



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Радиоэлектроника»

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовой работе  
по дисциплине

## «Устройства СВЧ и антенны»

Авторы

Звездина М.Ю.

Шокова Ю. А.

Ростов-на-Дону, 2016



## Аннотация

Методические указания предназначены для бакалавров, обучающихся по направлению 11.03.01 Радиотехника, выполняющих курсовую работу по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны».

## Авторы



д.ф.-м.н., доцент,  
зав. кафедрой  
«Радиоэлектроника»

Звездаина Марина  
Юрьевна



к.ф.-м.н.,  
доцент кафедры  
«Радиоэлектроника»

Шокова Юлия  
Александровна



## Оглавление

<b>1 Общие сведения по оформлению работы.....</b>	<b>5</b>
1.1 Задание исходных данных .....	5
1.2 Исходные данные для моделирования .....	6
1.3 Требования к оформлению курсовой работы .....	10
1.4 Порядок выполнения курсовой работы .....	11
<b>2 Основные сведения для расчета конструкции антенны</b>	<b>12</b>
2.1 Расчет характеристик излучения цилиндрической спиральной антенны .....	12
2.2 Расчет характеристики направленности диэлектрической стержневой антенны.....	15
2.3 Расчет характеристики направленности синфазной горизонтальной диапазонной антенны с апериодическим рефлектором.....	19
2.4 Расчет характеристики направленности широкополосного симметричного вибратора (диполя Надененко) .....	26
2.5 Расчет характеристики направленности логопериодической вибраторной антенны .....	34
2.6 Расчет характеристики направленности волноводно-щелевой антенной решетки нерезонансного типа.....	42
2.7 Расчет зеркальной антенны с круглой апертурой и рупорным облучателем .....	48
2.8 Расчет характеристики направленности цилиндропараболической зеркальной антенны с линейным вибраторным облучателем .....	53
2.9 Расчет характеристики направленности линзовой антенны с замедляющей линзой и рупорным облучателем .....	59
2.10 Расчет характеристики направленности линзовой антенны с ускоряющей цилиндрической линзой и облучателем в виде линейки вибраторов .....	69
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>76</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ВЕДОМОСТИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....</b>	<b>78</b>



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА .....79**

**ПРИЛОЖЕНИЕ В ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАНИЯ .....80**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г Описание программы *LogAnt*.....81**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д Размеры стандартных прямоугольных волноводов .....85**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Сводка функций излучения для круглой апертуры .....86**

**ПРИЛОЖЕНИЕ И Сводка функций излучения для прямоугольной апертуры .....87**

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ

### 1.1 Задание исходных данных

Целью выполнения курсовой работы является закрепление и углубление значений по курсу дисциплины «Устройства СВЧ и антенны», а также их применение для решения инженерных задач, обоснование выбора принятых решений.

Темы курсовых работы, выбираемые по последней цифре зачетки, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Темы курсовых работ

Последняя цифра номера зачетки	Тема курсовой работы
0	Расчет характеристик излучения цилиндрической спиральной антенны
1	Расчет характеристики направленности диэлектрической стержневой антенны
2	Расчет характеристики направленности синфазной горизонтальной диапазонной антенны с апериодическим рефлектором
3	Расчет характеристики направленности широкополосного симметричного вибратора (диполя Надененко)
4	Расчет характеристики направленности логопериодической вибраторной антенны
5	Расчет характеристики направленности волноводно-целевой антенной решетки нерезонансного типа
6	Расчет зеркальной антенны с круглой апертурой и рупорным облучателем
7	Расчет характеристики направленности цилиндрикопараболической зеркальной антенны с линейным вибраторным облучателем
8	Расчет характеристики направленности линзовой антенны с замедляющей линзой и рупорным облучателем
9	Расчет характеристики направленности линзовой антенны с ускоряющей цилиндрической линзой и облучателем в виде линейки вибраторов

## 1.2 Исходные данные для моделирования

### 1.2.1 Данные диэлектрической стержневой и спиральной антенн

Пред-последняя цифра в зачетке	Диапазон рабочих частот, МГц		Излучаемая мощность $P_{\Sigma}$ , кВт	Ширина ДН $2\theta_{0,5}$ , град		$\epsilon$
	$f_{\min}$	$f_{\max}$		мин.	макс.	
0	550	950	0,48	20	22	2,1
1	350	650	0,80	40	42	3,2
2	740	1260	0,60	18	20	2,4
3	300	450	0,70	45	50	3,0
4	450	750	0,52	23	25	2,2
5	400	700	0,75	30	35	2,8
6	800	1400	0,42	12	14	2,6
7	900	1440	0,45	30	32	2,8
8	350	500	0,90	40	45	3,1
9	870	1500	0,20	15	20	2,3

### 1.2.2 Данные для синфазной горизонтальной антенны

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочая длина волны $\lambda$ , м	Излучаемая мощность $P_{\Sigma}$ , кВт	Ширина ДН, град	Фидер
0	11	1,2	15	4-х проводный
1	16	1,5	20	4-х проводный
2	20	1,0	18	2-х проводный
3	25	0,6	25	2-х проводный
4	10	1,4	18	2-х проводный
5	14	1,3	14	4-х проводный
6	18	1,2	14	4-х проводный
7	22	0,6	16	4-х проводный
8	34	1,0	22	2-х проводный
9	28	1,4	24	2-х проводный

## Устройства СВЧ и антенны

**1.2.3 Данные для диполя Надененко**

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочая длина волны, м		Излучаемая мощность $P_{\Sigma}$ , кВт	Протяженность радиолинии, км	Фидер
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$			
0	11	19	0,25	850	2-х проводный
1	12	24	0,40	900	2-х проводный
2	15	31	0,45	950	2-х проводный
3	25	48	0,55	1000	4-х проводный
4	19	40	0,50	800	2-х проводный
5	31	52	0,60	1000	2-х проводный
6	11	19	0,25	850	4-х проводный
7	15	31	0,45	950	4-х проводный
8	19	40	0,50	800	4-х проводный
9	31	52	0,60	1000	4-х проводный

**1.2.4 Данные логопериодической вибраторной антенны**

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочий диапазон частот, МГц		Коэффициент усиления, дБ
	$f_{\min}$	$f_{\max}$	
0	14	30	6
1	80	2000	6,5
2	80	200	10
3	220	500	9,5
4	360	520	12
5	420	440	9
6	470	622	12
7	470	790	8,5
8	870	960	12
9	1700	2500	11

## Устройства СВЧ и антенны

**1.2.5 Данные для волноводно-щелевой антенны**

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочая длина волны $\lambda$ , см	Излучаемая мощность $P_{\Sigma}$ , кВт	Ширина ДН, град		Коэффициент направленного действия
			$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_{0,5}$	
0	2,6	0,8	1,6	2,0	-
1	3,6	2,0	-	-	2100
2	3,2	1,5	4,5	6,0	-
3	4,8	4,0	-	-	180
4	2,8	1,0	2,5	2,5	-
5	3,0	1,2	3,0	3,0	-
6	4,0	3,5	-	-	2000
7	5,2	4,2	-	-	160
8	6,2	3,4	-	-	150
9	7,8	2,8	-	-	130

**1.2.6 Данные для параболической зеркальной антенны**

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочая длина волны $\lambda$ , см	Излучаемая мощность $P_{\Sigma}$ , кВт	Ширина ДН, град	Коэффициент усиления $G$
0	2,8	1,0	5	-
1	9,0	2,6	-	1200
2	7,4	0,8	4	-
3	6,0	2,2	-	1500
4	8,0	2,4	-	1400
5	4,0	2,0	-	1700
6	3,2	1,8	-	1800
7	5,2	0,6	6	-
8	4,8	0,4	4	-
9	3,0	1,4	5	-



## Устройства СВЧ и антенны

**1.2.7 Данные для цилиндропараболической антенны**

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочая длина волны $\lambda$ , см	Излучаемая мощность $P_{\Sigma}$ , кВт	Ширина ДН в главных плоскостях, град:	
			$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_{0,5}$
0	4,2	0,2	10	3
1	6,8	0,4	7	1
2	5,0	1,8	1	6
3	3,1	1,2	12	4
4	5,4	0,6	8	2
5	3,5	2,0	11	2,5
6	4,8	2,5	8	1,5
7	6,2	2,8	1,5	10
8	7,8	3,2	2	12
9	8,4	2,6	3,5	14

**1.2.8 Данные для линзовых антенн**

Пред-последняя цифра в зачетке	Рабочая длина волны $\lambda$ , см	Ширина ДН, град (замедляющая)		Ширина ДН, град (ускоряющая)	
		$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_{0,5}$	$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_{0,5}$
0	2,6	15	20	3	8
1	4,0	10	14	4	10
2	3,2	12	16	2,5	12
3	4,8	14	18	5	8
4	2,0	20	22	6	12
5	2,4	16	18	3	9
6	3,4	10	18	4	8
7	3,6	18	22	6	14
8	4,5	10	18	7	9
9	5,0	16	20	3,5	10

### 1.3 Требования к оформлению курсовой работы

В соответствии с [1] пояснительная записка курсовой работы должна содержать следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- бланк задания на курсовую работу;
- содержание;
- введение;
- разделы основной части;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложение (текст программы).

Ведомость курсовой работы, образец заполнения которой приведен в ПРИЛОЖЕНИИ А, вкладывается в работу, но нешивается.

Оформление элементов курсовой работы (границы текста, абзацные отступы, оформление рисунков и таблиц, формул, списка литературы) осуществляется с учетом [1].

Образцы заполнения титульного листа и задания на курсовую работу, оформленные с учетом [1], приведены в ПРИЛОЖЕНИЯХ Б и В соответственно. Жирный шрифтом выделены коды, соответствующие двум последним цифрам номера зачетки. Текст пояснительной записки должен иметь объем до 30 страниц формата А4 и обязательно содержать ссылки на используемые информационные источники. Заключение должно содержать краткие выводы по работе, оценку результатов моделирования. В конце заключения указывается, чем завершается курсовая работа, в нашем случае – разработкой программного продукта для расчета конструктивных параметров антенны и проведения моделирования ее характеристики направленности. Список использованных источников является обязательным и оформляется в соответствии с требованиями [2]. Литература используемые и информационные источники на момент написания работы должны быть актуальны.

Сдаваемая на проверку курсовая работа должна также включать CD-диск с электронным вариантом пояснительной записки, а также презентацией и докладом на защиту.

## 1.4 Порядок выполнения курсовой работы

Процесс выполнения курсовой работы осуществляется в несколько этапов:

- подбор и изучение литературы;
- обоснование актуальности использования типа антенны, указанной в задании, с указанием основных областей применения;
- формулировка основных соотношений для расчета конструкции антенны и моделирования ее характеристики направленности;
- разработка программы для моделирования с оценкой достоверности получаемых результатов на примере известных конструкций;
- оформление курсовой работы;
- защита курсовой работы.

На основании проведенного анализа актуальности использования указанного в задании типа антенны, формируется текст введения, где перечисляются преимущества и недостатки исследуемого типа антенны, а также область их применения.

Основная часть пояснительной записки включает в себя следующие разделы:

### 1. Расчет основных конструктивных параметров антенны.

Данный раздел включает рисунки, поясняющие геометрию конструкции, а также основные соотношения для расчета конструктивных параметров антенны, используемых далее при вычислении диаграммы направленности.

### 2. Основные соотношения для моделирования характеристики направленности антенны.

Приводятся соотношения для вычисления диаграммы направленности антенны (либо объемной, либо главных сечений).

### 3. Исследование диапазонных свойств антенны.

Раздел в обязательном порядке должен включать описание используемого программного продукта, подтверждение достоверности получаемых с его использованием результатов путем сравнения с известными частными случаями, приведенными в информационных источниках, а также результаты моделирования характеристики направленности в частотном диапазоне (если это указано в задании на курсовую работу).

## 2 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ АНТЕННЫ

### 2.1 Расчет характеристик излучения цилиндрической спиральной антенны

#### 2.1.1 Области применения спиральных антенн

Спиральная антенна — диапазонная антенна бегущей волны, основным элементом которой является проводник в форме винтовой линии или спирали [3-5]. Характерной особенностью спиральных антенн является их высокое входное сопротивление, позволяющее в ряде случаев без использования дополнительных согласующих трансформаторов привести его к 50 Ом для передачи по обычному коаксиальному кабелю. Среди всех типов направленных антенн имеют самый большой показатель по соотношению усиление/размеры, конструктивно нечувствительны к погрешностям изготовления, имеют широкую полосу более 10% и круговую поляризацию. Рабочая ширина частотного диапазона определяется конструкцией спиральной антенны. Так, цилиндрическая спиральная антенна обеспечивает ширину частотного диапазона, не превышающую 50 %. Коническая спираль обеспечивает диапазон в два раза шире, чем цилиндрическая, а плоские спиральные антенны обладают двадцатикратным перекрытием по рабочему диапазону.

Спиральные антенны используются на УКВ в режиме бегущих волн с осевым излучением и вращающейся поляризацией.

#### 2.1.2 Конструкция антенны

Цилиндрическая спиральная антенна, как показано на рисунке 2.1, состоит из проволочной спирали и металлического диска. Причем внутренний проводник питающего коаксиального фидера присоединяется к спирали, а наружная оболочка к диску.

На рисунке 2.1 использованы следующие обозначения:

$L$  – длина спирали;

$R$  – радиус спирали;

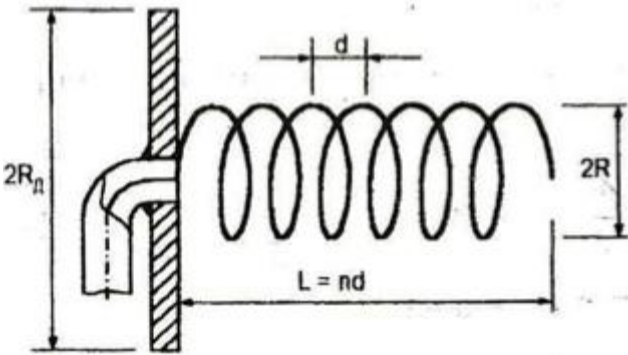
$d$  – шаг спирали (расстояние между витками);

$l_1$  – длина одного витка спирали;

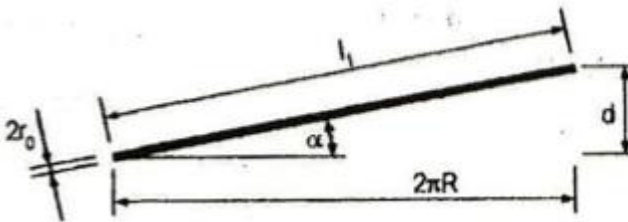
$\alpha$  – угол подъема спирали (шаговый угол);

$n$  – количество витков.

## Устройства СВЧ и антенны



а



б

Рисунок 2.1 – Геометрия цилиндрической спиральной антенны:  
 а – общая геометрия конструкции; б – развертка витка спирали

### 2.1.3 Методика расчета параметров антенны

Расчет размеров конструкции антенны осуществляется в следующем порядке.

Сначала определяются крайние длины волны рабочего диапазона:

$$\lambda_{\min} = c / f_{\max}, \quad \lambda_{\max} = c / f_{\min}, \quad (2.1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света.

Длина витка спирали принимается равной средней длине волны антенны:

$$\ell_1 \approx \lambda_{cp} = 0.5(\lambda_{\min} + \lambda_{\max}). \quad (2.2)$$

Длина антенны  $L$  рассчитывается на средней длине волны  $\lambda_{cp}$ . Формула для расчета зависит от исходных данных. Так,

- при заданном коэффициенте направленного действия  $D$

## Устройства СВЧ и антенны

$$L = D\lambda_{cp} / 15, \quad (2.3a)$$

- при заданной ширине главного лепестка диаграммы направленности  $2\theta_{0,5}$

$$L = \left( \frac{61^\circ}{2\theta_{0,5}} \right)^2 \lambda_{cp}. \quad (2.36)$$

Шаг спирали находится из условия, обеспечивающего максимальное значение коэффициента направленного действия:

$$d = \frac{0.22\lambda}{\left( 1 + \frac{\lambda}{2L} \right)}. \quad (2.4)$$

Число витков рассчитывается с использованием формулы:

$$n = L / d. \quad (2.5)$$

При этом число витков должно быть целым и больше 3. Если число витков не более 11, то можно ограничиться одной спиралью. Если больше, то следует использовать плоскую решетку из спиралей при их числе, равном четырем.

Радиус спирали определяется из выражения [3-5]:

$$R = \frac{\sqrt{l_1^2 - d^2}}{2\pi}. \quad (2.6)$$

Диаметр диска экрана выбирается равным

$$2R_D = (0,9..1,1)\lambda_{\max}. \quad (2.7)$$

Диаметр провода спирали выбирается из соотношения [3-5]:

$$2r_0 = (0,03..0,05)\lambda_{cp}. \quad (2.8)$$

Входное сопротивление антенны определяется для средней и крайних длин волн с использованием формулы:

$$R_{\text{вх}} = 140\ell_1 / \lambda_k, \quad (2.9)$$

где  $k = \min, \max, cp$ .

### 2.1.3 Соотношения для вычисления диаграммы направленности

Диаграмма направленности одиночной спирали рассчитывается по приближенной формуле [3-5]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$F(\theta) = \cos(\theta) \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda_k} (\xi - \cos(\theta))\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda_k} (\xi - \cos(\theta))\right)}, \quad (2.10)$$

где  $\xi = 1 + \frac{\lambda_k}{2L}$ .

Для однородной решетки из  $N$  спиральных излучателей с синфазным питанием выражение для диаграммы направленности имеет вид [3-5]:

$$F_{AP}(\theta) = F(\theta) \frac{\sin\left(\frac{N\pi d_p}{\lambda_k} \sin(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi d_p}{\lambda_k} \sin(\theta)\right)}, \quad (2.11)$$

где  $d_p$  - расстояние между элементами в раскрыва антенной решетки.

## 2.2 Расчет характеристики направленности диэлектрической стержневой антенны

### 2.2.1 Области применения стержневых антенн

Диэлектрические стержневые антенны относятся к антеннам бегущей волны или антеннам поверхностных волн [3, 5, 6] и находят применение в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн, т.е. на частотах 2 ГГц и выше. Один стержень обеспечивает формирование диаграммы направленности с шириной главного лепестка более 25 градусов. Для получения более узких диаграмм направленности стержневые антенны объединяются в антенные решетки.

Стержневые антенны реализуют режим осевого излучения и выполняются на основе замедляющих систем, способных поддерживать поверхностные волны. При этом направляющим элементом поверхностных волн является диэлектрический стержень, а ее возбудителем – либо электрический вибратор,

## Устройства СВЧ и антенны

либо металлический волновод. Для улучшения согласования антенны со свободным пространством диэлектрический стержень выполняется в виде усеченного конуса. При этом существенно снижается уровень боковых лепестков, составляющий для несужающегося стержня порядка 30..40 % от уровня главного лепестка диаграммы направленности.

Одним из преимуществ диэлектрических стержневых антенн является простота конструкции и малые размеры поперечного сечения излучающей системы. Это позволяет размещать невыступающие антенны бегущей волны на гладкой поверхности летательных объектов. В качестве основного недостатка можно отметить малую мощность излучения и относительно невысокий коэффициент полезного действия, обусловленный потерями в диэлектрике.

Стержневые диэлектрические антенны относятся к узкополосным, поскольку рабочая полоса частот измеряется обычно единицами процентов, значительно реже десятками процентов.

