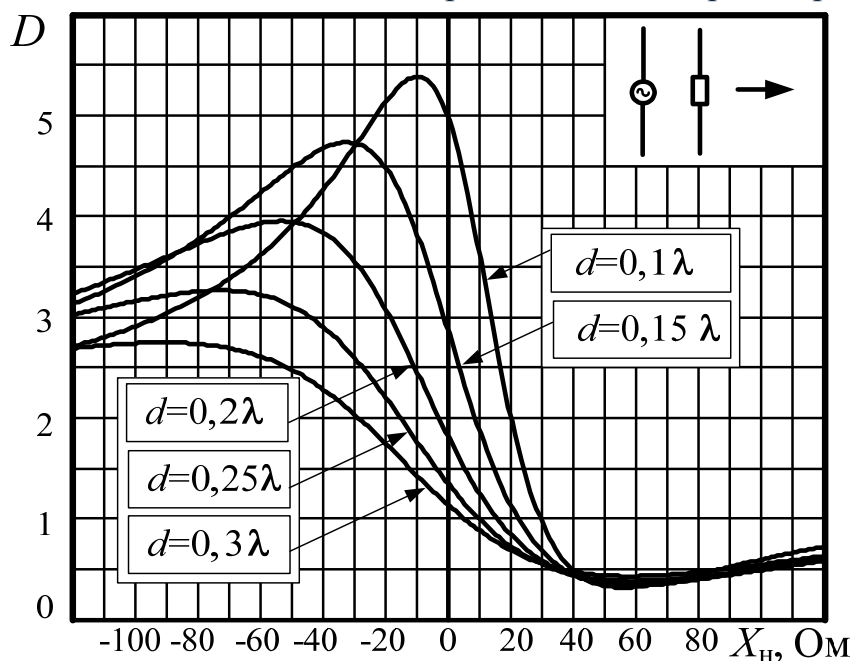


Рис. 2.8 — Зависимость КНД от сопротивления настройки директора

Важной характеристикой директорной антенны является коэффициент защитного действия (КЗД), который показывает во сколько раз излучения в направлении **главного максимума** больше излучения **в обратном направлении**. КЗД рассчитывается по формуле

$$\text{КЗД} = \frac{f(0, \pi/2)}{f(\pi, \pi/2)}, \quad (2.10)$$

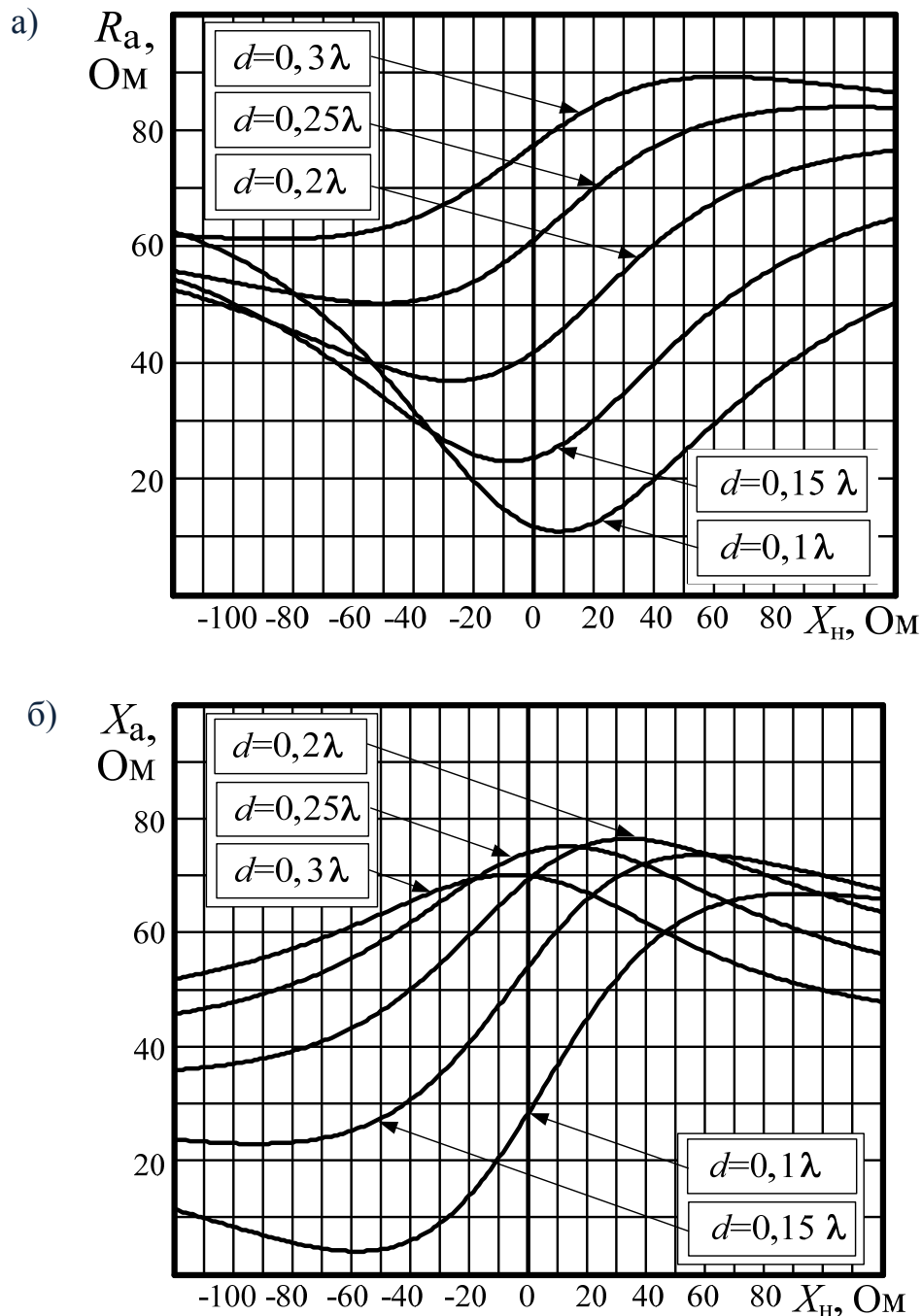


Рис. 2.9 — Зависимость активной (а) и реактивной (б) составляющих входного сопротивления директорной антенны от X_H

Входное сопротивление антенны определяется значением входного сопротивления активного вибратора и рассчитывается по формуле

$$Z_a = R_a + jX_a = R_{\Sigma 11} + jX_{\Sigma 11} - \frac{(R_{\Sigma 12} + jX_{\Sigma 12})^2}{R_{\Sigma 22} + jX_{\Sigma 22}}. \quad (2.11)$$

С учетом (2.11) построены зависимости для Z_a от сопротивления настройки пассивного излучателя X_n при различных d/λ (рис. 2.9).

Следует выбрать такое X_n пассивного вибратора, при котором R_a активного вибратора было бы достаточно велико для обеспечения его согласования с фидером с волновым сопротивлением 50 — 75 Ом. От настройки активного вибратора направленные свойства директорной антенны **не зависят**. Настройка в резонанс активного вибратора и согласование его R_a с волновым сопротивлением фидера ρ_f необходимы для того, чтобы антенна излучала приемлемую мощность, а при проведении экспериментальных исследований — для получения достоверных экспериментальных данных.

