

**УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ ТАШКЕНТСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

**Факультет Радиотехники, Радиосвязи и Телерадиовещания**

**Кафедра  
Антенно-Фидерных Устройств**

**Методическое указание к виртуальной лабораторной работе  
“Исследование направленных свойств рупорных антенн”  
по дисциплинам “Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства” и  
“Антенны и устройства СВЧ”  
по направлениям образования “Телевидение, радиосвязь и радиовещание”,  
“Радиотехника”**

**Ташкент 2006**

### **Аннотация**

Данное методическое указание предназначено для студентов, изучающих курсы “Распространение радиоволн и Антенно-фидерные устройства” и “Антенны и устройства СВЧ” по направлениям образования: “Телевидение, радиосвязь и радиовещание” и “Радиотехника”.

Программа курса “Распространение радиоволн и Антенно-фидерные устройства” содержит 36 часов лекций, 20 часов упражнений и 18 часов лабораторных работ, а программа курса “Антенны и устройства СВЧ” – 32 часа лекций и 16 часов лабораторных работ.

Настоящая виртуальная лабораторная работа рассчитана на выполнение в течение двух часов.

Данная работа предназначена для студентов, изучающих теорию апертурных антенн, и может быть полезна при работе над выпускными квалификационными работами и магистерскими диссертациями.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

- знать устройство и принцип действия рупорных антенн;
- уметь определять зависимость диаграммы направленности антенны от размеров и формы рупора.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Простейшей антенной СВЧ диапазона является открытый конец волновода. Электромагнитная волна, распространяющаяся в волноводе, частично отражается от его открытого конца и частично излучается. При этом на месте перехода от волновода к свободному пространству возникают волны высших типов и токи на наружных поверхностях стенок волновода.

Антенна в виде открытого конца волновода является слабонаправленной. Действительно для получения острой диаграммы направленности, т.е. большого значения коэффициента направленного действия (КНД), необходимо, чтобы размеры излучающей поверхности были много больше длины волны  $\lambda$ . В то же время размеры волновода не могут выходить за определенные пределы, так как в противном случае в волноводе возникают волны высших типов. Для прямоугольного волновода (рис.2.1) с волной  $H_{10}$  размеры поперечного сечения выбираются в пределах  $\lambda/2 < a < \lambda$ ,  $b < \lambda/2$ .

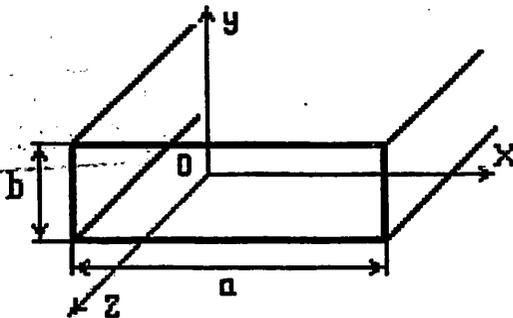


Рис.2.1. Прямоугольный волновод

Другой особенностью волноводных излучателей является их относительно плохое согласование со свободным пространством.

Таким образом, открытый конец волновода является неэффективной антенной вследствие малого значения КНД и значительного отражения электромагнитных волн от открытого конца волновода.

Для получения более острых диаграмм направленности размеры поперечного сечения волновода плавно увеличивают, превращая волновод в рупор. При этом

структура поля в волноводе, в основном, сохраняется. В месте перехода волновода в рупор возникают высшие типы волн. Если угол раскрытия рупора не очень велик, то волны всех типов, кроме основного, быстро затухают в окрестностях горловины рупора. Пренебрегая волнами высших типов, можно считать структуру поля в рупоре подобной структуре поля основной волны в волноводе. Плавное увеличение поперечного сечения волновода улучшает также его согласование со свободным пространством.

Если расширение прямоугольного волновода происходит только в одной плоскости, то рупор называется секториальным.