### 2.2.2 Конструкция антенны

Конструкция стержневой диэлектрической антенны показана на рисунке 2.2.

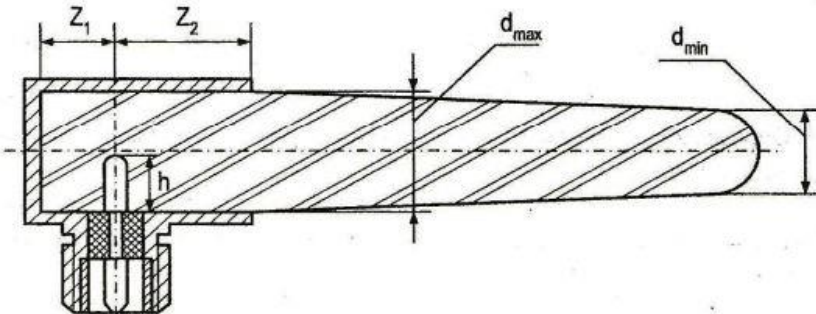


Рисунок 2.2. – Конструкция конусной стержневой диэлектрической антенны

Конструкция антенны включает две основные части:  
 - возбуждающее устройство в виде коаксиально-волноводного перехода на круглом волноводе с волной основного типа  $H_{11}$ ;



## Устройства СВЧ и антенны

- круглый диэлектрический стержень, представляющий собой отрезок регулярного (цилиндрического) или нерегулярного (конического) диэлектрического волновода.

### 2.2.3 Методика расчета параметров антенны

На первом этапе осуществляется выбор параметров диэлектрического материала, из которого изготавливается стержень. Традиционно для изготовления данных антенн применяются высокочастотные диэлектрики, обладающие малыми потерями. К ним, в частности, можно отнести материалы типа полистирол, люцит, фторопласт, у которых величина относительной диэлектрической проницаемости составляет порядка  $\varepsilon \approx 2,2 \dots 2,6$ , а тангенс угла диэлектрических потерь не превышает  $\operatorname{tg} \delta' = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ .

После выбора параметров материала рассчитываются максимальный  $d_{\max}$  и минимальный  $d_{\min}$  диаметры стержня [3, 5, 6]:

$$d_{\max} \approx \lambda_{cp} / \sqrt{\pi(\varepsilon - 1)}, \quad (2.12a)$$

$$d_{\min} \approx \lambda_{cp} / \sqrt{2.5\pi(\varepsilon - 1)}. \quad (2.12b)$$

Формулы (2.12) получены с учетом обеспечения переноса основной части мощности внутри диэлектрического стержня.

Длина стержня, обеспечивающего получение максимального значения коэффициента направленного действия, определяется выражением:

$$L \approx \frac{\lambda_{cp}}{2(\varepsilon - 1)}. \quad (2.13a)$$

Если в качестве исходных данных задана ширина главного лепестка диаграммы направленности  $2\theta_{0,5}$ , то длина стержня может быть найдена с использованием соотношения:

$$L \approx \left( \frac{60^\circ}{2\theta_{0,5}} \right) \lambda_{cp}. \quad (2.13b)$$

Для найденных геометрических размеров стержня коэффициент замедления  $\xi$  составляет примерно 1,2..1,4 и вычисляется по формуле:

## Устройства СВЧ и антенны

$$\xi \cong 1 + \frac{\lambda_{cp}}{2L}. \quad (2.14)$$

Зависимость коэффициента замедления  $\xi$  в диэлектрической антенне от ее волновых размеров показана на рисунке 2.3 из [3].

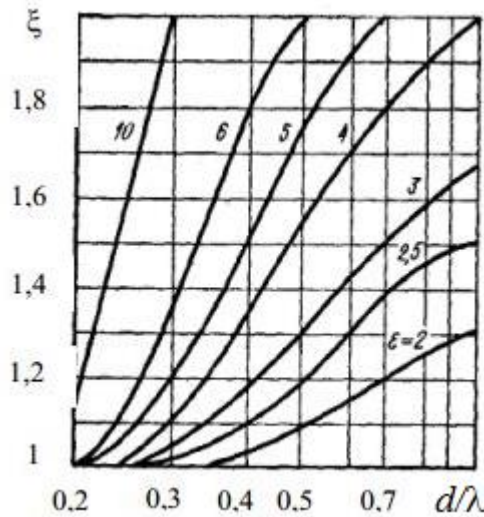


Рисунок 2.3. – Зависимость коэффициента замедления  $\xi$  от волновых размеров диэлектрического стержня

### 2.2.4 Соотношения для вычисления характеристик направленности

Известны несколько способов расчета диаграмма направленности, в которых механизм излучения антенны представляется либо как излучение эквивалентными поверхностными токами на стержне, либо как излучение токов смещения (поляризации) в объеме стержня. Поскольку расчет излучения объемных токов смещения позволяет получить наиболее точные результаты для средних по длине стержней, когда  $L \leq 6\lambda$ , широко применяемых на практике применим для вычисления характеристики направленности данный метод. В соответствии с ним сечения объемной диаграммы направленности в плоскостях  $E$  ( $\varphi = 0$ ) и  $H$  ( $\varphi = \pi/2$ ) определяются формулами:

## Устройства СВЧ и антенны

$$F_{\theta}(\theta) \cong J_0(k a \sin \theta) \cos \theta \left| \frac{\sin \psi}{\psi} \right|, \quad (2.15a)$$

$$F_{\varphi}(\theta) \cong J_0(k a \sin \theta) \left| \frac{\sin \psi}{\psi} \right|, \quad (2.15b)$$

где  $J_0(k a \sin \theta)$  - функция Бесселя нулевого порядка;

$$\psi = 0.5 k L (\cos \theta - \xi);$$

угол  $\theta$  отсчитывается от оси антенны;

$L$  - длина диэлектрического стержня вне волноводной секции;

$a = 0.25(d_{\max} + d_{\min})$  - средний радиус эквивалентной цилиндрической антенны.

Формулы (2.15) не учитывают излучение от стыка диэлектрического стержня с волноводом и отражения от конца диэлектрического стержня, определяющий высокий уровень боковых лепестков, а также затухание в нем, вызванное излучением и тепловыми потерями. Вследствие этого совпадение теоретических и экспериментальных ДН возможно только в области главного лепестка, Учет потерь в диэлектрике приводит к исчезновению нулей в ДН.

Величина коэффициента направленного действия рассчитывается по формуле:

$$D_0 \approx (7 \dots 8) \frac{L}{\lambda_{cp}}. \quad (2.16)$$

## 2.3 Расчет характеристики направленности синфазной горизонтальной диапазонной антенны с аперийодическим рефлектором

### 2.3.1 Области применения

Синфазные горизонтальные диапазонные антенны (СГД) являются основным типом передающих антенн, применяемых в КВ диапазоне для радиовещания на трассах различной протяженности. Кроме того, антенны данного типа применяются также для радиосвязи и других целей [5, 7].

## Устройства СВЧ и антенны

Основным преимуществом синфазных диапазонных антенн перед другими типами антенн является высокий коэффициент полезного действия, возможность получения высокого коэффициента усиления, а также управление диаграммой направленности (ДН) как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

В общем случае конструкция СГД представлена на рисунке 2.4.

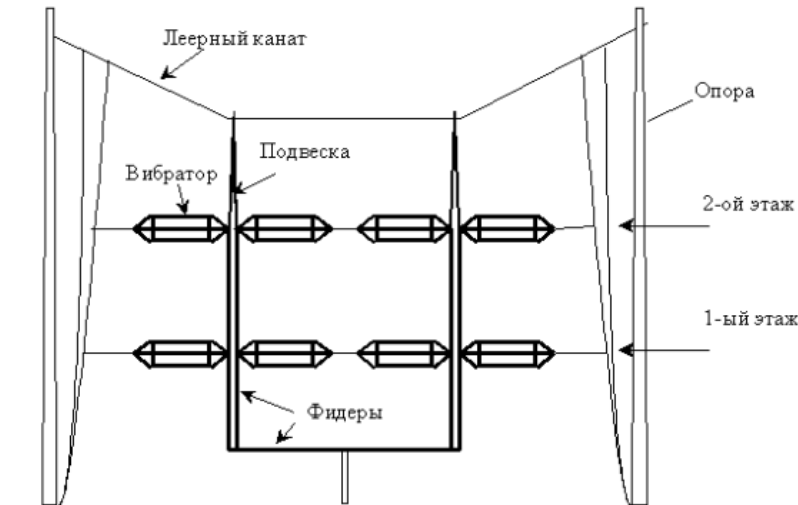


Рисунок 2.4. – Конструкция синфазной горизонтальной антенны

Наличие в этих антеннах рефлектора (активного диапазонного РАД, пассивного настроенного – РН или аperiodического – РА) позволяет получить одностороннюю направленность излучения [4, 5, 7]. Аperiodический рефлектор представляет собой сетку горизонтальных проводов, густота которой выбирается такой, чтобы обеспечить необходимое ослабление излучения в направлении, противоположном главному. Пассивный настраиваемый рефлектор представляет собой полотно, идентичное полотну антенны, возбуждаемое за счет пространственной электромагнитной связи между полотнами антенны и рефлектора. Необходимые амплитуда и фаза токов, наводимых в вибраторах рефлектора, обеспечиваются подключением соответствующего реактивного сопротивления на вход фидера рефлектора.

В общем случае конструкция антенн

## Устройства СВЧ и антенны

представляет собой полотно из  $m$  этажей вибраторов по  $n$  полуволновых вибраторов в каждом этаже. Вибраторы выполняются с пониженным волновым сопротивлением 280..470 Ом. Резонансная длина вибратора составляет  $2\ell \approx 0,82\lambda_0$ .

Синфазная горизонтальная диапазонная антенна с настроенным пассивным рефлектором обозначается СГД  $m/n$  РН. Полотно настроенного рефлектора является точной копией полотна антенны. Расстояние между вибраторами антенны и рефлектора выбирают равными 0,22..0,25  $\lambda_0$ . Антенны с настроенным рефлектором требуют перестройки рефлектора при смене длины волны. Синфазная горизонтальная диапазонная антенна с аperiodическим рефлектором обозначается СГД  $m/n$  РА. Аperiodический рефлектор выполняется в виде плоского экрана из проводов диаметром 4 мм, расположенных параллельно оси вибраторов. Размеры рефлектора превышают размеры полотна антенны. Расстояние между проводами рефлектора выбирают в пределах 0,035..0,07  $\lambda_0$ . Антенны с настроенным рефлектором требуют перестройки рефлектора при смене длины волны.

Областями применения являются:

- магистральные линии радиосвязи (антенны СГД1/2РА, СГД1/2РН, СГД1/4РА, СГД2/4РА, СГД2/4РН, СГД4/4РА, СГД4/4РН);
- внутренние линии радиосвязи (антенна СГД1/2РА);
- радиовещание.

### 2.3.2 Конструкция антенны

Синфазная горизонтальная диапазонная антенна состоит из полотна собственно антенны и рефлектора, распределительных и питающего фидеров. Полотно антенны, как показано на рисунке 2.5, состоит из нескольких рядов горизонтальных синфазно возбужденных вибраторов (этажей), расположенных на расстоянии  $d_2$  друг относительно друга.

В каждом этаже располагается несколько симметричных вибраторов с расстоянием между их центрами  $d_2$ . Систему вибраторов, расположенных друг над другом, с точками подключения питания, лежащими на одной вертикальной оси, принято называть секцией антенны. Питание вибраторов в

### Устройства СВЧ и антенны

полотне антенны осуществляется таким образом, что синфазность их возбуждения не зависит от частоты. Это достигается равенством длин распределительных фидеров от точек подключения главного фидера (фидера, идущего от передатчика) до точек питания каждого вибратора [4, 5, 7].

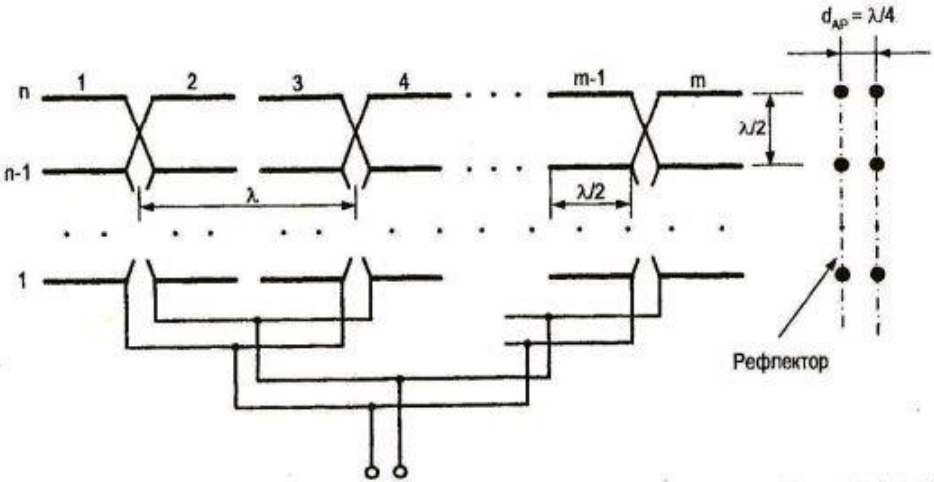


Рисунок 2.5 – Геометрия модели антенны СГД

#### 2.3.3 Методика расчета конструкции

При наличии активного рефлектора вычисляется количество вибраторов в решетке [8]:

- при заданном значении коэффициента направленного действия

$$N = m \cdot n = (0,32..0,35)D, \quad (2.17)$$

- при заданной ширине главного лепестка диаграммы направленности

$$m = \frac{51^\circ}{2\theta_{0,5}}, \quad n = \frac{102^\circ}{2\varphi_{0,5}}, \quad N = m \cdot n. \quad (2.18)$$

Общее количество вибраторов в обоих случаях необходимо уменьшить в два раза за счет учета влияния отражения от Земли. В первом случае, когда вычисление осуществляется по известному значению коэффициента направленного действия, необходимо определить число вибраторов в ряду  $m$  и в этаже  $n$ .

## Устройства СВЧ и антенны

Данные значения вычисляются на основе условий согласования фидера и антенны.

Вычисляется примерное сопротивление излучения антенны [8]:

$$R_{\Sigma A} = 145N. \quad (2.19)$$

Определяется ток в пучности на вибраторе [8]:

$$I = \sqrt{\frac{2P_{\Sigma}}{R_{\Sigma A}}}. \quad (2.20)$$

Рассчитывается радиус вибратора [8]:

$$r \geq (2..4) \frac{60I}{E_{кр}}, \quad (2.21)$$

где  $E_{кр} = (6000..8000)$  В/м – критическая напряженность поля на поверхности вибратора.

Далее вычисляется волновое сопротивление вибратора [8]:

$$W = 120 \left( \ln \frac{\lambda}{\pi r} - 0,578 \right). \quad (2.22)$$

Полное входное сопротивление антенны вычисляется по формуле [8]:

$$R_{\text{вх}A} = W^2 / R_{\Sigma A}. \quad (2.23)$$

Далее выбирается тип фидера для питания отдельных секций антенной решетки. Обычно это открытый двухпроводный фидер с волновым сопротивлением  $W_f$  от 200 до 600 Ом. По выбранному волновому сопротивлению фидера  $W_f$ , как можно ближе совпадающему с входным сопротивлением антенны  $R_{\text{вх}A}$ , рассчитывается количество вибраторов в ряду [8]:

$$m = 2W_f / R_{\text{вх}A}. \quad (2.24)$$

Далее необходимо скорректировать число излучателей в ряду, чтобы упростить схему питания. Поскольку обычно в данных решетках применяется схема деления на 2, то целесообразно, чтобы число излучателей было равно

$$m = 2^p, (p=1,2,...). \quad (2.25)$$

Число этажей после этого определяется по формуле

$$n = N / m. \quad (2.26)$$

## Устройства СВЧ и антенны

После определения структуры решетки определяется высота подвеса центра антенны над поверхностью Земли [8]:

$$H_{cp} = 0.25(n-1)\lambda + H, \quad (2.27)$$

где  $H = (0,5..1,0)\lambda$  - высота подвеса нижнего ряда вибраторов над Землей.

Расстояние между антенной и рефлектором выбирается равным

$$d_p = 0.25\lambda. \quad (2.28)$$

### 2.3.4 Соотношения для вычисления диаграммы направленности

Направленные свойства антенн СГД РА определяются геометрическими размерами полотна антенны, его расстоянием от аперидического рефлектора и высотой подвеса над землей [4, 5, 7]. В переднем полупространстве ДН может быть приближенно рассчитана заменой рефлектора зеркальным изображением антенны. Влияние земли учитывают также заменой ее зеркальными изображениями антенны и рефлектора или более точно – с учетом реального значения коэффициента отражения от земли. Если амплитуды и фазы токов в одной секции одинаковы (различием, как показано в [7], можно пренебречь), то ДН представляется в виде [7]:

$$F(\Delta, \varphi) = F_1 F_A F_3 F_p, \quad (2.29)$$

где  $F_1 = \frac{\cos(kl \cos \Delta \cos \varphi) - \cos(kl)}{1 - \cos^2 \Delta \cos^2 \varphi}$  - ДН вибратора;

$$F_A = \frac{\sin(0.5nu) - \sin(0.5mv)}{\sin(0.5u)\sin(0.5v)}$$

ности решетки;

$$u = kd_x \cos \Delta; \quad v = kd_y \sin \Delta;$$

$F_3$  - множитель, учитывающий влияние земли и определяемый в предположении об идеальной проводимости земли [7] выражением

$$F_3 = 2 \sin(kH_{cp} \sin \Delta). \quad (2.30)$$

$F_p$  - множитель, учитывающий влияние рефлектора



## Устройства СВЧ и антенны

для СГД с аperiodическим рефлектором определяется соотношением [7]:

$$F_p = 2 \sin(kd_p \cos \Delta \sin \varphi), \quad (2.31a)$$

а для антенны с настраиваемым рефлектором выражением [7]:

$$F_p = 1 + A \exp(i\Phi - ikd_p \cos \Delta \sin \varphi). \quad (2.31b)$$

Последнее соотношение можно преобразовать к виду:

$$F_p = \sqrt{1 + M^2 + 2M \cos(\Phi - kd_p \cos \Delta \sin \varphi)} \quad (2.31в)$$

где  $M = \frac{|I_2|}{|I_1|}$ .

Отсчет углов показан на рисунке 2.6. Угол  $\varphi$  - азимутальный угол, отсчитывается от плоскости антенны.

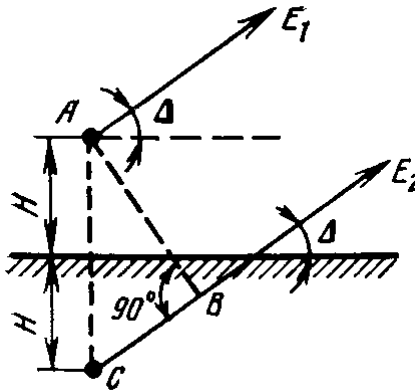


Рисунок 2.6 – Отсчет углов в модели

Диаграмма направленности в вертикальной плоскости в основном определяется множителями  $F_A$  и  $F_3$ , зависимость от азимутального угла – множителем  $F_A$ . Множители  $F_1$  и  $F_p$  слабо меняются, и их влияние проявляется преимущественно в области боковых лепестков.

