



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторный практикум

по дисциплине

«УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ»

для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника»
дневной и заочной форм обучения

Часть 2

Севастополь
2013 г.

УДК 621.396.62(75)

Методические указания по лабораторному практикуму по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»: для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника» дневной и заочной форм обучения. / СевНТУ; сост. В. В. Головин, Ю.Н. Тыщук. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — Ч.2. — 77 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам дневной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследований первичных и вторичных характеристик основных типов антенн.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций.

Протокол № _____ от «_____» _____ 2013 г.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент

Щекатурин А.А.

Ответственный за выпуск:

заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций

д-р техн. наук, профессор

Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа № 1. Исследование директорной антенны.....	6
2. Лабораторная работа № 2. Исследование рупорных антенн.....	23
3. Лабораторная работа № 3. Исследование цилиндрической спиральной антенны.....	34
4. Лабораторная работа № 4. Исследование волноводно-щелевых антенн.....	47
5. Лабораторная работа № 5. Исследование параболических антенн.....	58
Библиографический список.....	72
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе.....	73
Приложение Б. Пример программы для построения калибровочной кривой.....	74
Приложение В. Пример выполнения теоретических исследований характеристик цилиндрической спиральной антенны.....	76

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы выполняются студентами в 6 семестре в ходе изучения дисциплины «Устройства СВЧ и антенны».

Каждая лабораторная работа выполняется бригадой 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 [1];
- ознакомиться с правилами работы с измерительными приборами, входящими в измерительную установку, пользуясь методическими рекомендациями к соответствующим работам;
- 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 (угловые координаты, напряжения и т.д.), 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. Студенты, не защитившие отчет по текущей работе, к выполнению следующей работы не допускаются.

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 вместо результатов экспериментов 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 №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

1.1. 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.

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, детекторную секцию 5, селективный микровольтметр 6, фиксированный аттенюатор 7, опорное устройство для вспомогательной антенны 8.

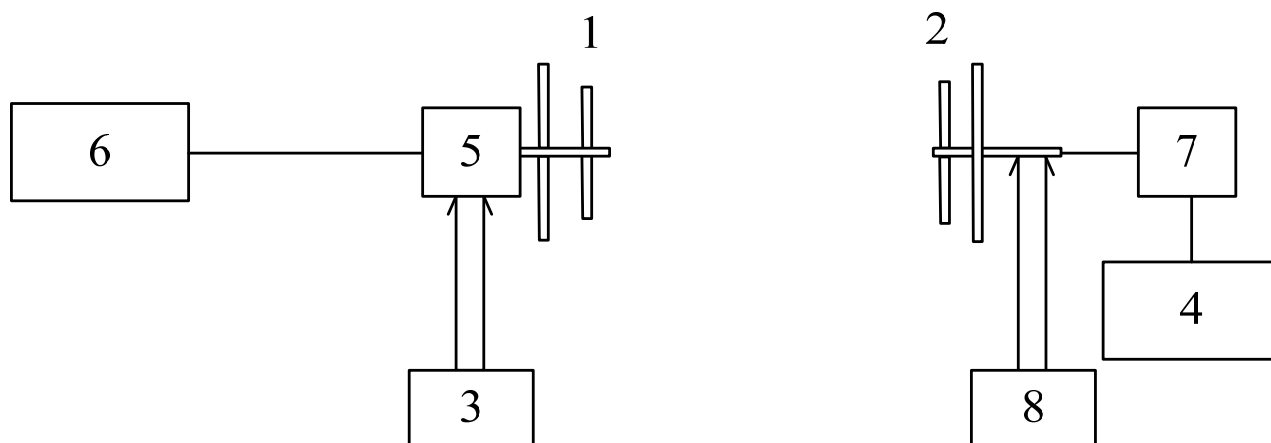


Рис. 1.1 — Структурная схема измерительной установки

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 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. 1.1).

Таблица 1.1 — Исходные данные для теоретических и экспериментальных исследований

M , предпослед- няя 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.

1.4. Методика расчета диаграммы направленности и входного сопротивления симметричного вибратора

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. 1.2.

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.

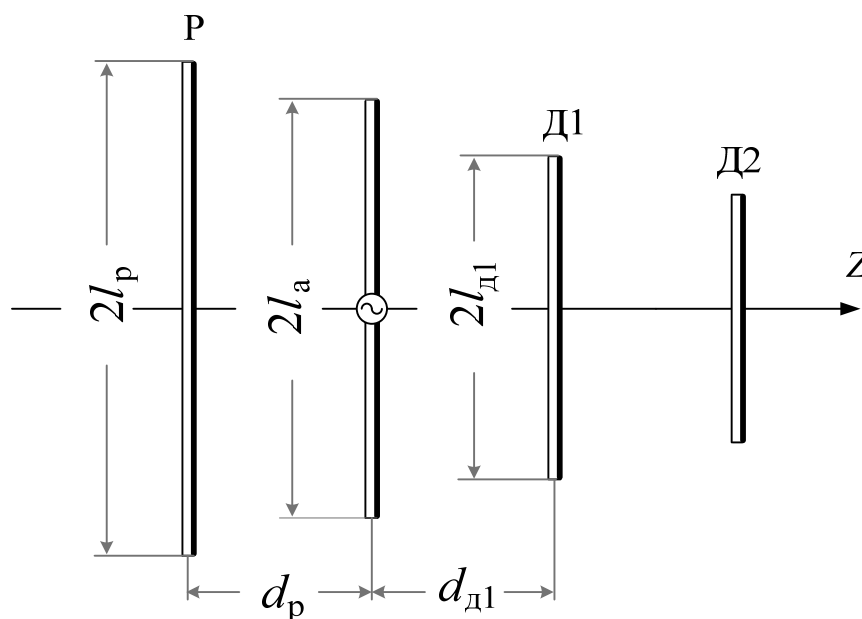


Рис. 1.2 — Схема директорной антенны

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.

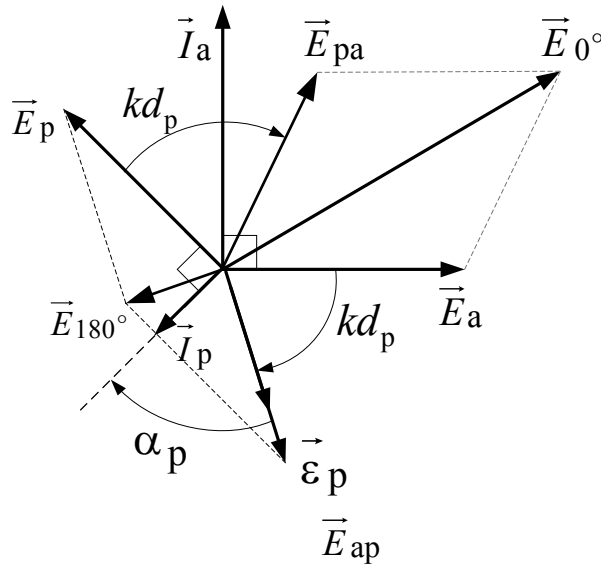
Пассивный излучатель, имеющий наибольшую длину (в среднем на (5...10)% длиннее активного), называют рефлектором (Р), так как он отражает энергию в сторону активного излучателя и гасит излучение «назад», то есть в свою сторону. Пассивные излучатели, длина которых в среднем на (10...15) % короче длины 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 активный симметричный вибратор — пассивный рефлектор в предположении, что $0,15 \leq d_p / \lambda \leq 0,25$. Покажем с помощью векторных диаграмм (рис. 1.3, а), что в направлении от рефлектора к активному симметричному вибратору поля излучателей складываются, а в противоположном направлении — вычитаются.

а)



б)

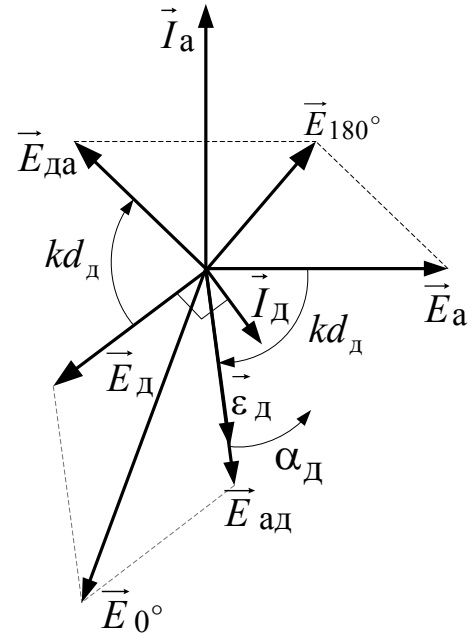


Рис. 1.3 — Векторные диаграммы для поля излучения директорных антенн, образованных системой двух излучателей: пассивный рефлектор и активный излучатель (а); пассивный директор и активный излучатель (б)

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. 1.3, а.

Пусть вектор тока $\vec{I}_a$ в активном вибраторе занимает положение на комплексной плоскости как показано на рис. 1.3, 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. 1.2)), 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) $\vec{\epsilon}_p$, совпадающую по фазе с электрическим полем у поверхности рефлектора $\vec{E}_{ap}$ и определяемую в соответствии с выражением

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

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 $\vec{\epsilon}_p$ 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 $\vec{E}_{ap}$ и $\vec{E}_p$ приблизительно противофазны, поэтому результирующее поле в направлении рефлектора (отрицательное направление оси Z) $\vec{E}_{180^\circ} = \vec{E}_{ap} + \vec{E}_p$ относительно мало.

Путем аналогичных рассуждений можно рассмотреть работу директорной антенны, образованной системой пассивного директора и активного излучателя. Пусть вектор тока $\vec{I}_a$ в активном вибраторе занимает положение на комплексной плоскости, как показано на рис. 1.3, 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 $\vec{\epsilon}_d$, 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 $\vec{\epsilon}_d$ на угол $\alpha_d = \arctg(X_d / R_d)$, где $\alpha_d < 0$. Напряженность электрического

поля $\vec{E}_д$, созданного у поверхности директора током $\vec{I}_д$, отстает от этого тока по фазе на угол $\pi/2$. На пути до активного вибратора поле директора запаздывает по фазе на угол $kd_д$ и становится приблизительно противофазным с полем активного симметричного вибратора. Поэтому результирующее поле $\vec{E}_{180^\circ} = \vec{E}_{да} + \vec{E}_а$ ослабляется в направлении от директора к активному излучателю. Поля $\vec{E}_{ад}$ и $\vec{E}_д$ приблизительно синфазны, поэтому результирующее поле $\vec{E}_{0^\circ} = \vec{E}_{ад} + \vec{E}_д$ 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. 1.4, 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.

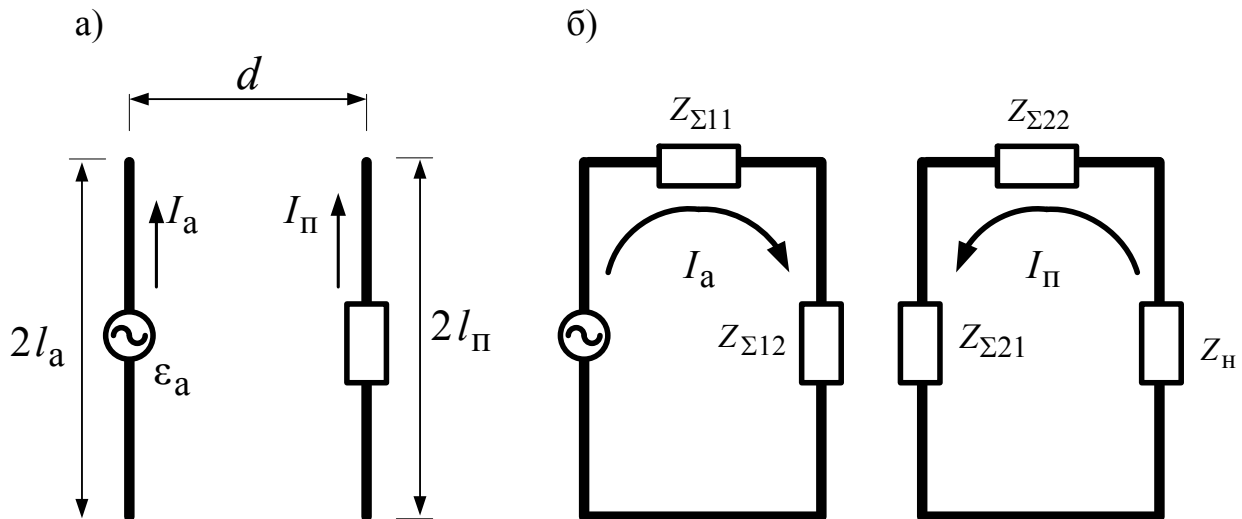


Рис. 1.4 — Модель директорной антенны (а) и ее схема замещения (б)

Амплитуда и фаза комплексного тока в пассивном вибраторе $I_п$ 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 фаз $\Delta\psi$ токов в пассивном и активном симметричных вибраторах, модели которых показаны на рис. 1,4, а, можно вычислить по следующим формулам:

$$q = \sqrt{\frac{R_{\Sigma 12}^2 + X_{\Sigma 12}^2}{R_{\Sigma 22}^2 + X_H^2}}; \quad (1.1)$$

$$\Delta\psi = \pi + \arctg\left(\frac{X_{\Sigma 12}}{R_{\Sigma 12}}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_{\Sigma 22}}\right). \quad (1.2)$$

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. 1.5, 1.6.

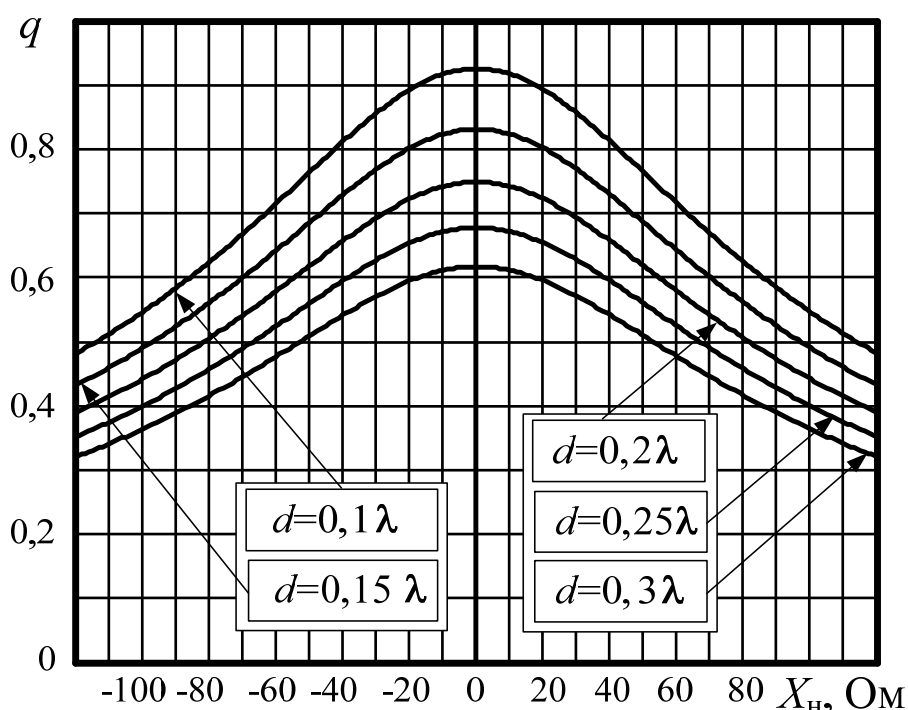


Рис. 1.5 — Зависимости отношения амплитуд токов в пассивном и активном симметричных вибраторах от сопротивления настройки пассивного излучателя

Из рис. 1.5, 1.6 следует, что в случае $d/\lambda = 0,25$ сложение 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.

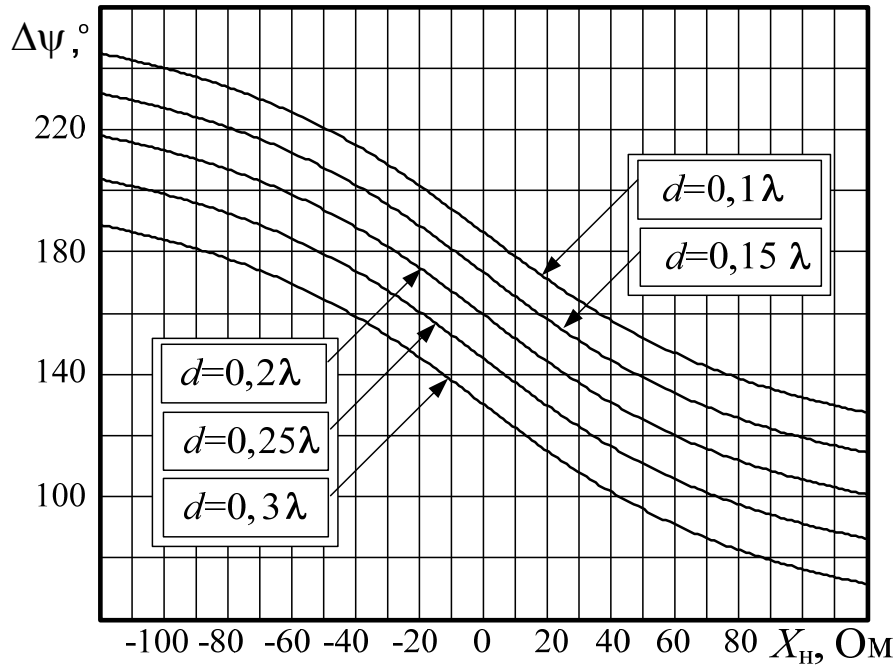


Рис. 1.6 — Зависимости разности фаз токов в пассивном и активном симметричных вибраторах от сопротивления настройки пассивного излучателя

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

$$l_a = 0,25\lambda \left[1 - \frac{2X_a}{\pi\rho} \right]; \quad (1.3)$$

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

$$\rho = 120 \left[\ln \left(\frac{l}{a} \right) - 1 \right]. \quad (1.4)$$

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

$$l_n = 0,25\lambda \left[1 - \frac{2(X_{\Sigma 22} - X_n)}{\pi\rho} \right], \quad (1.5)$$

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

Система отсчета углов для рассматриваемой модели директорной антенны представлена на рис. 1.7.

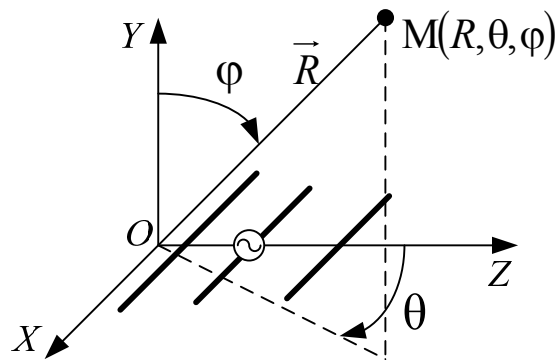


Рис. 1.7 — Система отсчета углов при расчете диаграмм направленности директорной антенны

Ненормированная диаграмма направленности двухэлементной директорной антенны рассчитывается по формуле

$$f(\theta, \varphi) = f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) \cdot f_{\text{реш}}(\theta, \varphi), \quad (1.6)$$

где

$$f_{\text{эл}}(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl_a \sin \theta \sin \varphi) - \cos kl_a}{\sqrt{1 - (\sin \theta)^2 (\sin \varphi)^2}} \right|. \quad (1.7)$$

$$f_{\text{реш}}(\theta, \varphi) = \sqrt{1 + q^2 + 2q \cos(\Delta \psi \pm kd \cos \theta)}. \quad (1.8)$$

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

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

Выбор знака в формуле (1.8) 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

$$D = \frac{4\pi f^2(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}})}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi f^2(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}, \quad (1.9)$$

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. 1.8, 1.9 показаны зависимости КНД от сопротивления настройки $X_{\text{н}}$ пассивного излучателя при различных значениях d/λ .