Рупор, образованный увеличением размера  $a$  волновода, параллельного вектору  $H$ , называется секториальным  $H$ -плоскостным рупором (рис.2.2.а). Рупор, образованный увеличением размера  $b$  волновода, параллельного вектору  $E$ , называется секториальным  $E$ -плоскостным рупором (рис.2.2.б). Рупор, образованный одновременным увеличением размеров  $a$  и  $b$  поперечного сечения волновода, называется пирамидальным рупором (рис.2.2.в), а увеличением поперечного сечения круглого волновода – коническим рупором (рис.2.2.г).

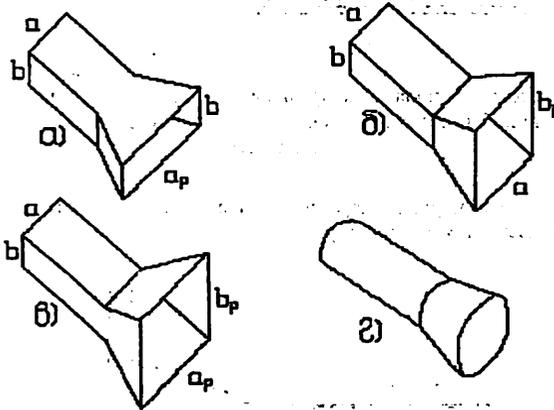


Рис. 2.2. Типы рупорных антенн (а -  $H$ -плоскостной рупор, б -  $E$ -плоскостной рупор, в - пирамидальный рупор, г - конический рупор)

Структура поля в пирамидальном рупоре приведена на рис.2.3.

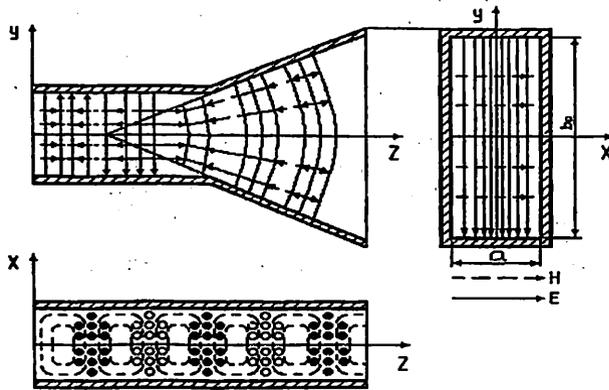


Рис.2.3. Структура поля в секторальной E – плоскостной рупорной антенне (сплошной линией изображены электрические силовые линии, пунктирной – магнитные)

Кроме размеров раскрыва, рупор характеризуется длиной  $L$  и углом раскрыва  $\varphi_0$  (рис.2.4). Точка  $O$  называется вершиной рупора.

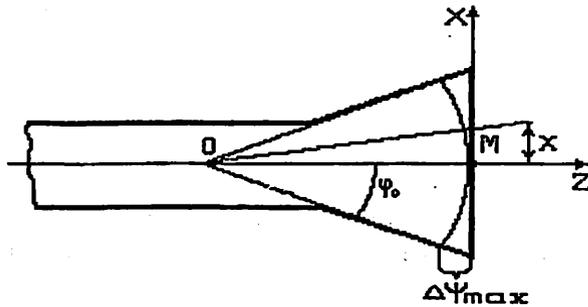


Рис.2.4. Продольное сечение рупора

Вследствие того, что боковые стенки рупора не параллельны друг другу, векторы электромагнитного поля при переходе из волновода в рупор несколько изменяют свое

направление, чтобы обеспечить выполнение граничных условий на стенках рупора (рис.2.3).

Поэтому поверхностью равных фаз поля в рупоре является не плоскость, как в волноводе, а цилиндрическая поверхность в случае секториальных рупоров и сферическая поверхность в случае пирамидального и конического рупоров (рис.2.4). Вследствие этого поле в раскрыве рупора будет несинфазным.

В произвольной точке М с координатой X фаза поля отстает от фазы в центре раскрыва на величину

$$\Delta\Psi_x = \frac{\pi X^2}{\lambda L} \quad (2.1)$$

а максимальное фазовое отклонение (фазовая ошибка) будет на краях раскрыва рупора:

$$\Delta\Psi_x = \frac{\pi a_p^2}{4\lambda L} \quad (2.2)$$

для H-секториального рупора и

$$\Delta\Psi_x = \frac{\pi b_p^2}{4\lambda L} \quad (2.3)$$

для E-секториального рупора.