С учетом числа этажей антенны и расположения в ней вибраторов выражение для множителя направленности антенны принимает вид [7]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$F_A = \frac{4 \sin^2 \left( \frac{m k d_2 \sin \Delta}{4} \right) \cos(k H_{cp} \sin \Delta)}{\sin \left( \frac{k d_2 \sin \Delta}{2} \right)} \times \frac{\sin \left( \frac{n k d_1 \cos \Delta \cos \varphi}{4} \right)}{\sin \left( \frac{k d_1 \cos \Delta \cos \varphi}{2} \right)}. \quad (2.32)$$

В частном случае для СГД с настраиваемым рефлектором, когда  $\Phi = \pi/2$  главный лепесток диаграммы направленности обращен в сторону пассивного вибратора, при  $\Phi = -\pi/2$  - в сторону активного вибратора (директора).

## 2.4 Расчет характеристики направленности широкополосного симметричного вибратора (диполя Надененко)

### 2.4.1 Области применения диполя Надененко

Широкополосный симметричный вибратор (диполь Надененко) используется в диапазоне КВ для организации ионосферных каналов связи. К данным антеннам предъявляются следующие условия: получение в пределах заданных углов наклона и в требуемом секторе азимутальных углов необходимого усиления [7]. Увеличение интенсивности излучения в указанном пространственном секторе при фиксированной мощности передатчика возможно только за счет уменьшения интенсивности излучения в других направлениях, т.е. путем сужения диаграммы направленности (ДН) и соответствующей ее ориентации.

К передающей антенне данного диапазона предъявляются дополнительные требования [7]:

- на проводах вибраторов и фидеров не должно возникать факельных разрядов и пробоев изоляторов при любых вероятных метеорологических условиях и при попадании на провода птиц, листьев, пыли;

## Устройства СВЧ и антенны

- главный питающий фидер, по которому подводится к антенне вся мощность передатчика, должен снабжаться элементами для настройки его на режим бегущей волны и элементами для компенсации отражений от конструкции узлов;

- коэффициент бегущей волны на входе питающего фидера должен быть не менее 0,8, что необходимо для нормальной работы передатчика большой мощности;

- конструкция антенны и фидерных линий должна обеспечивать надежные электрические контакты, обладать высокой механической надежностью и выдерживать нагрузки, обусловленные заданными климатическими и сейсмическими условиями, а также должна быть удобной при монтаже, эксплуатации и проведении профилактического ремонта.

### 2.4.2 Конструкция антенны

Самой распространенной конструкцией диполя Надененко является приведенная на рисунке 2.7.

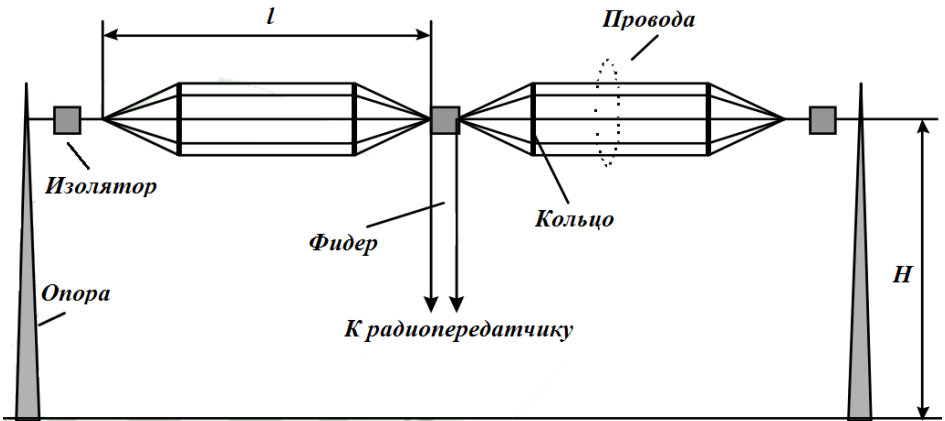


Рисунок 2.7. – Внешний вид диполя Надененко

Обычно такой вибратор выполнен из антенного канатика или биметаллического провода диаметром 4..6 мм и имеет волновое сопротивление около 1000 Ом. Изоляторы, включенные в середину и по краям вибратора, должны иметь возможно меньшую емкость, чтобы избежать значительных потерь в них и ухудшения согласования вибратора с питающим фидером, а также уменьшить возбуждение поддерживающих тросов.

## Устройства СВЧ и антенны

Симметричные вибраторы подвешивают на деревянных или асбоцементных опорах, оттяжки опор секционируют изоляторами таким образом, чтобы они не содержали отрезков длиннее  $0,25\lambda$ . Для уменьшения наводимых токов в тросах, поддерживающих вибратор, необходимо на расстоянии 2.73 м от конца вибратора в эти тросы вставить дополнительные изоляторы. Высоту подвеса вибраторов над землей выбирают такой, чтобы обеспечить соответствие между направлением максимального излучения и углами наклона лучей, достигающих места приема. Питание вибратора осуществляется обычно двухпроводным фидером с волновым сопротивлением 600 Ом.

### 2.4.3 Методика расчета параметров антенны

Расчет начинается с выбора угла наклона луча  $\Delta$ . При этом считается, что высота отражения от ионосферного слоя заключается в интервале 250.. 350 км. В последнее время наиболее типичными для ионосферных каналов являются радиотрассы длиной до 2000 км. С учетом сказанного, при проектировании ионосферного канала для выбора угла наклона луча можно использовать рисунок 2.8.

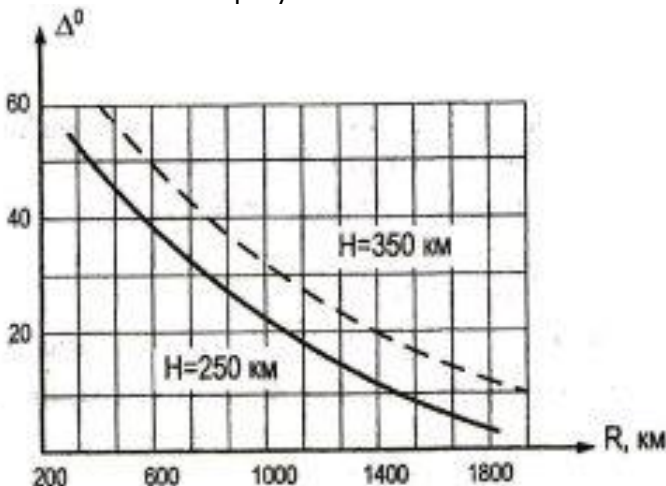


Рисунок 2.8 – Зависимость угла наклона луча  $\Delta$  от длины радиотрассы и высоты отражения от ионосферного слоя [8]

Далее для среднего значения рабочей длины волны

## Устройства СВЧ и антенны

$\lambda_{cp} = 0,5(\lambda_{max} + \lambda_{min})$  по найденному значению  $\Delta$  вычисляется высота подвеса антенны над Землей [8]:

$$H = \frac{\lambda_{cp}}{4 \sin \Delta}. \quad (2.33)$$

По заданному рабочему диапазону волны находится длина плеча вибратора. Значение длины плеча должно удовлетворять неравенству [8]:

$$0,25\lambda_{max} < \ell < 0,65\lambda_{min}. \quad (2.34)$$

Далее строится эскиз конструкции антенны, показанный на рисунке 2.9.

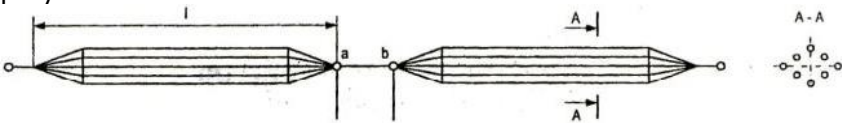


Рисунок 2.9 – Эскиз конструкции диполя Надененко

Радиус цилиндрической поверхности совокупности вибраторов  $r_u$  для уменьшения волнового сопротивления антенны выбирают в пределах 0,4..0,75 м, а число проводов  $n = 6..8$ , поскольку в [9] показано, что при таком количестве вибраторов распределенная емкость, а, следовательно, его волновая характеристика будут такими же, как у цилиндра со сплошной металлической поверхностью.

Эквивалентный радиус вибратора, образованного из металлического цилиндра и имеющего такое же волновое сопротивление, как и рассматриваемый вибратор, рассчитывается по формуле [8]:

$$r_э = r_u \sqrt[n]{\frac{nr}{r_u}}, \quad (2.35)$$

где  $r$  - радиус проводов, из которых выполнен вибратор. Как правило, провода выполнены в виде антенного канатика диаметром 2..5 мм.

Далее определяется волновое сопротивление диполя без учета наведенных сопротивлений [8]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$W = 120 \left( \ln \left( \frac{\lambda}{\pi r_3} \right) - 0.577 \right). \quad (2.36)$$

Для трех длин волн  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{cp}$  и  $\lambda_{\max}$  находятся сопротивления излучения вибраторов  $R_{\Sigma}$  и реактивные сопротивления  $X_p$  с учетом влияния Земли:

$$R_{\Sigma} = R_{11} - R_{12}, \quad (2.37a) \quad X_p = X_{11} - X_{12}, \quad (2.37b)$$

В которых индексами «11» обозначены собственные сопротивления (активное и реактивное соответственно), а индексами «12» - взаимные сопротивления, т.е. так называемые коэффициенты взаимной связи излучателей. Для их нахождения используем материалы работ [7, 9]. В соответствии с ними для вибраторов с соотношением длины вибратора к его радиусу  $\ell_a$  и длиной плеча  $\ell$  собственное сопротивление вычисляется с использованием формул:

$$Z_{11} = 30(R1 + R2 + R3) + j30(X1 + X2), \quad (2.38)$$

где  $R1 = 2(\gamma + \ln(2k\ell) - Ci(2k\ell))$ ;

$$R2 = \sin(2k\ell)(Si(4k\ell) - 2Si(2k\ell));$$

$$R3 = \cos(2k\ell)(\gamma + \ln(k\ell) + Ci(4k\ell) - 2Ci(2k\ell));$$

$$X1 = 2Si(2k\ell) + \sin(2k\ell) \times \\ \times (\gamma + \ln(k\ell) + Ci(4k\ell) - 2\ln(\ell_a));$$

$$X2 = -\cos(2k\ell)(Si(4k\ell) - 2Si(2k\ell)),$$

$\gamma = 0.5772157$  - число Эйлера;

$Si(\cdot)$  и  $Ci(\cdot)$  - синус- и косинус-интегралы Френеля

[10]:

$$Si(x) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{10} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)(2n+1)!} & |x| < 4, \\ \int_0^x \frac{\sin(u)}{u} du & 4 \leq |x| < 5, \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\cos(x)}{x} \sum_{n=0}^3 (-1)^n \frac{(2n)!}{x^{2n}} - \frac{\sin(x)}{x} \sum_{n=0}^3 (-1)^n \frac{(2n+1)!}{x^{2n+1}} & |x| > 5, \end{cases}$$

(2.39)

$$Ci(x) = \begin{cases} -100 & |x| < 10^{-3}, \\ -\int_x^{100} \frac{\cos(u)}{u} du & 10^{-3} \leq |x| < 4.5, \\ \frac{\sin(x)}{x} \sum_{n=0}^3 (-1)^n \frac{(2n)!}{x^{2n}} - \frac{\cos(x)}{x} \sum_{n=0}^3 (-1)^n \frac{(2n+1)!}{x^{2n+1}} & |x| \geq 4.5. \end{cases} \quad (2.40)$$

Взаимные сопротивления параллельных вибраторов вычисляются с использованием соотношений, приведенных в [7]:

$$Z_{12} = 30j(Z_{121} + Z_{122}), \quad (2.41)$$

После нахождения сопротивления излучения вибраторов  $R_{\Sigma}$  и реактивные сопротивления  $X_p$  с учетом влияния Земли рассчитывается входное сопротивление диполя для трех длин волн  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{cp}$  и  $\lambda_{\max}$  [9]:

$$Z_{ax} = \frac{R_{\Sigma} - j0,5W \sin(2k\ell)}{\left(\frac{R_{\Sigma}}{W}\right)^2 + \sin^2 k\ell}. \quad (2.42)$$

Полученные значения позволяют оценить рассогласование фидера с антенной в рабочем диапазоне длин волн.

После вычисления входного сопротивления диполя выбирается фидерная линия. Тип фидера проектируемой антенны, как показано в [8], как правило, открытый, симметричный двух- или четырехпроводный. Конструкция данных фидеров показана на рисунке 2.10, а, б соответственно.

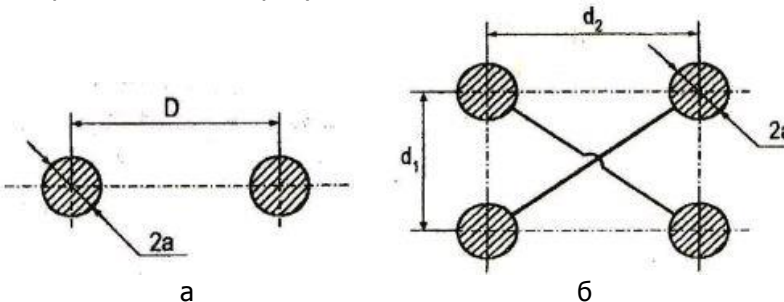


Рисунок 2.10 – Конструкция фидерной линии:

а – двухпроводный фидер; б – четырехпроводный фидер

## Устройства СВЧ и антенны

Волновое сопротивление фидера  $W_\phi$  выбирается по известному входному сопротивлению антенны на рабочей частоте, т.е.  $W_\phi = \text{Re}(Z_{\text{ex}}(\lambda_{cp}))$ . При этом волновое сопротивление определяется по формулам [8]:

- для двухпроводной линии:

$$W_\phi = 276 \lg(D/a), \quad (2.43)$$

- для четырех проводной линии:

$$W_\phi = 138 \lg\left(\frac{d_2}{a\sqrt{1+d_2^2/d_1^2}}\right), \quad (2.42a) \quad W_\phi = 138 \lg\left(\frac{d}{a\sqrt{2}}\right). \quad (2.426)$$

Формула (2.426) соответствует частному случаю  $d_1 = d_2 = d$ .

Для передающих антенн фидер выполняется из проводов диаметром 3..6 мм, расстояние между проводами обычно составляет 225..450 мм. Если волновое сопротивление фидера больше  $R_{\text{ex}}$  антенны, то применяют экспоненциальный трансформатор в виде открытой линии, волновое сопротивление которой плавно меняется от  $R_{\text{ex}}$  до  $W_\phi$ . экспоненциальный трансформатор подключается к вибратору в точках  $a, b$  на рисунке 2.9 и может располагаться частично вертикально, а частично и горизонтально, являясь одновременно снижением.

Далее осуществляется расчет модуля коэффициента отражения для волн  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{cp}$  и  $\lambda_{\max}$  [8]:

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{(R_{\text{ex}} - W_\phi)^2 + X_{\text{ex}}^2}{(R_{\text{ex}} + W_\phi)^2 + X_{\text{ex}}^2}} \quad (2.43)$$

и определяется коэффициент бегущей волны на этих же длинах волн:

$$КБВ = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|}. \quad (2.44)$$

Согласование считается удовлетворительным, если КБВ в рабочем диапазоне не хуже 0,3..0,5. Если согласование на краях рабочего диапазона получилось неудовлетворительное, то следует увеличить диаметр плеч вибратора. По известному значению модуля коэффициента отражения



## Устройства СВЧ и антенны

несложно рассчитать и коэффициент полезного действия линии [8]:

$$\eta_{\phi} = \frac{(1 - |\Gamma|^2) \exp(-2\alpha L)}{1 - |\Gamma|^2 \exp(-4\alpha L)}, \quad (2.45)$$

где  $L$  – длина фидерной линии (из конструктивных соображений выбирается в пределах от 10 до 100 м);

$\alpha$  – коэффициент затухания фидера, который может быть вычислен по формуле [8]:

$$\alpha = \frac{9600K_1}{W_{\phi} d \sqrt{\sigma \lambda_{cp}}}, \quad [\text{дБ/м}] \quad (2.46)$$

$$K_1 = 1,05..1,35;$$

$\sigma$  – удельная объемная проводимость провода.

По известному значению мощности излучения антенны  $P_{\Sigma}$  и вычисленному значению сопротивления излучения  $R_{\Sigma}$  рассчитывается максимальная напряженность электрического поля около проводов диполя Надененко [8]:

$$E_{\max} = 120 \frac{\sqrt{P_{\Sigma} / R_{\Sigma}}}{nd}, \quad (2.47)$$

где  $d$  – диаметр провода в метрах.

Допустимой является величина  $E_{\max} = (6..8) \cdot 10^5$  В/м.

### 2.4.4 Соотношения для вычисления характеристик направленности

Диаграмма направленности ионосферной антенны оценивается в трех плоскостях: для двух вертикальных (при  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$ ) и одной горизонтальной [7].

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле [7]:

$$F(\varphi) = \frac{\cos(k\ell \cos\varphi) - \cos(k\ell)}{(1 - \cos(k\ell)) \sin\varphi}, \quad (2.48)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число на исследуемой длине волны.

## Устройства СВЧ и антенны

Диаграмма направленности в вертикальных сечениях определяется соотношениями [7]:

- в  $H$ -плоскости ( $\varphi = 90^\circ$ ):

$$F(\Delta) = \sin(kH \sin \Delta), \quad (2.49a)$$

- в  $E$ -плоскости ( $\varphi = 0^\circ$ ):

$$F(\Delta) = \frac{\cos(k\ell \cos \Delta) - \cos(k\ell)}{(1 - \cos(k\ell)) \sin \Delta} \sin(kH \sin \Delta). \quad (2.49b)$$

Коэффициент направленного действия антенны  $D_0$  в направлении максимального излучения (в предположении об идеальной проводимости поверхности Земли) на средней длине волны  $\lambda_{cp}$  определяется выражением [8]:

$$D_0 = \frac{120}{R_\Sigma} (1 - \cos(k\ell))^2 (1 + |\Gamma|)^2. \quad (2.50)$$

Наконец, на заключительном этапе рассчитывается коэффициент полезного действия антенно-фидерного устройства в целом. Для этого используется формула [7]:

$$\eta = \eta_A \eta_\phi, \quad (2.51)$$

где  $\eta_A$  - коэффициент полезного действия. При хорошем заземлении  $\eta_A = 0,7..0,9$ .

## 2.5 Расчет характеристики направленности логопериодической вибраторной антенны

### 2.5.1 Области применения логопериодических вибраторных антенн

Логопериодические вибраторные антенны (ЛПВА) нашли широкое применение в качестве антенн внешних абонентских пунктов. Достоинствами данных антенн являются:

- возможность их применения для приема телевизионных сигналов;
- простота конструкции и низкая стоимость;
- возможность работы в широкой полосе частот;
- отсутствие элементов настройки.

При правильном выборе размеров антенны, как показано в [11-13], удается в десятикратном диапазоне волн получать почти

## Устройства СВЧ и антенны

неизменные характеристики направленности при коэффициенте стоячей волны менее 1,5-1,7. Так, в [14] показано, что логопериодические вибраторные антенны фирмы *SCHWARZBECK* применяются в широком частотном диапазоне – от 180 МГц до 8 000 МГц. Недостатком логопериодической антенны является сравнительно низкое значение ее коэффициента усиления, поскольку активная область включает только небольшую часть всех ее вибраторов антенны (обычно от трех до пяти).