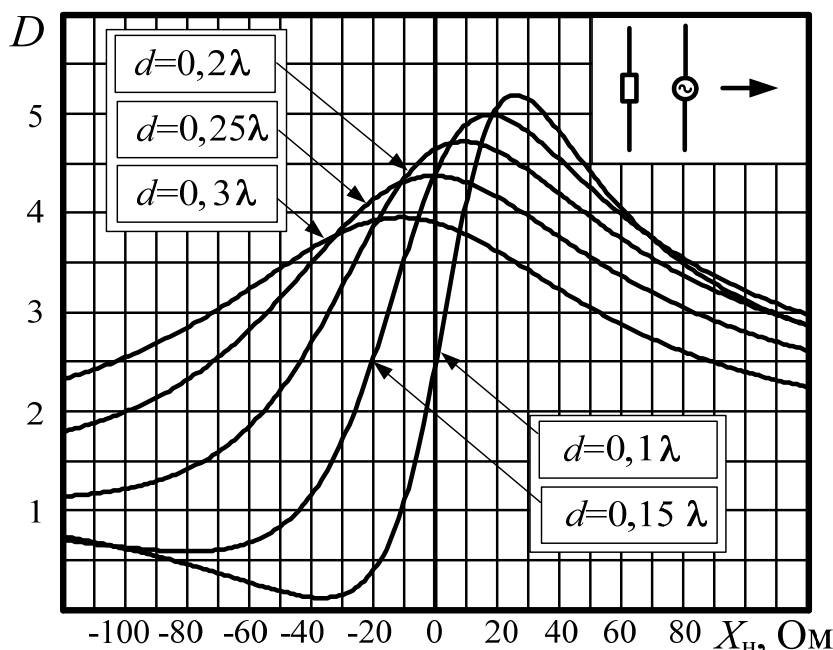


Рис. 1.8 — Зависимость КНД от сопротивления настройки рефлектора

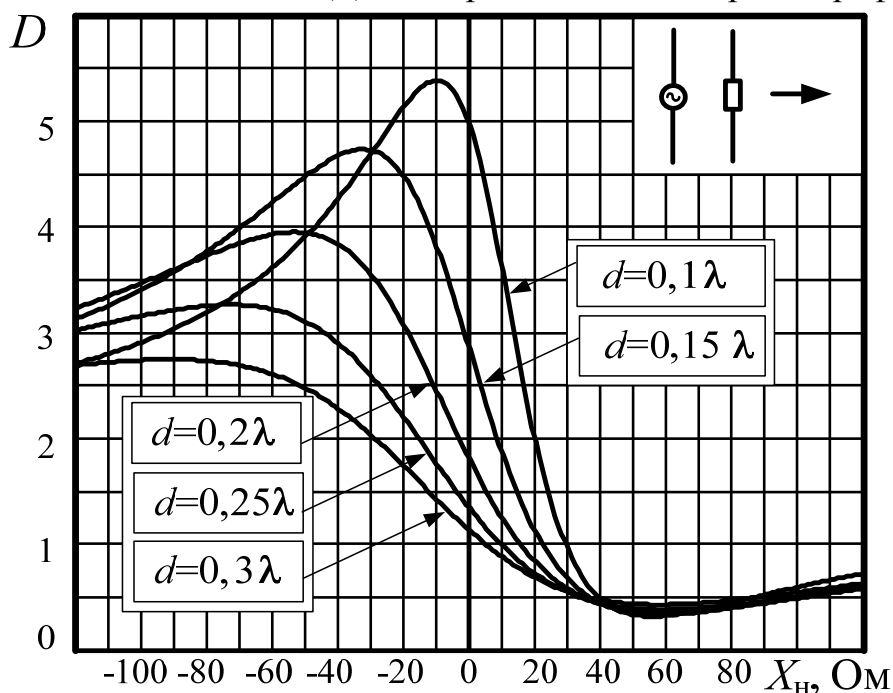


Рис. 1.9 — Зависимость КНД от сопротивления настройки директора

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

$$\text{КЗД} = \frac{f(0, \pi/2)}{f(\pi, \pi/2)}, \quad (1.10)$$

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

$$Z_a = R_a + jX_a = R_{\Sigma 11} + jX_{\Sigma 11} - \frac{(R_{\Sigma 12} + jX_{\Sigma 12})^2}{R_{\Sigma 22} + jX_{\Sigma 22}}. \quad (1.11)$$

С учетом (1.11) построены зависимости для Z_a от сопротивления настройки пассивного излучателя X_H при различных d/λ (рис. 1.10).

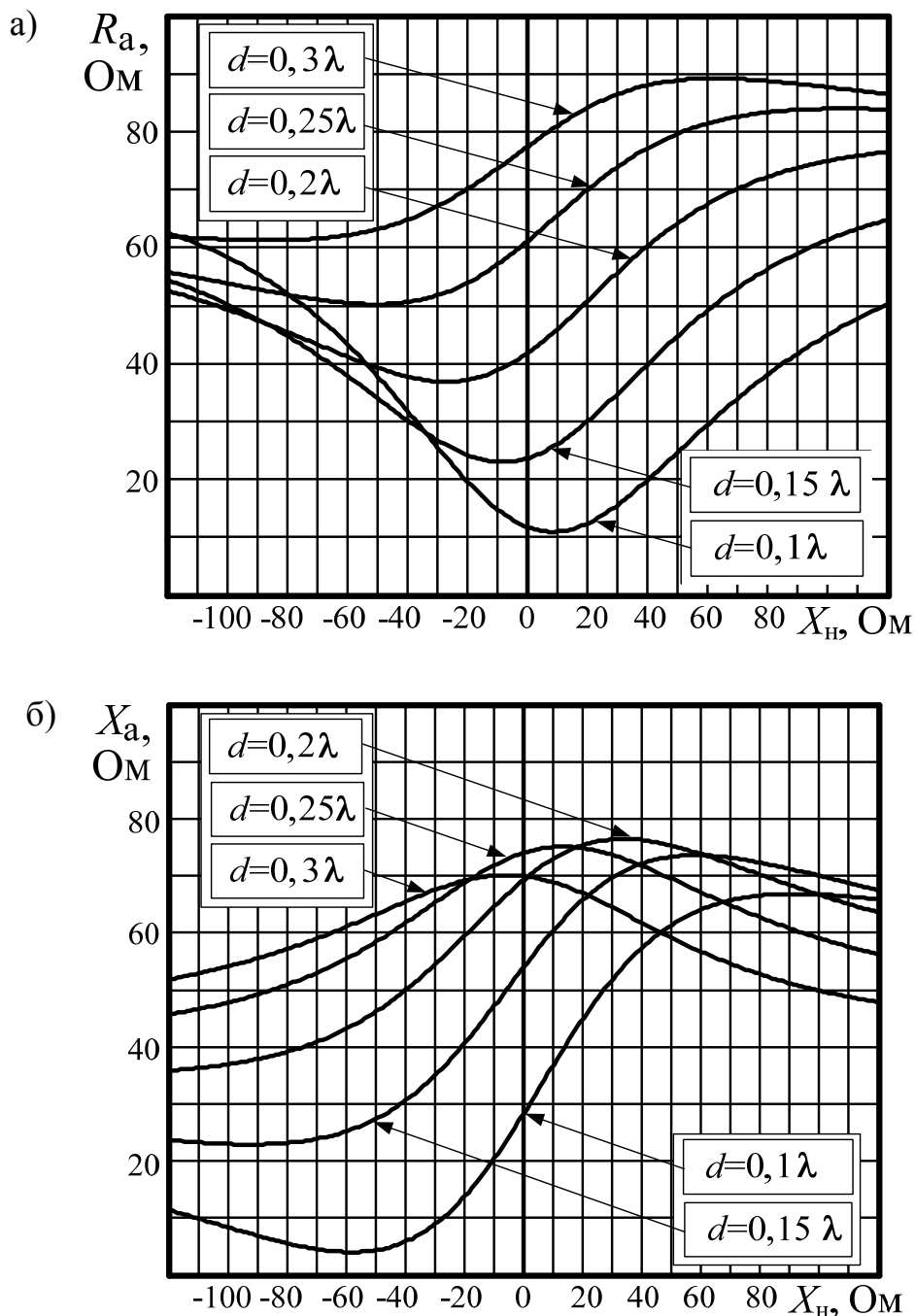


Рис. 1.10 — Зависимость активной (а) и реактивной (б) составляющих входного сопротивления директорной антенны от X_H

Следует выбрать такое X_H 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. 1.11), содержащей $N \geq 4$ излучателей (общее количество активных и пассивных излучателей) [2].

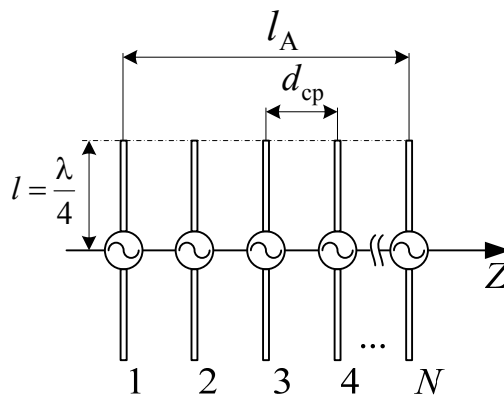


Рис. 1.11 — Модель антенны бегущей волны

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

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

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

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

1.5. Порядок выполнения работы

1.5.1. Теоретические исследования

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

а) На основании графиков, представленных на рис. 1.8, 1.9 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.

б) На основании графиков, приведенных на рис. 1.5, 1.6, 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 (1.6) — (1.8).

г) Рассчитать КНД по формуле (1.9) и КЗД по формуле (1.10).

д) Определить входное сопротивление антенны по графикам, приведенным на рис. 1.10, учитывая, что $Z_{\text{вх}} = R_{\text{а}} + jX_{\text{а}}$.

е) Рассчитать длину плеч активного симметричного вибратора по формулам (1.3), (1.4).

ж) Рассчитать длину пассивного симметричного вибратора по формулам (1.4), (1.5).

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

— сопротивление настройки $X_{\text{н}}$ изменяется на величину $\Delta X_{\text{н}} = \pm(0,1...0,2)nX_{\text{н}}$, где $n=1, 2, 3$;

— при каждом новом значении $X_{\text{н}}$ по графикам на рис. 1.5, 1.6, определить q и $\Delta\psi$, по формуле (1.11) рассчитать КЗД, по формуле (1.10) уточнить значение КНД (не должно быть меньше $D_{\text{доп}}$) и по графикам на рис. 1.10 определить входное сопротивление антенны;

— выбрать $X_{\text{н}}$, при котором КЗД из всех рассмотренных будет

максимальным, КНД не менее $D_{\text{доп}}$, 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 (1.6) — (1.8);

— для оптимального случая рассчитать длину плеч активного вибратора, используя формулы (1.3), (1.4);

— для оптимального случая рассчитать длину пассивного симметричного вибратора по формулам (1.4), (1.5).

1.5.2. Экспериментальные исследования

а) Согласно пунктам е) и ж) 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. 1.11).

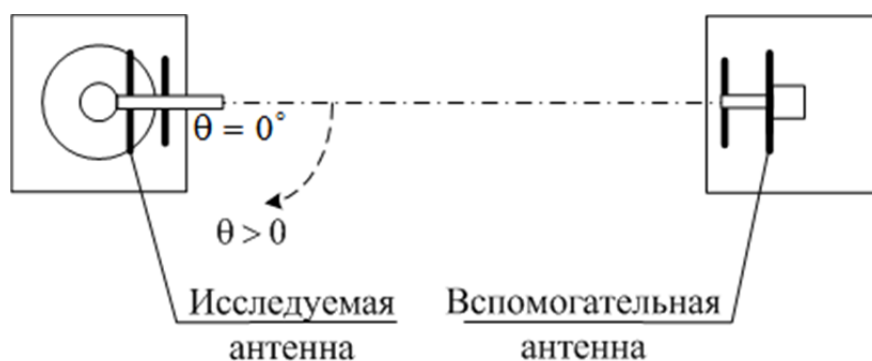


Рис. 1.11 — Схема установки антенны перед измерениями ДН

Предварительно направление $\theta = 0^\circ$ фиксируется по максимуму показаний селективного микровольтметра $\alpha(0^\circ)$. Затем положение максимума следует уточнить методом «двух засечек», выполнив следующие действия:

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, вправо (по часовой стрелке) до угла θ_1 , на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta_1) = \alpha(0^\circ)/2$;

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, влево (против часовой стрелки) до угла θ_2 ($\theta_2 < 0$), на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta_2) = \alpha(\theta_1) = \alpha(0^\circ)/2$;

— определить отсчетный угол положения максимума ДН θ_{max} как среднее арифметическое измеренных значений

$$\theta_{\text{max}} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}.$$

В дальнейшем при построении ДН положение максимума следует принять за 0° , и если отсчитываемая величина $\theta_{\max}$ отличается от 0° , то углы нужно соответственно пересчитать.

г) Снять калибровочную кривую измерительной установки в максимуме ДН директорной антенны: зависимость показаний микровольтметра от ослабления сигнала δ в децибелах $\alpha(0^\circ, \delta)$. Ослабление нужно изменять в пределах от 0 до 20 дБ (3, 6, 10, 13, 16, 20 дБ) используя встроенный аттенуатор используемого генератора.

д) Провести измерения ДН директорной антенны (см. рис. 1.11). Для этого из положения, соответствующего максимуму ДН $\theta_{\max}$, нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства на 180° вправо, затем — на 180° влево. При медленном изменении уровня сигнала отсчеты нужно выполнять с шагом 10° , а вблизи «нулей» диаграммы направленности — 5° . Положение «нулей» следует фиксировать с возможно большей точностью.

е) Выставить длину плеч активного и пассивного симметричных вибраторов, рассчитанные в ходе оптимизации геометрических размеров пассивного излучателя, и повторить действия по п. в), г), д).

ж) Изменять длину плеч пассивного излучателя, определенную по результатам оптимизации, на величину $\Delta l_{\Pi} = \pm(0,1 \dots 0,2)n\Delta l_{\Pi}$, $n=1, 2$. Для каждого случая измерить уровень сигнала с направлений, соответствующих главному максимуму ($\theta_{\max} = 0^\circ$) и максимуму заднего побочного лепестка ДН.

з) По результатам измерения, выполненных в п. ж) по формуле (1.11) предварительно оценить значение КЗД и определить, при каком $l_{\Pi \text{opt}} = l_{\Pi} + n\Delta l_{\Pi}$ значение КЗД принимает максимальное значение.

и) для директорной антенны, длина плеч пассивного излучателя которой $l_{\Pi \text{opt}}$ определена в п. з), согласно п. д) провести измерение ДН в E -плоскости.

1.5.3. Обработка результатов измерений

а) Построить калибровочную кривую по данным, полученным при выполнении п. 1.5.2, г: зависимость показаний селективного микровольтметра $\alpha(0^\circ, \delta)$ от ослабления δ . Пример написания программы для построения калибровочной кривой приведен в приложении Б.

б) Воспользовавшись построенной зависимостью $\alpha(0^\circ, \delta)$, пересчитать уровни отсчетов $\alpha(\theta)$ в децибелы: каждому значению α на основании графика $\alpha(0^\circ, \delta)$ ставится в соответствие соответствующее ослабление δ с применением функции $\text{Kalibr}(\alpha(\theta))$ (см. Приложение Б). Далее определяется

зависимость $f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{\text{Kalibr}(\alpha(\theta))/20}$, которая представляет собой нормированную диаграмму направленности антенны по полю. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 1.2).

Таблица 1.2 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Отсчет, град	100	90	...
Угол ДН θ , град	90	80	...
α	4	3,7	...
$\text{Kalibr}(\alpha)$, дБ	0	-1,62	...
$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{\text{Kalibr}(\alpha)/20}$	1	0,83	...

в) Для директорных антенн, геометрические параметры которых определены по исходным данным и по результатам теоретической оптимизации, построить в полярной системе координат диаграммы направленности в E -плоскости.

г) По результатам измерений, выполненных по пунктам 1.5.2. ж), з) рассчитать значения КЗД, воспользовавшись калибровочной кривой.

д) По результатам измерений, выполненных в п. 1.5.2. и), построить ДН директорной антенны

е) Для всех экспериментально измеренных и рассчитанных ДН определить значения ширины главного лепестка $2\Delta\theta$, определяемой по уровню 0,707.

ж) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

з) Сделать выводы по работе.

1.6. Контрольные вопросы и задания

1.6.1 Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Описать используемую в лабораторной работе методику измерения диаграмм направленности директорной антенны.

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

в) Как выбираются высоты установки исследуемой и вспомогательной антенн при исследовании диаграмм направленности?

г) Описать характеристики активного симметричного вибратора и его конструктивное исполнение.

д) Описать порядок оптимизации геометрических параметров директорной антенны.

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

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

з) Каким образом можно повысить коэффициент защитного действия

директорной антенны?

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

1.6.2. Задания 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 $D = 30$, $d_{\text{ср}} = 0,2$ 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 $d_{\text{ср}} = 0,2\lambda$ и относительной длине антенны l_A/λ равной: а) 3; б) 1.

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.

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. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНЫХ АНТЕНН

2.1. Цель работы

Изучить принцип действия, методику расчета и анализа характеристик рупорных антенн. Приобрести навыки в настройке, регулировке и измерении характеристик излучения рупорных антенн.

2.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 2.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, эталонную антенну 3, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 4, волноводный коммутатор 5, опорно-поворотное устройство для вспомогательной антенны 6, СВЧ генератор 7, детекторную секцию 8, селективный микровольтметр 9.

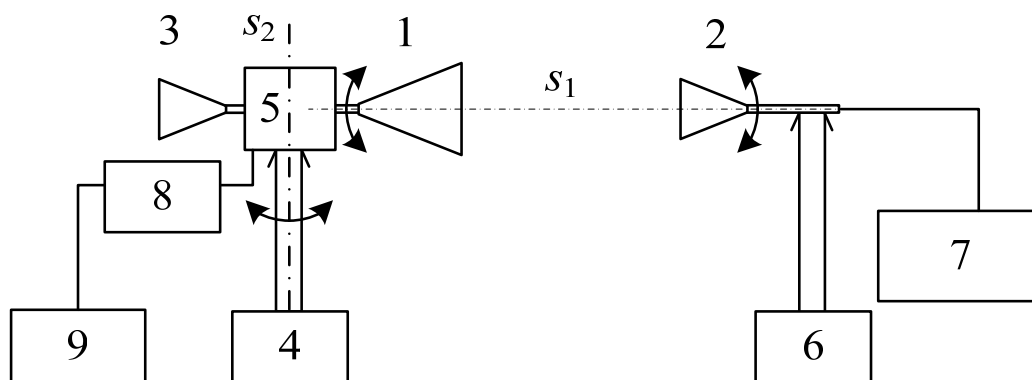


Рис. 2.1 — Структурная схема измерительной установки

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.