Таким образом, в раскрыве рупора возникают квадратичные фазовые искажения, которые приводят к расширению диаграммы направленности и «запыливанию» нулевых излучений.

Если максимальные фазовые искажения в рупоре не превышают значений:

$$\Delta\Psi_{\max} = 3\pi/4 \text{ — в плоскости H,} \quad (2.4)$$

$$\Delta\Psi_{\max} = \pi/2 \text{ — в плоскости E,} \quad (2.5)$$

то при расчете диаграмм направленности фазовые искажения обычно не учитывают. Амплитудное распределение поля в раскрыве остается приблизительно таким же, что и для основной волны в волноводе. Например, для пирамидального рупора с волной  $H_{10}$  амплитудное распределение в E-плоскости равномерное, а в H-плоскости спадает к краям по косинусoidalному закону. В этом случае расчет диаграмм направленности пирамидального рупора проводится по приближенным формулам:

$$F(\varphi^H) = \frac{\pi}{8} \left[ 1 + \cos \varphi^H \right] \frac{\cos \left( \frac{ka_p}{2} \sin \varphi^H \right)}{\left( \frac{\pi}{2} \right)^2 - \left( \frac{ka_p}{2} \sin \varphi^H \right)^2} \quad (2.6)$$

в плоскости H и

$$F(\varphi^E) = \frac{\pi}{8} [1 + \cos \varphi^E] \frac{\cos\left(\frac{kb_p}{2} \sin \varphi^E\right)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(\frac{kb_p}{2} \sin \varphi^E\right)^2} \quad (2.7)$$

в плоскости E,

где  $\varphi^E$  и  $\varphi^H$  – углы между осью Z и направлением на точку наблюдения соответственно в плоскостях E и H;  
k – волновое число.

Ширина диаграммы направленности по половинной мощности в плоскостях E и H может быть рассчитана по следующим приближенным формулам:

$$2\varphi_{0,5}^E = 51^\circ \lambda b_p, \quad (2.8)$$

$$2\varphi_{0,5}^H = 67^\circ \lambda a_p, \quad (2.9)$$

Диаграммы направленности рупора в плоскостях E и H независимы. Сужение или расширение раскрыва рупора, например, в плоскости E приводит к изменению диаграммы направленности только в этой плоскости.

КНД рупорной антенны определяется выражением

$$D = v \frac{4\pi S}{\lambda^2}, \quad (2.10)$$

где S – площадь поверхности раскрыва рупора,  
v – коэффициент использования поверхности раскрыва, зависящий от амплитудного и фазового распределения поля в раскрыве.

Допустимая величина максимального сдвига фаз определяется условием получения максимального КНД при заданной относительной длине  $L/\lambda$  рупора (рис.2.5). Вначале, с увеличением относительных размеров раскрыва рупора ( $a_p/\lambda$  или  $b_p/\lambda$ ) при его неизменной длине диаграмма направленности сначала становится уже и КНД растет, так как увеличиваются размеры излучающей поверхности S, которая практически остается синфазной (сдвиг фаз  $\Psi_{\max}$  – мал). При дальнейшем увеличении размеров раскрыва заметно растут фазовые искажения (значение коэффициента использования поверхности v уменьшается) вследствие чего диаграмма направленности начинает расширяться и КНД уменьшается.

При заданной длине  $L/\lambda$  имеется оптимальная величина  $a_p/\lambda$  или  $b_p/\lambda$  при которой получается максимальный КНД. Можно также сказать что размеру  $a_p/\lambda$  или  $b_p/\lambda$  соответствует оптимальная величина длины рупора  $L/\lambda$ .

Рупор, размеры которого ( $a_p/\lambda$  или  $b_p/\lambda$ ) подобраны так, чтобы при заданной длине  $L/\lambda$  получить максимальный КНД, называется оптимальным.