Логопериодические антенны находят широкое применение в коммерческом вещании, функционируют в коротковолновых диапазонах, где изменяющиеся условия распространения волн требуют быстрой смены частоты передачи. Кроме того, данный тип антенн применяется для радиоконтроля, слежения за спутниками и ракетами в радиоастрономии. С развитием систем беспроводного широкополосного доступа в Интернет логопериодические антенны стали применяться в качестве репитеров.

### 2.5.2 Конструкция антенны

Известно большое количество конструкций логопериодических антенн [11-14]: вибраторные, плоские, пространственные и т.д. Конструкция логопериодической вибраторной антенны показана на рисунке 2.11.

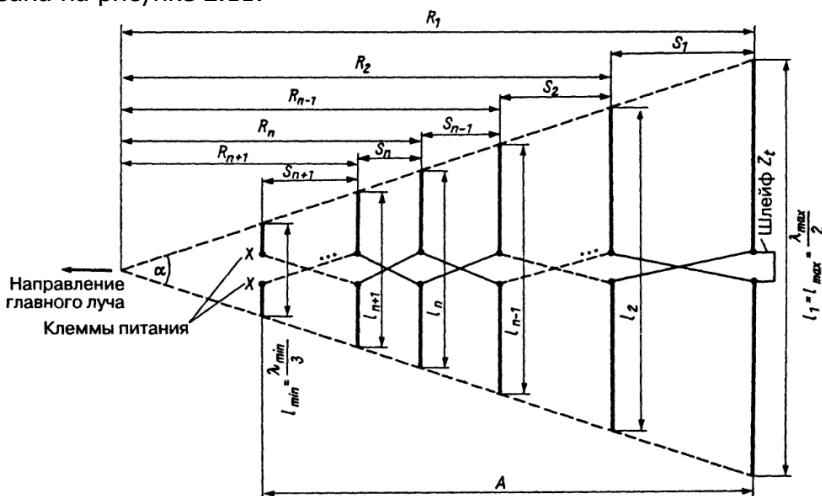


Рисунок 2.11 - Геометрия конструкции и схема подключения логопериодической вибраторной антенны

Рассмотрим принцип излучения ЛПВА, приведенный в [12]. Симметричный фидер всегда подключается в точках ХХ самого короткого вибратора. В режиме передачи волна распространяется вдоль возбуждающей линии без излучения пока длина вибраторов слишком мала по сравнению с длиной волны. Такие вибраторы действуют как емкостная реактивная нагрузка. Излучение начинается только с приближением длины вибратора к трети от рабочей длины вибратора  $\lambda/3$ , а затем в нем участвуют и следующие вибраторы. Такая активная область  $B_{AR}$  начинается сверху от вибратора, длина которого приблизительно равна  $\lambda/2$ . Все следующие более длинные вибраторы почти не влияют на излучение. Активная область  $B_{AR}$  простирается от вибратора с максимальным током до диполей справа и слева от него, в которых ток на 10 дБ слабее максимального. У антенн с обычными параметрами активная область охватывает 3..5 вибраторов.

### 2.5.3 Методика расчета параметров антенны

Вначале рассчитываются размеры крайних вибраторов [12]:

$$\ell_{\max} = \lambda_{\max} / 2, \quad \ell_{\min} = \lambda_{\min} / 3. \quad (2.52)$$

В данном соотношении значение  $\ell_{\max}$  отвечает нижнему частотному пределу  $f_{\min}$ , а  $\ell_{\min}$  - верхнему  $f_{\max}$ . Длина рабочей частотной области определяется формулой:

$$B = f_{\max} / f_{\min}. \quad (2.53)$$

По заданному значению коэффициента усиления по графику 2.12 определяются значения  $\tau$  и  $\sigma$ .

Первый параметр описывает плотность размещения вибраторов определяется безразмерным коэффициентом структуры, определяемым соотношением

$$\tau = \ell_{n+1} / \ell_n = R_{n+1} / R_n = (R_n - R_{n+1}) / (R_{n-1} - R_n). \quad (2.54)$$

Второй параметр  $\sigma$  называется междурядным коэффициентом и определяет относительное расстояние между вибраторами. В определенных пределах  $\sigma$  выбирается произвольно и задает начальное расстояние  $S_1$  [12]:

$$S_1 = \sigma \lambda_{\max} = 0,5(\ell_1 - \ell_2) \operatorname{ctg}(\alpha/2). \quad (2.55)$$

## Устройства СВЧ и антенны

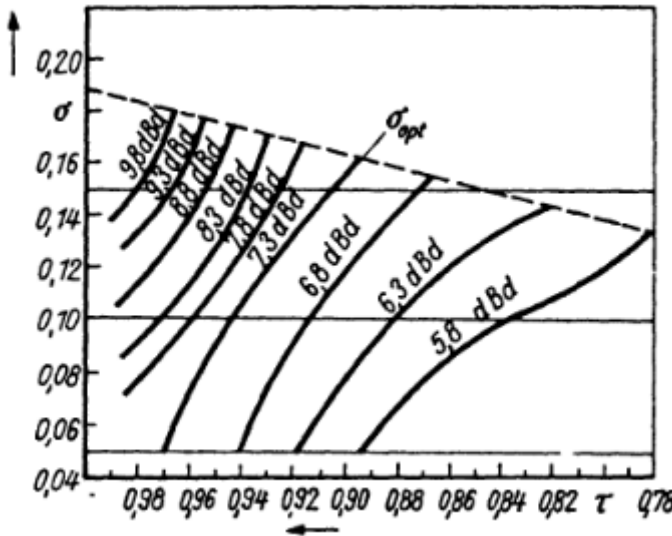


Рисунок 2.12. - Кривые равного усиления ЛПВА в зависимости от  $\tau$  и  $\sigma$

Далее определяется ширина структуры  $B_s$ , связанная с рабочей областью  $B$  и активной областью  $B_{AR}$  выражением [13]:

$$B_s = BB_{AR} \quad (2.56)$$

Ширина структуры  $B_s$  представляет собой отношение значений длины наиболее и наименее длинного элементов. Для его расчета предложена приближенная зависимость:

$$B_{AR} = 1,1 + 30,8(1 - \tau)\sigma \quad (2.57)$$

По известной ширине структуры  $B_s$  несложно рассчитать и количество излучающих элементов (вибраторов):

$$N = 1 + \frac{\lg B_s}{\lg(1/\tau)} \quad (2.58)$$

Результат округляется до целого числа.

Длина антенны вычисляется с использованием выражения [12]:

$$A = \left(1 - \frac{1}{B_s}\right) \frac{4\sigma}{1 - \tau} \frac{\lambda_{max}}{4} \quad (2.59)$$

## Устройства СВЧ и антенны

Зная длину максимального вибратора  $\ell_1$ , остальные находятся по известной рекуррентной формуле:

$$\ell_i = \ell_1 \tau^i. \quad (2.60)$$

Длина короткозамкнутого шлейфа  $Z_t$  рассчитывается по формуле:

$$Z_t \leq \lambda_{\max} / 8. \quad (2.61)$$

Шлейф  $Z_t$  обязательно применяется в диапазонах УКВ и ДМВ. Для КВ антенн достаточно вместо шлейфа применить перемычку из провода, если допустима компромиссная величина КСВ. В этом случае способ замыкания концов двухпроводной линии играет второстепенную роль, поскольку волны в ней настолько ослабляются благодаря излучению энергии в активной области, что за самым длинным вибратором они становятся пренебрежимо слабыми. Перемычка  $Z_t$  несколько улучшает давление обратного излучения на минимальных рабочих частотах  $f_{\min}$ .

Диаметр поперечного сечения вибраторов выбирают исходя из конструктивных особенностей. Однако обычно рекомендуют, чтобы отношение длины плеча вибратора к его радиусу ( $\ell/a$ ) составляло величину в интервале от 30 до 150.

На втором этапе для приближенной оценки фактического входного сопротивления  $R_e$  в точках ХХ рассчитываются средние волновые сопротивления  $Z_a$  подключенных вибраторов, а также волновое сопротивление ненагруженной двухпроводной линии связи  $W_\phi$ .

Для нахождения значений средних волновых сопротивлений подключаемых вибраторов воспользуемся выражением [12]:

$$Z_a = 120 \left( \left( \ln \frac{\ell}{a} \right) - 2,25 \right). \quad (2.62)$$

Для проволочных вибраторов в КВ диапазоне волновое сопротивление  $Z_a$  лежит в пределах 600..800 Ом. Толстые трубчатые проводники характеризуются соответственно более низкими значениями  $Z_a$ . Волновые сопротивления  $Z_a$  у всех вибра-

## Устройства СВЧ и антенны

торов системы одинаковы только в том случае, если всем им свойственно только одно и то же отношение  $\ell/a$ , т.е. при применении элементов разного диаметра. В практических условиях обычно используется средний диаметр элементов.

Предполагая, что нагрузка двухпроводной связующей линии является емкостной вследствие коротких вибраторов, а на ее конце отражение отсутствует благодаря действию активной области, входное сопротивление двухпроводной линии  $W_\phi$  равно входному сопротивлению  $R_e$ . Само входное сопротивление определяется с использованием формулы [12]:

$$W_\phi = R_e \left( \frac{R_e \sqrt{\tau}}{8\sigma Z_a} + \sqrt{\left( \frac{R_e \sqrt{\tau}}{8\sigma Z_a} \right)^2 + 1} \right). \quad (2.63)$$

Параметры двухпроводной связующей линии определяются величиной  $W_\phi$ . Они практически не влияют на свойства антенны. Расстояние посередине вибратора между двумя клеммами двухпроводной линии в КВ диапазоне составляет от 50 до 150 мм. В диапазонах УКВ и ДМВ оно не должно превышать  $\lambda_{\max}/8$ . Приблизительное значение требуемого входного сопротивления  $R_e$  обычно известно. В случае проволочных вибраторов с их сравнительно большими значениями волновых сопротивлений  $Z_a$  величина  $R_e$  оказывается практически близкой к 200 Ом. В связи с этим  $W_\phi$  принимает здесь значения, позволяющие воспользоваться двухпроводной линией. Чтобы можно было использовать коаксиальный кабель, требуется симметрирующий трансформатор [12]. Он может быть выполнен на кольцевом сердечнике с таким же коэффициентом преобразования, чтобы импеданс кабеля был согласован с  $W_\phi$ . Благодаря этому величина КСВ оказывается малой во всей рабочей области. Рекомендуется применять согласующее устройство на конце коаксиального кабеля со стороны передатчика, поскольку оно не только устранит имеющиеся рас-согласования, но и предотвратит излучение высших гармоник, свойственное широкополосным антеннам.

### 2.5.4 Соотношения для вычисления диаграммы направленности

Для нахождения диаграммы направленности логопериодической вибраторной антенны воспользуемся стандартным выражением для диаграммы направленности антенной решетки, как предложено в работе [11]:

$$f(\theta, \varphi) = 60 \sum_{n=1}^N f_n(\theta, \varphi) \exp[-ikS_n \sin\theta \sin\varphi], \quad (2.64)$$

где  $f_n(\theta, \varphi)$  - диаграмма направленности  $n$ -го вибратора антенны,

$\theta$  - угол, отсчитываемый от нормали к плоскости антенны,

$\varphi$  - угол, отсчитываемый от оси вибратора в горизонтальной плоскости.

Диаграмма направленности  $n$ -го вибратора антенны полностью определяется выбранным законом распределения тока по вибратору. Для синусоидального приближения выражение для расчета  $f_n(\theta, \varphi)$  имеет вид [11]:

$$f_n(\theta, \varphi) = I_n \frac{\cos(kl_n \sin\theta \cos\varphi - \cos kl_n)}{\sin(kl_n) \sqrt{1 - (\sin\theta \cos\varphi)^2}}, \quad (2.65)$$

где  $I_n$  - комплексная амплитуда тока в  $n$ -м вибраторе.

Выражение для нахождения коэффициента направленного действия антенны может быть получено по известной ненормированной диаграмме направленности [11]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{|f_n(\theta, \varphi)|^2}{30 \operatorname{Re} R_e} \quad (2.66a)$$

или с использованием приближенной формулы

$$D = 10 \lg \frac{41253}{(2\theta_{0,5}^E)(2\theta_{0,5}^H)}, \quad (2.66b)$$

где  $2\theta_{0,5}^E$ ,  $2\theta_{0,5}^H$  - ширина главного лепестка диаграммы направленности по половинной мощности в  $E$ - и  $H$ -плоскостях.

Для нахождения комплексных амплитуд токов  $\mathbf{I}_A = \{I_n\}_{n=1}^N$  в вибраторах находятся из решения системы линейных алгебраи-



## Устройства СВЧ и антенны

ческих уравнений [13]:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}(\mathbf{U} + \mathbf{Y}\mathbf{Z}_A)^{-1}, \quad (2.67)$$

где  $\mathbf{I}$  - матрица входных токов;

$\mathbf{U}$  - единичная матрица;

$\mathbf{Y}$  - матрица проводимостей вибраторов;

$\mathbf{Z}_A$  - Z-параметры распределительного фидера.

При нахождении комплексных амплитуд токов в вибраторах полагают, что входной ток задан только в одном вибраторе и равен 1 А, т.е.

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.68)$$

Матрица проводимостей вибраторов логопериодической антенны имеет вид [13]:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_{32} & y_{33} & y_{34} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{NN} \end{bmatrix}. \quad (2.69)$$

Элементы матрицы проводимостей вычисляются с использованием формул [13]:

$$y_{11} = -\frac{i}{W_\phi} (\text{ctg}(\beta S_0) + \text{ctg}(\beta S_1)), \quad (2.70)$$

$$y_{p1q} = -\frac{i}{W_\phi} (\text{ctg}(\beta S_{q-1}) + \text{ctg}(\beta S_q)), \quad (2.71)$$

$$y_{NN} = -\frac{i}{W_\phi} \text{ctg}(\beta S_{N-1}), \quad (2.72)$$

$$S_0 = \lambda_{\max} / 8. \quad (2.73)$$

Коэффициент фазы в фидере рассчитывается на основе выражения:

$$\beta = k \sqrt{1 + \frac{W_{\phi} \sqrt{\tau}}{Z_a 4\sigma}}. \quad (2.74)$$

### 2.5.5 Методические указание по выбору программного обеспечения

Для проведения расчетов конструкции ЛПВА и ее характеристики направленности рекомендуется воспользоваться следующим подходом:

- для расчета параметров конструкции в языковой среде *MathCad* с использованием соотношений, приведенных в п.2.5.3, разрабатывается программы для расчета основных конструктивных параметров ЛПВА;

- полученные конструктивные параметры логопериодической вибраторной антенны вводятся далее в бесплатную программу *LogAnt* [15] для формирования файла в формате исходных данных программы *MMANA-GAL* [16];

- в программе *MMANA-GAL* рассчитываются характеристики направленности и характеристики согласования.

Описание программы *LogAnt* приведено в ПРИЛОЖЕНИИ Г.

Преимуществами предлагаемого подхода является возможность решения одновременно нескольких задач: сокращение времени на разработку программ; получение наглядных результатов (графики характеристики направленности и характеристик согласования в полосе частот); обеспечение контроля достоверности получаемых результатов; получение программного продукта с минимальными требованиями к компьютеру.

## 2.6 Расчет характеристики направленности волноводно-щелевой антенной решетки нерезонансного типа

### 2.6.1 Области применение волноводно-щелевых антенных решеток

Щелевые антенны находят широкое применение на практике благодаря сравнительной простоте изготовления и возбуждения. Основные преимущества волноводно-щелевых антенн (ВЩА) заключаются:

- в отсутствии выступающих частей и

## Устройства СВЧ и антенны

компактность волноводной распределительной системы, что особенно важно при применении антенн на борту летательных аппаратов;

- в возможности сравнительно легкой реализации требуемых амплитудных распределений (путем регулирования связи щелей с волноводом);

- в простоте эксплуатации.

Недостатком волноводно-щелевых антенн является ограниченность рабочей полосы частот, проявляющаяся, в первую очередь, нежелательными отклонениями луча при изменении частоты, а также нарушениями согласования входа.

Компактность и возможность выполнения щелевых антенн заподлицо с металлической обшивкой делают целесообразным их установку на летательных аппаратах, поскольку они не ухудшают аэродинамические свойства объекта.

Применяются в широком диапазоне частот, начиная от длины волны КВ диапазона и до миллиметровых волн.

### 2.6.2 Конструкция антенны

В зависимости от типа волн в волноводе, которые определяются характером нагрузки, волноводно-щелевые антенны подразделяются на два вида:

- резонансные;
- нерезонансные.

Резонансная ВЩА получается при установке в конце волновода металлической пластины, эквивалентной нагрузке типа короткого замыкания, и обеспечении в волноводе режима стоячей волны. В пластине на расстояниях кратных  $\lambda_g/2$  ( $\lambda_g$  - длина волны в волноводе) прорезаются щели. Резонансные антенны являются синфазными, и направление максимального излучения совпадает с нормалью к продольной оси антенны.

Нерезонансные ВЩА получают при установке в конце волновода согласующей нагрузки, эквивалентной волновому сопротивлению, и обеспечении в нем режима бегущей волны. В пластине на расстояниях  $0,2\lambda_g \leq d \leq 0,8\lambda_g$  прорезаются щели.

Волноводные согласованные нагрузки выполняются в виде поглощающих вставок переменного профиля в отрезке короткозамкнутого волновода. Для уменьшения отражений

## Устройства СВЧ и антенны

поглощающим вставкам придают вид клиньев. В антеннах с согласованными щелями каждая щель согласована с волноводом при помощи реактивного вибратора или диафрагмы и не вызывает отражений. Геометрия конструкции нерезонансной ВЩА показана на рисунке 2.13.

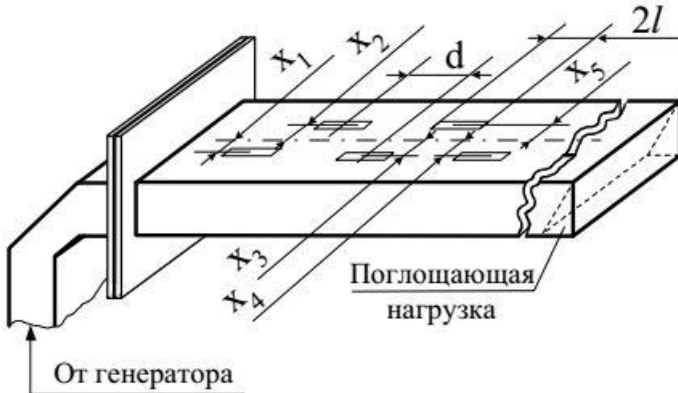


Рисунок 2.13. – Геометрия конструкции нерезонансной ВЩА

Возбуждение соседних щелей может быть либо  $\psi_0 < 2\pi d / \lambda_g$ , либо  $\psi_0 = \pi$ . В первом случае щели синфазносвязанные, во втором – переменnofазносвязанные. За счет изменения разности фаз в щелях обеспечивает отклонение направления максимального излучения от нормали к оси антенны либо в сторону генератора, либо в сторону от генератора. Конструктивно дополнительный сдвиг фаз в  $\pi$  можно обеспечить прорезыванием щелей по разные стороны от средней линии широкой стенки волновода, либо размещением возбуждающих зондов по разные стороны щели [17]. Таким размещением обеспечивается и требуемое значение коэффициента стоячей волны.