Опорно-поворотное устройство 4 позволяет вращать исследуемую антенну вокруг осей s_1 и s_2 . Однокоординатное опорно-поворотное устройство 6 позволяет вращать вспомогательную антенну вокруг оси s_1 .

2.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: номера двух рупорных антенн, габаритные размеры апертур $a_p \times b_p$ и длина граней L рупоров, рабочие частоты f_1 и f_2 , тип возбуждающего волновода (табл. 2.1, 2.2).

Таблица 2.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ рупора	1	3	6	7	8	9	10	1	3	6
f_1 , ГГц	9,4	9,2	9,5	9,6	9,3	9,4	9,8	9,2	9,6	9,9
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ рупора	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2
f_2 , ГГц	10,1	10,5	10,8	10,3	10,1	10,4	10,7	10,3	10,2	10,5

Таблица 2.2 — Геометрические размеры рупорных антенн

№ рупора	a_p , мм	b_p , мм	L_H , мм	L_E , мм	Тип волновода
1	135	90	157	152	R100
2	145	115	240	242	R100
3	100	80	95	97	R100
4	23	208	217	194	R100
5	80	60	92	94	R100
6	42	56	93	90	R84
7	50	80	144	140	R84
8	46	68	119	117	R84
9	23	55	58	56	R84
10	159	49	189	199	R84

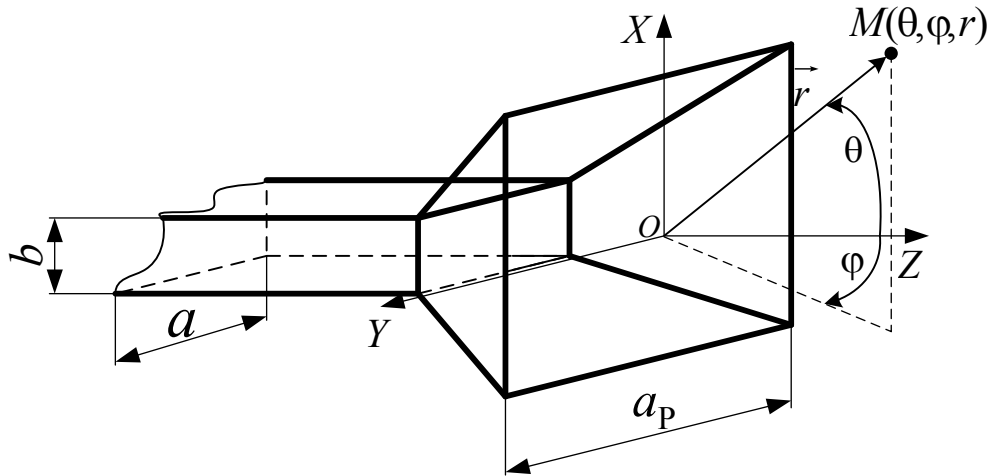
Примечание. Типы возбуждающих волноводов:

- R84: размер поперечного сечения волновода 28,50×12,62 мм;
- R100: размер поперечного сечения волновода 22,66×10,16 мм.

2.4. Методика расчета диаграмм направленности рупорных антенн

Обобщенная модель рупорной антенны показана на рис. 2.2.

а)



б)

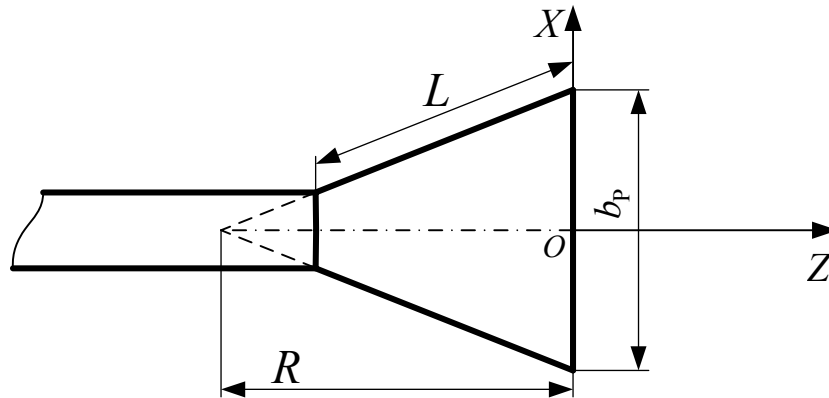


Рис. 2.2 — Модель рупорной антенны в декартовой системе координат (а) и проекция антенны в плоскости XOZ (б)

На основе модели, показанной на рис. 2.2., можно рассмотреть следующие варианты апертурных излучателей:

- E -секториальный рупор, при $a_p = a$ и $b_p > b$;
- H -секториальный рупор, при $a_p > a$ и $b_p = b$;
- пирамидальный остроконечный рупор, при $a_p > a$ и $b_p > b$.

Излучающей поверхностью рупора является поверхность его раскрыва. Особое внимание уделяется амплитудно-фазовому распределению поля в апертуре рупорной антенны. Амплитудное распределение поля на раскрыве совпадает с распределением поля в поперечном сечении волновода для основного типа волны. В плоскости E наблюдается равномерное амплитудное распределение поля, в плоскости H — косинусоидальное

$$E_y = E_0 \cos\left(\frac{\pi y}{a_p}\right).$$

Фронт волны в процессе ее движения в рупоре преобразуется из плоского в цилиндрический (в секториальных рупорах) или в сферический (в пирамидальных рупорах). Фазовое распределение имеет квадратичный характер в плоскости, в которой производится раскрыв рупора. Максимальная *фазовая ошибка* (максимальный сдвиг по фазе по отношению к центру раскрыва) определяется соотношением

$$\text{— в } E\text{-плоскости:} \quad \Delta\psi_{\max}^E \approx \frac{\pi}{4} \frac{b_p^2}{\lambda R}, \quad (2.1)$$

$$\text{— в } H\text{-плоскости:} \quad \Delta\psi_{\max}^H \approx \frac{\pi}{4} \frac{a_p^2}{\lambda R}, \quad (2.2)$$

где R — длина рупора (см. рис. 2.2).

Максимальная фазовая ошибка, достигаемая в углах пирамидального рупора определяется соотношением

$$\Delta\psi_{\max} \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{a_p^2}{\lambda R} + \frac{b_p^2}{\lambda R} \right).$$

Если максимальные фазовые ошибки в раскрыве рупора не превышают допустимых

$$\Delta\psi_{\max}^E \leq \frac{\pi}{2}, \quad \Delta\psi_{\max}^H \leq \frac{3\pi}{4},$$

то коэффициент направленного действия (КНД) рупорной антенны при заданной длине будет максимальным. Рупоры, размеры которых соответствуют максимальным значениям КНД, называются «оптимальными». Их размеры связаны с длиной рупора следующими соотношениями:

$$R_E \geq \frac{b_p^2}{2\lambda}, \quad (2.3)$$

$$R_H \geq \frac{a_p^2}{3\lambda}. \quad (2.4)$$

Нормированные диаграммы направленности (ДН) рупорной антенны в предложении синфазного раскрыва (при фазовых ошибках, не превышающих допустимые значения) можно рассчитать по формулам:

$$\text{— в } E\text{-плоскости:} \quad f^E(\theta) = \left| \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin \left(\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin \theta} \right|; \quad (2.5)$$

— в H -плоскости:
$$f^H(\varphi) = \left| \frac{1 + \cos \varphi}{2} \frac{\cos\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \varphi\right)}{1 - \left(\frac{2a_p}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \right|, \quad (2.6)$$

Ширина главного луча диаграммы направленности рупорных антенн в E - и H -плоскостях ($2\Delta\theta_{0,5}^E$ и $2\Delta\theta_{0,5}^H$) определяется по уровню половинной мощности по формулам:

H -секториальный рупор: $2\Delta\theta_{0,5}^E = 0,88 \frac{\lambda}{b} \text{ [рад]}; \quad (2.7)$

$2\Delta\theta_{0,5}^H = 1,4 \frac{\lambda}{a_p} \text{ [рад]}; \quad (2.8)$

E -секториальный рупор: $2\Delta\theta_{0,5}^E = 0,93 \frac{\lambda}{b_p} \text{ [рад]}; \quad (2.9)$

$2\Delta\theta_{0,5}^H = 1,18 \frac{\lambda}{a} \text{ [рад]}; \quad (2.10)$

пирамидальный рупор: $2\Delta\theta_{0,5}^E = 0,93 \frac{\lambda}{b_p} \text{ [рад]}; \quad (2.11)$

$2\Delta\theta_{0,5}^H = 1,4 \frac{\lambda}{a_p} \text{ [рад]}. \quad (2.12)$

Коэффициент направленного действия H -секториального рупора D_H определяется по формуле [3]

$$D_H = \frac{4\pi b_p R_H}{\lambda a_p} \{ [C(u) + C(v)]^2 + [S(u) + S(v)]^2 \}, \quad (2.13)$$

где $C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$; $S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$ — интегралы Френеля;

$$u = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{a_p}{\sqrt{\lambda R_H}} - \frac{\sqrt{\lambda R_H}}{a_p} \right); \quad v = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{a_p}{\sqrt{\lambda R_H}} + \frac{\sqrt{\lambda R_H}}{a_p} \right).$$

Коэффициент направленного действия E -секториального рупора D_E определяется по формуле [3]

$$D_E = \frac{64 a_p R_E}{\pi \lambda b_p} \left\{ C^2\left(\frac{b_p}{\sqrt{2\lambda R_E}}\right) + S^2\left(\frac{b_p}{\sqrt{2\lambda R_E}}\right) \right\}. \quad (2.14)$$

Коэффициент направленного действия пирамидального рупора D с учетом (2.13, 2.14) определяется по следующей формуле [3]

$$D = \frac{\pi \lambda^2}{32 a_p b_p} D_E D_H. \quad (2.15)$$

Коэффициент направленного действия (КНД) **оптимальной** рупорной

антенны вычисляется по формуле:

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \nu, \quad (2.13)$$

где $S = a_p b_p$ — геометрическая площадь раскрыва; ν — коэффициент использования поверхности, определяемый амплитудным ν_a и фазовым ν_ϕ распределением поля в раскрыве антенны: $\nu = \nu_a \cdot \nu_\phi$.

Для **оптимальных** секториальных рупоров $\nu_a = 0,81$ учитывает косинусоидальный характер амплитудного распределения поля в H -плоскости; $\nu_\phi = 0,8$ — несинфазность раскрыва в одной из плоскостей при условии $\Delta\psi_{\max} \leq \Delta\psi_{\text{доп}}$.

Поэтому для **секториальных** рупорных антенн $\nu \approx 0,81 \cdot 0,8 \approx 0,64$.

Для **оптимальных** пирамидальных рупоров при тех же условиях $\nu = \nu_a \nu_\phi^2 \approx 0,52$ (учтена несинфазность раскрыва в обеих плоскостях).

2.5. Порядок выполнения работы

2.5.1. Теоретические исследования

а) Рассчитать длины рупора R_H и R_E (см. рис. 2.2) по формулам:

$$R_H = \sqrt{\frac{L^2 a_p^2}{(a_p - a)^2} - \frac{a_p^2}{4}}; \quad R_E = \sqrt{\frac{L^2 b_p^2}{(b_p - b)^2} - \frac{b_p^2}{4}};$$

— для H -секториального рупора рассчитывается только R_H ;

— для E -секториального рупора рассчитывается только R_E ;

— для пирамидального рупора рассчитываются R_H и R_E .

б) По формулам (2.1) и (2.2) рассчитать максимальные квадратичные фазовые ошибки в апертурах двух рупорных антенн.

в) По формулам (2.3) и (2.4) рассчитать оптимальные длины исследуемых рупорных антенн.

г) По формулам (2.5) и (2.6) построить в декартовой системе координат нормированные диаграммы направленности исследуемых рупорных антенн в E - и H -плоскостях.

д) По формулам (2.7) — (2.12) рассчитать ширину главного лепестка диаграмм направленности рупорных антенн в E - и H -плоскостях.

е) По диаграммам направленности рупорных антенн определить максимальный уровень побочного излучения.

ж) По формулам (2.13) — (2.15) рассчитать коэффициент направленного действия для исследуемых рупорных антенн.

1.5.2. Экспериментальные исследования

а) Установить на генераторе частоту, заданную для первой исследуемой рупорной антенны. Настройка генератора (Г4-109)

осуществляется следующим образом:

- ручкой «**Поддиапазоны**» установить нужный диапазон частот;
- при помощи ручки «**Частотомер**» установить требуемую по заданию частоту СВЧ колебаний;
- повернуть ручку «**Чувствительность**» по часовой стрелке до упора;
- добиться заметного отклонения стрелки индикатора настройки, вращая вправо-влево ручку «**Установка частоты**» нужного поддиапазона;
- плавно поворачивая ручку «**Установка частоты**», добиться максимального отклонения стрелки индикатора настройки.

Внимание! Выполняя настройку генератора, нельзя допускать «зашкала» индикатора! Для этого необходимо ручкой «Чувствительность» подбирать подходящую чувствительность прибора.

б) Переключить волноводный коммутатор в положение «к исследуемой антенне» (рис. 2.3).

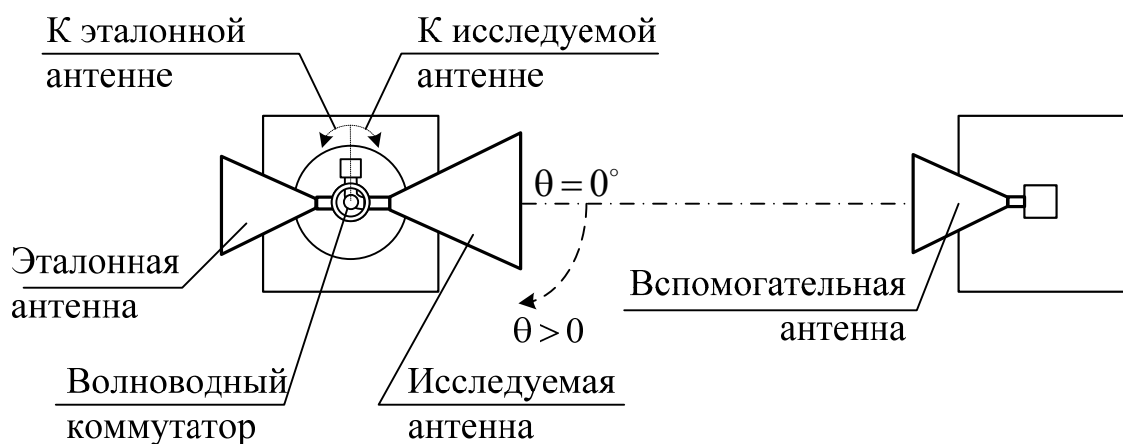


Рис. 2.3 — Схема измерительной установки перед измерениями ДН

в) Установить первую исследуемую антенну (см. табл. 2.1) на опорно-поворотное устройство.

г) Выполнить юстировку исследуемой и вспомогательной антенн. Для этого антенны сориентировать так, чтобы направления максимумов их диаграмм направленности находились на одной линии (рис. 2.3). Вращая исследуемую и вспомогательную антенны вокруг оси, проходящей через центры апертур рупорных антенн, обеспечить вертикальную поляризацию поля излучения обеих антенн.

Предварительно направление $\theta = 0^\circ$ фиксируется по максимуму показаний селективного микровольтметра $\alpha(0^\circ)$. Затем положение максимума следует уточнить методом «двух засечек», выполнив следующие действия:

- повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, вправо (по часовой стрелке) до угла θ' , на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta') = \alpha(0^\circ)/2$;
- повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего

максимуму, влево (против часовой стрелки) до угла θ'' ($\theta'' < 0$), на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta'') = \alpha(\theta') = \alpha(0^\circ)/2$;

— определить отсчетный угол положения максимума ДН $\theta_{\max}$, как среднее арифметическое измеренных значений

$$\theta_{\max} = \frac{\theta' + \theta''}{2}.$$

В дальнейшем при построении ДН положение максимума следует принять за 0° , и если отсчитываемая величина $\theta_{\max}$ отличается от 0° , то углы нужно соответственно пересчитать.

д) Выполнить измерения калибровочную кривую измерительной установки в максимуме ДН рупорной антенны: зависимость показаний микровольтметра от ослабления сигнала δ в децибелах $\alpha_k(0^\circ, \delta)$. Ослабление нужно изменять в пределах от 0 до 20 дБ (3, 6, 10, 13, 16, 20 дБ) используя встроенный аттенюатор генератора.

е) Провести измерения ДН рупорной антенны (см. рис. 2.3) в H -плоскости:

— из положения, соответствующего максимуму ДН $\alpha_1(\theta_0)$, нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства по часовой стрелке, пока показания микровольтметра не составят $\alpha(\theta_1) = \alpha(\theta_0)/2$;

— необходимо определить направление первого минимума в диаграмме направленности $\alpha(\theta_2)$;

— на интервалах углов $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$ произвести измерение ДН антенны всего в 4...6 дополнительных точках;

— повернуть антенну на угол $\theta > \theta_2$ и определить направление, соответствующее первому боковому максимуму $\alpha(\theta_3)$ и следующему минимуму ДН $\alpha(\theta_4)$;

— на интервале углов $\theta \in (\theta_2, \theta_4)$ произвести измерение ДН в 4...6 дополнительных точках;

— повернуть антенну в исходное положение, соответствующее $\alpha(\theta_0)$;

— повторить аналогичный порядок измерений при вращении антенны против часовой стрелки.

ж) Провести измерения ДН рупорной антенны (см. рис. 2.3) в E -плоскости. Для этого повернуть исследуемую и вспомогательную антенны на 90° вокруг оси, проходящей через центры апертур антенн (см. рис. 2.3) и повторить измерения по п. е).

з) Переключить волноводный коммутатор в положение «к эталонной антенне» (см. рис. 2.3).

и) Произвести юстировку эталонной и вспомогательной антенн, выполнив операции аналогично п. г).

к) Определить показания микровольтметра $\alpha_3(\theta_0)$.

л) Установить на генераторе частоту, заданную для второй исследуемой рупорной антенны.

м) Переключить волноводный коммутатор в положение «к исследуемой антенне» (см. рис. 2.3).

н) Установить вторую исследуемую антенну (см. табл. 2.1) на опорно-поворотное устройство.

о) Выполнить операции по п. г) — к).

2.5.3. Обработка результатов измерений

а) Построить калибровочные кривые по данным, полученным при выполнении п. 2.5.2, г) на двух частотах, указанных в индивидуальном задании (табл. 2.1): зависимости показаний селективного микровольтметра $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ от ослабления δ . Пример написания программы для построения калибровочной кривой приведен в приложении Б.