При расчете диаграмм направленности многоэлементной директорной антенны в ряде случаев используют упрощенную модель антенны бегущей волны (рис. 2.10), содержащей $N \geq 4$ излучателей (общее количество активных и пассивных излучателей) [2].

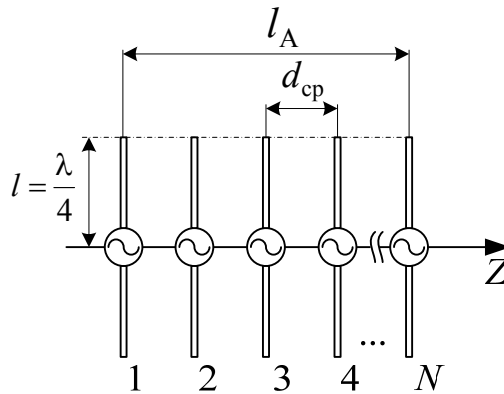


Рис. 2.10 — Модель антенны бегущей волны

Предполагается, что излучатели возбуждаются токами равной амплитуды с линейным законом изменения фазы, описываемым функцией $\psi_i = 90^\circ (N - i)$, где $i = 1 \dots N$ — номер излучателя в решетке.

В этом случае в основных сечениях диаграммы направленности антенны можно рассчитать по следующим формулам:

— диаграмма направленности в H -плоскости

$$F(\theta) = \frac{\left| \sin \left[\frac{Nd_{cp}\pi}{\lambda} (1 - \cos(\theta)) \right] \right|}{\left| N \sin \left[\frac{\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos(\theta)) \right] \right|}.$$

— диаграмма направленности в E -плоскости

$$F(\theta) = \frac{\cos(0,5\pi \sin(\theta)) \left| \sin \left[\frac{N\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos(\theta)) \right] \right|}{\cos(\theta) \left| N \sin \left[\frac{\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos(\theta)) \right] \right|}.$$

Для данной модели директорной антенны можно приближенно оценить ряд ее характеристик:

а) значение ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности:

$$\text{— в } E\text{-плоскости } 2\Delta\theta_{0,5}^E \approx \frac{3,5}{N-1}, \text{ рад;}$$

$$\text{— в } H\text{-плоскости } 2\theta_{0,5}^H \approx \frac{3,8}{N-1}, \text{ рад;}$$

б) значение коэффициента направленного действия

$$D \approx 5 \left[1 + \frac{d_{\text{ср}}(N-1)}{\lambda} \right].$$

2.5. Порядок выполнения работы

2.5.1. Теоретические исследования

Для директорной антенны, работающей на частоте f , необходимо выполнить следующее.

а) На основании графиков, представленных на рис. 2.7, 2.8 для заданного типа пассивного излучателя (*рефлектор* или *директор*), с учетом минимально допустимого значения КНД $D_{\text{доп}}$ выбрать величину сопротивления настройки $X_{\text{н}}$ для пассивного излучателя ($X_{\text{н}} > 0$ — для рефлектора и $X_{\text{н}} < 0$ — для директора).

б) На основании графиков, приведенных на рис. 2.5, 2.6, определить q и $\Delta\psi$ для токов в пассивном и активном симметричных вибраторах.

в) Рассчитать и построить ДН директорной антенны в E - и H -плоскостях, используя формулы (2.6) — (2.8).

г) Рассчитать КНД по формуле (2.9) и КЗД по формуле (2.10).

д) Определить входное сопротивление антенны по графикам, приведенным на рис. 2.9, учитывая, что $Z_{\text{вх}} = R_{\text{а}} + jX_{\text{а}}$.

е) Рассчитать длину плеч активного симметричного вибратора по формулам (2.3), (2.4).

ж) Рассчитать длину пассивного симметричного вибратора по формулам (2.4), (2.5).

з) Провести **оптимизацию геометрических параметров** директорной антенны, добиваясь максимума КЗД и значения $R_{\text{а}}$ не менее 25 — 35 Ом:

— необходимо несколько раз изменять сопротивление настройки $X_{\text{н}}$ с шагом $\Delta X_{\text{н}} = \pm(0,1 \dots 0,2)X_{\text{н}}$;

— при каждом новом значении $X_{\text{н}}$ по графикам на рис. 2.5, 2.6, определить q и $\Delta\psi$, по формуле (2.11) рассчитать КЗД, по формуле (2.10) уточнить значение КНД (не должно быть меньше $D_{\text{доп}}$) и по графикам на рис. 2.9 определить входное сопротивление антенны;

— выбрать X_H , при котором КЗД из всех рассчитанных случаев будет максимальным, КНД не менее $D_{\text{доп}}$, а R_a — не менее 25 — 35 Ом;

— для оптимального значения X_H рассчитать и построить ДН директорной антенны в E - и H -плоскостях, используя формулы (2.6) — (2.8);

— для оптимального случая рассчитать длину плеч активного вибратора, используя формулы (2.3), (2.4);

— для оптимального случая рассчитать длину пассивного симметричного вибратора по формулам (2.4), (2.5).

2.5.2. Экспериментальные исследования

а) Согласно пп. е) и ж) подраздела 2.5.1 теоретического исследования установить длины плеч активного и пассивного симметричных вибраторов.

б) Согласно исходным данным, установить расстояние между симметричными вибраторами d , см.

в) Установив исследуемую антенну на опорно-поворотное устройство, выполнить юстировку исследуемой и вспомогательной антенн. Для этого антенны сориентировать так, чтобы направления максимумов их диаграмм направленности находились на одной линии (рис. 2.11). **Направление $\theta = 0^\circ$ принимается по максимуму показаний селективного микровольтметра $\alpha(0^\circ)$.**

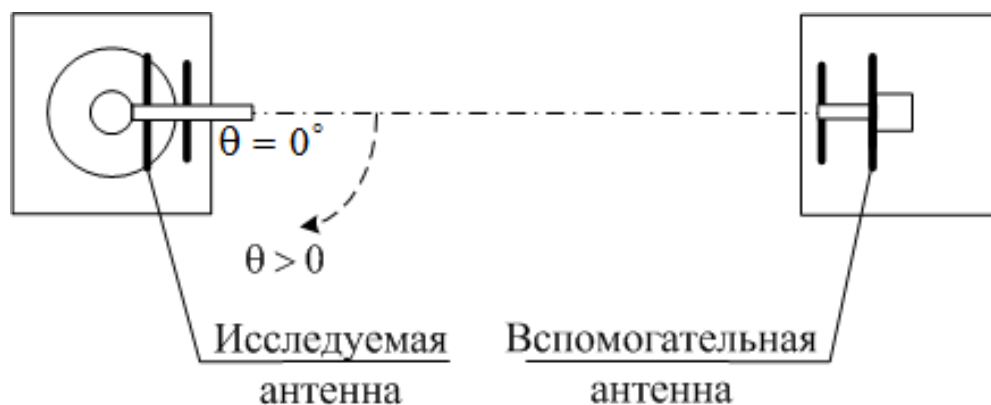


Рис. 2.11 — Схема установки антенны перед измерениями ДН

г) Провести измерения ДН директорной антенны. Для этого из положения, соответствующего максимуму ДН θ_{max} , нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства на угол от 0° до 360° с шагом 10° .