### 2.6.3 Методика расчета параметров антенны

При расчете волноводно-щелевой решетки в качестве исходных данных в соответствии с техническим заданием выступают либо рабочая длина волны  $\lambda$  и коэффициент направленного действия  $D$ , либо ширина главного лепестка диаграммы направленности в главных плоскостях ( $2\theta_{0,5}^E$ ,  $2\theta_{0,5}^H$ ) и мощность излучения  $P_\Sigma$ .

Расчет конструктивных параметров антенны начинается с

## Устройства СВЧ и антенны

выбора прямоугольного волновода, в стенках которого будут вырезаться щели. Геометрические размеры волновода  $a \times b$  определяются рабочей длиной волны  $\lambda$  следующим образом [8].

Выбор размеров прямоугольного волновода производится исходя из условия режим работы с волной основного типа  $H_{10}$ :

$$0,6\lambda_{\max} \leq a \leq 0,9\lambda_{\min}, \quad b = 0,5a. \quad (2.75)$$

С использованием полученных значений из таблицы Д.1 выбирают стандартный волновод. Далее для волны  $H_{10}$  вычисляется длина волны в волноводе:

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}. \quad (2.76)$$

Определяется количество щелей в антенной решетке:

- при заданном значении коэффициента направленного действия  $D$

$$N = D/3,2, \quad (2.77a)$$

- при заданной ширине главного лепестка диаграммы направленности:

$$N = n \cdot m, \quad n = 51^\circ \frac{\lambda}{2\theta_{0,5}^E}, \quad m = 51^\circ \frac{\lambda}{2\theta_{0,5}^H}. \quad (2.77b)$$

Далее выбирается расположение щелей на стенке волновода. Пусть щели ориентированы параллельно широкой стенке волновода, как показано на рисунке 2.13. Для равномерного амплитудного распределения по щелям антенны рассчитывается относительная мощность излучения любой  $n$ -й щели [8]:

$$P_n = \frac{\eta_A}{\sum_{n=1}^N f_n^2} f_n^2, \quad (2.78)$$

где  $\eta_A$  - коэффициент полезного действия антенны (можно принять равным 0,9..0,95);

$f_n$  - нормированные значения амплитуд полей на щелях (для равномерного распределения  $f_n = 1$ ).

Далее осуществляется расчет коэффициентов связи щелей

## Устройства СВЧ и антенны

с волноводом [8]:

$$\beta_n = \begin{cases} P_1 & n = 1, \\ \frac{P_{n-1}}{1 - \sum_{j=1}^{n-1} P_{n-1}} & n > 1. \end{cases} \quad (2.79)$$

Эквивалентные нормированные проводимости щелей вычисляются с использованием формулы [8]:

$$g_n = \frac{\beta_n}{1 - \beta_n}. \quad (2.80)$$

По известным значениям эквивалентных нормированных проводимостей определяются смещения щелей относительно оси волновода [8]:

$$X_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g_n}{2.09 \frac{a \lambda_e}{b \lambda} \cos^2 \left( \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_e} \right)}}. \quad (2.81)$$

Ширина щели выбирается из условия обеспечения электрической прочности:

$$b_{щ} \geq (2..4) \frac{U_n}{E_{кр}}, \quad (2.81)$$

где  $E_{кр}$  - значение пробивной напряженности, которое можно принять равным  $3 \cdot 10^4$  В/см;

$U_n$  - напряжение между кромками щели в пучности, определяемое формулой:

$$U_n = \sqrt{\frac{2P_\Sigma}{NG_\Sigma}} = \sqrt{\frac{2P_\Sigma R_\Sigma}{N}}, \quad (2.82)$$

$$G_\Sigma = \frac{0.9 \cdot 73.1}{2(60\pi)^2}. \quad (2.83)$$

Далее вычисляется укорочение щели

## Устройства СВЧ и антенны

$$\Delta \ell = \frac{42,5\lambda}{240\pi \left( \ln \left( \frac{4\lambda}{b_{из}} \right) - 0.578 \right)} \quad (2.84)$$

а также резонансная длина щели:

$$2\ell = 0.5\lambda - 2\Delta \ell. \quad (2.85)$$

Длина антенны составляет

$$L = md. \quad (2.86)$$

### 2.6.4 Соотношения для вычисления характеристик направленности

Для вычисления диаграммы направленности волноводно-щелевой антенной решетки используем соотношения [8, 17]:

$$F(\varphi) = F_1(\varphi)F_m(\varphi), \quad (2.87a)$$

$$F(\theta) = F_1(\theta)F_n(\theta), \quad (2.87b)$$

где  $F_1(\cdot)$  - нормированная парциальная диаграмма направленности;

$F_n(\cdot)$  и  $F_m(\cdot)$  - множители решетки в главных плоскостях.

Приведенные выше характеристики рассчитываются с использованием соотношений [17]:

$$F_1(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{в } E\text{-плоскости,} \\ \frac{\cos(0.5\pi \sin \theta)}{\cos \theta}, & \text{в } H\text{-плоскости,} \end{cases} \quad (2.88)$$

$$F_s(\theta) = \frac{\sin(0.5S[kd \sin \theta - \psi])}{S \sin(0.5[kd \sin \theta - \psi])}, \quad (2.89)$$

где  $\theta$  - угол, отчитываемый от нормали к плоскости щели;

$$\psi = \frac{2\pi d}{\lambda_g} \quad \text{или} \quad \psi = \frac{2\pi d}{\lambda_g} - \pi \quad \text{в зависимости от способа}$$

возбуждения;

$k = 2\pi/\lambda$  - волновое число свободного пространства;

$S$  - количество рядов или количество щелей в ряду, т.е.

$n$  или  $m$ ;

$d$  - расстояние между щелями в соответствующей

плоскости.

Для нахождения коэффициента направленного действия антенны (если он не задан в качестве исходных данных) используем выражение [8]:

$$D_0 = 3,2N . \quad (2.90)$$

Величина коэффициента усиления антенны определяется выражением:

$$G = D_0 \eta , \quad (2.91)$$

где  $\eta$  - коэффициент полезного действия антенно-фидерного тракта.

## 2.7 Расчет зеркальной антенны с круглой апертурой и рупорным облучателем

### 2.7.1 Области применения зеркальных антенн

Зеркальные антенны – наиболее распространенный тип остронаправленных антенн. Они применяются в различных диапазонах волн, начиная с коротковолнового и заканчивая оптическим. Широкое применение зеркальных антенн обусловлено:

- простотой их конструкции,
- возможностью получения высокой направленности,
- сохранением направленных свойств в широкой полосе частот,
- малыми активными потерями.

Зеркальные антенны позволяют в широких пределах изменять ширину и форму диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, вид поляризации. В силу этого они широко применяются в современных радиотехнических системах различного назначения (радиорелейные системы связи, радиолокационные станции, спутниковые системы связи и телевидение, системы радиоуправления и т.п.). В последнее время применяются для организации каналов связи систем *Wi-Fi* и *LTE* в качестве уличных приемо-передающих устройств.

### 2.7.2 Конструкция антенны

Среди зеркальных антенн применяются следующие основные типы зеркал: параболические (параболоид



## Устройства СВЧ и антенны

вращения, усеченный параболоид, параболический цилиндр), сферические, плоские и угловые, специальной формы, двух- и многозеркальные.

Зеркальная антенна входит в состав апертурной антенны. Апертура, или раскрыв антенны, возникает при проекции зеркала на перпендикулярную лучам плоскость. Если антенна имеет размер раскрыва 2..2,5 м, то она может изготавливаться по однозеркальной, или офсетной схеме. Облучатель такой антенны выносится за зону действия основного луча, что обеспечивает достижение более высокого усиления.

По своей конструкции параболические зеркальные антенны состоят из двух частей: зеркала и облучателя. Облучатель излучает электромагнитную волну в сторону зеркала. Фронт волны в пространстве формируется в результате отражения волны от поверхности зеркала (рефлектора).

Наиболее распространенными типами облучателей зеркальных антенн являются вибраторные, щелевые или волноводно-рупорные облучатели. В диапазоне дециметровых и более длинных волн применяются вибраторные облучатели. Волноводно-рупорные облучатели представляют собой либо открытый конец волновода, либо небольшой рупор, питаемый волноводом. Используются волноводы (рупоры) как прямоугольного, так и круглого сечения. Последние более предпочтительны, поскольку их диаграмма направленности более симметрична относительно оси волновода. В то же время прямоугольные рупорные облучатели позволяют получать разную ширину диаграммы направленности в перпендикулярных плоскостях, в связи с чем данные облучатели целесообразно использовать для зеркальных антенн с продолговатым раскрывом.

При расчете параметров зеркала используется модель зеркала, показанная на рисунке 2.14. На нем используются следующие обозначения:

- $F$  - положение фокуса зеркала, в котором должен располагаться облучатель;
- $S$  - профиль зеркала;
- $R_0$  - радиус антенны;
- $f$  - фокусное расстояние;
- $h$  - глубина зеркала;
- $2\psi_0$  - угол раскрыва зеркала.

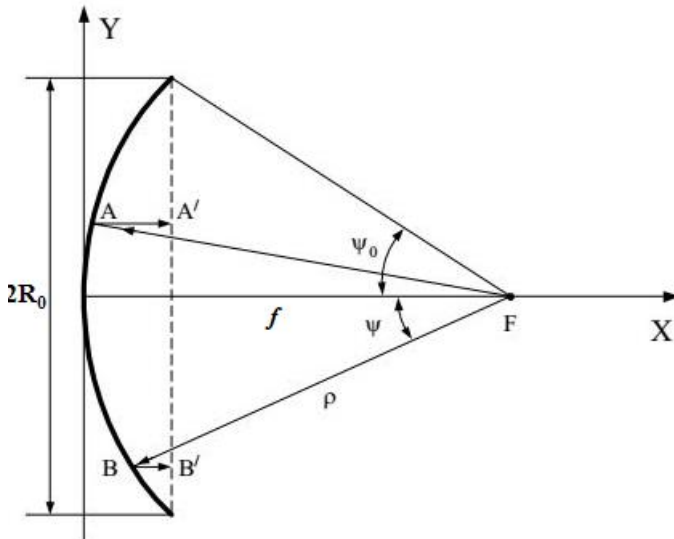


Рисунок 2.14. – Геометрия зеркального раскрыва

По величине  $2\psi_0$  зеркало может быть отнесено к длиннофокусным (мелким), если  $\psi_0 < \pi/2$ , или короткофокусным (глубоким), если  $\psi_0 > \pi/2$ . При  $\psi_0 = \pi/2$  зеркало называется средним.

### 2.7.3 Методика расчета параметров зеркальной антенны

Расчет начинается с определения параметров зеркала.

При заданном коэффициенте усиления  $G$  антенны радиус зеркала определяется с использованием соотношения [8]:

$$R_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{v\eta_A}}, \quad (2.92)$$

где  $\lambda$  - рабочая длина волны;

$v$  - коэффициент использования поверхности раскрыва. При использовании рупорных облучателей  $v \approx 0,5 \dots 0,6$ ;

$\eta_A$  - коэффициент полезного действия (КПД) антенны.

На рисунке 2.15 из [8] приведена зависимость величины КПД  $\eta_A$  от угла полуоткрытия антенны  $\psi_0$ . В реальных антеннах

## Устройства СВЧ и антенны

эффективность антенны, определяемая произведением  $v\eta_A$ , лежит в пределах от 0,45 до 0,60. Максимум эффективности, как следует из графика наблюдается при  $\psi_0 \approx 60^\circ$ .

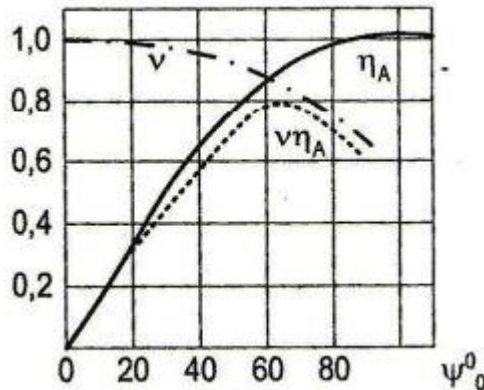


Рисунок 2.15. – Зависимость эффективности антенны от угла полураскрыва зеркала [8]

Фокусное расстояние вычисляется с использованием выражения [5]:

$$f = 0.5R_0 \operatorname{ctg}(\psi_0 / 2). \quad (2.93)$$

В том случае, если задана ширина диаграммы направленности антенны, то для выбора размеров зеркала можно воспользоваться данными таблицы 2.1.

Уравнение для образующей параболоида вращения в полярной системе координат может быть записано в виде [5]:

$$\rho(\psi) = 2f / (1 + \cos\psi). \quad (2.94)$$

Угловой размер  $2\psi_0$  и радиус  $R_0$  раскрыва зеркала связаны соотношением [5]:

Таблица 2.1 – Данные для выбора размеров зеркала антенны [8]

$R_0 / 2f$	$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_{0,5}$	Подавление УБЛ, дБ	
			H-пл.	E-пл.
0,4	$61\lambda / 2R_0$	$63\lambda / 2R_0$	-	-
0,6	$63\lambda / 2R_0$	$71\lambda / 2R_0$	16	20
0,8	$70\lambda / 2R_0$	$83\lambda / 2R_0$	24	25
1,0	$79\lambda / 2R_0$	$96\lambda / 2R_0$	27	26

## Устройства СВЧ и антенны

$$\sin \psi_0 = R_0 / \left( f \left( 1 + \left( \frac{R_0}{2f} \right)^2 \right) \right). \quad (2.95)$$

Глубина зеркала будет описываться соотношением:

$$h = R_0^2 / (4f). \quad (2.96)$$

На втором этапе рассчитываются параметры заданного типа облучателя. Диаграмма направленности должна обладать осевой симметрией с минимальным уровнем боковых лепестков. Фазовый центр облучателя располагается в фокусе зеркала. Облучатель должен минимально затенять зеркало.

При расчете параметров конического рупора (радиуса  $R_{к.р.}$  и длины  $L_{к.р.}^{опт}$ ) будем полагать, что на краях зеркала поле облучателя должно быть на уровне -10 дБ, т.е. уровень диаграммы направленности по мощности облучателя должен составлять 0,1, а по полю – 0,316. Учитывая вышесказанное, первое приближение радиуса рупора может быть найдено с использованием приближенной формулы [5]:

$$R_{к.р.} \approx 110\lambda / (4\psi_0). \quad (2.97)$$

Если после подстановки в описывающее характеристику направленности конического рупора соотношение

$$F_E(\psi) \cong F_H(\psi) \cong \frac{\left[ 1 + \cos \psi \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{1,84}{kR_{к.р.}} \right)^2} \right]}{\left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,84}{kR_{к.р.}} \right)^2} \right]} \cdot \frac{2J_1(u)}{u}, \quad (2.98)$$

где  $J_1(\cdot)$  - функция Бесселя первого порядка;

$R_{к.р.}$  - радиус раскрытия облучателя (конического рупора);

$$u = kR_{к.р.} \cdot \sin \psi,$$

Если уровень поля превышает требуемое значение в 0,316, то радиус рупора уточняется. Длина рупора определяется с использованием соотношения [19]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$L_{\text{к.р.}}^{\text{опт}} = \frac{(2R_{\text{к.р.}})^2}{2.4\lambda} - 0.15\lambda. \quad (2.99)$$

### 2.7.4 Соотношения для вычисления характеристики направленности

Диаграмма направленности может быть вычислена с использованием приближенной формулы [5]:

$$F(\theta) = \frac{2J(kR_0 \sin \theta)}{kR_0 \sin \theta}. \quad (2.100)$$

Более точную диаграмму направленности с учетом краевых эффектов, возникающих при дифракции поля облучателя на краях зеркала, можно рассчитать с использованием бесплатной студенческой версии программы *GRASP* разработанной компанией *Ticra* [20].

## 2.8 Расчет характеристики направленности цилиндропараболической зеркальной антенны с линейным вибраторным облучателем

### 2.8.1 Области применения цилиндропараболических антенн

Циллиндрикопараболические антенны являются частным случаем параболических зеркальных антенн. Их особенностью является возможность формирования диаграмм направленности различной ширины в главных плоскостях. Вследствие этого цилиндрикопараболические антенны нашли широкое применение в системах радиолокации, радиорелейной связи, в системах широкополосного доступа в Интернет.

### 2.8.2 Конструкция антенны

Конструкция антенны включает в себя два элемента: вырезку из параболического цилиндра, используемую в качестве рефлектора, и облучатель, расположенный вдоль фокальной линии рефлектора и формирующий цилиндрический фронт волны. Геометрия конструкции показана на рисунке 2.16.

Для данной конструкции в плоскости, проходящей через ось облучателя (фокальную ось), главный лепесток диаграммы

## Устройства СВЧ и антенны

направленности является более узким. Во взаимноперпендикулярной плоскости ширина главного лепестка определяется размером (шириной) параболического цилиндра.

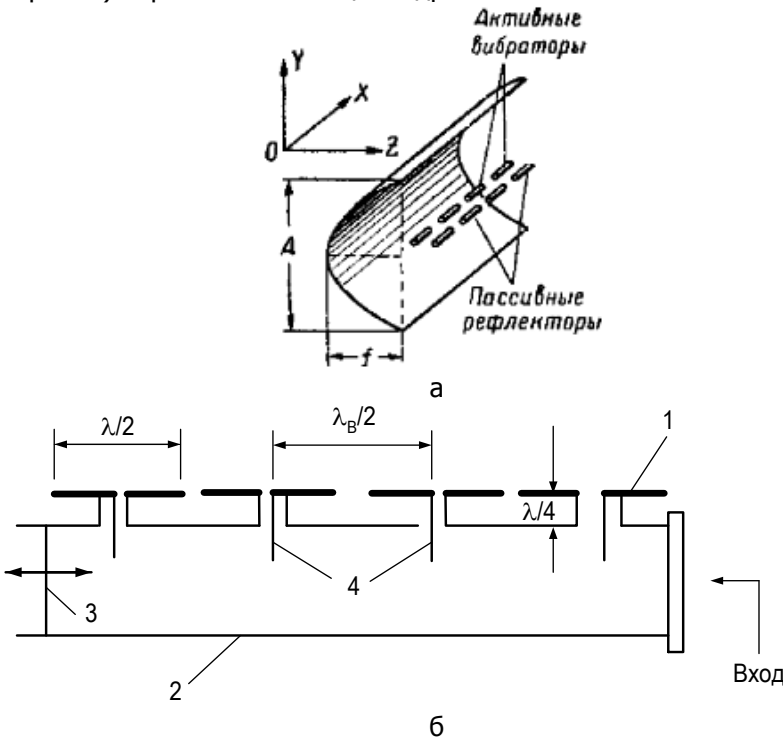


Рисунок 2.16. – Геометрия конструкции цилиндропараболической антенны:

1 – вибраторы; 2 – возбуждающий волновод; 3 – короткозамыкатель, устанавливаемый на конце волновода для настройки облучателя; 4 – приемные антенны (штыри), применяемые для отбора мощности и передачи ее на входы вибраторов

### 2.8.3 Методика расчета параметров цилиндропараболической антенны

На первом этапе расчетов определяются параметры фидерного тракта облучателя. Поскольку облучатель запитывается, как следует из рисунка 2.16, б, волноводом, то расчет осуществляется в два этапа. На первом находят ориентировочные размеры прямоугольного волновода [21]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$a' = \lambda / 1,4, \quad b' = (0,4..0,5)a'. \quad (2.101)$$

На втором этапе по найденным значениям подбирается стандартный размер волновода. Характеристики стандартных волноводов в сантиметровом диапазоне длин волн из [18] приведены в таблице Д.1.