б) Используя результаты измерений диаграмм направленности, выполненных для двух исследуемых антенн в E - и H -плоскостях, пересчитать уровни отсчетов $\alpha(\theta)$ в децибелы, воспользовавшись построенными зависимостями $\alpha_K(0^\circ, \delta)$: каждому значению $\alpha(\theta)$, определенному в ходе измерений, на основании графика $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ ставится в соответствие ослабление δ с применением функции $Kalibr(\alpha(\theta))$ (см. Приложение Б). Далее определяется зависимость

$$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{Kalibr(\alpha(\theta))/20},$$

которая представляет собой нормированную диаграмму направленности антенны по полю. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 2.3).

Таблица 2.3 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Отсчет, град	100	95	...
Угол ДН θ , град	90	85	...
α	4	3,7	...
$Kalibr(\alpha)$, дБ	0	-1,62	...
$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{Kalibr(\alpha)/20}$	1	0,83	...

в) Построить в декартовой системе координат два графика для первой исследуемой антенны, объединив на каждом из графиков теоретическую и экспериментально измеренную диаграммы направленности в E - и H -плоскостях. Выполнить аналогичные построения для второй исследуемой антенны.

г) По экспериментальным диаграммам направленности определить для двух антенн $2\Delta\theta_{0,707}^E$ и $2\Delta\theta_{0,707}^H$, относительные уровни первых боковых лепестков.

д) Рассчитать коэффициенты усиления двух исследованных антенн относительным методом. В качестве эталонной антенны используется

пирамидальный остроконечный рупор с геометрическими параметрами апертуры $a_p=0,135$ м, $b_p=0,09$ м, для которого на рис. 2.4 показана зависимость коэффициента усиления от частоты.

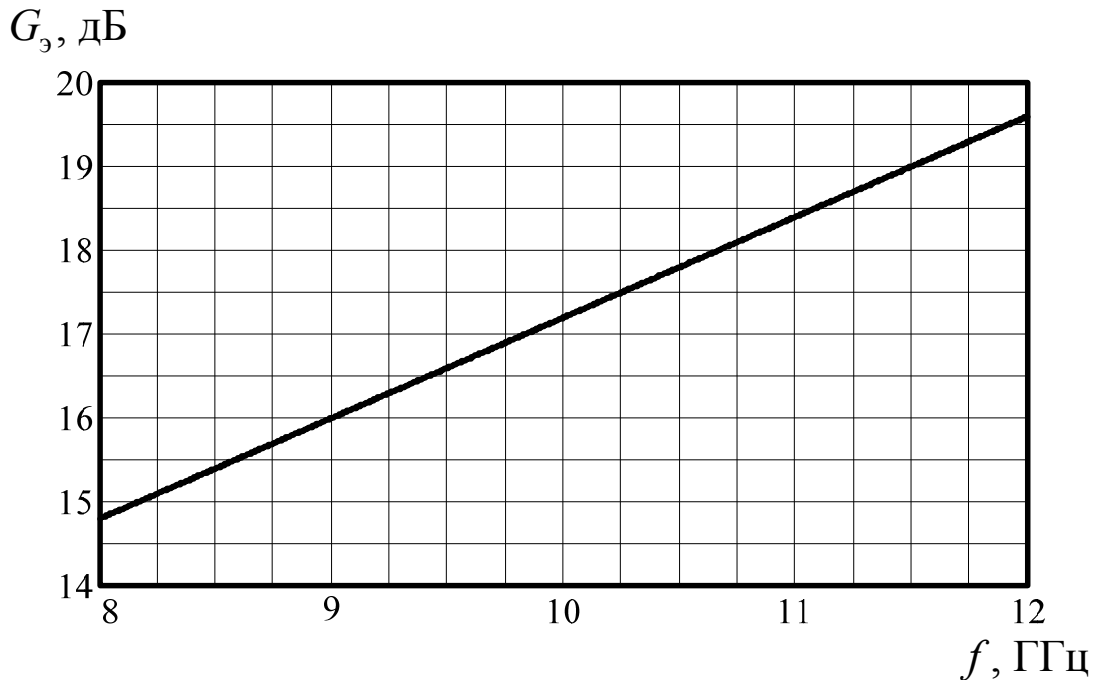


Рис. 2.4 — Зависимость коэффициента усиления эталонного рупора от частоты

Экспериментальный коэффициент усиления исследуемой антенны с учетом квадратичной характеристики детектора определяется по формуле

$$G = G_{\text{э}} + 10 \lg \frac{\alpha(\theta_0)}{\alpha_{\text{э}}(\theta_0)}, \text{ дБ}$$

где $G_{\text{э}}$ — коэффициент усиления эталонного рупора, выраженный в дБ;

$\alpha(\theta_0)$ — максимальный уровень измеренного сигнала исследуемой антенны;

$\alpha_{\text{э}}(\theta_0)$ — максимальный уровень измеренного сигнала эталонного рупора.

е) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

ж) Сделать выводы по работе.

2.6. Контрольные вопросы и задания

2.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Охарактеризуйте состав установки для измерения характеристик излучения рупорной антенны.

б) Охарактеризуйте, в чем отличие диаграмм направленности открытого конца волновода и рупорной антенны.

в) Что входит в программу экспериментальных измерений характеристик рупорной антенны?

г) Охарактеризуйте порядок калибровки при проведении измерений

диаграммы направленности рупорной антенны.

д) Охарактеризуйте порядок калибровки при проведении измерений диаграммы направленности зеркальных антенны.

е) Охарактеризуйте методику измерения коэффициента усиления рупорной антенны относительным методом.

ж) Как влияет длина рупорной антенны R на её коэффициент направленного действия?

з) Охарактеризуйте методику измерения диаграммы направленности рупорной антенны.

2.6.2. Задания для подготовки к защите лабораторной работы

а) Определить параметры оптимального H -плоскостного секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на длине волны $\lambda = 3,2$ см. Длина рупора $l_{opt} = 25$ см. Рупор в основании имеет размеры: $a = 2,3$ см, $b = 1$ см.

б) Определить размеры апертуры оптимального остроконечного пирамидального рупора, возбуждаемого на длине волны $\lambda = 10$ см. Длина рупора $l_{opt} = 1$ см.

в) Эффективная площадь оптимальной E -плоскостной секториальной рупорной антенны $S_{эф} = 0,64S_p = 180$ см². Определить габаритные размеры антенны при работе на длине волны $\lambda = 6$ см, если размер рупора в раскрыве $a = 5,8$ см.

г) Во сколько раз ширина главного луча ДН пирамидального рупора на уровне 0,5 по мощности в E -плоскости $2\Delta\theta_{0,5}^E$ больше ширины главного луча ДН на том же уровне в H -плоскости $2\Delta\theta_{0,5}^H$, если размеры апертуры рупора связаны соотношением $a_p = 2b_p$.

д) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН оптимального E -секториального рупора в плоскости E , если ширина его раскрыва $b_p = 10$ см, а длина волны $\lambda = 2$ см.

е) Определить размеры раскрыва оптимального пирамидального рупора, КНД которого $D = 240$, если ширина главного луча ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях одинакова ($2\Delta\theta_{0,5}^H = 2\Delta\theta_{0,5}^E$), а длина волны $\lambda = 2$ см.

ж) Эффективная площадь оптимальной H -секториальной рупорной антенны $S_{эф} = 0,64S = 200$ см². Определить габариты антенны при работе на длине волны $\lambda = 13$ см, если размер рупора в раскрыве $b_p = 3,4$ см.

з) Определить габариты оптимального E -секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на длине волны $\lambda = 9$ см. Длина рупора $R_{opt}^E = 80$ см. Рупор в основании имеет размеры $a = 7,2$ см; $b = 3,4$ см.

и) Оптимальный пирамидальный рупор с квадратным раскрывом возбуждается волной H_{10} . В какой из плоскостей (E или H) и во сколько раз ширина луча рупора на уровне 0,5 по мощности будет больше и почему?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ 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.

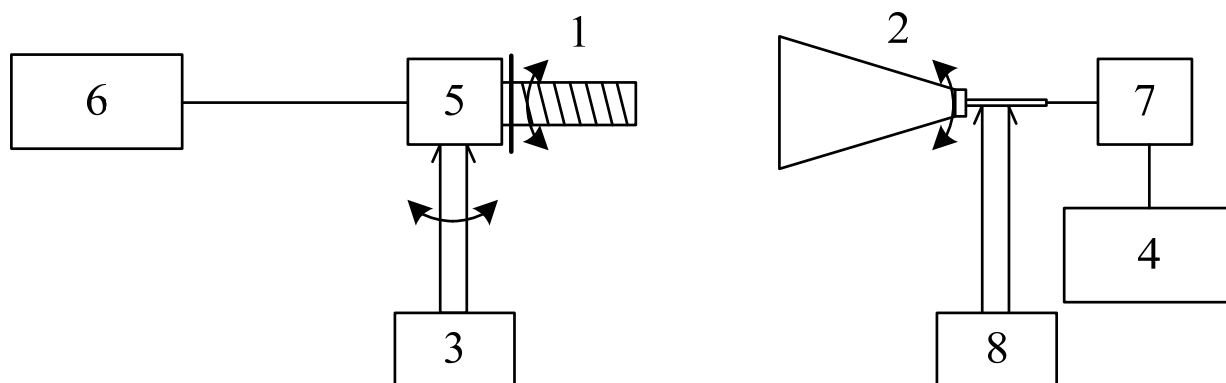


Рис. 3.1 — Структурная схема измерительной установки

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
Антенна	ЦСА 1	ЦСА 1	ЦСА 1	ЦСА 1	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 2	ЦСА 2	ЦСА 2	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

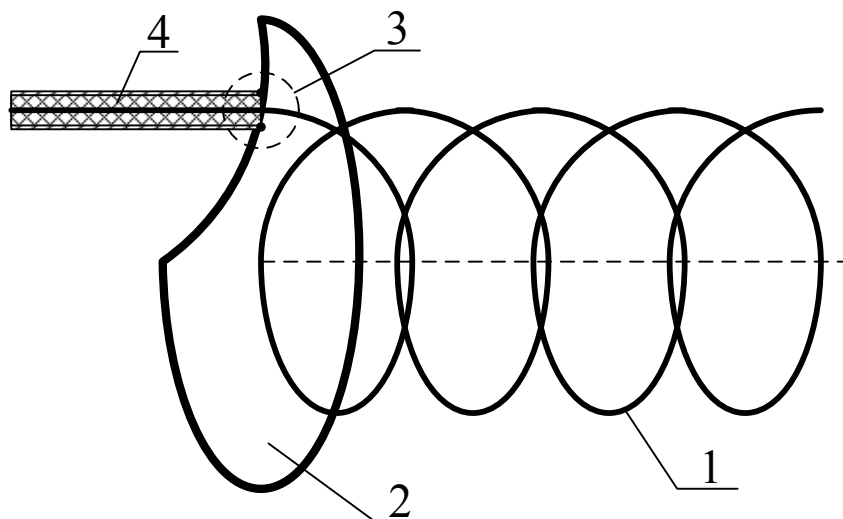
Таблица 3.2 — Геометрические параметры антенн

№ 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.



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

Рис. 3.2 — Модель цилиндрической спиральной 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;
- 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

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)

$$K_{\text{э}} = \frac{OA}{OB},$$

который изменяется от 0 до 1.

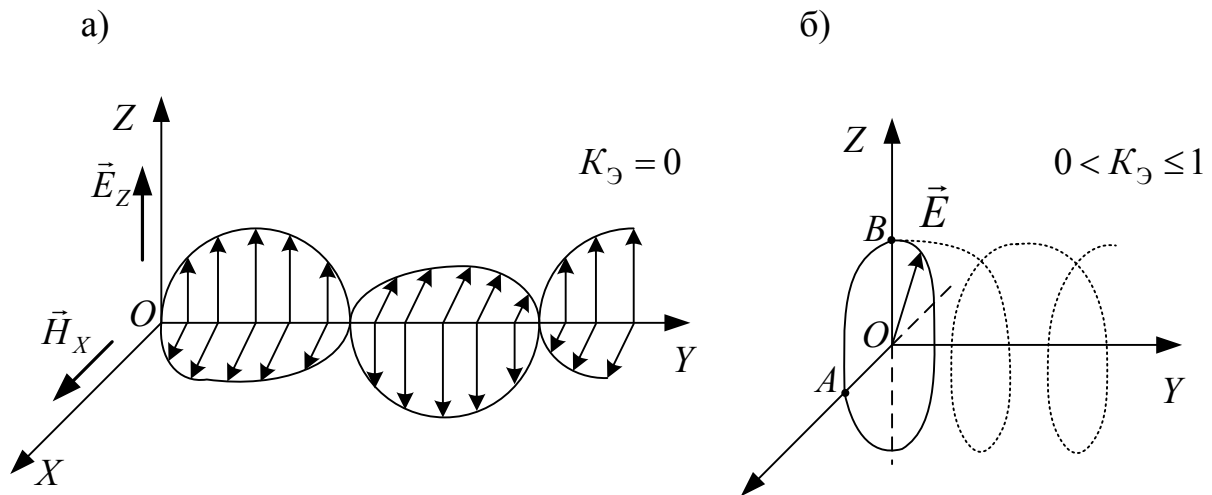


Рис. 3.3 — Поляризационная структура электромагнитного поля

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. 1.3) 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).

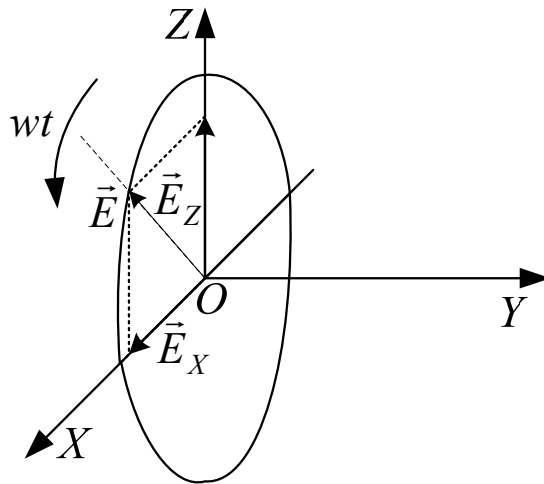


Рис. 3.4 — Формирование эллиптически поляризованной волны

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 .

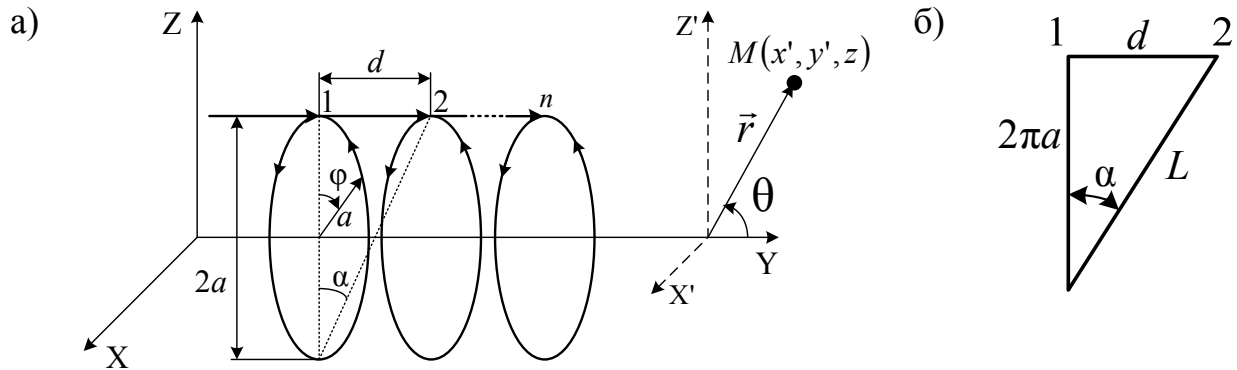


Рис. 3.5 — Модель представления однозаходной цилиндрической спиральной антенны: при ортогональном расположении витков спирали относительно плоскости XY (а); к определению угла наклона витков спирали (б)

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.

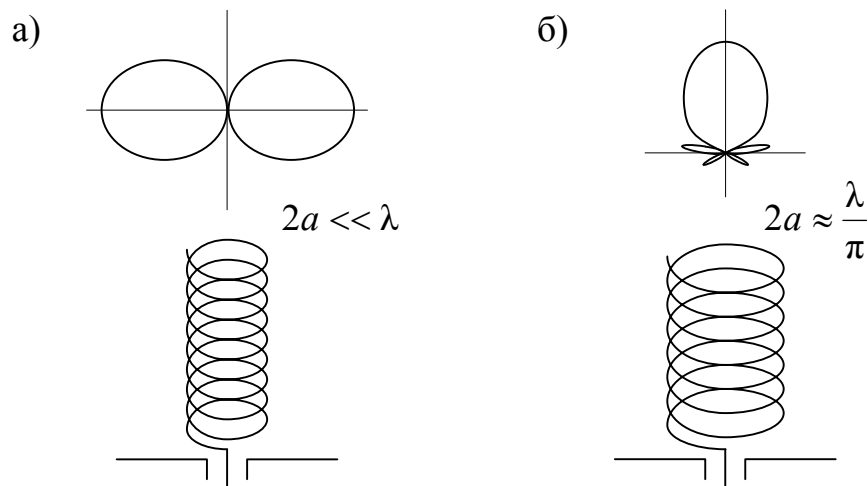


Рис. 3.6 — Основные режимы излучения цилиндрической спиральной антенны: а) режим малых рамок; б) режим осевого излучения

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

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

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

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

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

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

Для определения $f_{\text{реш}}(\theta)$ 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 [3]

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

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

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

Для приближенного расчета характеристик спиральных антенн можно воспользоваться эмпирическими формулами [4]:

— 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

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

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 В.1 и В.2 (см. Приложение В).

Примечание. Пример выполнения теоретических исследований представлен в Приложении А.

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. 3.7. Антенны ориентируются в направлении друг друга таким образом, чтобы направления главных максимумов их диаграмм направленности находились на линии, соединяющей осевые направления антенн (рис. 3.7).

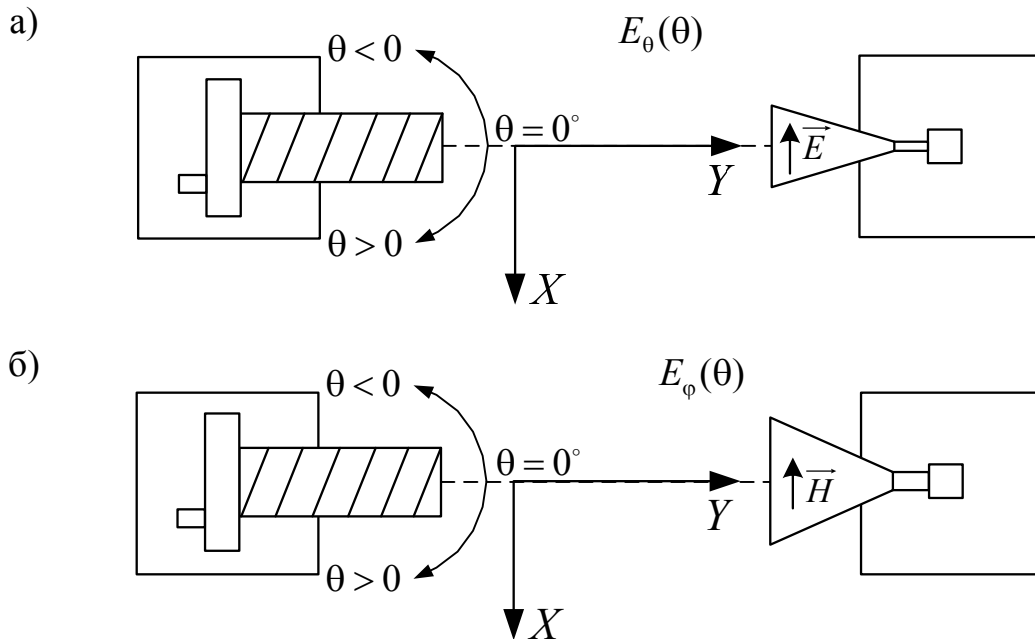


Рис. 3.7 — Измерение амплитудных диаграмм направленности в плоскости XOY: а) E_θ и б) E_ϕ составляющих поля излучения спиральной антенны

в) Выполнить калибровку измерительного стенда на полигоне, внося последовательно ослабления на выходе генератора от 0 до 20 дБ (3, 6, 10, 13, 16, 20 дБ) с использованием калиброванного выхода генератора Г4-79 и записывая показания $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ на селективном усилителе.