д) По измеренным данным рассчитать значение КЗД по формуле (2.10).

е) Выставить длину плеч активного и пассивного симметричных вибраторов, рассчитанные в ходе оптимизации геометрических размеров пассивного излучателя согласно п. з) подраздела 2.5.1 теоретического исследования.

ж) Определить, при каком значении длин плеч пассивного вибратора величина КЗД максимальна. Для этого необходимо увеличивать (уменьшать) длину плеч пассивного вибратора с шагом 1 см и **в каждом случае** измерять уровень сигнала в двух направлениях $\theta=0^\circ$, 180° и определить КЗД.

з) Для случая максимального КЗД провести измерение ДН по пп. в), г).

2.5.3. Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

а) Результаты теоретических исследований, выполненных в соответствии с подразделом 2.5.1.

б) По результатам измерений, выполненных подразделе 2.5.2., построить ДН директорных антенн со следующими длинами плеч: определенными по исходным данным, определёнными по результатам экспериментальной оптимизации. Для построенных экспериментальных ДН привести значения рассчитанных КЗД.

в) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

г) Сделать выводы по работе.

2.6. Контрольные вопросы и задания

2.6.1 Вопросы подготовки к защите лабораторной работы

а) В чем состоят отличия диаграмм направленности директорной антенны и симметричного вибратора?

б) Из каких соображений выбираются геометрические параметры директора и расстояние от него до активного вибратора?

в) Из каких соображений выбираются геометрические параметры рефлектора и расстояние от него до активного вибратора?

г) Каким образом можно повысить коэффициент защитного действия директорной антенны?

д) Какое влияние оказывают окружающие предметы и подстилающая поверхность на результаты измерений диаграмм направленности директорной антенны.

е) Сравнить рассчитанные и измеренные характеристики поля излучения исследуемой директорной антенны.

ж) Проанализировать и сравнить результаты оптимизации геометрических параметров директорной антенны по критерию максимума КЗД.

з) Поясните критерии выбора геометрических размеров активного вибратора (электрическая длина плеч, резонансное укорочение, диаметр поперечного сечения проводника).

и) Поясните критерии выбора длин плеч директора и рефлектора и расстояния до активного излучателя в директорной антенне.

к) Опишите методику определения входного сопротивления двухэлементной директорной антенны.

2.6.2. Задачи для подготовки к защите лабораторной работы

а) Ширина главного луча ДН директорной антенны на уровне половинной мощности в плоскости H $2\Delta\theta_{0.5}^H = 0,345$ рад. Определить, на какой частоте работает антенна, если ее КНД $D = 30$, $d_{cp} = 0,2$ м.

б) Директорная антенна имеет пять директоров и работает на частоте $f = 75$ МГц. Полная длина антенны $l_A = 6$ м. Рассчитать и построить в полярных координатах нормированную амплитудную диаграмму направленности антенны в E -плоскости, определить ширину главного лепестка диаграммы направленности и КЗД.

в) Рассчитать и построить в полярных координатах нормированные амплитудные диаграммы направленности директорной антенны в H -плоскости при среднем расстоянии между соседними симметричными вибраторами $d_{cp} = 0,2\lambda$ и относительной длине антенны l_A/λ равной: а) 3; б) 2.

г) Определить ширину главного луча диаграммы направленности на уровне половинной мощности в E -плоскости для директорной антенны, имеющей 2, 3, 4, 5, 6 и 10 директоров. По полученным данным построить графическую зависимость $2\theta_{0.5}^E = f(N)$, где N — полное число излучателей в антенне.

д) Директорная антенна, имеющая $N = 7$ излучателей, настроена в резонанс на частоту $f = 80$ МГц. Полная длина антенны $l_A = 2,4$ м. Определить ширину диаграммы направленности антенны в E - и H -плоскостях, КНД антенны.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

3.1. Цель работы

Изучить принцип действия цилиндрических спиральных антенн. Освоить методику расчета и экспериментального исследования характеристик поля излучения ЦСА.

3.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 3.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 3, СВЧ генератор 4, детекторную секцию 5, селективный микровольтметр 6, фиксированный аттенюатор 7, опорное устройство для вспомогательной антенны 8.

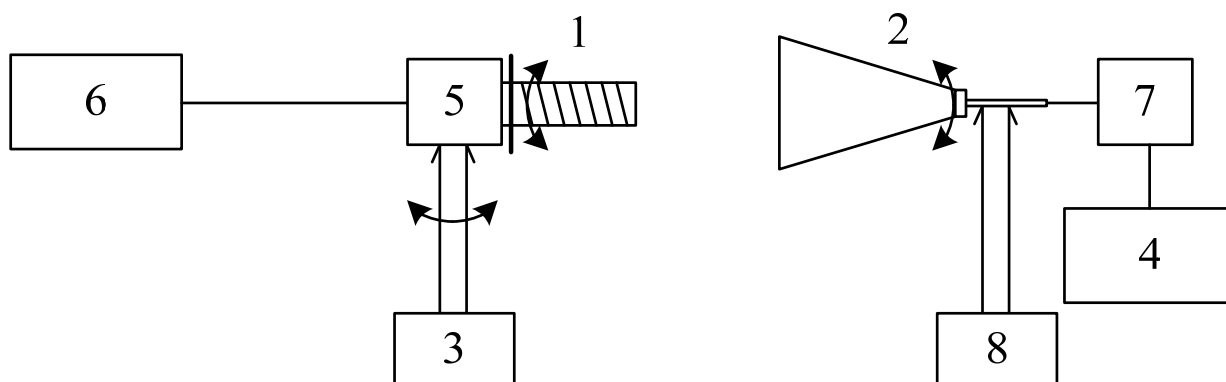


Рис. 3.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности.

Опорно-поворотное устройство 3 позволяет вращать исследуемую антенну в азимутальной плоскости и в плоскости, проходящей через продольную ось антенны. Однокоординатное опорно-поворотное устройство 6 позволяет вращать вспомогательную антенну в плоскости, проходящей через центр апертуры рупора.

3.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических и экспериментальных исследований являются: номер исследуемого макета, диаметр витка спирали D , шаг намотки витков спирали d , угол намотки витков спирали α , количество витков n , диапазон рабочих частот $f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$.