Волновод с уточненными размерами проверяется на допустимую мощность:

$$P_{пред} = \frac{ab E_{кр}^2}{1,51} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}. \quad (2.102)$$

где  $E_{кр} = 30$  кВт/см.

Далее необходимо определить параметры решетки электрических вибраторов, образующих облучатель. Сначала рассчитывается число вибраторов в ряду [8]:

$$n = \left[ \frac{102^\circ}{2\theta_{0,5}^0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \right]. \quad (2.103)$$

В соотношении (2.103) квадратные скобки означают округление до ближайшего целого.

Далее вычисляется сопротивление излучения облучателя [8]:

$$Z_A = R_A + jX_A, \quad (2.104a)$$

$$\text{где } R_A = \sum_{p=1}^n \left( \sum_{q=1}^n R_{pq} - \sum_{q=1}^n R'_{pq} \right), \quad (2.104б)$$

$$X_A = \sum_{p=1}^n \left( \sum_{q=1}^n X_{pq} - \sum_{q=1}^n X'_{pq} \right) \quad (2.104в)$$

$R_{pq}, X_{pq}$  - взаимное активное и реактивное сопротивление между  $p$ -м и  $q$ -м вибраторами;

$R'_{pq}, X'_{pq}$  - взаимное активное и реактивное сопротивление между  $p$ -м и зеркальным изображением  $q$ -го вибратора.

Сопротивления  $Z_{pq} = R_{pq} + iX_{pq}$  и  $Z'_{pq} = R'_{pq} + iX'_{pq}$  могут быть найдены с использованием метода Стреттона-Чу [10]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$Z_{pq} = 30i \left\{ \left( 1 - \frac{\pi^2}{(2kl)^2} \right) E_{21}(kz_0, kz_2, a, b, d) + \frac{\pi}{2kl} E_{22}(kz_0, kz_2, a, b, d) \right\}, \quad (2.105)$$

где

$$E_{21} = \int_{-kl}^{kl} \sin(kl - |kz_0|) \int_{-kl+kd}^{kl+kd} \sin(kl - |kz_2 - kd|) G(kz_0, kz_2, a, b) dz_2 dz_0, \quad (2.106a)$$

$$E_{22} = \int_{-kl+kd}^{kl+kd} \sin(kl - |kz_2 - kd|) (G(kl, kz_2, a, b) + G(-kl, kz_2, a, b)) dz_2, \quad (2.106b)$$

$$G(kl, kz_2, a, b) = \frac{\exp(-i\sqrt{(kz - kz_2)^2 + b^2 + a^2})}{\sqrt{(kz - kz_2)^2 + b^2 + a^2}}. \quad (2.106b)$$

При нахождении  $Z'_{pq} = R'_{pq} + iX'_{pq}$  полагается, что расстояние между излучателями составляет  $0,5\lambda$ . Параметры, используемые в соотношениях (2.105) и (2.106), показаны на рисунке 2.17.

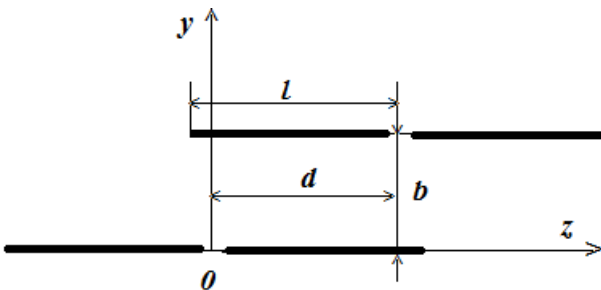


Рисунок 2.17 – Геометрия задачи о нахождении взаимных сопротивлений двух параллельных электрических вибраторов

По найденному значению сопротивления излучения и заданному значению мощности излучения определяют несложно определить радиус вибратора [8]:

$$r \geq (2..4) \frac{60}{E_{кр}} \sqrt{\frac{2P_{\Sigma}}{R_A}}. \quad (2.107)$$



## Устройства СВЧ и антенны

При малом значении допустимого радиуса толщину вибратора выбирают из условия механической прочности.

Далее рассчитывается волновое сопротивление вибратора [8]

$$W = 120 \left( \ln \frac{\ell_{\partial}}{r} - 1 \right), \quad (2.108)$$

в котором действующая длина вибратора  $\ell_{\partial}$  рассчитывается с учетом укорочения, обычно составляющего порядка 5%.

На втором этапе рассчитывается размер апертуры. Для этого рассчитывается диаграмма направленности облучателя в плоскости  $H$ :

$$F_{\text{обл}}(\varphi) = \sin \left( \frac{\pi}{2} \cos(\varphi) \right). \quad (2.109)$$

По диаграмме направленности рассчитывается амплитудное распределение тангенциальной составляющей напряженности поля в раскрыве антенны [8]:

$$E(\varphi) = F_{\text{обл}}(\varphi) \cos^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right). \quad (2.110)$$

По графику (2.110) определяется значение угла  $\varphi$ , при котором уровень напряженности поля составляет 0,316..0,447 (что по мощности будет соответствовать уровню 0,1) от уровня максимального излучения. Угол  $\varphi$  будет равен углу полуоткрыва  $\psi_0$  параболического зеркала.

Размер зеркала в плоскости  $H$  и фокусное расстояние параболического цилиндра рассчитываются с использованием соотношений:

$$L_H = \frac{68^\circ \lambda}{2\varphi_{0,5}^\circ}, \quad (2.111) \quad f = \frac{L_H}{4} \operatorname{ctg} \frac{\psi_0}{2}. \quad (2.112)$$

Форма сечения параболического отражателя может быть найдена с использованием выражения [10]:

$$y^2 = 4fx. \quad (2.113)$$

Длина параболического цилиндра равна

$$L_E = n \frac{\lambda_B}{2}. \quad (2.114)$$

### 2.8.4 Соотношения для вычисления характеристик направленности

Для нахождения диаграммы направленности в главных сечениях могут быть использованы соотношения [8]:

- в плоскости  $E$

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta\right) \sin\left(\frac{nk d}{2} \sin\theta\right)}{\cos\theta \sin\left(\frac{k d}{2} \sin\theta\right)}, \quad (2.115)$$

- в плоскости  $H$

$$F(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{k L_H}{2} \sin\varphi\right)}{\frac{k L_H}{2} \sin\varphi}, \quad (2.116)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число;

$$d = 0.5\lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad - \text{расстояние между излучателями в решетке;}$$

ми в решетке;

$\theta$  и  $\varphi$  - углы, отсчитываемые от перпендикуляра к плоскости раскрыва.

Коэффициент направленного действия антенны определяется формулой [8]:

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} L_H L_E \nu, \quad (2.116)$$

где  $\nu$  - коэффициент использования поверхности, обычно равный для зеркальных антенн 0,5..0,6.

Коэффициент полезного действия фидерного тракта может быть найден с использованием выражения [8]:

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2, \quad (2.117)$$

где коэффициент отражения находится по приближенной формуле

$$\Gamma = \frac{G_{обл}}{4\pi} \frac{\lambda}{f} \approx \frac{3}{4\pi} \frac{\lambda}{f}. \quad (2.118)$$

## 2.9 Расчет характеристики направленности линзовой антенны с замедляющей линзой и рупорным облучателем

### 2.9.1 Области применения линзовых антенн с замедляющей линзой

Линзовые антенны используются в диапазоне миллиметровых, сантиметровых волн и в коротковолновой части дециметрового диапазона в качестве средне- и высоконаправленных антенн. В связи с этим возможности применения их в технике СВЧ весьма разнообразны. Так, например, линзовые антенны, формирующие узкий игольчатый луч ДН, широко применяются в качестве антенных систем радиолокационных станций обнаружения и сопровождения. Цилиндрические линзовые антенны, позволяющие формировать веерную ДН, могут использоваться в доплеровских измерителях скоростей и сноса бортовых РЛС, а также в системах картографирования местности. Линзовые антенны с облучателями в виде решетки элементарных излучателей способны формировать многолучевые ДН. Такие антенны находят применение в бортовых системах искусственных спутников Земли и обеспечивают их связь с наземными станциями, позволяя осуществлять разделение каналов связи. Возможно применение линзовых антенн в комбинации с другими типами апертурных антенн, например, с зеркальными. В рупорных антеннах линзовые антенны применяются для компенсации квадратичной фазовой ошибки на раскрые рупора. При этом глубина рупора может быть значительно меньше оптимальной, что позволяет существенно уменьшить продольный размер антенны.

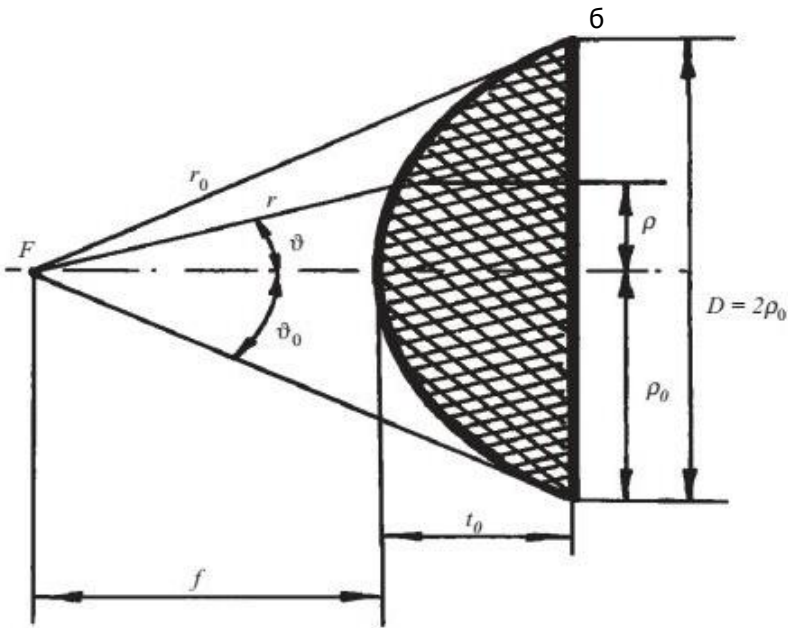
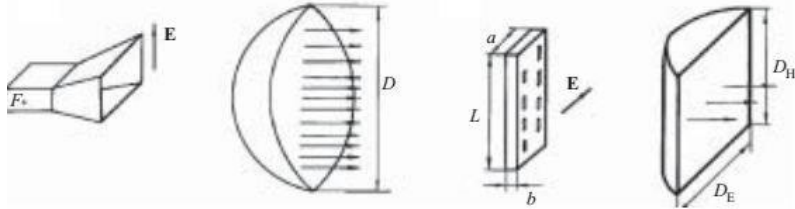
Основными недостатками линзовых антенн с диэлектрической линзой являются: частичное отражение волн от преломляющей поверхности линзы в сторону облучателя, большой вес и высокую стоимость изготовления.

### 2.9.2 Конструкция линзовой антенны

Принцип работы заимствован из оптики. Антенна состоит из двух основных элементов - облучателя и фокусирующей линзы. В качестве облучателя используются слабонаправленные излучатели (волноводные, рупорные, вибраторные, щелевые и др.). Линза может выполняться из диэлектрика с малыми потерями

Устройства СВЧ и антенны

ми, у которых коэффициентом преломления выбирается интервала  $1,1 < n < 1,5$ . Увеличение показателя преломления невыгодно, поскольку приводит к значительному увеличению коэффициента отражения на границе воздух-диэлектрик.



В

Рисунок 2.18. – Геометрия линзовых антенн с замедляющей линзой: *a* – с круглым сечением и облучателем в виде пирамидального рупора; *б* – с прямоугольным плоским излучающим раскрывом и линейного облучателя; *в* – геометрия профиля линзы

Замедляющая линза имеет выпуклый профиль по отношению к фронту падающей волны, как показано на рисунках 2.18, а-в из [8].

### 2.9.3 Методика расчета параметров антенны

#### 2.9.4.1 Порядок расчета параметров линзы.

Расчет начинается с выбора материала, из которого изготавливается линза и вычисления его показателя преломления:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}. \quad (2.119a)$$

Обычно выбирают материал, у которого величина относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon \approx 2 \dots 9$ , т.е. полистирол, полиэтилен, фторопласт и т.п., а величина относительной магнитной проницаемости  $\mu = 1$ . Потери в применяемых материалах, характеризуемые величиной тангенса угла диэлектрических потерь, не превышают  $\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-3} \dots 10^{-4}$ . Кроме того, наряду с чистым диэлектриком для изготовления замедляющей линзы может быть использован и метаматериал, представляющий собой пенистый диэлектрик с  $\varepsilon \approx 1$  (например, пенистый полистирол – пенопласт), в который впрессованы металлические элементы в виде дисков, лент и т.д. [22, 23]. Размеры этих включений намного меньше длины волны, а расстояние между ними значительно больше их размера, но существенно меньше длины волны. Для них показатель преломления рассчитывается по формуле [23]:

$$n = \sqrt{1 + N \frac{16R^3}{3}}, \quad (2.119б)$$

где  $N$  – количество включений в единице объема;

$R$  – радиус включений.

На втором шаге определяются размеры линзы. В объеме линзовая антенна с замедляющей линзой может быть реализована либо в виде диэлектрической сферы (линзы Люнеберга), либо цилиндра. При выборе типа линзы учитывают, что изготовление сферической линзы Люнеберга является сложной в техническом отношении задачей, поскольку внутри сферы показатель преломления не является постоянным, а изменяется по некоторому закону в зависимости от расстояния от центра.

## Устройства СВЧ и антенны

Обычно закон изменения показателя преломления подбирается таким образом, чтобы при прохождении линзы параллельные лучи фокусировались в одной точке на поверхности линзы, а испущенные точечным источником на поверхности формировали параллельный пучок. При конструировании цилиндрической линзы изменять фазовую скорость распространения колебаний можно не только с помощью изменения величины диэлектрической проницаемости, но и другими способами.

По заданным параметрам ширины главного лепестка диаграммы направленности размеры линзы в главных плоскостях рассчитываются с использованием соотношений [8]:

$$a_p \approx A^* \lambda / 2\theta_{0,5}, \quad b_p \approx A^* \lambda / 2\varphi_{0,5}, \quad (2.120)$$

где  $A^*$  - коэффициент, выбираемый из таблиц, приведенных в ПРИЛОЖЕНИИ Ж или ПРИЛОЖЕНИИ И, в зависимости от требований к формируемой диаграмме направленности и формы линзы (круглая или прямоугольная).

Далее выбирается фокусное расстояние линзы  $f$ :

$$f = (1,0 \dots 1,5)D, \quad (2.121)$$

где  $D = \sqrt{a_p^2 + b_p^2}$  - диаметр линзы. (2.122)

Для выбранного материала линзы и ее размеров рассчитывается величина коэффициента полезного действия (кпд):

$$\eta = \exp(-2\pi n \operatorname{tg} \delta^s D / \lambda) \quad (2.123)$$

и величину коэффициента усиления линзовой антенны:

$$G = \frac{16\pi a_p b_p}{\lambda^2} v \eta, \quad (2.124)$$

где  $v$  - коэффициент использования поверхности линзовой антенны. Данный коэффициент выбирается из таблиц, приведенных в ПРИЛОЖЕНИИ Ж или ПРИЛОЖЕНИИ И, в зависимости от требований к формируемой диаграмме направленности и формы линзы (круглая или прямоугольная).

Если величины КПД и коэффициента усиления не соответствуют техническому заданию, то для линзы выбирают другой материал. После чего повторяют расчеты, описанные выше.

Толщина линзы рассчитывается с использованием выражения [8]:

## Устройства СВЧ и антенны

$$t = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{D^2}{4(n^2-1)}}. \quad (2.125)$$

Профиль  $\rho(\vartheta)$  освещенной поверхности замедляющей линзы находится с использованием выражения:

$$\rho(\vartheta) = f \frac{n-1}{n \cos(\vartheta) - 1}. \quad (2.126)$$

Еще один из параметров линзовой антенны - угол раскрыва диэлектрической линзы  $\vartheta_0$  - зависит от диаграммы направленности излучателя и создаваемого им амплитудного распределения на раскрыве линзы  $A(\vartheta)$ . Требуется, чтобы на краю раскрыва линзы обеспечивался заданный уровень  $\Delta$  поля

$$\tilde{E}(\vartheta) = A(\vartheta) f_{обл}(\vartheta), \quad (2.127)$$

где  $f_{обл}(\vartheta)$  - диаграмма направленности облучателя;

$A(\vartheta)$  - распределение поля на раскрыве линзы.

Геометрия задачи показана на рисунке 2.19.

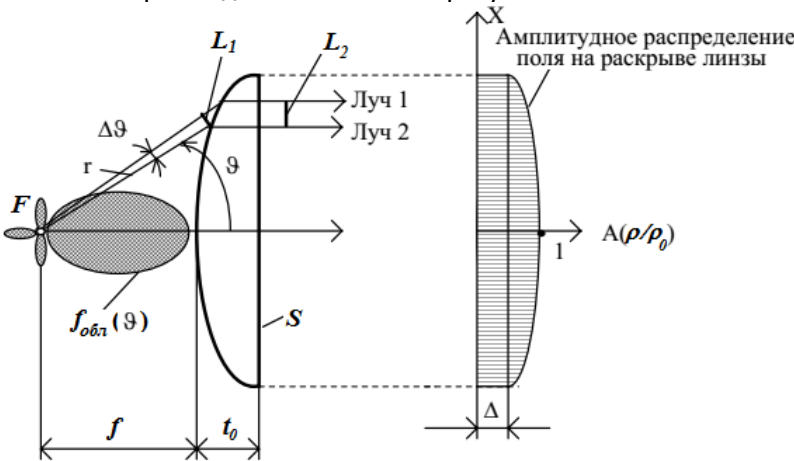


Рисунок 2.19. – Геометрия задачи определения амплитудного распределения на раскрыве замедляющей линзы

На данном рисунке показаны нормированное амплитудное распределение поля  $A(\vartheta)$  на раскрыве линзы, два луча (луч 1 и

## Устройства СВЧ и антенны

луч 2), разнесенные по углу  $\vartheta$  на величину  $\Delta\vartheta$ , а также линейные расстояния между лучами 1 и 2 до входа в линзу ( $L_1$ ) и после выхода ( $L_2$ ) из нее.