г) Провести измерения ДН для составляющей поля излучения E_θ

исследуемой антенны. Для этого исследуемая и вспомогательная антенна размещаются как показано на рис. 3.7, а. 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 $\alpha(\theta)$.

д) 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. 3.7, б. Затем провести измерение ДН аналогично п. г).

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

3.5.3. Обработка результатов измерений

а) Построить калибровочные кривые по данным, полученным при выполнении п. в) на трех частотах, указанных в индивидуальном задании (табл. 3.1): зависимости показаний селективного микровольтметра $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ от ослабления δ . Пример написания программы для построения калибровочной кривой приведен в Приложении Б.

б) Используя результаты измерений, выполненных для составляющих поля E_θ и E_φ исследуемой антенны, пересчитать уровни отсчетов $\alpha(\theta)$ в децибелы, воспользовавшись построенными зависимостями $\alpha_K(0^\circ, \delta)$: каждому значению $\alpha(\theta)$, определенному в ходе измерений, на основании графика $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ ставится в соответствие ослабление δ с применением функции $Kalibr(\alpha(\theta))$ (см. Приложение Б). Далее определяется зависимость

$$f_{\text{норм}}(\theta) = 10^{Kalibr(\alpha)/20},$$

которая представляет собой нормированную диаграмму направленности антенны по полю. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 3.3).

Таблица 3.3 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Отсчет, град	100	95	...
Угол ДН θ , град	90	85	...
α	4	3,7	...
$Kalibr(\alpha)$, дБ	0	-1,62	...
$f_{\text{норм}}(\theta) = 10^{Kalibr(\alpha)/20}$	1	0,83	...

в) Построить в полярной системе координат нормированные диаграммы направленности для составляющих поля E_θ и E_φ исследуемой антенны с учетом результатов, представленных в таблице 3.3.

г) Определить ширину главного лепестка ДН $2\Delta\theta_{0,707}$ и максимальный уровень бокового излучения для E_θ и E_φ составляющих поля. Результаты измерений представить в виде таблиц В.2 (см. Приложение В).

3.6. Контрольные вопросы и задания

3.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- а) Опишите порядок измерения диаграмм направленности цилиндрической спиральной антенны на заданной частоте.
- б) Как выбирается вспомогательная антенна и как выбирается расстояние на измерительном полигоне между антеннами?
- в) Как производить калибровку измерительной установки и использовать результаты калибровки?
- г) Опишите структуру поля с эллиптической или круговой поляризацией.
- д) Какие существуют режимы излучения спиральных антенн? Для каких целей могут использоваться антенны, работающие в этих режимах?
- е) Перечислите основные характеристики поля излучения цилиндрической спиральной антенны.
- ж) Как количество витков спирального излучателя влияет на диаграмму направленности антенны?
- з) Как влияет периметр одного витка цилиндрической спиральной антенны на ее диаграмму направленности?

3.6.2. Задания 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 $\frac{L}{\lambda} = 1,1$.

ж) Поясните, для каких практических задач может быть использована цилиндрическая спиральная антенна?

з) Поясните, от чего зависит значение диапазона рабочих частот спиральной антенны и чем он ограничен?

и) Как можно повысить направленность излучения ЦСА?

к) Как измениться поляризационная структура поля излучения ЦСА, если разность фаз между составляющими поля E_x и E_z в продольном направлении будет изменяться в пределах от 0° до 100° ?

л) Поясните, каким образом влияют шаг намотки и количество витков спирального проводника на диаграмму направленности ЦСА?

м) Поясните, какие особенности следует учесть при организации радиоканала с применением передающей и приемной спиральных антенн?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН

4.1. Цель работы

Изучить принципы построения волноводно-щелевых антенн и их основные характеристики. Выполнить теоретические расчеты характеристик излучения и параметров антенн в соответствии с индивидуальным заданием. Провести экспериментальное исследование характеристик волноводно-щелевых антенн.

4.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 4.1) включает: исследуемые резонансную волноводно-щелевую антенну 1 и нерезонансную волноводно-щелевую антенну 2, вспомогательную антенну 3, детекторные секции 4, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 5, опорно-поворотное устройство для вспомогательной антенны 6, СВЧ генератор 7, селективный микровольтметр 8.

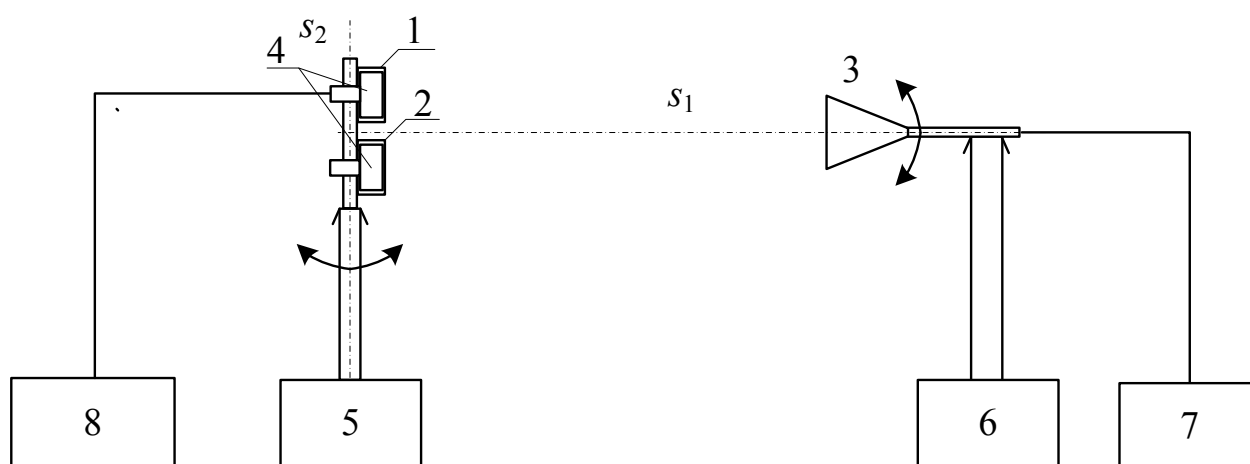


Рис. 4.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемыми 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 5 позволяет вращать исследуемые антенны вокруг оси s_2 . Опорно-поворотное устройство 6 позволяет вращать вспомогательную антенну вокруг оси s_1 .

4.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются (табл. 4.1):

— для **резонансной** волноводно-щелевой антенны: поперечное сечение прямоугольного волновода $0,023 \times 0,01$ м; расстояние между центрами соседних щелей $d = 0,02$ м; длина щелевых излучателей $l = 0,015$ м; два варианта количества щелей в решетке n_1, n_2 ; рабочая частота $f_1 = 9,5$ ГГц;

— для **нерезонансной** волноводно-щелевой антенны: поперечное сечение прямоугольного волновода $0,023 \times 0,01$ м; длина щелевых излучателей $l = 0,015$ м; расстояние между центрами соседних щелей $d = 0,02$ м; количество щелей в решетке $n_3 = 25$; рабочая частота f_2 ; верхняя $f_3 = f_2 + \Delta f$ и нижняя $f_4 = f_2 - \Delta f$ частоты диапазона при $\Delta f = 60$ МГц.

Таблица 4.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

Резонансная волноводно-щелевая антенна											
M_3		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кол-во щелей	n_1	6	4	6	8	7	6	5	7	9	10
	n_2	12	10	14	18	12	11	15	17	16	10
Нерезонансная волноводно-щелевая антенна											
N_3		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_2 , ГГц		7,9	8,1	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,9	9,1	9,3

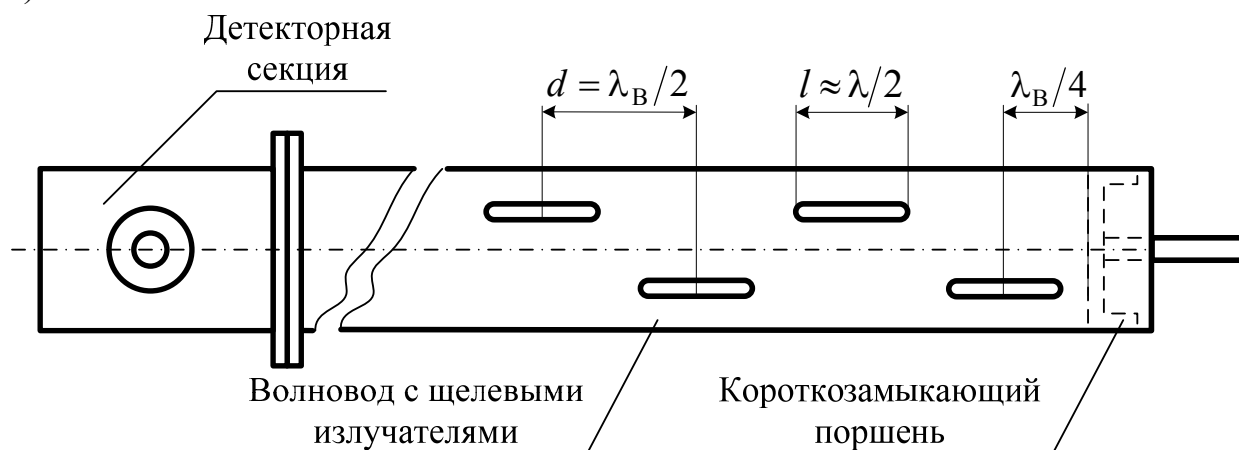
4.4. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

4.4.1. Особенности построения волноводно-щелевых антенн

Обобщенные модели резонансной (РВЩА) и нерезонансной (НВЩА) волноводно-щелевых антенн показаны на рис. 4.2.

Задача об излучении щелевой антенны характеризуется рядом особенностей, отличающих ее от аналогичных задач для других типов СВЧ антенн, где амплитудно-фазовые распределения поля в апертуре мы получали, используя электромагнитное поле внутри антенны. Сложность состоит в том, что закон изменения амплитуд и фаз поля в щели не зависит от внутреннего поля в волноводе, на стенке которого вырезана щель.

а)



б)

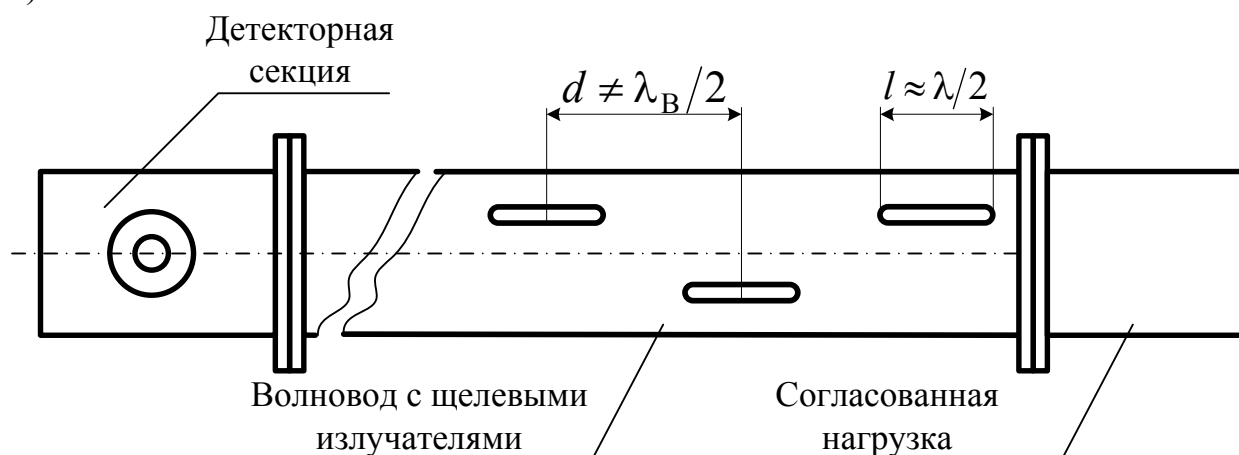


Рис. 4.2 — Модели резонансной (а) и нерезонансной (б) волноводно-щелевых антенн

У резонансных антенн щели располагаются вдоль волновода на расстояниях $\lambda_{\text{в}}/2$ и вследствие этого возбуждаются синфазно стоячей волной поля в волноводе (см. рис. 4.2), создающей соответственное распределение тока на широкой стенке волновода. Режим стоячей волны обеспечивается установкой на конце волновода настраиваемого короткозамыкающего поршня.

У нерезонансных антенн щели располагаются вдоль волновода на расстояниях отличных от $\lambda_{\text{в}}/2$ и вследствие этого возбуждаются несинфазно бегущей волной поля в волноводе (см. рис. 4.2), создающей соответственное распределение тока на широкой стенке волновода. Режим бегущей волны обеспечивается согласованием антенны с конечной нагрузкой, для чего в конце волновода ставится поглотитель. Поэтому КПД нерезонансных антенн меньше, чем у резонансных. Нерезонансные антенны являются более широкодиапазонными, чем резонансные. Это положительное качество нерезонансных щелевых антенн обусловлено хорошим согласованием в полосе частот.

4.4.2. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

К исследованию щелевых антенн может быть применен принцип поляризационной двойственности Бабинэ, который значительно облегчает получение требуемых расчетных формул. Этот принцип является вполне точным для идеальной щелевой антенны, т.е. для щели на неограниченной идеально-проводящей бесконечно тонкой плоскости. Однако этим методом можно пользоваться и в большинстве практических случаев.

Содержание принципа двойственности сводится к следующему. Если к идеальной щелевой антенне приложить от какого-либо источника электродвижущую силу частоты f , то векторы электромагнитного поля E_1 и H_1 в щели и в окружающем щель пространстве будут иметь такое же направление и являться такими же функциями пространственных координат, какое направление и какими функциями являются соответственно векторы E_2 и H_2 ($E_1 = H_2, H_1 = -E_2$) электромагнитного поля вибратора в виде идеально проводящей бесконечно тонкой пластинки, находящейся в свободном пространстве и имеющей такую же форму и размеры, как щель, при приложении к пластинке электродвижущей силы той же частоты в аналогичных точках.

Идентичность электромагнитных полей идеальной щелевой антенны и пластинчатого вибратора относится не только к зоне Фраунгофера, но также к зоне непосредственно примыкающей к щели и соответственно вибратору, как и к другим зонам. А поскольку электрический и магнитный векторы связаны с током и напряжением идентичными интегральными соотношениями, из этого следует, что определение напряжения вдоль щели такое же, как распределение тока по вибратору (близкое к синусоидальному). И распределение тока по кромке щели такое же, как распределение напряжения по вибратору (близко к косинусоидальному). Отсюда следует, что входная проводимость щелевой антенны с точностью до постоянного множителя определяется входным сопротивлением $Z_{\text{ВХ.СВ}}$ симметричного вибратора

$$Y_{\text{ВХ.щ.}} = \frac{Z_{\text{ВХ.СВ}}}{(60\pi)^2} = \frac{Z_{\Sigma\text{СВ}} - j\rho_{\text{СВ}}\text{ctg}(kl)}{(60\pi)^2}, \quad (4.1)$$

где $Z_{\Sigma\text{СВ}}$ — сопротивление излучения симметричного вибратора с длиной плеч l ;

$$\rho_{\text{СВ}} = 120 \left(\ln \left(\frac{1}{r_0} \right) - 1 \right) \quad \text{— волновое сопротивление эквивалентного}$$

вибратора с радиусом проводников $r_0 = \frac{d_0}{4}$; d_0 — ширина щели; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Из (4.1) следует, что при $l = \frac{\lambda}{4}$, $2l = \frac{\lambda}{2}$ (полуволновая щель) щель является резонансной, однако для получения резонанса реальную щель

приходится «укорачивать» аналогично укорочению вибратора. Величина укорочения может быть определена по формуле

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,225}{\ln\left(\frac{4l}{d_0}\right)}. \quad (4.2)$$

Для того чтобы щель максимально излучала, она должна располагаться перпендикулярно линиям тока на поверхности волновода, либо, что то же самое, — параллельно магнитным силовым линиям (последнее более наглядно).

Полагая, что взаимное влияние щелей пренебрежимо мало, а размеры и интенсивность их возбуждения одинакова, можно рассчитать диаграмму направленности ВЩА по обобщенной формуле

$$F(\theta) = F_1(\theta) \frac{\sin(0,5N(kd \sin \theta - \psi_0))}{\sin(0,5(kd \sin \theta - \psi_0))}, \quad (4.3)$$

где N — число щелей; d — расстояние между щелями;

ψ_0 — разность фаз токов возбуждения соседних щелевых излучателей;

θ — пространственный угол, отсчитываемый в H -плоскости от нормали к плоскости антенны;

$F_1(\theta)$ — функция направленности одиночного излучателя.

ДН щели длиной $2l$ в плоскости H рассчитывается по формуле:

$$F_1(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos(kl)}{\cos \theta} \right|. \quad (4.4)$$

В плоскости E продольный волноводу щелевой излучатель в отличие от электрического вибратора не является всенаправленным вследствие влияния ограниченных размеров стенок волновода. Расчет функции направленности в этом случае сложен и в лабораторной работе не рассматривается.

Так как в резонансной ВЩА щели возбуждаются синфазно, то

$$\psi_{0\text{РВЩА}} = 0.$$

При синфазном возбуждении щелевых излучателей главный максимум ДН резонансной ВЩА направлен вдоль нормали к полотну антенной решетки.

Так как в нерезонансной ВЩА щели, расположенные в шахматном порядке (см. рис. 4.2), возбуждаются не синфазно, то

$$\psi_{0\text{НВЩА}} = d \frac{2\pi}{\lambda_B} + \pi, \quad (4.5)$$

где $\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$; a — размер широкой стенки поперечного сечения

волновода.