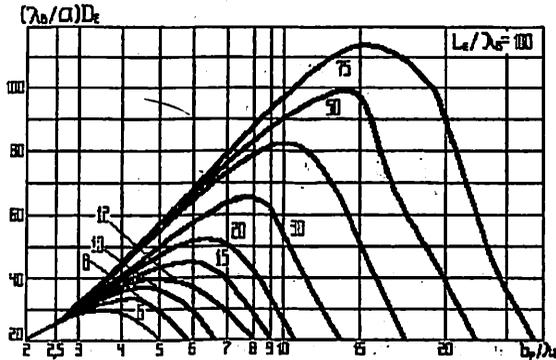


Рис. 2.5. Зависимость КНД от размеров раскрытия

Коэффициент использования поверхности раскрытия  $\nu$  оптимальных Е- и Н-секториальных рупоров  $\nu = 0,64$ ; для оптимального пирамидального рупора  $\nu = 0,5$ .

Рупорные антенны являются широкополосными антеннами. Это объясняется следующим. Если длина волны увеличивается, то направленность рупора снижается за счет уменьшения размеров рупора по сравнению с длиной волны, но это в значительной мере компенсируется тем, что уменьшаются фазовые искажения в раскрытии рупора. При уменьшении длины волны увеличиваются фазовые искажения в раскрытии рупора, влияние которых на диаграмму направленности компенсируется увеличением поверхности раскрытия рупора по сравнению с длиной волны. Практически диапазон использования рупорных антенн определяется диапазоновыми свойствами волноводов.

Коэффициент полезного действия рупорных антенн близок к единице. Поэтому значения КНД и коэффициента усиления рупорных антенн практически совпадают.

Недостатком рупорной антенны является наличие фазовых искажений в ее раскрытии. Для уменьшения этих искажений приходится увеличивать длину рупора. Указанный недостаток рупорной антенны можно устранить применением фазовыравнивающих устройств. В качестве таких устройств чаще всего применяют различные линзы, устанавливаемые в раскрытии рупора. Линза преобразует волну с цилиндрическим или сферическим фронтом в волну с плоским фронтом, то есть поле в раскрытии рупора становится синфазным.

Обычные диэлектрические линзы не нашли широкого применения в радиотехнике главным образом из-за их дороговизны и большой массы. В технике связи на сверхвысоких частотах значительное распространение получили линзы, выполненные

из параллельных металлических пластин (рис.2.6), образующих среду с коэффициентом преломления меньше единицы (ускоряющие линзы).

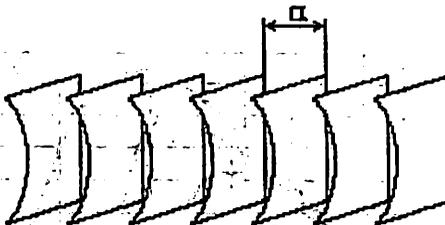


Рис.2.6. Металлопластинчатая ускоряющая линза

Вектор напряженности электрического поля  $E$  должен быть параллелен пластинам. Тогда пространство между двумя соседними пластинами может рассматриваться как волновод, в котором возбуждается волна типа  $H_{10}$  с фазовой скоростью  $v = c/\sqrt{1 - (\lambda/a)^2}$ . Таким образом, система параллельных пластин представляет собой среду с эффективным коэффициентом преломления, меньшим единицы

$$n = c/v = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} < 1, \quad (2.11)$$

Расстояние между пластинами  $a$  должно удовлетворять неравенству  $\lambda/2 < a < \lambda$  для того, чтобы между пластинами распространялась волна только одного типа  $H_{10}$ . Следовательно, коэффициент преломления ускоряющей линзы находится в пределах  $0 < n < 0,86$ . На практике значения  $n$  выбирают в пределах  $0,5 \dots 0,7$ .

Освещенная поверхность ускоряющей линзы (профиль линзы) имеет форму эллипсоида.

### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Структурная схема установки для исследования диаграммы направленности рупорных антенн показана на рис.3.1.