Входящее в соотношение (2.127) амплитудное распределение имеет вид:

- для сферической линзы:

$$A(\vartheta) = \sqrt{\frac{(n \cos(\vartheta) - 1)^3}{(n-1)^2(n - \cos(\vartheta))}}, \quad (2.128a)$$

- для цилиндрической линзы:

$$A(\vartheta) = \sqrt{\frac{(n \cos(\vartheta) - 1)^2}{(n-1)(n - \cos(\vartheta))}}. \quad (2.128б)$$

Непосредственно приведенные выше соотношения не позволяют аналитически представить уровень поля в раскрыве. В связи с этим воспользуемся вместо формулы (2.127) ее приближенной записью с помощью аппроксимационных полиномов:

- для круглого раскрыва (сферической) линзы:

$$\tilde{E}(\rho/\rho_0) = \Delta + (1 - \Delta) \left(1 - (\rho/\rho_0)^2\right)^p, \quad (2.129a)$$

- для прямоугольного раскрыва (цилиндрической) линзы:

$$\tilde{E}(\rho/\rho_0) = \Delta + (1 - \Delta) \cos^p \left( \frac{\pi}{2} (\rho/\rho_0) \right), \quad (p = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.129б)$$

Подставляя далее в соотношение (2.129б) координаты точки в раскрыве через уравнение профиля (2.126), несложно записать:

$$\Delta + (1 - \Delta) \cos \left( \frac{\pi \rho(\vartheta_0) \sin(\vartheta_0)}{2r} \right) = \Delta, \quad (2.130)$$

где  $r = a_p, b_p$  - размеры прямоугольной линзы;

$\Delta$  - величина пьедестала из распределения (2.130), соответствующая, как следует из анализа рисунка 2.19, уровню поля на краю линзы. После несложных преобразований уравнение (2.130) приобретает вид:



## Устройства СВЧ и антенны

$$\sin(\vartheta_0) = -r \frac{1 - n \cos(\vartheta_0)}{f(n-1)} \quad (r = a_p, b_p). \quad (2.131)$$

Решая данное уравнение графически для двух размеров прямоугольной линзы, в качестве угла раскрыва выбирают максимальное  $\vartheta_0$ . Далее строится графическая зависимость (2.126), являющаяся профилем линзы.

На следующем шаге определяется необходимость зонирования линзы. Зонирование применяют, если толщина линзы превышает длину волны в материале линзы. Принцип зонирования сводится к тому, что скачок фазы за счет сокращения пути луча в линзе в  $2\pi p$  ( $p = 1, 2, 3, \dots$ ) раз не нарушает коррекции фазового фронта на выходе линзы, как показано на рисунке 2.20.

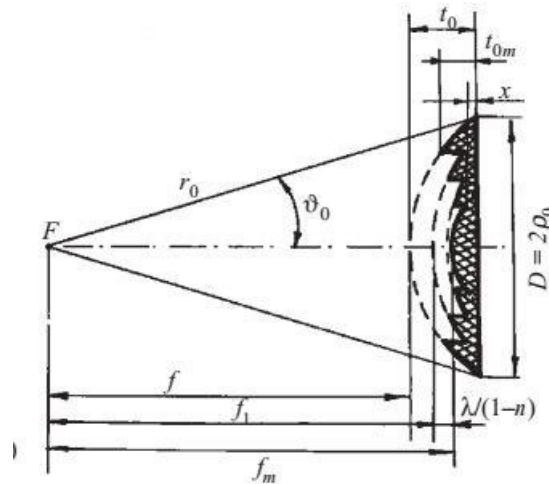


Рисунок 2.20. – Профиль зонированной диэлектрической линзы

Толщина зоны линзы определяется соотношением [8]:

$$t_i = \frac{\lambda}{n-1}. \quad (2.132)$$

Фокусное расстояние зонированной линзы для каждой зоны рассчитывается по формуле:

$$f_p = f + \frac{p\lambda}{n-1}. \quad (2.133)$$

## Устройства СВЧ и антенны

Угол раскрыва  $\vartheta_0$  для зонированной замедляющей линзы не изменится. Следует отметить, что существенными недостатками зонированной линзы являются сложность изготовления, а также некоторое ухудшение ее диапазонных свойств, поскольку фокусное расстояние у нее становится зависимым от частоты.

## 2.9.4.2 Порядок расчета параметров облучателя

Порядок расчета размеров облучателя линзовой антенны зависит от выбранного типа облучателя. В рассмотренном выше случае предполагалось, что размеры линзы в главных плоскостях различаются. В связи с этим в качестве облучателя линзы целесообразно использовать пирамидальный рупор.

Определим геометрические размеры рупорного облучателя, питаемого волноводом с волной типа  $H_{10}$ . Конструкция такого облучателя представлена на рисунке 2.21.

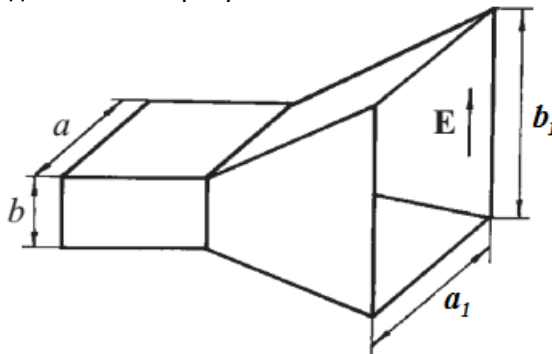


Рисунок 2.21. – Геометрия конструкции облучателя в виде пирамидального рупора

Параметрами, подлежащими определению, являются три параметра:

- размер раскрыва рупора в плоскости  $H$   $a_1$ ;
- размер раскрыва рупора в плоскости  $E$   $b_1$ ;
- оптимальная длина рупора  $L$ .

Размеры  $a$  и  $b$  волновода, питающего пирамидальный рупорный облучатель, выбираются исходя из условия распространения в волноводе волны основного типа  $H_{10}$ . Справочные данные по размерам прямоугольного волновода приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Д.

## Устройства СВЧ и антенны

Для нахождения размеров раскрыва преобразуем уравнение (2.127) с учетом вида распределения поля (2.128а) и диаграмм направленности рупорного облучателя [22]:

$$f_{обл}^E(\vartheta) = \frac{1 + \cos(\vartheta)}{2} \frac{\sin(0.5kb_1 \sin(\vartheta))}{0.5kb_1 \sin(\vartheta)}, \quad (2.134а)$$

$$f_{обл}^H(\phi) = \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \frac{\cos(0.5ka_1 \sin(\phi))}{1 - \left(\frac{2}{\pi} 0.5ka_1 \sin(\phi)\right)^2}. \quad (2.134б)$$

В результате получаем:

- для  $E$ -плоскости:

$$\begin{aligned} & \frac{1 + \cos(\vartheta_0)}{2} \frac{\sin(0.5kb_1 \sin(\vartheta_0))}{0.5kb_1 \sin(\vartheta_0)} \times \\ & \times \sqrt{\frac{(n \cos(\vartheta_0) - 1)^3}{(n - 1)^2 (n - \cos(\vartheta_0))}} = \Delta, \end{aligned} \quad (2.135а)$$

- для  $H$ -плоскости:

$$\begin{aligned} & \frac{1 + \cos(\vartheta_0)}{2} \frac{\cos(0.5ka_1 \sin(\vartheta_0))}{1 - \left(\frac{2}{\pi} 0.5ka_1 \sin(\vartheta_0)\right)^2} \times \\ & \times \sqrt{\frac{(n \cos(\vartheta_0) - 1)^3}{(n - 1)^2 (n - \cos(\vartheta_0))}} = \Delta. \end{aligned} \quad (2.135б)$$

Решая уравнения (2.135) графически, несложно определить размеры  $a_1$  и  $b_1$  пирамидального рупора. Поскольку уравнения решались графически, то необходимо решение уточнить путем построения распределения поля на раскрыве рупора. Для этого строятся графики функций, описываемых выражениями (2.127) и (2.129б). Размер рупора уточняется с целью обеспечения требуемого уровня на краю раскрыва рупора.

Далее определяется оптимальная длина рупора[22]:

$$L_{онм}^E = \frac{b_1^2}{2\lambda}, \quad (2.136а) \quad L_{онм}^H = \frac{a_1^2}{3\lambda}, \quad (2.136б)$$

$$L_{онм} = \max(L_{онм}^E, L_{онм}^H). \quad (2.139в)$$

### 2.9.4 Соотношения для вычисления характеристик направленности

Для рассчитанных параметров рупорного облучателя осуществляется вычисление диаграммы направленности линзовой антенны с диэлектрической замедляющей линзой. В главных плоскостях выражения для диаграммы направленности зависят от формы линзы и имеют следующий вид [22].

Для сферической линзы:

$$F(\vartheta) = \frac{1 + \cos \vartheta}{2} \left\{ \Delta \Lambda_1(U) + \frac{1 - \Delta}{p + 1} \Lambda_{p+1}(U) \right\} \frac{1}{\Delta + \frac{1 - \Delta}{p + 1}}, \quad (2.140)$$

где  $U = 0,5kD \sin(\vartheta)$ ;

$\Lambda_{p+1}(\cdot)$  - лямбда-функция  $(p+1)$ -го порядка.

Для прямоугольного раскрыва линзовой антенны выражение для вычисления диаграммы направленности зависит от вида амплитудного распределения:

- при  $p = 1$  и  $\Delta \neq 0$ :

$$F(\vartheta) = \frac{1 + \cos \vartheta}{2} \left\{ \Delta \frac{\sin(U)}{U} + \frac{2(1 - \Delta)}{\pi} \frac{\cos(U)}{1 - \left(\frac{2U}{\pi}\right)^2} \right\} \times \\ \times \frac{1}{\Delta + \frac{2(1 - \Delta)}{\pi}}, \quad (2.1416)$$

- при  $p = 2$  и  $\Delta \neq 0$ :

$$F(\vartheta) = \frac{1}{1 + \Delta} \left\{ \frac{(1 + \Delta) \sin(U)}{U} - \frac{(1 - \Delta) \sin(U)}{U^2 - \pi^2} \right\}, \quad (2.141в)$$

- при  $p = 2m$ , где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  и  $\Delta = 0$ :

## Устройства СВЧ и антенны

$$F(\vartheta) = \frac{2p! \frac{\sin(U)}{U}}{\prod_{v=0}^m \left\{ (2v)^2 - \frac{4U^2}{\pi^2} \right\}}, \quad (2.141r)$$

- при  $p = 2m + 1$ , где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  и  $\Delta = 0$ :

$$F(\vartheta) = \frac{4}{\pi} \frac{p! \cos(U)}{\prod_{v=0}^m \left\{ (2v + 1)^2 - \frac{4U^2}{\pi^2} \right\}}. \quad (2.141r)$$

В соотношениях (2.141)  $U = 0,5kr \sin(\vartheta)$ , где  $r = a_1, b_1$ , т.е. вместо диаметра круглой линзы берется размер прямоугольного излучающего раскрыва линзы в соответствующей плоскости.

Относительная погрешность ширины рассчитанной диаграммы направленности составляет:

$$\delta\vartheta = \frac{|2\vartheta_{0,5p} - 2\vartheta_{0,5}|}{2\vartheta_{0,5}} \leq 5\%. \quad (2.142)$$

В том случае, когда величина относительной погрешности ширины ДН превышает 5%, то корректируется множитель  $p$  в соотношениях (2.130).

## 2.10 Расчет характеристики направленности линзовой антенны с ускоряющей цилиндрической линзой и облучателем в виде линейки вибраторов

### 2.10.1 Области применение линзовых антенн с ускоряющей линзой

В сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн нашли применение ускоряющие металлопластинчатые линзы. Одним из наиболее широких областей применения является их применение в рупорных антеннах для уменьшения длины антенны и преобразования сферического фронта волны в плоский, а также формирования узкой диаграммы направленности.

### 2.10.2 Конструкция антенны

Линзовые антенны с ускоряющей линзой выполняются в виде набора тонких параллельных металлических пластин, расположенных на расстоянии  $a$  друг от друга, как показано на рисунке 2.22.

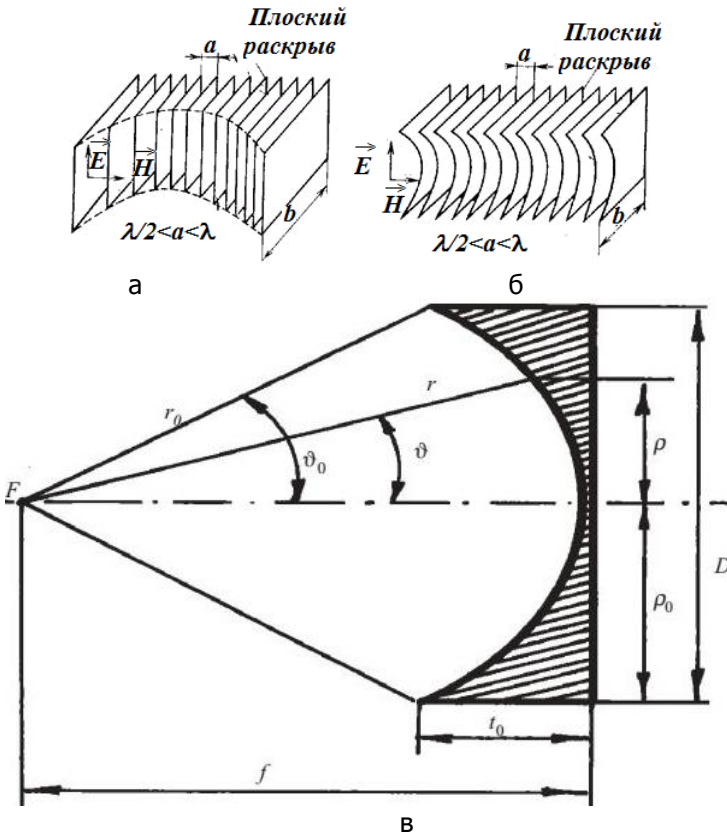


Рисунок 2.22. – Геометрия линзовой антенны с ускоряющей линзой:  $a$  –  $H$ -линза;  $b$  –  $E$ -линза;  $v$  – профиль линзы

Если профиль линзы расположен в плоскости  $H$  электромагнитного поля, как показано на рисунке 2.22, $a$ , то линза называется  $H$ -линзой. Если же профиль расположен в плоскости  $E$ , как продемонстрировано на рисунке 2.22, $b$ , то линза называется  $E$ -линзой. В объеме линзовая антенна с профилем, показанным на рисунках 2.22, $a$ ,  $b$ , может быть реализована в виде цилиндриче-

ской структуры. Профиль линзы для обоих случаев показан на рисунке 2.22, в. Цилиндрическая линза сужает диаграмму направленности только в плоскости вектора  $\vec{E}$ . Такая линза может быть выполнена из непрофилированных прямоугольных пластин разной ширины. Облучатель может быть линейным. Во второй плоскости линза не фокусирует, поэтому диаграмма направленности в этой плоскости определяется диаграммой направленности облучателя. При этом размер раскрыва линзы в данной плоскости берется на 15-20% больше длины облучателя вдоль данной оси.

В качестве линейных облучателей используются секториальные рупоры и линейные антенные решетки. Для того, чтобы линза сужала диаграмму направленности в обеих плоскостях одновременно, применяется сферическая линза в виде части поверхности эллипсоида, профилированной в обеих плоскостях. Облучателем служит источник сферической волны, например, пирамидальный рупор.

Выравнивание фронта волны осуществляется за счет того, что участки волновой поверхности часть своего пути проходят в линзе с повышенной фазовой скоростью. Эти участки пути различны для разных лучей. Чем сильнее луч отклонен от оси линзы, тем больший участок пути он проходит с повышенной фазовой скоростью внутри линзы. Таким образом, профиль ускоряющей линзы должен быть вогнутым по отношению к фронту падающей волны. Выходной раскрыв линзы, как правило, делается плоским.

В соответствии с заданием в качестве облучателя используется линейка синфазных вибраторов, как показано на рисунках 2.23, а, б. В связи с этим линза является цилиндрической, а ее диаграмма направленности в  $H$ -плоскости определяется диаграммой направленности облучателя. На рисунке 2.23, б показано, что в качестве облучателя применяется линейная система электрических симметричных вибраторов, запитываемых посредством прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$ .

### 2.10.3 Методика расчета параметров антенны

Линзовые антенны относятся к апертурным, следовательно, их характеристики направленности зависят от распределения поля на раскрыве линзы.

## Устройства СВЧ и антенны

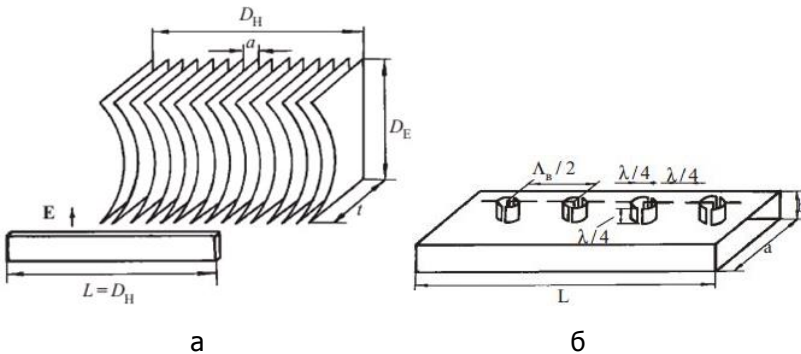


Рисунок 2.23. – Геометрия конструкции линзовой антенны:  
*а* – общая конструкция антенны; *б* – конструкция облучателя

В связи с этим прежде, чем приступать к расчету геометрических параметров конструкции необходимо на основе данных таблиц, приведенных в ПРИЛОЖЕНИЯХ Ж и И, выбрать по требуемым параметрам уровня первых боковых лепестков степень аппроксимирующего полинома  $p$ , уровень поля на краю раскрыва  $\Delta$ , значение коэффициента  $A^*$ , а также величину коэффициент использования поверхности  $\nu$ .

После этого начинают расчет геометрических параметров антенны. Сначала необходимо определить число вибраторов в облучателе  $i$ , соответственно, размер линзы  $D_H$  в плоскости  $H$ . При расчете размеров будем использовать условие обеспечения ширины главного лепестка в плоскости  $H$ . Используя принцип получения остронаправленного излучения, связывающий ширину главного лепестка  $D_H$  с размером раскрыва [24], а также учитывая дискретность системы облучателей можно записать выражение, описывающее диаграмму направленности системы  $N$  синфазных излучателей:

$$f_{obl}(\varphi) = \frac{\sin(Nkd \sin(\varphi))}{N \sin(kd \sin(\varphi))}, \quad (2.143)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число свободного пространства;

$$d = 0.5\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \quad - \text{расстояние между vibra-}$$



## Устройства СВЧ и антенны

торами в линейке, равное половине длины волны в питающем волноводе;

$\lambda_{кр}$  - критическая длина в питающем волноводе, выбираемая из таблицы ПРИЛОЖЕНИЯ Д для волновода, обеспечивающего на заданной частоте распространение только волны основного типа  $H_{10}$ .

Подставляя в соотношение (2.143) рассчитанные значения волнового числа и расстояния между излучателями в линейке, найденное из таблицы значение критической длины в волноводе, а также величину  $0.5(2\Delta\varphi_{0.5}^H)$  - половину заданной ширины главного лепестка диаграммы направленности в плоскости  $H$ , измеренной по уровню поля 0,707, несложно графически вычислить количество элементов облучателя  $N$ .

По известному значению  $N$  вычисляем размер облучателя, а, следовательно, и размер линзы в плоскости  $H$ :

$$L_{обл} = (N + 1)d, \quad (2.144a) \quad D_H = (1.15..1.20)L_{обл}. \quad (2.144б)$$

Размер раскрыва линзы в плоскости  $E$  рассчитывается по формуле:

$$D_E = \frac{\lambda A^*}{2\Delta\varphi_{0.5}^E}, \quad (2.145)$$

где  $A^*$  - коэффициент (град), учитывающий закон распределения амплитуды поля на излучающем раскрыве и выбираемый для прямоугольной линзы из таблицы, приведенной в ПРИЛОЖЕНИИ И.