Линейное изменение фазы токов возбуждения вдоль полотна антенны приводит к отклонению главного максимума ДН нерезонансной ВЩА на

некоторый угол. Направление максимального излучения нерезонансной ВЩА образует с нормалью к плоскости расположения щелей угол

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d}. \quad (4.6)$$

Нули функции диаграммы направленности в общем случае определяются по формуле

$$\sin \theta_{0i} = i \frac{\lambda}{Nd} + \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d},$$

где $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ВЩА по нулевому уровню рассчитывается по формуле

$$2\Delta\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\lambda}{Nd}. \quad (4.7)$$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ВЩА на уровне половинной мощности рассчитывается по формуле

$$2\Delta\theta_{0,5} = 0,88 \frac{\lambda}{Nd}, [\text{рад}] \text{ или } 2\Delta\theta_{0,5} = 51 \frac{\lambda}{Nd}, [\text{град}]. \quad (4.8)$$

При заданном значении угла $\theta_{\max}$ можно определить требуемое значение d по формуле

$$d = \frac{\lambda \lambda_B}{2(\lambda_B \sin \theta_{\max} - \lambda)}. \quad (4.9)$$

При оценке расстояния d между щелями необходимо также обратить внимание на ограничения этой величины в решетке из ненаправленных излучателей. Для того, чтобы антенна имела один главный максимум и чтобы боковые максимумы убывали с увеличением их номера, должно выполняться следующее условие

$$d < \frac{\lambda}{2(1 + \sin \theta_{\max})}. \quad (4.10)$$

Направленные свойства щели позволяют увеличивать d , по сравнению с условием (4.10), чем и объясняется допустимость выбора d даже равного длине волны в волноводе.

Определение проводимостей и сопротивлений щелей для многоэлементной антенны производится в пренебрежении взаимным влиянием соседних щелей, что оказывается возможным, так как в большинстве случаев щели располагаются на расстоянии, приблизительно равном $\lambda_B/2$.

Нормированная проводимость одиночной щели длиной $\lambda/2$, расположенной вдоль широкой стенки волновода, определяется по формуле

$$G = 2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_B}{\lambda} \sin^2 \frac{\pi x_1}{a} \cos^2 \frac{\pi \lambda}{2\lambda_B}. \quad (4.11)$$

где a и b — размеры широкой и узкой стенок поперечного сечения волновода, соответственно, x_1 — смещение щели относительно средней линии широкой стенки волновода.

4.5. Порядок выполнения работы

4.5.1. Порядок выполнения теоретических исследований

а) Рассчитать и построить в прямоугольной системе координат нормированные ДН резонансной волноводно-щелевой антенны в плоскости H в пределах главного и первого бокового лепестков для двух заданных значений числа щелей в антенне на частоте f_1 , используя формулы (4.3), (4.4).

б) Рассчитать и построить в прямоугольной системе координат нормированную ДН нерезонансной волноводно-щелевой антенны в плоскости H в пределах главного и первого бокового лепестка для заданного значения частоты f_2 , используя формулы (4.3), (4.4) и (4.5).

в) Рассчитать положение главного максимума и ширину главного лепестка ДН нерезонансной волноводно-щелевой антенны в диапазоне частот $(f_3 \dots f_4)$ по формулам (4.6) и (4.8), соответственно. Построить графики рассчитанных зависимостей.

г) Рассчитать резонансное укорочение щелей для частоты f_2 нерезонансной ВЩА по формуле (4.2), полагая, что ширина щелевых излучателей составляет 0,5 мм.

д) Рассчитать нормированные проводимости щелевых излучателей в нерезонансной ВЩА при $x_1 = 5$ мм на частотах f_3 и f_4 по формуле (4.11).

е) Для щелевых излучателей резонансной и нерезонансной ВЩА на частотах f_1 и f_2 , соответственно, подобрать x_1 , при которых обеспечивается согласование ВЩА с питающим волноводом, т.е. выполняется условие $N \cdot G = 1$.

4.5.2. Порядок выполнения экспериментальных исследований

а) Включить генератор и селективный усилитель. Установить частоту колебаний на выходе генератора, равную f_1 .

б) Подключить детекторную секцию ко входу резонансной ВЩА.

в) Установить на резонансной ВЩА количество щелей, равное n_1 , с помощью подвижного короткозамыкающего поршня, перемещая его вдоль полотна излучателей.

г) Выполнить юстировку исследуемой и вспомогательной антенны. Для этого исследуемая и вспомогательная антенна ориентируются в направлении друг друга таким образом, чтобы направления главных максимумов их диаграмм направленности находились на линии, соединяющей осевые направления антенн (рис. 4.3).

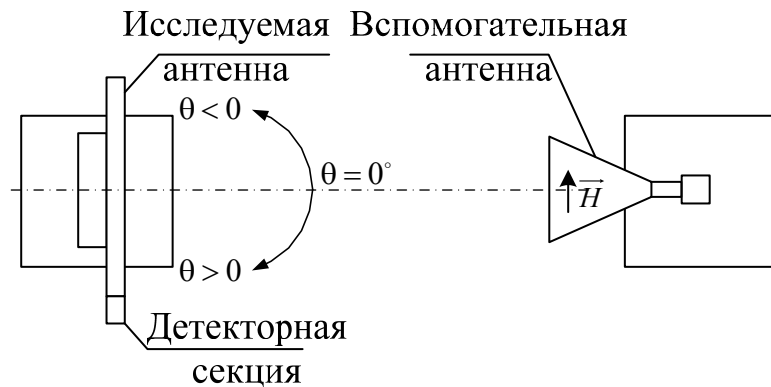


Рис. 4.3 — Измерение амплитудных диаграмм направленности ВЩА в плоскости H

Предварительно направление $\theta = 0^\circ$ фиксируется по максимуму показаний селективного микровольтметра $\alpha(0^\circ)$. Затем положение максимума следует уточнить методом «двух засечек», выполнив следующие действия:

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, вправо (по часовой стрелке) до угла θ' , на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta') = \alpha(0^\circ)/2$;

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, влево (против часовой стрелки) до угла θ'' ($\theta'' < 0$), на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta'') = \alpha(\theta') = \alpha(0^\circ)/2$;

— определить отсчетный угол положения максимума ДН $\theta_{\max}$, как среднее арифметическое измеренных значений

$$\theta_{\max} = \frac{\theta' + \theta''}{2}.$$

В дальнейшем при построении ДН положение максимума следует принять за 0° для всех последующих измерений.

д) Снять калибровочную кривую измерительной установки в максимуме ДН ВЩА: зависимость показаний микровольтметра от ослабления сигнала δ в децибелах — $\alpha_K(0^\circ, \delta)$. Ослабление нужно изменять в пределах от 0 до 20 дБ (3, 6, 10, 13, 16, 20, 25 дБ) используя встроенный аттенюатор генератора.

е) Провести измерения ДН резонансной ВЩА (см. рис. 2.3) в H -плоскости:

— из положения, соответствующего максимуму ДН $\alpha_1(\theta_0)$, нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства по часовой стрелке, пока показания микровольтметра не составят $\alpha(\theta_1) = \alpha(\theta_0)/2$;

— необходимо определить направление первого минимума в диаграмме направленности $\alpha(\theta_2)$;

— на интервалах углов $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$ произвести измерение

ДН антенны всего в 4...6 дополнительных точках;

— повернуть антенну на угол $\theta > \theta_2$ и определить направление, соответствующее первому боковому максимуму $\alpha(\theta_3)$ и следующему минимуму ДН $\alpha(\theta_4)$;

— на интервале углов $\theta \in (\theta_2, \theta_4)$ произвести измерение ДН в 4...6 дополнительных точках;

— повернуть антенну в исходное положение, соответствующее $\alpha(\theta_0)$;

— повторить аналогичный порядок измерений при вращении антенны против часовой стрелки.

ж) Установить на резонансной ВЩА количество щелей, равное n_2 . Выполнить измерение ДН ВЩА по п. е).

з) Подключить детекторную секцию ко входу нерезонансной ВЩА.

и) Установить на генераторе частоту f_2 .

к) Измерить калибровочную кривую измерительной установки в максимуме ДН нерезонансной ВЩА, выполнив операции по п. д).

л) Выполнить измерение ДН нерезонансной ВЩА в соответствии с операциями по п. е).

м) Последовательно устанавливая на генераторе частоты f_3, f_2, f_4 и в каждом случае определять угловое положение главного максимума ДН нерезонансной ВЩА.

4.5.3. Обработка результатов измерений

д) Построить калибровочные кривые по данным, полученным при выполнении п. д) на частотах f_1 и f_2 : зависимости показаний селективного микровольтметра $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ от ослабления δ . Пример написания программы для построения калибровочной кривой приведен в Приложении Б.

е) Используя результаты измерений диаграмм направленности, выполненных для двух исследуемых антенн в H -плоскостях, пересчитать уровни отсчетов $\alpha(\theta)$ в децибелы, воспользовавшись построенными зависимостями $\alpha_K(0^\circ, \delta)$: каждому значению $\alpha(\theta)$, определенному в ходе измерений, на основании графика $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ ставится в соответствие ослабление δ с применением функции $Kalibr(\alpha(\theta))$ (см. Приложение Б).

Далее определяется зависимость

$$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{Kalibr(\alpha(\theta))/20},$$

которая представляет собой нормированную диаграмму направленности антенны по полю. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 4.3).

Таблица 4.3 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Угол ДН θ , град	0	2,6	...
α	4	3,7	...
$Kalibr(\alpha)$, дБ	0	-1,62	...
$f^{норм}(\theta) = 10^{Kalibr(\alpha)/20}$	1	0,83	...

ж) Построить в декартовой системе координат два графика для резонансной ВЩА, объединив на каждом из графиков соответствующие теоретическую и экспериментально измеренную диаграммы направленности.

з) Построить в декартовой системе координат график для нерезонансной ВЩА, объединив теоретическую и экспериментально измеренную диаграммы направленности.

и) Построить в декартовой системе координат график для нерезонансной ВЩА, объединив теоретическую и экспериментально измеренную зависимости углового положения главного максимума ДН нерезонансной ВЩА от частоты.

к) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

л) Сделать выводы по работе.

4.6. Контрольные вопросы и задания

4.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Охарактеризуйте состав установки для измерения характеристик излучения ВЩА.

б) Что входит в программу экспериментальных измерений характеристик ВЩА?

в) Охарактеризуйте методику измерения диаграммы направленности рупорной антенны.

г) Охарактеризуйте порядок калибровки при проведении измерений диаграммы направленности ВЩА.

д) Чем конструктивно отличаются резонансная и нерезонансная ВЩА?

е) Чем отличаются характеристики резонансной и нерезонансной ВЩА?

ж) Как выбирается расстояние между щелевыми излучателями в резонансной ВЩА?

з) Как выбирается расстояние между щелевыми излучателями в нерезонансной ВЩА?

и) Как изменится диаграмма направленности резонансной ВЩА при увеличении количества щелевых излучателей?

к) Как изменится диаграмма направленности нерезонансной ВЩА при изменении рабочей частоты?

л) Как выбирается длина щели?

м) Охарактеризуйте, на что влияет смещение щели относительно

середины широкой стенки волновода?

н) Как определяется длина волны в волноводе?

4.6.2. Задания для подготовки к защите лабораторной работы

а) Для резонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=8$, сечение волновода $a \times b = 2,3 \times 1$ см, длина волны $\lambda = 3,7$ см.

б) Для резонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=22$, сечение волновода $a \times b = 2,3 \times 1$ см, длина волны $\lambda = 2,9$ см.

в) Резонансная ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода с сечением $a \times b = 7,2 \times 3,4$ см, состоит из $N=10$ щелей и работает на $\lambda = 10$ см. На какое расстояние должны быть смещены щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в возбуждающем антенну волноводе установился режим бегущих волн, для этого должно выполняться условие $GN = 1$.

г) Резонансная ВЩА, имеющая $N=20$ продольных полуволновых щелей работает на волне $\lambda = 8$ см. На какое расстояние следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в возбуждающем антенну волноводе установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 6,1 \times 1$ см.

д) Нерезонансная ВЩА, выполненная на волноводе сечением $a \times b = 2,85 \times 1,26$ см, работает на $\lambda = 3,8$ см. Определить, на какой угол смещается главный максимум нормированной амплитудной ДН антенны относительно нормали к широкой стенке волновода, при сдвиге фаз между токами двух соседних щелевых излучателей $\psi_{0\text{НВЩА}} = 3,9$ рад.

е) Для нерезонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=8$, сечение волновода $a \times b = 2,3 \times 1$ см, длина волны $\lambda = 3$ см. Требуется обеспечить $\theta_{\max} = 20^\circ$.

ж) Для нерезонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=25$, сечение волновода $a \times b = 2,3 \times 1$ см, длина волны $\lambda = 3,8$ см. Требуется обеспечить $\theta_{\max} = 10^\circ$.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН

5.1. Цель работы

Изучить принцип действия, методику расчета и анализа характеристик параболических антенн. Приобрести навыки в измерении характеристик излучения параболических антенн.

5.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 5.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 3, опорно поворотное устройство для вспомогательной антенны 4, СВЧ генератор 5, детекторную секцию 6, селективный микровольтметр 7.

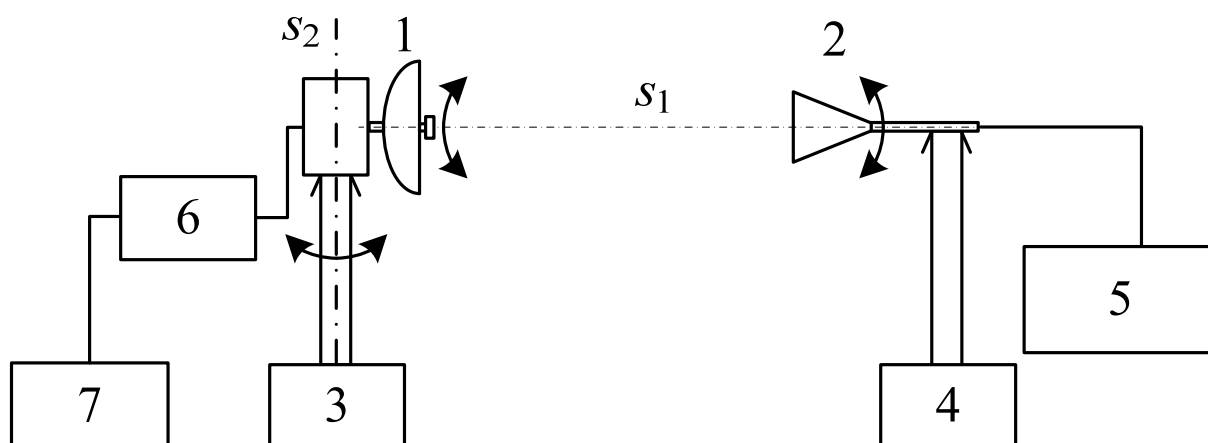


Рис. 5.1 — Структурная схема измерительной установки

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 вокруг осей s_1 и s_2 . Однокоординатное опорно-поворотное устройство 4 позволяет вращать вспомогательную антенну вокруг оси s_1 .

5.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: номера двух параболических антенн, габариты апертур $d_{31} \times d_{32}$ и глубина зеркал L (рис. 5.2), рабочие частоты f_1 и f_2 (табл. 5.1).

Таблица 5.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
f_1 , ГГц	9,4	9,2	9,5	9,6	9,3	9,4	9,8	9,2	9,6	9,9
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1
f_2 , ГГц	10	10,1	10,2	10,3	10,4	10,2	10,1	10	9,8	9,5

Примечание. Типы зеркальных антенн:

A1 — параболоид вращения ($d_{31} = d_{32} = 0,3$ м, $L_3 = 0,046$ м); двухщелевой облучатель Катлера с расстоянием между щелями $d_{\text{обл}} = 0,017$ м;

A2 — усеченный параболоид ($d_{31} \times d_{32} = 0,41 \times 0,275$ м, $L_3 = 0,085$ м); двухщелевой облучатель Катлера с расстоянием между щелями $d_{\text{обл}} = 0,009$ м.

5.4. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

5.4.1. Особенности построения параболических зеркальных антенн

Параболические антенны являются одним из наиболее распространенных типов антенн, используемых в современных радиотехнических системах различного назначения (радиорелейные системы связи, радиолокационные станции, спутниковые системы связи и телевидение, системы радиуправления и т. д.). Наибольшее распространение получили антенны с зеркалами в виде параболоида вращения, усеченного параболоида, параболического цилиндра и вырезки из параболоида вращения. Такое широкое распространение этих антенн объясняется возможностью формирования самых разнообразных диаграмм направленности при относительной простоте конструкции, достаточно высоком КПД, малой шумовой температуре.

Параболическая антенна конструктивно состоит из двух элементов — облучателя и зеркала (рис. 5.2). Наиболее распространенными являются зеркала в виде параболоида вращения, усеченного параболоида, параболического цилиндра.

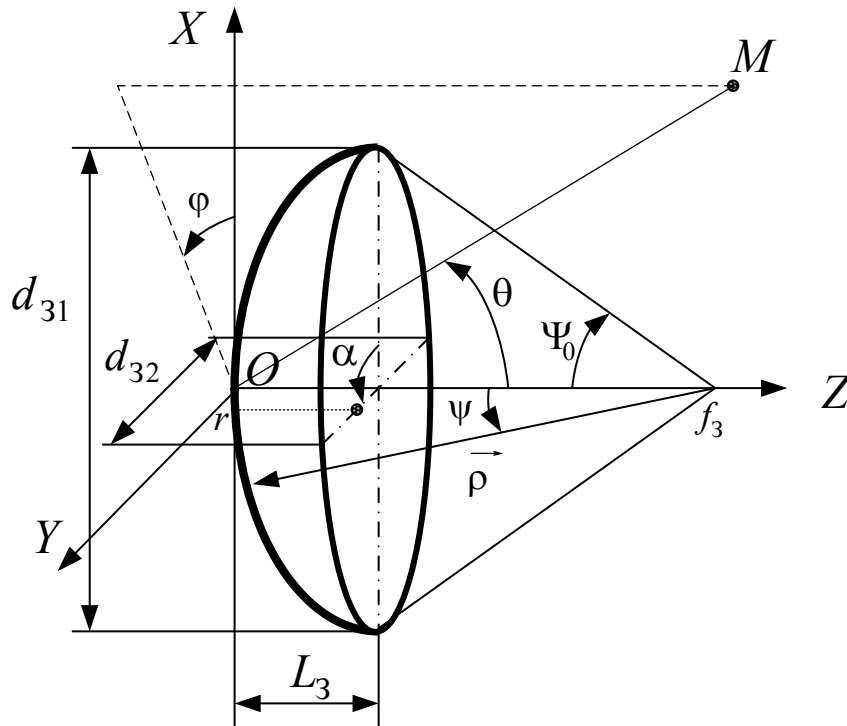


Рис. 5.2 — Схема параболической зеркальной антенны

Параболическая антенна характеризуется геометрическими параметрами:

- габариты раскрыва (апертуры) $d_{31} \times d_{32}$;
- фокусное расстояние параболоида f_3 ;
- угол раскрыва зеркала Ψ_0 ;
- глубина зеркала L_3 .

Если $\Psi_0 < 90^\circ$ ($d_3 < 4f_3$), то параболоид называют длиннофокусным, тогда как при $\Psi_0 > 90^\circ$ ($d_3 > 4f_3$) — короткофокусным.