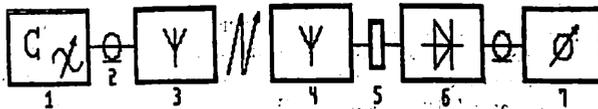


Рис.3.1. Структурная схема лабораторной установки (1 – генератор СВЧ, 2 – коаксиальный кабель, 3 – передающая антенна, 4 – приемная рупорная антенна, 5 – прямоугольный волновод, 6 – детекторная секция, 7 – индикаторный прибор)

Виртуальный макет, созданный на основе рассмотренной установки, моделирует ход выполнения реальной лабораторной работы и обеспечивает определение КНД для секториальных Н- и Е-плоскостных рупоров.

#### 4. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1. Предварительно необходимо ознакомиться с устройством и принципом действия рупорной антенны, получить от преподавателя исходные данные для выполнения работы.

4.2. Ввести в программу свою фамилию, имя и номер группы.

4.3. Пройти микротестирование.

4.4. Для данного прямоугольного волновода определить рабочую частоту  $f$ .

4.5. Последовательно снять характеристики направленности (ХН) и построить диаграммы направленности (ДН) для открытого конца волновода, для секториальных Н-плоскостного, Е-плоскостного, и пирамидального рупоров.

4.7. Определить значения ширины главного лепестка ДН по уровням нулевого излучения и половинной мощности излучения вышеперечисленных излучателей.

4.8. Определить значения КНД секториальных Н- и Е-плоскостных рупоров.

4.9. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

#### 5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Для того, чтобы приступить к выполнению работы с помощью компьютерной модели необходимо запустить исполняемый файл и убедиться, что на экране монитора появилось главное окно программы, совмещающее в себе регистрацию и меню (рис.5.1).

5.2. В этом окне нужно ввести личные данные студента (фамилию, имя и номер группы). Если хотя бы одна строка не будет заполнена, программа автоматически выдает об этом сообщение. Заполнив все строки необходимо подтвердить регистрацию, нажав кнопку «Принять», после чего все введенные данные будут зафиксированы, и дальнейшее их изменение будет невозможно. После успешной регистрации генерируется сообщение о её завершении и станет доступной кнопка «Начать выполнение лабораторной работы», нажав которую можно будет перейти к следующему этапу работы.

5.3. На втором шаге, открывается окно, в котором представлены несложные тесты (рис.5.2), позволяющие проверить подготовленность студента к выполнению

лабораторной работы.

Необходимо ответить на тесты, окончательный результат фиксируется кнопкой «Принять». В третьем блоке «Задать частоту для данной антенны» студенту предоставляется возможность задать рабочую частоту, находящуюся в диапазоне от 5 до 12 ГГц (Внимание! На каждый тест предоставляется лишь три возможных попытки).

5.4. Для перехода к следующему этапу нужно нажать кнопку «Продолжить».

5.5. В окно «Определение ХН и построение ДН» реализуется основная часть программы (рис. 5.3). Необходимо выбрав нужную вкладку, в верхней части окна.

5.6. Включить установку, это можно сделать, переведя выключатель «Сеть» в положение «ВКЛ» (рис. 5.3). После чего на нижних индикаторах появятся соответствующие значения, а доступ к заблокированным кнопкам откроется (рис. 5.4).

5.7. Задать шаг поворота антенны.

5.8. Выбрать плоскость (Е либо Н), в которой будут производиться исследования, для этого в окне имеется пара переключателей: «Плоскость Е», «Плоскость Н».

5.9. Начать поворот антенны, нажимая кнопку «Повернуть антенну на один шаг».

При повороте антенны в таблицу, находящуюся в левой части окна занесутся соответствующие значения ХН. Когда угол поворота достигнет 360 градусов, на экране появляется изображение ДН в декартовой системе координат (рис 5.5). На этом этапе имеется возможность изменять ДН, путём варьирования размеров раскрытия рупора, что реализуется на нижней панели.

Также можно отобразить ДН в полярных координатах, для этого под диаграммой имеется специальный переключатель «Полярные координаты» (рис. 5.6).