Исходные данные для теоретических и экспериментальных исследований приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 — Исходные данные индивидуальных заданий для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2
M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рабочая частота f_0 , ГГц	2,3	2,4	2,3	2,4	2,5	2	2,1	2	2,1	2,15
Диапазон частот Δf , МГц	200	200	100	100	100	200	200	100	100	100

Таблица 3.2 — Геометрические параметры антенн

№ Антенны	Диаметр витка, D , см	Шаг спирали, d , см	Угол намотки, α , град	Количество витков, n
ЦСА 1	4	4,3	19	9
ЦСА 2	4,5	3,6	14	7

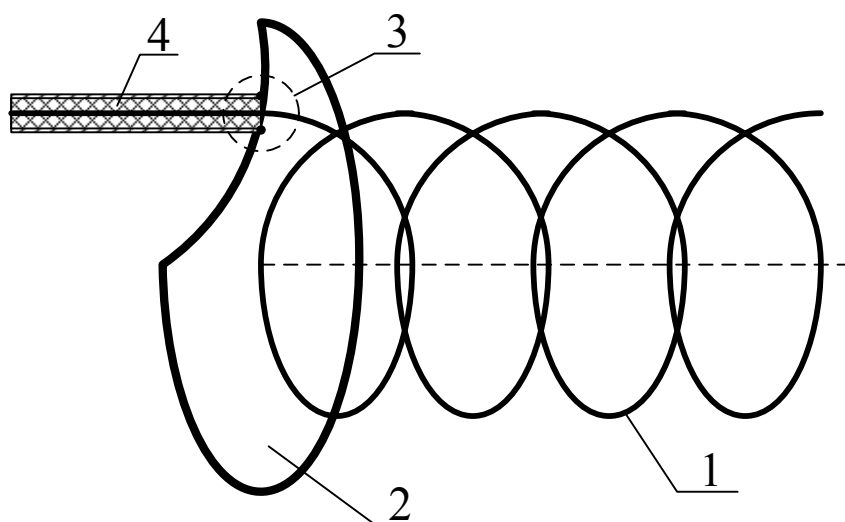
3.4. Методика расчета характеристик цилиндрических спиральных антенн

3.4.1. Конструктивное исполнение и достоинства спиральных антенн

Исследуемая цилиндрическая спиральная антенна (рис. 3.2) представляет собой намотанную из провода спираль 1, один конец которой свободен, а другой соединяется в точке 3 с внутренним проводником коаксиальной линии 4, внешний проводник которой присоединяется к металлическому экрану 2, служащему для ослабления обратного излучения антенны.

Главными достоинствами спиральных антенн являются:

- возможность создания поля излучения с поляризацией от линейной до круговой;
- возможность подбирать требуемые характеристики излучения и входными характеристиками антенны за счет изменения геометрических параметров спирали (габаритной окружности, угла наклона витков, количества витков, количества заходов спиральных проводников, режима возбуждения заходов (синфазного, квадратурного), возможности сжатия цилиндрической спирали до эллипса);
- простота и надежность конструкции;



1 — спираль; 2 — экран; 3 — точка подключения к питающей линии;
4 — коаксиал

Рис. 3.2 — Модель цилиндрической спиральной антенны

- малые поперечные (продольные) габаритные размеры антенны;
- на основе цилиндрических, конических, полусферических спиральных антенн могут быть выполнены комбинированные структуры (сфероцилиндрические, цилиндроконические и т.п.);
- возможность без использования больших экранов обеспечить относительно низкий уровень бокового и заднего излучения (менее $(-15 \dots -10)$ дБ в рабочем диапазоне частот);
- возможность хорошего согласования с питающим фидером в широкой полосе частот;

3.4.2. Поляризационная структура поля излучения спиральных антенн

Спиральные антенны формируют поле излучения с эллиптической (или круговой) поляризацией. В отличие от поля линейно поляризованной волны (рис. 3.3, а), для которой вектор напряженности электрического поля располагается в некоторой плоскости ZOY ($\vec{E}_z$), в случае поля с вращающейся поляризацией при распространении электромагнитной волны вдоль оси OY вектор $\vec{E}$ вращается вокруг нее с некоторой угловой частотой ω (рис. 3.3, б). Если при наблюдении от входных зажимов спиральной антенны вектор $\vec{E}$ вращается по часовой стрелке, то поле считается с правосторонним вращением, иначе — с левосторонним.

Одной из основных характеристик поля излучения, описывающей его поляризационную структуру является коэффициент эллиптичности, определяемый как отношение малой OA и OB большой полуосей эллипса поляризации (см. рис. 3.3, б)

$$K_{\vartheta} = \frac{OA}{OB},$$

который изменяется от 0 до 1.

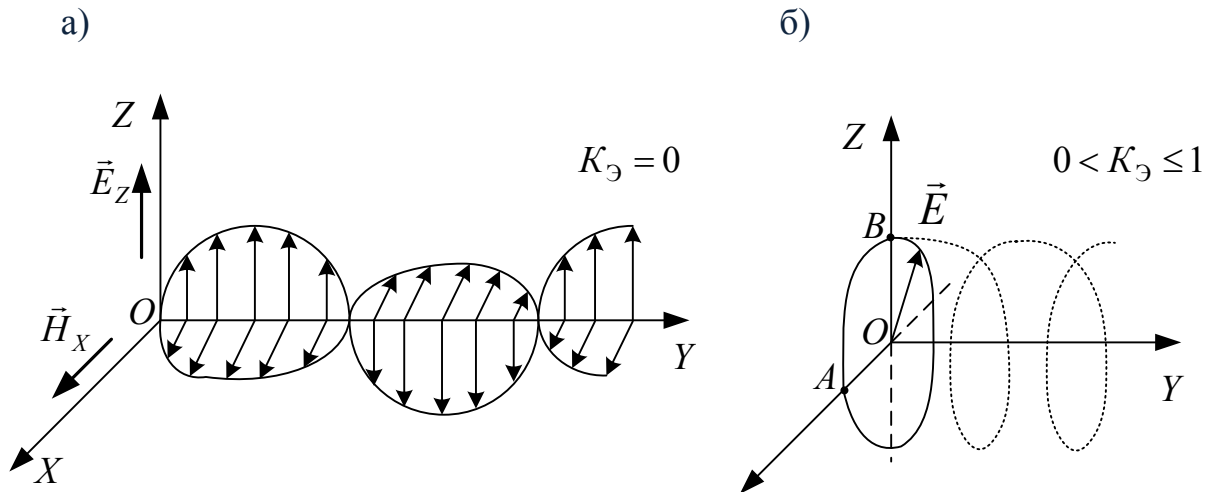


Рис. 3.3 — Поляризационная структура электромагнитного поля

Наиболее общим является случай эллиптически поляризованной волны, которую можно рассматривать как результат суперпозиции двух ортогональных линейно поляризованных волн одинаковой частоты и сдвинутых по фазе в направлении распространения волны на величину δ . Другой вариант представления волны с эллиптической поляризацией — это результат суперпозиции двух полей круговой поляризации одинаковой частоты, но противоположного направления вращения.

Таким образом, согласно первого подхода, поляризационная структура поля зависит от соотношения между двумя линейными составляющими $\vec{E}_X$ и $\vec{E}_Z$ (см. рис. 3.3) волны, распространяющейся вдоль оси OY .

Линейно поляризованные составляющие поля $\vec{E}_X$ и $\vec{E}_Z$ описываются выражениями:

$$E_X = E_{mx} \cos \omega t ;$$

$$E_Z = E_{mz} \cos(\omega t - \delta),$$

где δ — сдвиг фаз между $\vec{E}_X$ и $\vec{E}_Z$, E_{mx}, E_{mz} — амплитуды напряженности поля линейно поляризованных волн, на которые раскладывается вектор $\vec{E}$ (см. рис. 3.4).