Симметричный параболический профиль зеркала описывается:

- в прямоугольной системе координат уравнением

$$y^2 = x^2 = 4f_3z; \quad (5.1)$$

- в полярной системе координат соотношением

$$\rho(\psi) = \frac{2f_3}{1 + \cos \psi}. \quad (5.2)$$

Геометрические параметры параболического отражателя связаны между собой соотношениями:

$$\Psi_0 = 2 \operatorname{arccctg} \left(\frac{4f_3}{d_3} \right); \quad L_3 = f_3 \operatorname{tg}^2 \frac{\Psi_0}{2}. \quad (5.3)$$

Как правило, соотношение между фокусным расстоянием и диаметром раскрыва параболического зеркала выбирается исходя из типа облучателя согласно значений, приведенных в табл. 5.2.

Таблица 5.2 — Рекомендуемое соотношение для выбора значений f_3 и d_3

Тип облучателя	f_3/d_3
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде стержня	0,34...0,4
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде сплошного экрана	0,4...0,5
Рупорный или щелевой облучатель	0,5...0,625

Облучатель является важным элементом параболической зеркальной антенны, в значительной степени определяющим ее характеристики. В качестве облучателей используются слабонаправленные антенны, удовлетворяющие следующим основным требованиям:

- диаграмма направленности облучателя должна обеспечивать необходимое амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала;
- фазовый центр облучателя необходимо совместить с точкой фокуса зеркала;
- рабочая полоса частот облучателя должна соответствовать требуемой;
- электрическая прочность облучателя должна быть достаточной для излучения без пробоя заданной мощности;
- поперечные размеры облучателя должны быть относительно небольшими для снижения затенения зеркала;
- облучатель должен обеспечивать заданную поляризацию поля излучения;
- конструкция облучателя должна быть механически прочной.

Наибольшее применение на практике нашли облучатели следующих типов:

- вибраторные с рефлектором;
- волноводно-рупорные;
- щелевые.

В лабораторной работе исследуются макеты параболических зеркальных антенн с двухщелевым облучателем Катлера, конструкция которого показана на рис. 5.3. Щели закрывают пластинками из высокочастотного диэлектрика, что обеспечивает герметизацию облучателя. Для согласования питающего волновода его суживают и используют реактивный настроенный штырь на закорачивающей стенке резонатора, в котором прорезаны щели. Двухщелевой облучатель имеет сферическую фазовую характеристику и отличается низким уровнем заднего излучения. Поперечные размеры облучателя малы, что обеспечивает малое затенение.

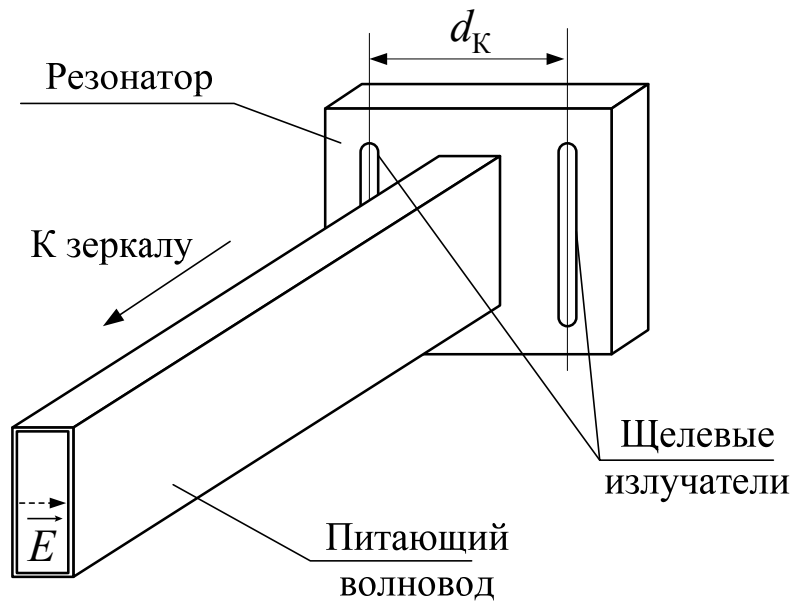


Рис. 5.3 — Модель облучателя Катлера

Диаграмма направленности двухщелевого облучателя рассчитывается по формуле [5]:

$$f_{\text{обл}}(\psi, \alpha) = \sqrt{\cos^2\left(\frac{kd_K}{2} \sin \psi\right) \sin^2(\alpha) + \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \psi\right)}{\cos \psi} \cos^2(\alpha)}. \quad (5.4)$$

Тогда, в основных плоскостях ДН облучателя определяется выражениями:

— в плоскости E

$$f_E(\psi) = \cos\left(\frac{kd_K}{2} \sin \psi\right); \quad (5.5)$$

где d_K — расстояние между щелями;

— в плоскости H

$$f_H(\psi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \psi\right)}{\cos \psi}. \quad (5.6)$$

Обычно для получения примерно одинаковой ширины ДН в обеих плоскостях выбирают $d_K \approx \frac{\lambda}{2}$. В этом случае диаграмма направленности облучателя удовлетворительно аппроксимируется выражением

$$f(\psi) = \cos^2 \psi. \quad (5.7)$$

Коэффициент направленного действия облучателя может быть рассчитан по формуле

$$D_{\text{обл}} = 2(n+1). \quad (5.8)$$

5.4.2. Методика расчета характеристик параболической антенны

Направленные свойства антенны определяются размерами зеркала и амплитудно-фазовым распределением поля по раскрыву антенны. Фазовое распределение поля на апертуре при выполнении требований к установке облучателя можно считать равномерным. Амплитудное распределение поля на раскрыве зеркала 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. 5.4). Осесимметричное распределение амплитудны поля на поверхности апертуры зеркала $A(r, \alpha)$ может быть аппроксимировано функцией вида:

$$A(r, \alpha) = 1 - (1 - \Delta) \cdot \left(\frac{r}{a_3} \right)^2, \quad (5.9)$$

где r, α — координаты точки в раскрыве параболического отражателя (см. рис. 5.2); Δ — относительная амплитуда напряженности электрического поля по краю раскрыва; $a_3 = \frac{d_3}{2}$ — радиус раскрыва зеркала.

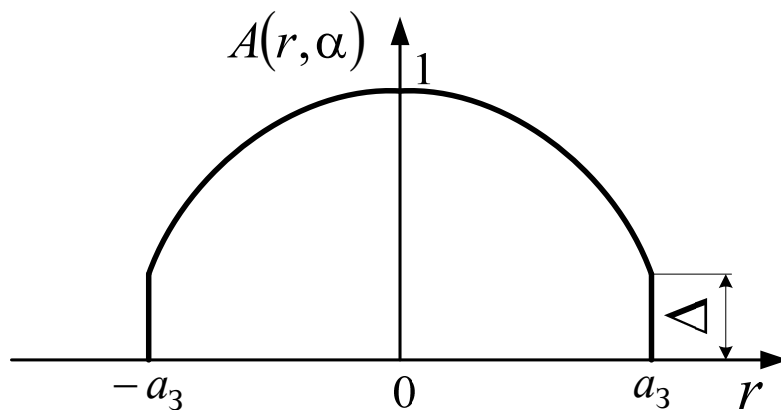


Рис. 5.4 — Нормированное распределение амплитуды поля в раскрыве зеркала

Для расчета амплитудной диаграммы направленности (ДН) параболической антенны используется система отсчета углов θ и φ , показанная для произвольной точки наблюдения M на рис. 5.2.

Часто перед расчетом ДН параболической антенны 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 $\varphi = 90^\circ$) и $2\theta_{0,5}^H$ (в плоскости H при $\varphi = 0^\circ$);
- уровень первого бокового лепестка в дБ по напряженности поля, определяемый величиной $\gamma_{\text{бок}}$

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

Для распределения $A(r, \alpha)$, определяемого по формуле (5.9), основные характеристики диаграммы направленности параболической антенны можно оценить по данным, приведенным в табл. 5.3

Таблица 5.3 — Численные параметры ДН

Δ	$2\theta_{0,5}^{\text{E,H}}, \text{ град}$	$\gamma_{\text{бок, дБ}}$
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 синфазном возбуждении апертуры антенны в виде параболоида вращения ее диаграмма направленности рассчитывается по следующему выражению

$$f(\theta, \varphi) = (1 + \cos\theta) \int_0^{2\pi} \int_0^{a_3} A(r, \alpha) \exp[jkr \sin\theta \cos(\varphi - \alpha)] r dr d\alpha \quad (5.10)$$

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

С учетом реальных диаграмм направленности облучателя в E - и H -плоскостях амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала определяется с помощью соотношения

$$A(r, \alpha) = \frac{f_{\text{обл}}(\psi(r), \alpha)}{\rho(\psi(r))} = \cos^2 \frac{\psi(r)}{2} f_{\text{обл}}(\psi(r), \alpha), \quad (5.11)$$

где $F_{\text{обл}}(\psi, \alpha)$ — нормированная ДН облучателя;

r — текущая координата раскрыва зеркала;

ψ — текущий угол раскрыва; $\psi(r) = 2 \arccos \frac{1 - (r/2f_3)^2}{1 + (r/2f_3)^2}$.

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

Для этого по данным, полученным при расчете ДН антенны, строятся графики нормированных функций диаграмм направленности по мощности

$F_E^{\text{норм}}(\theta) = \left[f^{\text{норм}}\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right) \right]^2$ и $F_H^{\text{норм}}(\theta) = \left[f^{\text{норм}}(\theta, 0) \right]^2$ в пределах главного лепестка (рис. 5.5).

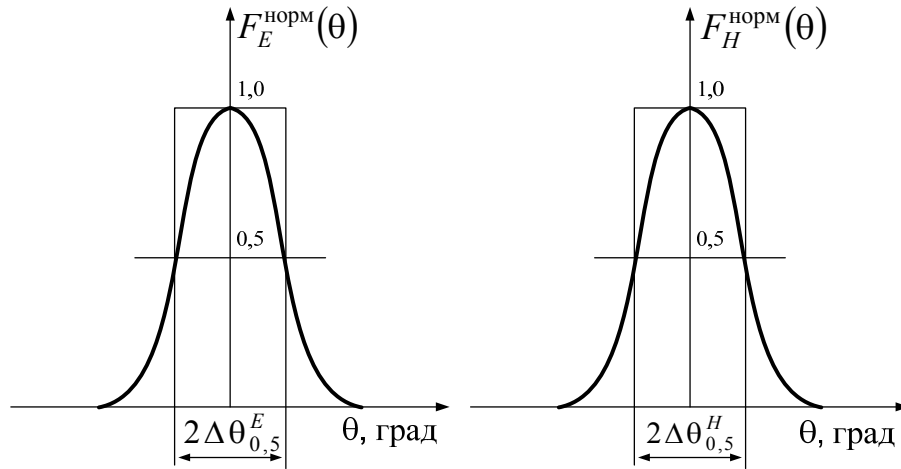


Рис. 5.5 — Определение ширины главного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности

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

$$D = \frac{41300}{2\Delta\theta_{0,5}^E 2\Delta\theta_{0,5}^H}. \quad (5.12)$$

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

$$\delta_{\text{доп}} \leq \pm \lambda/16. \quad (5.13)$$

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

$$\delta_{11} \leq \frac{\lambda}{4(1 - \cos \Psi_0)}. \quad (5.14)$$

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

$$\delta_{\perp} \leq f_3 \sin(\delta\theta_{\text{max}}), \quad (5.15)$$

где $\delta\theta_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4a_3} \left(4 \frac{f_3^2}{a_3^2} - 1 \right)$ — предельно допустимое отклонение максимума главного луча ДН параболической антенны от направления фокальной оси зеркала, вызванное смещением облучателя, при котором расширение главного лепестка еще незначительно.

5.5. Порядок выполнения работы

5.5.1. Теоретические исследования

а) Вычислить фокусное расстояние и апертурный угол раскрыва для заданных типов параболических зеркал по известному диаметру раскрыва и глубине зеркала, используя соотношения (5.1) и (5.3). Принять во внимание, что глубина зеркала $L = z_{\max}$ при $y_{\max} = a_3$.

б) Рассчитать ДН заданных типов параболических антенн на соответствующих частотах на основе выражений (5.4), (5.10) и (5.11). В прямоугольной системе координат построить нормированные ДН в E - и H -плоскостях.

в) Определить в E - и H -плоскостях ширину главного лепестка нормированных ДН по уровню 0,707 и максимальный уровень бокового излучения.

г) Вычислить КНД заданных типов параболических антенн, используя формулу (5.12).

д) Рассчитать технические допуски на отклонение формы отражающей поверхности зеркала и допустимую область установки облучателя на основе соотношений (5.13) — (5.15).

5.5.2. Порядок выполнения экспериментальных исследований

а) Установить на генераторе частоту f_1 . Настройка генератора Г4-109 осуществляется следующим образом:

- ручкой «Поддиапазоны» установить нужный диапазон частот;
- при помощи ручки «Частотомер» установить требуемую по заданию частоту СВЧ колебаний;
- повернуть ручку «Чувствительность» по часовой стрелке до упора;
- добиться заметного отклонения стрелки индикатора настройки, вращая вправо-влево ручку «Установка частоты» нужного поддиапазона;
- плавно поворачивая ручку «Установка частоты», добиться максимального отклонения стрелки индикатора настройки.

Внимание! Выполняя настройку генератора, нельзя допускать «зашкала» индикатора! Для этого необходимо ручкой «Чувствительность» подбирать подходящую чувствительность прибора.

б) Установить на опорно-поворотное устройство антенну А1.

в) Исследуемая и вспомогательная антенны поворачиваются вокруг оси s_1 (см. рис. 5.1) таким образом, чтобы узкие стенки питающих волноводов располагались параллельно горизонтальной плоскости. Данное положение антенн соответствует условию измерения ДН в E -плоскости (рис. 5.6, а).

г) Выполнить юстировку исследуемой и вспомогательной антенны. Для этого исследуемая и вспомогательная антенны ориентируются в направлении друг друга таким образом, чтобы направления главных максимумов их диаграмм направленности находились на линии, соединяющей осевые направления антенн (рис. 5.6, а).

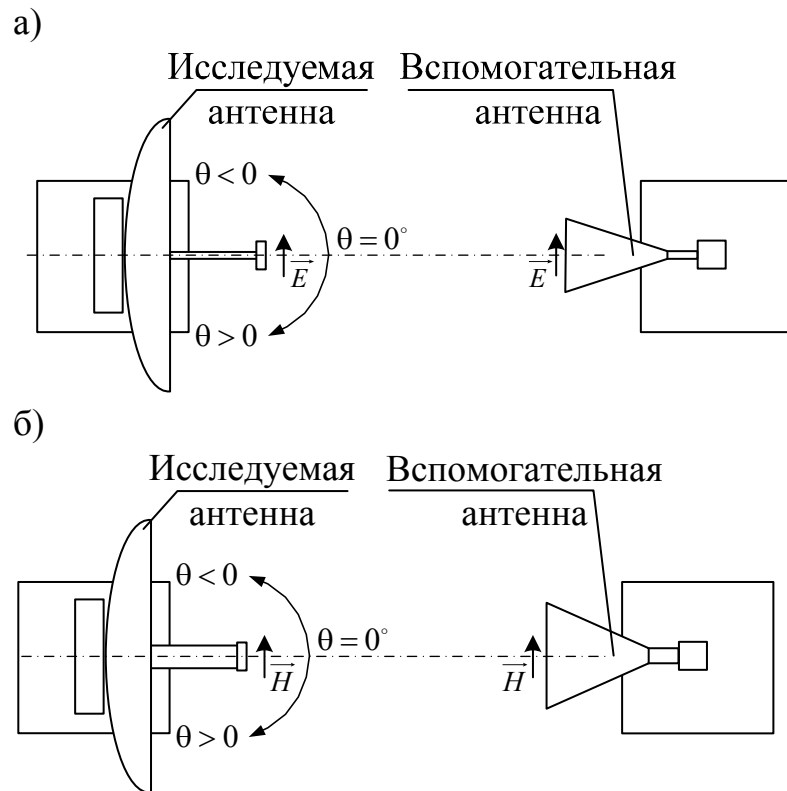


Рис. 5.6 — Измерение амплитудных диаграмм направленности параболической зеркальной антенны в плоскости E (а) и в плоскости H (б)

Предварительно направление $\theta = 0^\circ$ фиксируется по максимуму показаний селективного микровольтметра $\alpha(0^\circ)$. Затем положение максимума следует уточнить методом «двух засечек», выполнив следующие действия:

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, вправо (по часовой стрелке) до угла θ' , на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta') = \alpha(0^\circ)/2$;

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, влево (против часовой стрелки) до угла θ'' ($\theta'' < 0$), на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta'') = \alpha(\theta') = \alpha(0^\circ)/2$;

— определить отсчетный угол положения максимума ДН $\theta_{\max}$, как среднее арифметическое измеренных значений

$$\theta_{\max} = \frac{\theta' + \theta''}{2}.$$

В дальнейшем при построении ДН положение максимума следует принять за 0° для всех последующих измерений ДН данной антенны.

д) Снять калибровочную кривую измерительной установки в максимуме ДН зеркальной антенны: зависимость показаний микровольтметра от ослабления сигнала δ в децибелах — $\alpha_k(0^\circ, \delta)$. Ослабление нужно изменять в пределах от 0 до 20 дБ (3, 6, 10, 13, 16, 20, 25 дБ) используя встроенный аттенюатор генератора.

- е) Провести измерения ДН зеркальной антенны в E -плоскости:
- из положения, соответствующего максимуму ДН $\alpha_1(\theta_0)$, нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства по часовой стрелке, пока показания микровольтметра не составят $\alpha(\theta_1) = \alpha(\theta_0)/2$;
 - необходимо определить направление первого минимума в диаграмме направленности $\alpha(\theta_2)$;
 - на интервалах углов $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$ произвести измерение ДН антенны всего в 4...6 дополнительных точках;
 - повернуть антенну на угол $\theta > \theta_2$ и определить направление, соответствующее первому боковому максимуму $\alpha(\theta_3)$ и следующему минимуму ДН $\alpha(\theta_4)$;
 - на интервале углов $\theta \in (\theta_2, \theta_4)$ произвести измерение ДН в 4...6 дополнительных точках;
 - повернуть антенну в исходное положение, соответствующее $\alpha(\theta_0)$;
 - повторить аналогичный порядок измерений при вращении антенны против часовой стрелки.
- ж) Повернуть исследуемую и вспомогательную антенны вокруг оси s_1 (см. рис. 5.1) на 90° . Данное положение антенн соответствует условию измерения ДН в H -плоскости (рис. 5.6, б).
- з) Выполнить измерение ДН зеркальной антенны по п. е).
- и) Снять с опорно-поворотного устройства исследуемую антенну и на ее место установить эталонную антенну.
- к) Произвести юстировку эталонной и вспомогательной антенн, выполнив операции аналогично п. г).
- л) Снять показания микровольтметра $\alpha_3(\theta_0)$.
- м) Установить на генераторе частоту f_2 .
- н) Установить на опорно-поворотном устройстве антенну А2.
- о) Повторить операции по п. в), г), д), е), ж), з), и), к), л).

4.5.3. Обработка результатов измерений

а) Построить калибровочные кривые по данным, полученным при выполнении п. д) на частотах f_1 и f_2 : зависимости показаний селективного микровольтметра $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ от ослабления δ . Пример написания программы для построения калибровочной кривой приведен в Приложении Б.