Далее осуществляется расчет показателя преломления линзы, образованной из совокупности параллельно расположенных металлических пластин, удаленных на расстояние  $a_1$  друг от друга. При расчетах полагают, что  $0,58 \leq a_1/\lambda \leq 0,7$ . Это обеспечивает получение показателя преломления линзы

$$n = \sqrt{1 - (\lambda/2a_1)^2} \quad (2.146)$$

в интервале значений  $n \approx 0,5..0,7$ .

Далее выбирается фокусное расстояние линзы  $f$  рассчитывается по формуле:

## Устройства СВЧ и антенны

$$f > \frac{\sqrt{D_E^2 + D_H^2}}{2} \sqrt{\frac{1+n}{1-n}}. \quad (2.147)$$

Толщина линзы рассчитывается с использованием выражения [8]:

$$t = \frac{f}{n+1} - \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{D_E^2}{4(n^2-1)}}. \quad (2.148)$$

Угол раскрыва диэлектрической линзы определяется формулой:

$$\vartheta_0 = 2 \arctg\left(2t \frac{1-n}{D_E}\right). \quad (2.149)$$

Профиль  $\rho(\vartheta)$  (угол  $\vartheta$  изменяется от 0 до  $\vartheta_0$ ) освещенной поверхности замедляющей линзы находится с использованием выражения:

$$\rho(\vartheta) = f \frac{1-n}{1-n \cos(\vartheta)}. \quad (2.150)$$

Поле на раскрыве прямоугольной линзы  $A(\vartheta)$  описывается выражением:

$$A(\vartheta) = \sqrt{\frac{(1-n \cos(\vartheta))^2}{(1-n)(\cos(\vartheta)-n)}}. \quad (2.151)$$

Далее строится графическая зависимость (2.151), являющаяся профилем линзы.

Наконец, рассчитывается длина  $L$  вибратора, обеспечивающее требуемый уровень  $\Delta$  поля на краю линзы, т.е. при максимальном угле ее раскрыва  $\vartheta_0$ . Для этого воспользуемся соотношением

$$A(\vartheta) f_{обл}^E(\vartheta) = \Delta, \quad (2.152)$$

где  $f_{обл}^E(\vartheta) = \frac{\cos(kL \sin(\vartheta))}{\cos(\vartheta)}$  - диаграмма направленности

вибратора в свободном пространстве.

Решая уравнение (2.152) относительно  $L$ , несложно получить:

$$L/\lambda = \frac{\arccos\left(\frac{\Delta \cos(\vartheta_0)}{A(\vartheta_0)}\right)}{2\pi \sin(\vartheta_0)}. \quad (2.153)$$

### 2.10.4 Соотношения для вычисления характеристики направленности

Вычисление диаграммы направленности линзовой антенны с ускоряющей линзой в плоскости  $E$  осуществляется с использованием соотношений (2.141). В плоскости  $H$  диаграмма направленности рассчитывается с использованием формулы:

$$F(\varphi) = \frac{\sin(Nkd \sin(\varphi)) \cos(kL \sin(\vartheta))}{N \sin(kd \sin(\varphi)) \cos(\vartheta)} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos(\varphi)\right). \quad (2.154)$$

Последний множитель в (2.154) учитывает отражение поля от верхней стенки питающего волновода облучателя.

Далее строятся главные сечения диаграммы направленности и вычисляется погрешность расчетов с использованием соотношения (2.142). Если погрешность расчетов превышает 5%, то выбираются другие параметры амплитудного распределения из таблицы, приведенной в ПРИЛОЖЕНИИ Ж, и повторяется описанный выше расчет.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила оформления и требования к содержанию курсовых проектов (работ) и выпускных квалификационных работ». Ростов н/Д, 2015. Введено в действие приказом ректора ДГТУ №227 от 30.12.2015.
2. ГОСТ Р 7.05-2008 СИБИД. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила оформления.
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш.шк., 1988. 432 с.
4. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский [и др.]. М. Радио и связь, 1989. 352 с.
5. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2008. 384 с.
6. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Дробкин [и др.]. М.: Сов. Радио, 1974. 536 с.
7. Коротковолновые антенны / под ред. Г.З. Айзенберга. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
8. Нечаев Е.Е. Антенны и устройства СВЧ. М.: МГТУ ГА, 2008. 104 с.
9. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М.: Связь, 1975. 126 с.
10. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М: Наука, 1979. 832 с.
11. Петров Б.М., Костромитин Г.И., Горемыкин Е.В. Логопериодические вибраторные антенны. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 239 с.
12. Ротхаммель К. Антенны. Т.1. М.: Изд-во Лайт-ЛТД, 2007. 410 с.
13. Ільницький Л.Я., Щербина О.А., Мацюк К.М. Синтез логоперіодичної антени // Електроніка та системи управління. 2009. №4(22). С.136-140.
14. Продукция фирмы *SCHWARZBECK*: [Электронный ресурс]: URL: <http://www.tehcom.com/Companies/Schwarzbeck/Schwarzbeck.htm> (дата обращения 23.02.2016г.).
15. Программа для расчета логопериодической антенны: [Электронный ресурс]: URL: <http://forum.cxem.net/index.php?showtopic=120755> (дата обращения: 25.02.2016г.)
16. Программа моделирования антенн MMANA-GAL basic

## Устройства СВЧ и антенны

- 3.0.0.30: [Электронный ресурс]: URL: <http://www.radio.ru/mmana/> (дата обращения: 24.02.2016г.)
17. Антенны УКВ / под ред. Г.З. Айзенберга. В 2-х ч. Ч.2. М.: Связь, 1977. 288 с.
18. ГОСТ 209000-75. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия.
19. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн. М.: Радио и связь, 1984. 208 с.
20. GRASP: [Электронный ресурс]: URL: <http://www.ticra.com/products/software/grasp>. (дата обращения: 14.03.2016)
21. Бекетов В.И. Антенны сверхвысоких частот. М.: Рипол Классик, 2013. 128 с.
22. Федорова Л.А., Мельникова А.Ю. Расчет и проектирование линзовых антенн: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2002. - 33 с.: [Электронный ресурс]: URL: <http://window.edu.ru/resource/692/44692/files/2002-0122-0-02.pdf> (дата обращения: 18.03.2016).
23. Юрцев О.А. Резонансные и апертурные антенны. Ч.2: Метод. пособие по курсу «Антенны и устройства СВЧ». Минск: 2000. – 89 с.
24. Никольский В.В., Никольская Т.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978. – 544 с.

Устройства СВЧ и антенны

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ВЕДОМОСТИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

№ строки	Формат	Обозначения	Наименования	Код. документа	№ экз.	Прим.
1я	я	я	я	я	я	я
2я	я	я	Документация общая	я	я	я
3я	я	я	я	я	я	я
4я	я	я	Вновь разработанная	я	я	я
5я	я	я	я	я	я	я
6я	А4я	СВЧА.010000.000-ПЗя	Пояснительная записка	19я	я	я
7я	я	я	я	я	я	я
8я	я	я	я	я	я	я
9я	я	я	я	я	я	я
10я	я	я	я	я	я	я
11я	я	я	я	я	я	я
12я	я	я	я	я	я	я
13я	я	я	я	я	я	я
14я	я	я	я	я	я	я
15я	я	я	я	я	я	я
16я	я	я	я	я	я	я
17я	я	я	я	я	я	я
18я	я	я	я	я	я	я
19я	я	я	я	я	я	я
20я	я	я	я	я	я	я
21я	я	я	я	я	я	я
22я	я	я	я	я	я	я
23я	я	я	я	я	я	я
24я	я	я	я	я	я	я
25я	я	я	я	я	я	я
26я	я	я	я	я	я	я
27я	я	я	я	я	я	я
28я	я	я	я	я	я	я
		<b>СВЧА.010000.000-КРя</b>				
		Расчет спаренной антенны по заданному коэффициенту направленного действия				
		Ведомость работя				
		ДТУя кафедры РЭТя				



## ПРИЛОЖЕНИЕ В ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАНИЯ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
 ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 (ДГТУ)

Факультет	Транспорт, сервис и эксплуатация (наименование факультета)
Кафедра	Радиоэлектроника (наименование кафедры)

Зав. кафедрой	Радиоэлектроника
	Звездина М.Ю.
(подпись)	(И.О.Ф.)
<< >>	201_ г.

### ЗАДАНИЕ на курсовую работу

Студент \_\_\_\_\_ Код СВЧА.01000.000 КР \_\_\_\_\_ Группа \_\_\_\_\_

Тема **РАСЧЕТ СТЕРЖНЕВОЙ АНТЕННЫ ПО ЗАДАННОМУ КОЭФФИЦИЕНТУ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ**

Срок представления работы к защите «\_» \_\_\_\_\_ 201\_ г.

Исходные данные для курсовой работы

Рассчитать приемо-передающую стержневую диэлектрическую антенну линейной  
поляризации с возбудителем в виде круглого волновода при следующих исходных  
данных: коэффициент направленного действия 40, длине волны на средней частоте  
3.5 см и ширине частотного диапазона 20%. Подводимая к антенне средняя мощность  
 $P_a=100$  Вт



## Устройства СВЧ и антенны

Содержание пояснительной записки

**ВВЕДЕНИЕ:**

Анализ областей применения стержневых диэлектрических антенн, их достоинства и недостатки

1 Разделы основной части:

1.1 Выбор материала стержня (направителя) и его формы.

1.2 Определение геометрических параметров направителя и возбuditеля

1.3 Расчет ДН антенны и ширины ее главного лепестка в главных плоскостях на нижней, средней и верхней частотах

1.4 Определение КПД антенны, потерь мощности в ней, а также ее КНД, КУ и шумовой температуры на нижней, средней и верхней частотах

1.5 Исследование зависимости формы ДН от потерь в материале стержня и потерь на излучение

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

Результаты сравнения характеристик направленности стержневой диэлектрической антенны

в заданном частотном диапазоне, а также зависимости ее формы от потерь в материале стержня и потерь на излучение

Перечень графического материала

Схема антенны

ДН в главных плоскостях на верхней и нижней частотах

Руководитель работы	подпись, дата	И.О.Ф.
Задание принял к исполнению	подпись, дата	И.О.Ф.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ *LOGANT*

## Устройства СВЧ и антенны

Программа *LogAnt*, предложенная в работе [15], является программой свободного доступа и представляет собой выполняемый модуль объемом 1892 Кб, функционирующий под операционной системой *Windows XP* и выше.

Исходными данными для проектирования ЛПВА являются:

- минимальная частота рабочего диапазона антенны  $f_{\min}$  ;
- процент возможного ухода минимальной частоты;
- максимальная частота рабочего диапазона антенн  $f_{\max}$  ;
- безразмерный параметр структуры  $\tau$  ;
- междурядный коэффициент (относительное расстояние между вибраторами)  $\sigma$  .

Возможность провести расчеты для оптимального значения междурядного коэффициента  $\sigma_{opt}$  .

Выходными данными являются:

- угол раскрытия антенны  $\alpha$  ;
- количество вибраторов в антенне;
- длины вибраторов  $l_n$ , м;
- расстояние между вибраторами  $S_n$ , м;
- сопротивление фидера, Ом;
- диаметр проволочного вибратора, мм;
- диаметр перемычки, мм.

Кроме того, конструктивные параметры антенны могут быть преобразованы во входные данные конструкции для программы *MMANA-GAL*.

Окно программы *LogAnt* для частного случая расчетов приведено на рисунке Г.1. Следует отметить, что в окне выходных данных не все рассчитанные параметры поместились в фиксированный размер окна, о чем свидетельствует положение полоска.

## Устройства СВЧ и антенны

**LogAnt (logo-periodic antennas calculator)**

**Input data**

F min, MHz	470
Correction F min, %	5
F max, MHz	790
Design Constant (Tau)	0.82
Relative Spacing (Sigma)	0.1494

Sigma optimum

**Output Data:**

Alpha = 33.5 Degrees  
 A = 0.39421 m  
 En = 7.184 Dipoles  
 Accept N = 8 Dipoles  
 Length of the dipoles, m:  
 L1 = 0.3359  
 L2 = 0.2755  
 L3 = 0.2259  
 L4 = 0.1852  
 L5 = 0.1519  
 L6 = 0.1245  
 L7 = 0.1021  
 L8 = 0.08375  
 The distance between the dipoles, m:  
 S0 = 0.08399  
 S1 = 0.1004  
 S2 = 0.08231  
 S3 = 0.0675  
 S4 = 0.05535  
 S5 = 0.04538  
 S6 = 0.03722

**Graph:** Relative Spacing  $\sigma$  vs Design Constant  $\tau$ . Curves for gain: 6.0 dBi, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 10.0, 10.5 dBi. Optimum  $\sigma$  is marked.

**Schematic:** Shows a log-periodic antenna with a feed loop (D loop), dipoles (D dipole), and dimensions: Alpha, A, L<sub>i</sub>, L<sub>i+1</sub>, S<sub>i</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>0</sub>.

**Export data**

Exports to MMANA	Numbers of dipoles	8	Diameter loop wire, mm	1.6	X-X size, mm	27
	Impedance, Ohm	100	Diameter dipole wire, mm	1.6	<input type="button" value="About"/>	<input type="button" value="Exit"/>

Рисунок Г.1 – Диалоговое окно программы LogAnt [15]

Достоверность результатов, получаемых с использованием программы *LogAnt*, была оценена путем сравнения данных, найденных для известной конструкции телевизионной антенны для 21-60 каналов из [12] двумя способами: с помощью исследуемой программы и с помощью программы, разработанной в языковой среде *MathCad* на основе соотношений из п.2.5.3. Результаты вычислений приведены в таблице Г.1. Антенна, для которой проводились исследования, имела 6 излучателей и обеспечивала коэффициент усиления от 4 до 4 дБи. Рабочий диапазон частот составлял 470..790 МГц. По заданному значению коэффициенту усиления в соответствии с графиком 2.12 были выбраны параметры ЛПВА  $\tau = 0.86$  и  $\sigma = 0.05$ .

## Устройства СВЧ и антенны

Таблица Г.1 - Сравнение результатов вычисления конструктивных параметров ЛПВА, полученных с использованием различных программ

Наименование параметра	Результаты численного моделирования		Характеристики реальной ЛПВА
	в программе <i>MathCad</i>	в программе <i>LogAnt</i>	
Число вибраторов	6	6	6
Ширина узкой части, м	0,135	0,1348	0,14
Длина антенны до коррекции, м	0,1133	0,1133 4	-
Длина антенны с учетом шлейфа, м	0,198	0,19	0,19
Длины вибраторов антенны, м	0,322 0,271 0,227 0,191 0,161 0,135	0,3224 0,2708 0,2275 0,1911 0,1605 0,1348	-

Анализ данных таблицы Г.1 показывает, что получаемые в обеих программах результаты расчетов конструктивных параметров антенны, во-первых, практически совпадают между собой и, во-вторых, совпадают с параметрами реальной логопериодической антенны, применяемой для приема телевизионных сигналов на 21-60 каналах вещания. Таким образом, программа *LogAnt* может быть использована как для нахождения параметров ЛПВА, так и для преобразования конструктивных размеров антенны в формат программы *MMANA-GAL*.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### РАЗМЕРЫ СТАНДАРТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Таблица Д.1 – Размеры стандартных прямоугольных волноводов для волны  $H_{10}$  [18]

Обозначение волновода	Диапазон частот для основного типа волн, ГГц		Внутренние размеры, мм		Средняя длина волны $\lambda_{cp}$ , см	Критическая длина волны $\lambda_{кр}$ , см
	$f_{min}$	$f_{max}$	$a$	$b$		
МЭК-26	2,17	3,30	86,36,	43,18	11,5	17,3
МЭК-32	2,60	3,95	72,14	34,04	9,4	14,4
МЭК-40	3,22	4,90	57,17	29,083	7,5	11,6
МЭК-48	3,94	5,99	47,55	22,149	6,3	9,5
МЭК-58	4,64	7,05	40,39	20,193	5,2	8,0
МЭК-70	5,38	8,17	34,85	15,799	4,3	7,0
МЭК-81	6,57	9,99	28,499	12,624	3,7	5,7
МЭК-100	8,20	12,5	22,860	10,160	3,0	4,6
МЭК-120	9,84	15,0	19,050	9,525	2,5	3,8
МЭК-140	11,9	18,0	15,799	7,899	2,2	3,2
МЭК-180	14,5	22,0	12,954	6,477	1,7	2,6
МЭК-220	17,6	26,7	10,668	4,318	1,4	2,1
МЭК-260	21,7	33,0	8,636	4,318	1,2	1,7
МЭК-320	26,4	40,0	7,112	3,556	0,9	1,4
МЭК-400	32,9	50,1	5,690	2,845	0,75	1,1
МЭК-500	39,2	59,6	4,775	2,388	0,6	0,96
МЭК-620	49,8	75,8	3,759	1,880	0,48	0,76
МЭК-740	60,5	91,9	3,099	1,549	0,4	0,6
МЭК-900	73,8	112	2,540	1,270	0,33	0,5

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### СВОДКА ФУНКЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КРУГЛОЙ АПЕРТУРЫ

Вид аппроксимирующей функции

$$\tilde{E}(\rho/\rho_0) = \Delta + (1 - \Delta) \left(1 - (\rho/\rho_0)^2\right)^p$$

Степень аппроксимирующей функции $p$	Уровень поля на краю раскрыва, $\Delta$	Коэффициент $A^*$ , град	Уровень первого бокового лепестка, дБ	Коэффициент использования поверхности, $v$
$p = 1$	0	72,763	-24,639	0,7499
	0,2	67,274	-23,422	0,8709
	0,4	63,959	-21,478	0,9423
	0,6	61,744	-19,829	0,9796
	0,8	60,159	-18,555	0,9959
$p = 2$	0	84,397	-30,609	0,5556
	0,2	70,516	-31,716	0,7928
	0,4	65,003	-24,632	0,9184
	0,6	62,056	-20,997	0,9742
	0,8	60,221	-18,915	0,9952
$p = 3$	0	94,642	-35,960	0,4375
	0,2	71,444	-34,481	0,7567
	0,4	64,936	-26,919	0,9127
	0,6	61,829	-21,498	0,9744
	0,8	60,124	-19,021	0,9956
$p = 0$ (постоянный закон)	1,0	60,0	-17,6	1,000

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

### СВОДКА ФУНКЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ АПЕРТУРЫ

Вид аппроксимирующей функции

$$\tilde{E}(\rho/\rho_0) = \Delta + (1 - \Delta) \cos^p \left( \frac{\pi}{2} (\rho/\rho_0) \right)$$

Степень аппроксимирующей функции $p$	Уровень поля на краю раскрыва, $\Delta$	Коэффициент $A^*$ , град	Уровень первого бокового лепестка, дБ	Коэффициент использования поверхности, $v$
$p = 1$	1,0	50,5	-13,2	1,000
	0,8	52,0	-14,0	0,990
	0,6	54,0	-16,0	0,975
	0,4	57,5	-18,6	0,950
	0,2	62,0	-21,5	0,915
	0	68,5	-23,0	0,810
$p = 2$	1,0	50,5	-13,2	1,000
	0,8	52,5	-15,2	0,990
	0,6	56,0	-18,7	0,970
	0,4	60,5	-24,3	0,940
	0,2	67,5	-30,3	0,885
	0	83,0	-32,0	0,667
$p = 3$	0	95,0	-40,0	0,575
$p = 4$	0	110,5	-48,0	0,515
$p = 0$ (постоянный закон)	1,0	50,5	-13,2	1,000