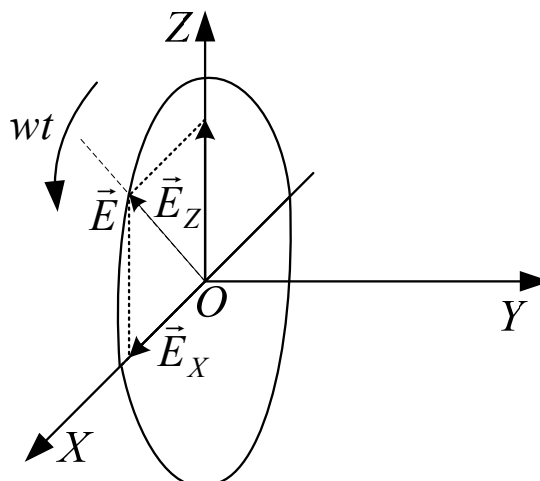


Рис. 3.4 — Формирование эллиптически поляризованной волны

Согласно принятой модели поле эллиптической поляризации можно описать с помощью уравнения эллипса

$$\frac{E_X^2}{E_{mx}^2} - 2 \frac{E_X E_Z}{E_{mx} E_{mz}} \cos \delta + \frac{E_Z^2}{E_{mz}^2} = \sin^2 \delta. \quad (3.1)$$

В случае, когда $\delta = 0$, поле излучения антенны имеет чисто линейную поляризацию, которое согласно (3.1) определяется следующим соотношением

$$E_X = \frac{E_{mx}}{E_{mz}} E_Z.$$

Если $\delta = \frac{(2n+1)\pi}{2}$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$), то поле приобретает эллиптическую поляризацию

$$\frac{E_X^2}{E_{mx}^2} + \frac{E_Z^2}{E_{mz}^2} = 1,$$

при этом оси эллипса OA и OB (см. рис. 3.3,б) совпадают с координатными осями OX и OZ , как показано на рис. 3.4.

В том случае, когда амплитуды $E_{mx} = E_{mz} = E_m$ поле излучения антенны будет иметь круговую поляризацию.

В случае, при котором сдвиг фаз $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$, оси эллипса OA и OB , изображенного на рис. 3.3,б, не будут совпадать с координатными осями.

3.4.3. Расчет характеристик поля излучения однозаходной цилиндрической спиральной антенны

Рассмотрим характеристики поля излучения однозаходной цилиндрической спиральной антенны, упрощенная модель которой показана на рис. 3.5, где введены обозначения: $2a$ — диаметр цилиндра, на котором расположен спиральный проводник, a — радиус спирали; d — шаг намотки витков спирали; n — число витков; $L = \sqrt{(2\pi a)^2 + d^2}$ (рис. 3.5, б) — длина витка между точками «1» и «2» на рис. 3.5, а; $\alpha = \arcsin \frac{d}{L}$ — угол наклона витков относительно плоскости XOZ .

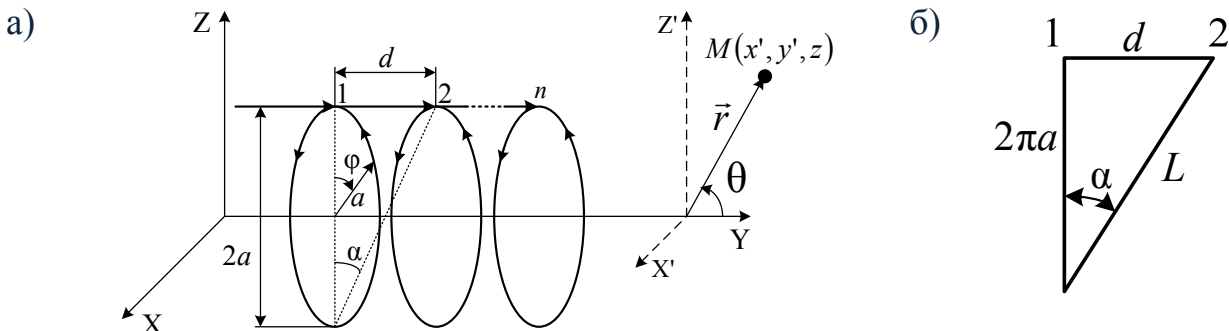


Рис. 3.5 — Модель представления однозаходной цилиндрической спиральной антенны: при ортогональном расположении витков спирали относительно

плоскости XY (а); к определению угла наклона витков спирали (б)

Поляризационная структура поля антенны и режим излучения зависят от соотношения геометрических параметров a , d и длины волны λ . На практике используются спиральные антенны для двух режимов работы (рис. 3.6):

- режим ненаправленного излучения («малых рамок»);
- режим осевого излучения.

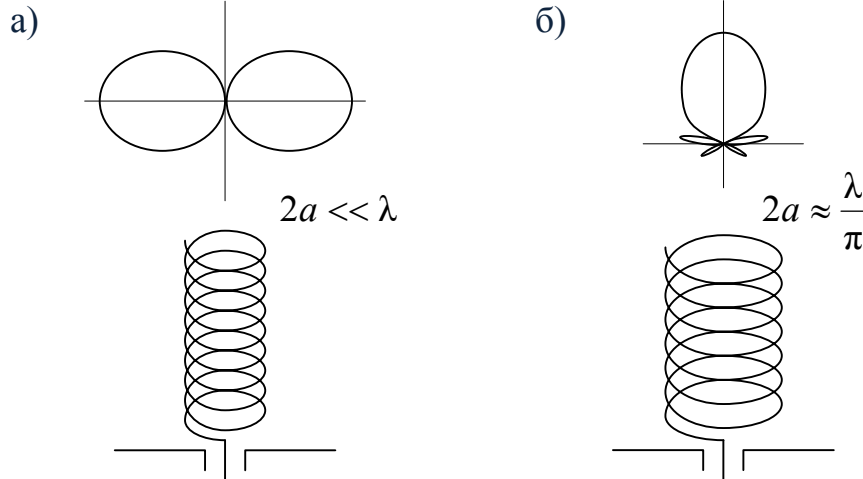


Рис. 3.6 — Основные режимы излучения цилиндрической спиральной антенны:
а) режим малых рамок; б) режим осевого излучения

В случае режима ненаправленного излучения длина витка спирали меньше длины волны λ . Антенну можно представить в виде системы из аксиальных кольцевых рамок и диполей с длиной, равной $d \ll \lambda$. ЦСА работает в режиме малых рамок, поэтому суммарное поле, создаваемое антенной, имеет максимальное значение при $\theta = \frac{\pi}{2}$ (см. рис. 3.6, а). При малых по сравнению с λ поперечных размерах антенны количество витков n не влияет на форму диаграммы направленности (ДН) и поляризационную структуру поля. Поэтому достаточно рассмотреть поле двух элементов: диполя и одного витка спирали. Так для диполя можем записать соотношение [3]

$$E_d = -j \frac{30 I_l k d}{r} \sin \theta e^{-jkr} = -j \frac{60 I_l \pi d}{r \lambda} \sin \theta e^{-jkr}, \quad (3.2)$$

где I_l — амплитуда тока на входных зажимах диполя; r — расстояние до точки наблюдения; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Для рамочного излучателя действующая длина рамки [4]

$$l_{др} = kS,$$

где S — площадь рамки. Следовательно, из (3.2) получим соотношение для поля рамки E_p в виде

$$E_p = -j \frac{120 I_d \pi^2 S}{\lambda^2 r} \sin \theta e^{-jkr}, \quad (3.3)$$

где I_d — ток на действующей длине рамки.