б) Используя результаты измерений диаграмм направленности, выполненных для двух исследуемых антенн в E - H -плоскостях, пересчитать уровни отсчетов $\alpha(\theta)$ в децибелы, воспользовавшись построенными зависимостями $\alpha_K(0^\circ, \delta)$: каждому значению $\alpha(\theta)$, определенному в ходе измерений, на основании графика $\alpha_K(0^\circ, \delta)$ ставится в соответствие

ослабление δ с применением функции $\text{Kalibr}(\alpha(\theta))$ (см. Приложение Б).

Далее определяется зависимость

$$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{\text{Kalibr}(\alpha(\theta))/20},$$

которая представляет собой нормированную диаграмму направленности антенны по полю. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 5.4).

Таблица 5.4 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Угол ДН θ , град	0	2,6	...
α	4	3,7	...
$\text{Kalibr}(\alpha)$, дБ	0	-1,62	...
$f^{\text{норм}}(\theta) = 10^{\text{Kalibr}(\alpha)/20}$	1	0,83	...

в) Построить в декартовой системе координат два графика для зеркальной антенны А1, объединив на каждом из графиков теоретическую и экспериментально измеренную диаграммы направленности в E - и H -плоскостях, соответственно. Выполнить аналогичные построения для зеркальной антенны А2.

г) По экспериментальным диаграммам направленности определить для двух антенн $2\Delta\theta_{0,707}^E$ и $2\Delta\theta_{0,707}^H$, относительные уровни первых боковых лепестков.

д) Рассчитать коэффициенты усиления зеркальных антенн А1 и А2 относительным методом. В качестве эталонной антенны используется пирамидальный остроконечный рупор с геометрическими параметрами апертуры $a_p=0,135$ м, $b_p=0,09$ м, для которого на рис. 5.7 показана зависимость коэффициент усиления от частоты.

G_ρ , дБ

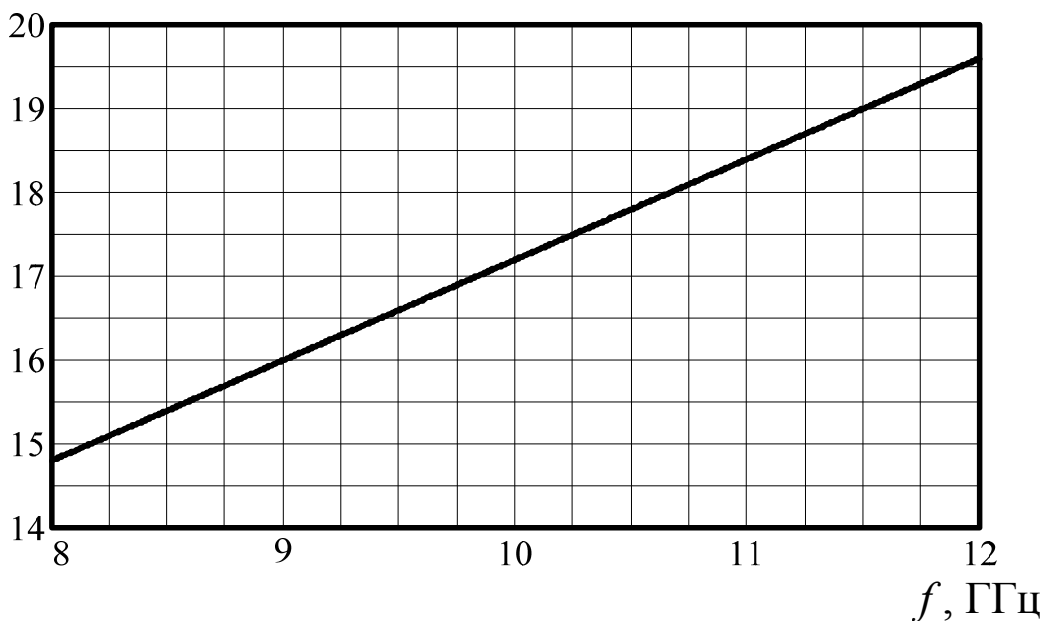


Рис. 5.7 — Зависимость коэффициента усиления эталонного рупора от частоты

Экспериментальный коэффициент усиления исследуемой антенны с учетом квадратичной характеристики детектора определяется по формуле

$$G = G_{\text{э}} + 10 \lg \frac{\alpha(\theta_0)}{\alpha_{\text{э}}(\theta_0)}, \text{ дБ}$$

где $G_{\text{э}}$ — коэффициент усиления эталонного рупора, выраженный в дБ;

$\alpha(\theta_0)$ — максимальный уровень измеренного сигнала исследуемой антенны;

$\alpha_{\text{э}}(\theta_0)$ — максимальный уровень измеренного сигнала эталонного рупора.

е) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

ж) Сделать выводы по работе.

4.6. Контрольные вопросы и задания

4.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Охарактеризуйте состав установки для измерения характеристик излучения параболической зеркальной антенны.

б) Охарактеризуйте, что входит в программу экспериментальных измерений характеристик зеркальных антенн?

в) Охарактеризуйте методику измерения диаграммы направленности зеркальных антенн.

г) Охарактеризуйте порядок калибровки при проведении измерений диаграммы направленности зеркальных антенн.

д) Охарактеризуйте особенности конструкции параболической зеркальной антенны.

е) Какой облучатель используется в конструкции исследуемых зеркальных антенн?

ж) Какие требования предъявляются к облучателям зеркальных антенн?

з) Охарактеризуйте основные характеристики поля излучения зеркальных антенн.

и) Охарактеризуйте, на что влияют погрешности при установке облучателя в параболической зеркальной антенне?

к) Определите для макетов исследуемых антенн положение E - и H -плоскости.

л) Определите для вспомогательной рупорной антенны положение E - и H -плоскости.

5.6.2. Задания для подготовки к защите лабораторной работы

а) Параболическая антенна с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 4,5$ м возбуждается полуволновым вибратором с дисковым рефлектором и работает на длине волны $\lambda = 0,2$ м. Определить оптимальное фокусное расстояние зеркала, угол его раскрыва и электрические параметры облучателя.

б) Пирамидальный рупор, возбуждаемый волной H_{10} , имеет квадратный раскрыв и используется в качестве первичного излучателя параболической антенны с осесимметричным отражателем. В какой из плоскостей (H или E) ширина главного луча ДН антенны на уровне половинной мощности больше и почему?

в) Антенна самолетного радиолокатора, работающего на длине волны $\lambda = 3$ см, выполнена в виде усеченного параболоида с размерами $a_3 \times b_3 = 1 \times 1,5$ м. Определить ширину главного луча ДН антенны на уровне половинной мощности в плоскостях H и E .

г) Определить размеры раскрыва отражателя параболической антенны в виде усеченного параболоида, при которых ее нормированная амплитудная диаграмма направленности будет иметь ширину главного луча ДН по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}^E = 7^\circ$ и $2\theta_{0,5}^H = 1^\circ$, если длина рабочей волны $\lambda = 3$ см.

д) Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным отражателем, ширина луча которой на уровне половинной мощности в H -плоскости $2\theta_{0,5}^H = 3^\circ$. Длина волны $\lambda = 3,2$ см, а угол раскрыва параболического отражателя $\Psi_0 = 49^\circ$.

е) Определить допуски на установку облучателя для параболического зеркала со следующими геометрическими параметрами: размер раскрыва $a_3 \times b_3 = 0,5 \times 1$ м, фокусное расстояние $f_3 = 0,5$ м. Рабочая частота 11 ГГц.

ж) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1,2$ м на частоте 9,8 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -18 дБ.

з) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1,5$ м на частоте 8,5 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -20 дБ.

и) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1$ м на частоте 10,5 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -22 дБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / СевНТУ; сост. В.Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — 20 с.
2. Хмель В.Ф. Теория и расчет антенн и устройств сверхвысоких частот. Сборник задач: Учеб. Пособие / Хмель В.Ф. и др. — Одесса: Латстар, 2001. — 252 с.
3. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
4. Марков Г.Т. Антенны/ Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. — М.: Энергия, 1975. — 523 с.
5. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко; Под ред. Г.З. Айзенберга. — М.: Радио и связь, 1985. — 536 с.

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

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

Факультет радиоэлектроники
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ»
по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь

20__ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРИМЕР ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАЛИБРОВОЧНОЙ КРИВОЙ

После снятия калибровочной кривой детектора (см. таблицу 1.2) необходимо построить ее в виде непрерывной функции. Ниже приведен пример составления программы в среде *MathCad*.

Ввести исходные данные в векторы ослабления *att* и показаний измерительного прибора α , например:

$$\alpha := \begin{pmatrix} 0.032 \\ 0.07 \\ 0.13 \\ 0.25 \\ 0.52 \\ 0.98 \\ 2.1 \\ 4 \end{pmatrix} \quad att := \begin{pmatrix} -21 \\ -18 \\ -15 \\ -12 \\ -9 \\ -6 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Сформировать непрерывную калибровочную функцию «Kalibr(α_{ish})» путем интерполяции дискретных данных:

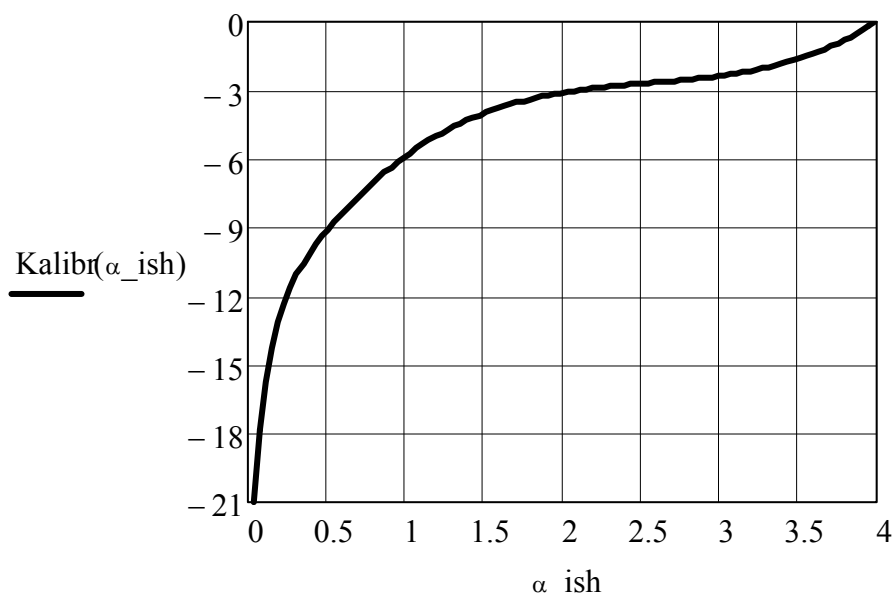
$$SPL := cspline(\alpha, att)$$

$$Kalibr(\alpha_{ish}) := interp(SPL, \alpha, att, \alpha_{ish})$$

Задать пределы изменения α_{ish} в соответствии с данными

$$\alpha_{ish} := \min(\alpha), \min(\alpha) + \frac{\max(\alpha)}{100} .. \max(\alpha)$$

Построить калибровочную кривую



С помощью функции $Kalibr(\alpha_ish)$, описывающей аппроксимированную калибровочную кривую, можно определять значения по известным отсчетам, например при расчете КЗД:

$$\alpha(\theta_{\max}) = 4 ; \alpha(\theta_{\text{бок max}}) = 2,5 ;$$

$$KZD := 10 \frac{Kalibr(4) - Kalibr(2,5)}{20} ;$$

$$KZD = 1,37 .$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Пример выполнения теоретических исследований характеристик цилиндрической спиральной антенны

Исходные данные:

— номер антенны — ЦСА *;

— геометрические параметры: $a=0,02$ м; $d = 0,04$ м; $\alpha = 17,6^\circ$; $n = 7$;

— диапазон частот $f = f_0 \pm \frac{\Delta f}{2} = 2400 \pm 200$ МГц.

Предварительно определите

$$L = \sqrt{(2\pi \cdot 0,02)^2 + 0,031^2} = 0,129 \text{ м.}$$

Результаты расчетов по (3.13), (3.14) представьте в виде табл. А.1.

Таблица В.1. — Результаты расчетов

	$f_0 - \Delta f = 2200$ МГц	$f_0 = 2400$ МГц	$f_0 + \Delta f = 2600$ МГц
D , дБ	14,6	15,7	16,8
$R_{\text{вх}}$, Ом	135	148	160

Подготовьте программу для расчета ДН антенны.

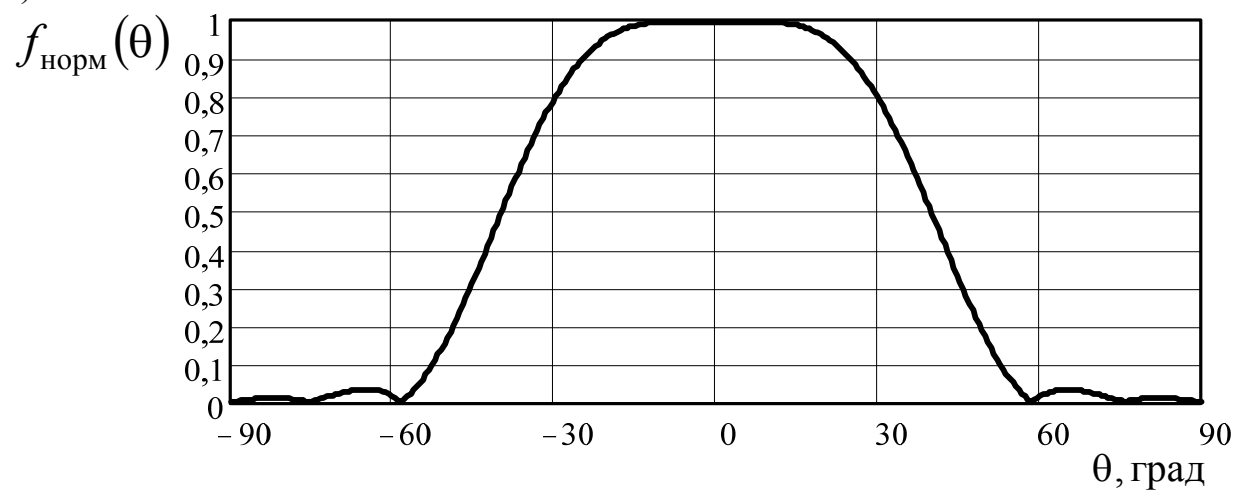
Постройте ДН в нормированном виде (см. рис. А.1).

Определите ширину ДН и уровень боковых лепестков (УБЛ), результаты представить в таблице А.2. Ширина главного лепестка нормированной ДН $2\Delta\theta$ определяется по уровню 0,707.

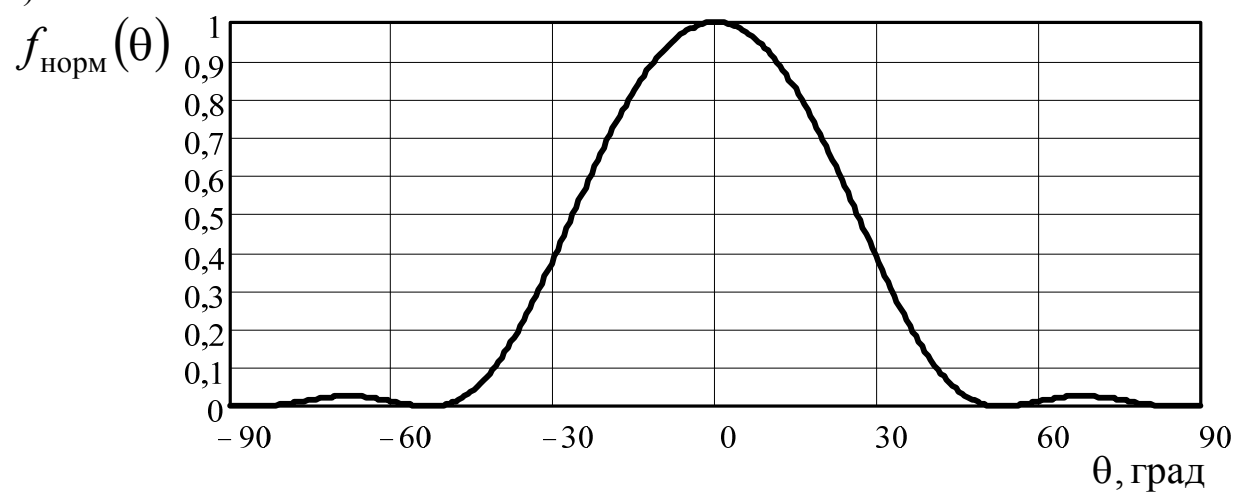
Таблица В.2 — Результаты анализа рассчитанных ДН

	$f_0 - \frac{\Delta f}{2} = 2200$ МГц	$f_0 = 2400$ МГц	$f_0 + \frac{\Delta f}{2} = 2600$ МГц
$2\Delta\theta$, град	67	39	25,6
УБЛ	0,033	0,025	0,045

а)



б)



в)

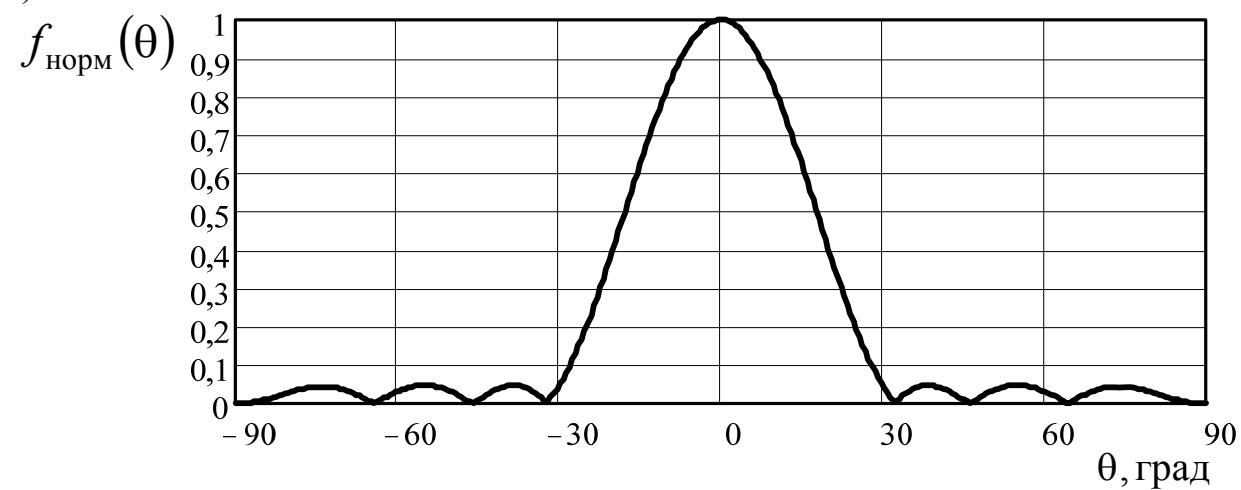


Рис. В.1 — Результаты расчетов диаграмм направленности исследуемой ЦСА на частотах $f = 2200$ МГц (а); $f = 2400$ МГц (б); $f = 2600$ МГц (в)