5.10. Нажать кнопку «2φ» и определить ширину главного лепестка ДН по уровню нулевого излучения  $2\varphi_0$  и по половинной мощности  $2\varphi_{0,5}$  (рис. 5.7).

5.11. Нажать кнопку «Пересчитать», повторить пункты 5.6 ... 5.10 для другой плоскости.

5.12. Вновь перейти к окну «Определение ХН и построение ДН» (рис. 5.3). Перевести кнопку «Сеть» в положение «ВЫКЛ», поменять исследуемую антенну (вкладка в верхней части окна). Повторить пункты 5.5 ... 5.11. Данный пункт необходимо выполнять до тех пор, пока не будут исследованы все изучаемые в данной работе антенны.

5.13. После завершения всех исследований выключатель «Сеть» должен быть переведён в положение «ВЫКЛ», на нижней панели появится кнопка «Расчёт КНД», нажав которую данное окно закроется, и появится окно расчёта КНД.

5.14. Выбрать с помощью переключателей в блоке «Выбор типа рупора», для какого типа рупора будет производиться исследование. Подождите, пока прорисуются все графики (рис. 5.8 и рис. 5.9).

5.15. В «выпадающем» списке блока «Выбор относительной длины рупора» выбрать интересующий график, соответствующий определённой относительной длине рупора.

5.16. Воспользовавшись линиями прокруток в блоке «Выбор размеров рупора», установить максимальное значение КНД (рис. 5.10).

5.17. Повторить пункты 5.15 и 5.16, задав другую относительную длину рупора.

5.18. Нажать кнопку «Пересчитать» и повторить пункты 5.14 ... 5.17 для другого типа рупора.

5.19. Закончить исследования, нажав кнопку «Выход».

5.20. Все результаты измерений ХН должны быть сведены в таблицу типа

Угол поворота $\varphi$ (градусы)	Значения $XH f(\varphi)$	
	в плоскости E	в плоскости H
0		
...		
359		

По табличным значениям в отчете необходимо построить все ДН, во всех системах координат, привести все их параметры. Отчет должен также содержать исходные данные, промежуточные значения, максимальное значение КНД и соответствующий ему раскрыв рупра.

**Внимание!** При выполнении работы нужно исследовать все имеющиеся в работе антенны, иначе работа не будет считаться выполненной.

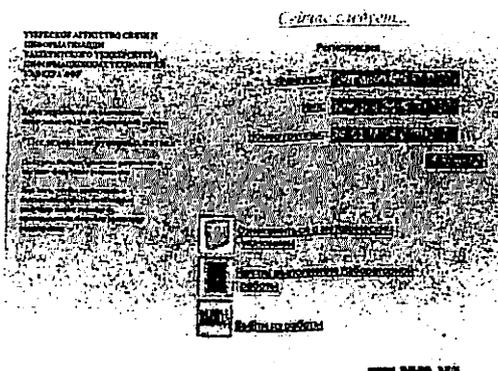


Рис. 5.1. Главное окно виртуальной лабораторной работы «Исследование направленных свойств рупорной антенны»

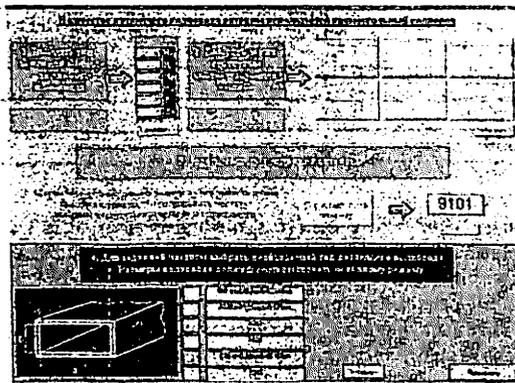


Рис. 5.2. Окно для проверки знаний студента и выбора рабочей частоты

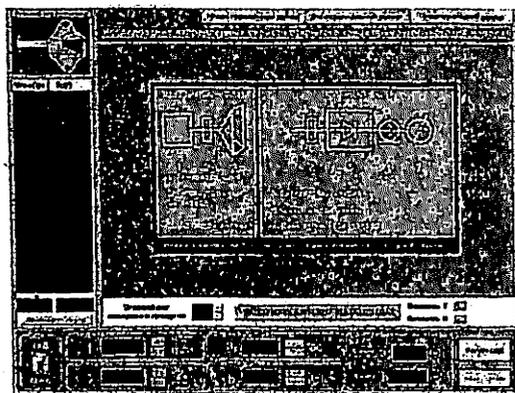


Рис. 5.3. Внешний вид окна для определения ХН и построения ДН при положении «ВЫКЛ» выключателя «Сеть»