Результирующее поле состоит из двух ортогональных компонент $\vec{E}_d$ (поле диполя длиной d) и $\vec{E}_p$ (поле рамки с периметром $2\pi a$). В том случае, если компоненты поля будут сдвинуты по фазе на $\frac{\pi}{2}$, а токи на рамке и диполе одинаковой амплитуды ($I_d = I_l$), то коэффициент эллиптичности равен

$$K_{\Theta} = \frac{|E_d|}{|E_p|} = \frac{d\lambda}{2\pi S} = \frac{d}{l_{dp}}. \quad (3.4)$$

Так из (3.4) следует, что если бы выполнялось условие $d = l_{dp}$, то поле излучения в плоскости XOZ имело бы круговую поляризацию, однако на практике шаг спирали d оказывается намного меньше действующей длины рамки ($d \ll l_{dp}$), поэтому поле характеризуется как линейно поляризованное.

Рассмотрим режим осевого излучения (см. рис. 3.6, б), при котором длина витка спирали выбирается близкой к длине волны. При этом происходит синфазное или близкое к нему сложение полей витков в осевом направлении. ДН в этом случае приближается к ДН линейки излучателей, возбуждаемых в режиме бегущей волны при выполнении условия $L \approx \lambda$. Таким образом, в режиме бегущей волны, который совпадает с режимом осевого излучения, создается поле круговой поляризации.

В данном случае результирующая амплитудная ДН $F(\theta)$ будет определяться как для решетки излучателей, возбужденных в режиме бегущей волны

$$F(\theta) = f_{эл}(\theta)f_{реш}(\theta), \quad (3.5)$$

где $f_{реш}(\theta)$ — множитель решетки, состоящей из n рамочных излучателей (см. рис. 3.5, а); $f_{эл}(\theta)$ — ДН витка спирали, которую можно определять соотношением [4]

$$f_{эл}(\theta) = \cos\theta. \quad (3.6)$$

Для определения $f_{реш}(\theta)$ необходимо проанализировать разность фаз токов между витками «1» и «2» $\Delta\psi_{1-2}$ (см. рис. 3.5, а). Для $\Delta\psi_{1-2}$ можем записать

$$\Delta\psi_{1-2} = k_{\phi}L,$$

где $k_{\phi} = \frac{2\pi}{\lambda_{\phi}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{c}{v_{\phi}}$; v_{ϕ} — фазовая скорость волны в витке; c — скорость света в свободном пространстве.

С учетом этого

$$\Delta\psi_{1-2} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{c}{v_{\phi}} L. \quad (3.7)$$

Для того чтобы излучение от всех n витков в осевом направлении складывалось, набег фазы на витке должен составлять 2π , поэтому должно выполняться условие

$$\Delta\psi_{1-2} = \frac{2\pi}{\lambda}(l+d) = 2\pi + kd, \quad (3.8)$$

где l — периметр рамки, который должен быть близок к длине волны, kd — набег фазы на диполе (см. рис. 3.5, а).

Сравнивая (3.7) и (3.8) получим

$$\frac{v_{\phi}}{c} = \frac{L}{l+d}.$$

Зная, что $\Delta\psi_{1-2} = k(l+d)$ для $f_{\text{реш}}(\theta)$ можем записать [3, 4]

$$f_{\text{реш}}(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{n}{2}(kd \cos\theta - k(l+d))\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd \cos\theta - k(l+d))\right]}. \quad (3.9)$$

Исследуемая антенна располагается над экраном, поэтому можно воспользоваться методом зеркальных изображений. В соответствии с этим методом при определении поля, создаваемого антенной, полагают, что она размещается над идеально проводящей поверхностью с размерами много больше длины волны. Наводимые на поверхности плоского экрана вторичные токи исключаются из рассмотрения введением фиктивного излучателя, являющегося зеркальным изображением действительной антенны. Зеркальный излучатель располагается на продолжении нормали, соединяющей ось симметрии реальной антенны с проводящим экраном. В любой точке полупространства (где расположена исследуемая антенна) зеркальный излучатель создает точно такое же поле, как и реальная антенна.

С учетом сказанного при расчете ДН антенны необходимо учитывать влияние экрана, воспользовавшись множителем экрана

$$f_{\text{экр}}(\theta) = \cos(kd \sin\theta). \quad (3.10)$$

Тогда результирующая амплитудная ДН антенны по полю с учетом (3.5), (3.6) и (3.9), (3.10) будет определяться выражением:

$$F(\theta) = f_{\text{эл}}(\theta)f_{\text{реш}}(\theta)f_{\text{экр}}(\theta). \quad (3.11)$$

Пример расчета нормированных ДН ЦСА в диапазоне частот показан на рис. 3.7.

Для приближенного расчета характеристик спиральных антенн можно воспользоваться эмпирическими формулами [7]:

— ширина ДН по уровню половинной мощности

$$\Delta\theta \approx \frac{52^\circ}{\frac{L}{\lambda} \sqrt{\frac{nd}{\lambda}}}, \text{ град}; \quad (3.12)$$

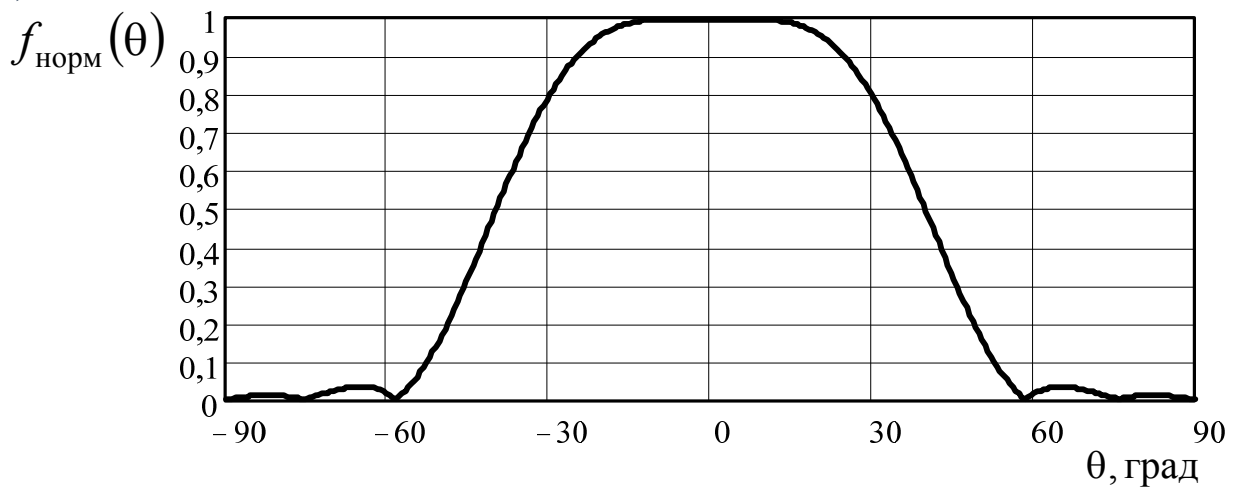
— коэффициент направленного действия (КНД) в направлении оси спирали

$$D \approx 10 \lg \left(15 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 n \frac{d}{\lambda} \right), \text{ дБ}; \quad (3.13)$$