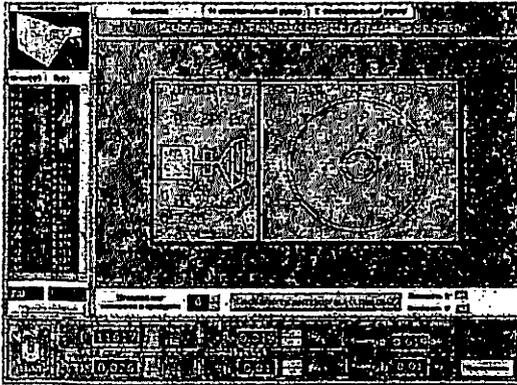


Рис. 5.4. Внешний вид окна для определения ХН и построения ДН после перевода выключателя «Сеть» в положение «ВКЛ»

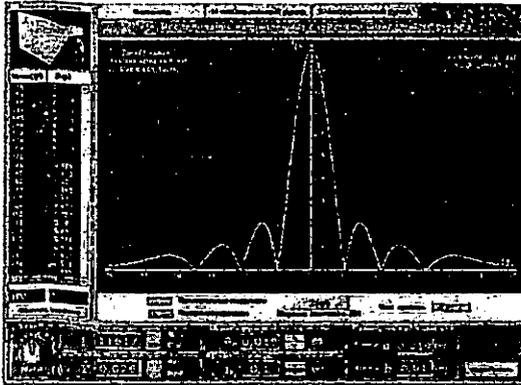


Рис. 5.5. Внешний вид окна для определения ХН и построения ДН на этапе построения ДН в декартовых координатах

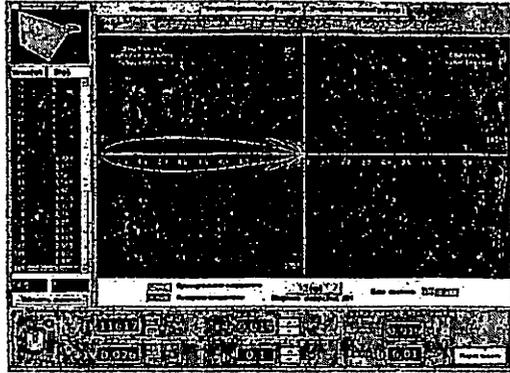


Рис. 5.6. Построение ДН в полярных координатах

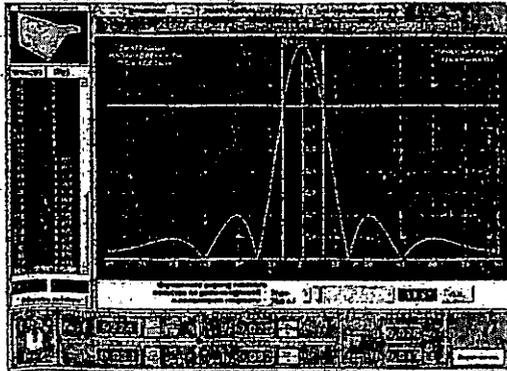


Рис. 5.7. Определение ширины главного лепестка ДН по нулевому уровню  $2\varphi_0$  и по половинной мощности  $2\varphi_{0,5}$