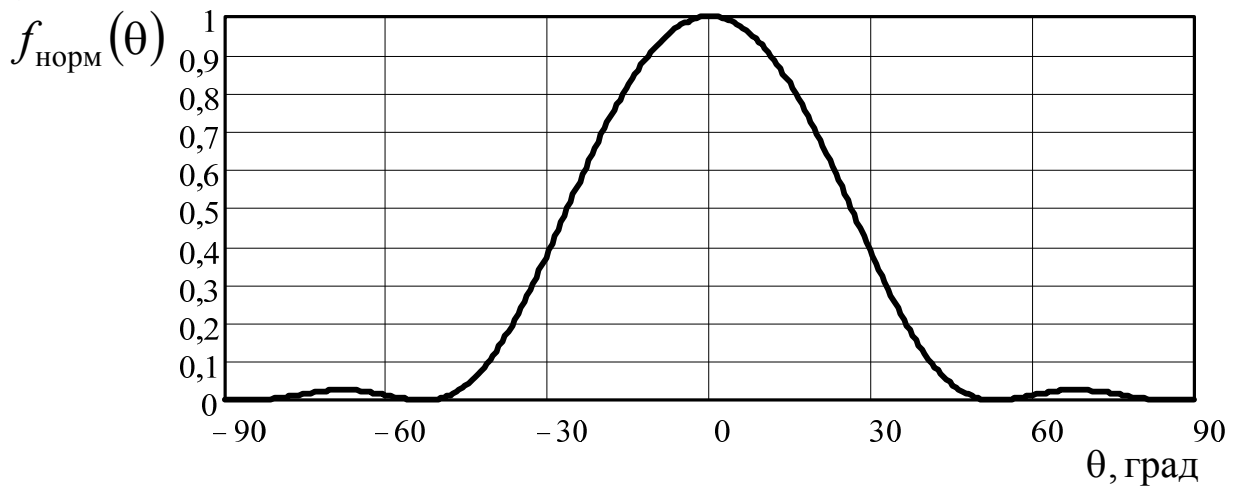
— входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} \approx 140 \frac{L}{\lambda}, \text{ Ом.} \quad (3.14)$$

а)



б)



в)

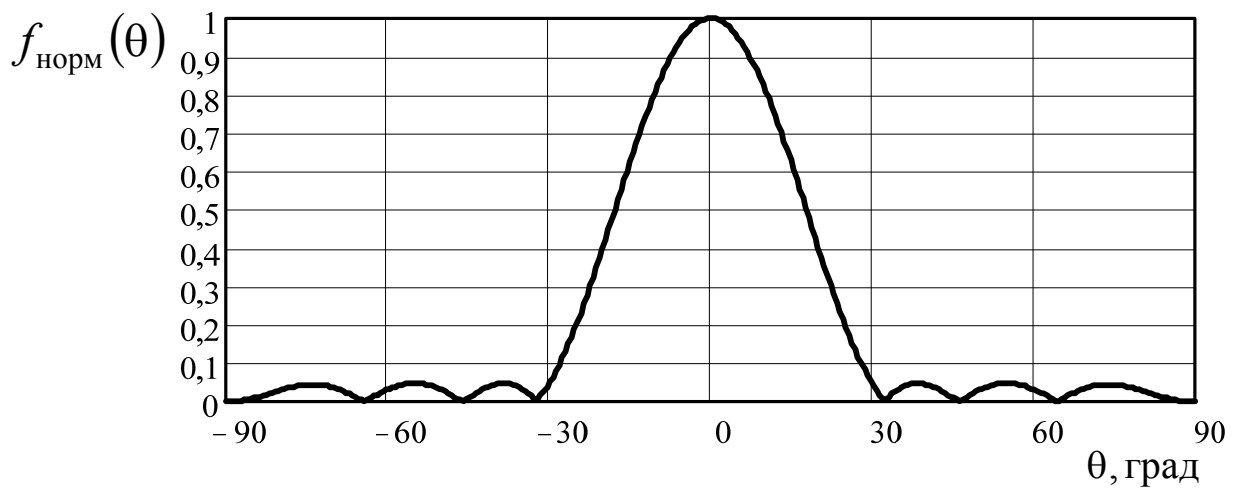


Рис. 3.7 — Результаты расчетов диаграмм направленности исследуемой ЦСА на частотах f_{min} (а); f_0 (б); f_{max} (в)

3.5. Порядок выполнения работы

3.5.1. Порядок выполнения теоретических исследований

а) Выбрать тип исследуемой антенны и определить центральную частоту и граничные частоты рабочего диапазона $f = f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$ по табл. 3.1.

Геометрические параметры антенны приведены в табл. 3.2.

б) По формулам (3.13), (3.14) на центральной частоте f_0 и на крайних частотах диапазона $f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$ для исследуемой антенны с заданными значениями a , d и n рассчитать КНД и входное сопротивление.

в) Рассчитать ДН исследуемой антенны на частоте $f = f_0$, используя формулы (3.6), (3.9), (3.10), (3.11).

г) Рассчитать ДН исследуемой антенны на границах диапазона частот $f = f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$. Расчеты выполнить аналогично п. в).

д) Осуществить *нормировку* ДН ЦСА. Построить ДН антенны в декартовой системе координат.

е) По рассчитанным ДН определить ширину главного лепестка $2\Delta\theta_{0,707}$ и уровень бокового излучения.

ж) Результаты расчетов в п. б) и п. е) представить в виде таблиц 3.3.

Таблица 3.3. — Результаты расчетов характеристик ЦСА

	$f_0 - \frac{\Delta f}{2}$	f_0	$f_0 + \frac{\Delta f}{2}$
D , дБ			
$R_{вх}$, Ом			
$2\Delta\theta_{0,707}$, град			
УБЛ			

3.5.2. Порядок выполнения экспериментальных исследований

а) Включить генератор и селективный усилитель. Установить частоту колебаний на выходе генератора, равную f_0 .

б) Выполнить *юстировку* исследуемой и вспомогательной антенны. Для этого исследуемая и вспомогательная антенна размещается согласно рис. 3.8. Антенны ориентируются в направлении друг друга таким образом, чтобы направления главных максимумов их диаграмм направленности находились на линии, соединяющей осевые направления антенн (рис. 3.8).

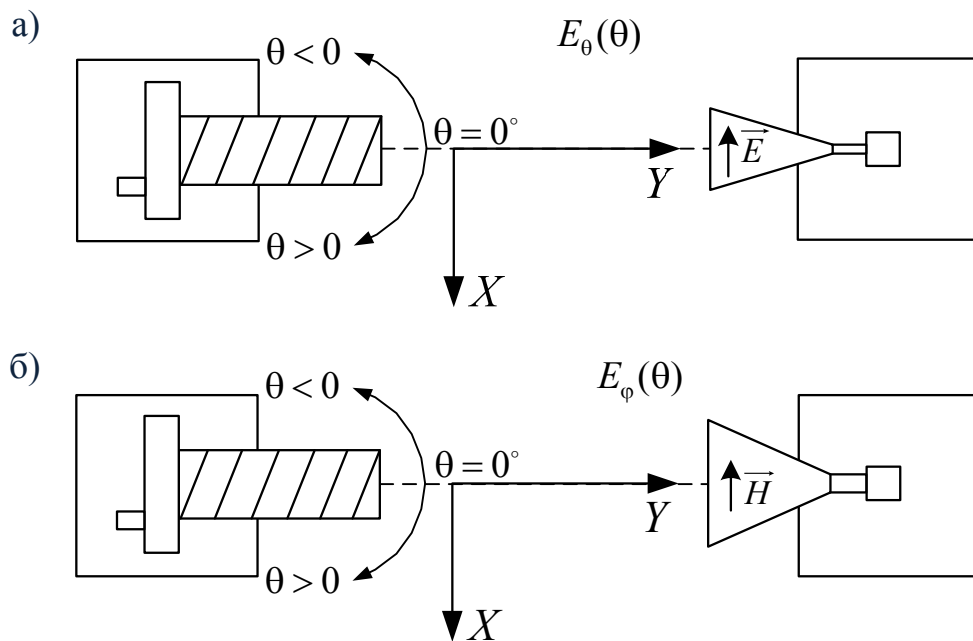


Рис. 3.8 — Измерение амплитудных диаграмм направленности в плоскости XOY : а) E_θ и б) E_ϕ составляющих поля излучения спиральной антенны

в) Провести измерения ДН для составляющей поля излучения E_θ исследуемой антенны. Для этого исследуемая и вспомогательная антенна размещаются как показано на рис. 3.8, а (*широкая стенка апертуры рупорной антенны расположена вертикально*). Затем исследуемая антенна поворачивается вокруг вертикальной оси опорно-поворотного устройства (в плоскости XOY) в пределах сектора углов $0^\circ \dots 360^\circ$ с шагом $\Delta = 5^\circ \dots 10^\circ$. В пределах главного лепестка ДН измерения производятся с шагом $\Delta = 5^\circ$. При каждом фиксированном положении антенны записываются показания селективного усилителя $\alpha(\theta)$.

г) Провести измерения ДН для составляющей поля излучения E_ϕ исследуемой антенны. Для этого повернуть вспомогательную антенну вокруг оси Y на 90° до положения показанного на рис. 3.8, б (*широкая стенка апертуры рупорной антенны расположена горизонтально*). Затем провести измерение ДН аналогично пп. в).

д) Установить на генераторе частоту $f_0 + \frac{\Delta f}{2}$ и повторить измерения в соответствии с пп. в), г).

е) Установить на генераторе частоту $f_0 - \frac{\Delta f}{2}$ и повторить измерения в соответствии с пп. в), г).

3.5.3. Обработка результатов измерений

а) Построить в декартовой системе координат **нормированные** диаграммы направленности для составляющих поля E_θ и E_ϕ исследуемой антенны.

б) Определить ширину главного лепестка ДН $2\Delta\theta_{0,707}$ и максимальный уровень бокового излучения для E_0 и E_φ составляющих поля. Результаты измерений представить в виде табл. 3.4.

Таблица 3.4. — Результаты измерений внешних характеристик ЦСА

	$f_0 - \frac{\Delta f}{2}$	f_0	$f_0 + \frac{\Delta f}{2}$
$2\Delta\theta$, град			
УБЛ			

3.6. Контрольные вопросы и задания

3.6.1. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

- а) Как выбирается вспомогательная антенна и как выбирается расстояние на измерительном полигоне между антеннами?
- б) Опишите структуру поля с эллиптической или круговой поляризацией.
- в) Какие существуют режимы излучения спиральных антенн? Для каких целей могут использоваться антенны, работающие в этих режимах?
- г) Как количество витков спирального излучателя влияет на диаграмму направленности антенны?
- д) Как влияет периметр одного витка цилиндрической спиральной антенны на ее диаграмму направленности?
- е) Поясните, для каких практических задач может быть использована цилиндрическая спиральная антенна?
- ж) Поясните, от чего зависит значение диапазона рабочих частот спиральной антенны и чем он ограничен?
- з) Как можно повысить направленность излучения ЦСА?

3.6.2. Задачи для подготовки к защите лабораторной работы

- а) Определить параметры диаграммы направленности ЦСА, работающей в режиме осевого излучения поля с круговой поляризацией, если длина одного витка $L=20$ см, число витков $n=8$ и шаг намотки $d=2$ см.
- б) Ширина главного луча диаграммы направленности ЦСА по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}=38^\circ$. Определить рабочую частоту антенны, если радиус намотки антенны $a=14$ см, шаг намотки $d=10$ см, число витков $n=10$. Определить КНД антенны на данной частоте.
- в) Определить, при каком числе витков ЦСА, имеющая длину одного витка $L=19$ см и шаг намотки $d=3$ см, обеспечивает на волне $\lambda=18$ см ширину главного луча диаграммы направленности по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}=42^\circ$.
- г) ЦСА подключена к передатчику, работающему на частоте $f=3,3$ ГГц. Антенна характеризуется следующими геометрическими параметрами: полная длина спиральной антенны $l_a=13$ см, радиус намотки спирали $a=1,5$ см,

количество витков $n=9$. Определить характеристики диаграммы направленности: ширину главного лепестка, уровень бокового излучения.

д) ЦСА характеризуется геометрическими размерами: радиус намотки спирали $a=10$ см, количество витков $n=8$, шаг намотки $d=8$ см. Определить, на какой центральной частоте работает данная антенна и как измениться ширина ее ДН, если количество витков увеличить или уменьшить на 3 витка.

е) Определить входное сопротивление и КНД спиральной антенны, имеющей ширину луча по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5} = 42^\circ$ при относительной длине витка $\frac{L}{\lambda} = 1,1$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оформление текстовых работ: методические указания / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин, П. П. Ермолов. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2015. — 19 с.
2. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев; под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радиотехника, 2005. — 450 с.
3. *Гошин, Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Гошин Г.Г.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 159 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13997>.— ЭБС «*IPRbooks*», по паролю.
4. *Виноградов, А.Ю. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Виноградов А.Ю., Кабетов Р.В., Сомов А.М.— Электрон. текстовые данные.— М.: Горячая линия — Телеком, 2012.— 440 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12063>.— ЭБС «*IPRbooks*», по паролю.
5. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг [и др.]; под ред. Айзенберга Г.З. — М.: Радио и связь, 1985. — 536 с.
6. Бова Н.Т. Антенны и устройства СВЧ / Н.Т. Бова, Г.Б. Резников. — К.: Вища школа, 1982. — 278 с.
7. Марков Г.Т. Антенны/ Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. — М.: Энергия, 1975. — 523 с.

Примечание:

* — ресурсы электронно-библиотечной системы *IPRbooks* — научно-образовательный ресурс для решения задач обучения в России и за рубежом. Контент ЭБС *IPRbooks* отвечает требованиям стандартов высшей школы, СПО, дополнительного и дистанционного образования. ЭБС *IPRbooks* соответствует требованиям законодательства РФ в сфере образования.

Приложение А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА»
по дисциплине «Антенные системы»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь
2021

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Часть 2

*Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторного практикума*

*Составители : Головин Владислав Викторович,
Тыщук Юрий Николаевич, Громоздин Валентин Владимирович*

В авторской редакции

Изд. № 47/2021. Объем 3 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»