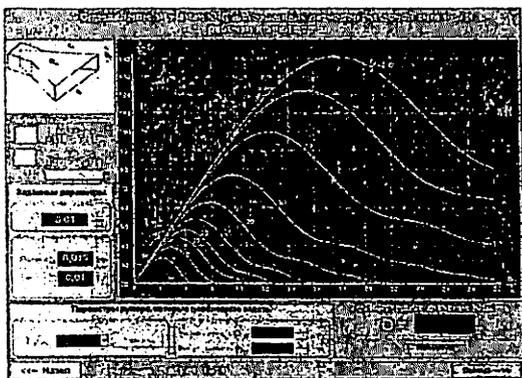


Рис. 5.8. Графики значений КНД для секториального Н-плоскостного рупора

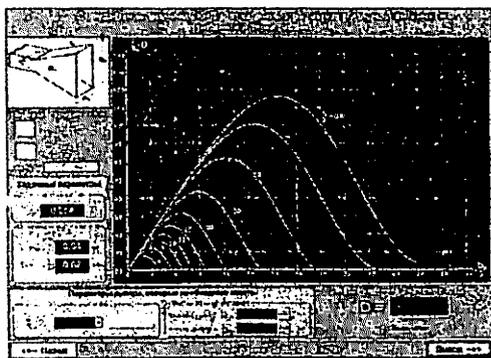


Рис. 5.9. Графики значений КНД для секториального Е-плоскостного рупора

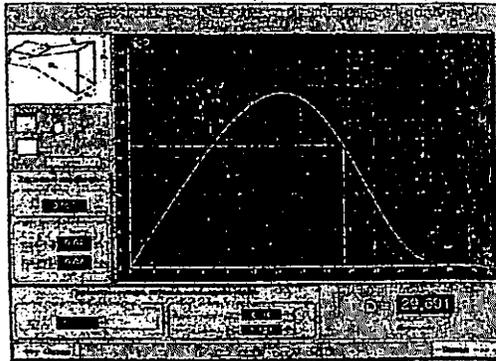


Рис. 5.10. Определение значения КНД

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 6.1. Структурную схему действующей лабораторной установки.
- 6.2. Значения рабочей частоты  $f_0$  и длины волны  $\lambda_0$ .
- 6.3. Размеры сечения заданного прямоугольного волновода.
- 6.4. Результаты измерений КНД для всех исследуемых антенн, оформленные в виде таблиц.
- 6.5. ДН исследованных антенн в прямоугольной и полярной системах координат.
- 6.6. Значения ширины главного лепестка по уровню нулевого излучения  $2\varphi_0$  и по половинной мощности  $2\varphi_{0,5}$ .
- 6.7. Максимальные значения коэффициента направленного действия D и соответствующие ему размеры раскрыва рупора при заданной относительной длине рупора.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Назовите типы рупорных антенн и нарисуйте их.
- 7.2. Как зависят диаграммы направленности возбужденной поверхности от размеров раскрыва?
- 7.3. Как зависят диаграммы направленности возбужденной поверхности от амплитудного распределения поля?

7.4. Как зависят диаграммы направленности возбужденной поверхности от фазового распределения поля? Виды фазовых распределений (фазовых ошибок).

7.5. По какому закону изменяется фаза поля в раскрыве рупора и от каких параметров рупора она зависит?

7.6. Какие рупорные антенны называются оптимальными?

7.7. Сравните диаграммы направленности двух рупоров с одинаковым раскрывом, но с различной длиной  $L$ .

7.8. Почему допустимые фазовые искажения для секториальных E- и H-плоскостных рупоров имеют разные значения?

7.9. Каковы диапазонные свойства рупорных антенн?

7.10. Укажите область применения рупорных антенн.

7.11. Достоинства и недостатки рупорных антенн.

7.12. Поясните принцип действия металлопластинчатой линзовой антенны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1972.
2. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.
3. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1972.
4. Дабкин А.Л., Зузеико В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. – М.: Советское радио, 1974.
5. Ерохин Г.А., Чернышев О.В. и др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 1996.
6. Ликонцев Д.Н. Антенно-фидерные устройства: Конспект лекций. – Т.: ТУИТ, 2002.

Методическое руководство к виртуальной лабораторной работе “ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ РУПОРНЫХ АНТЕНН” по дисциплинам “Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства” и “Антенны и устройства СВЧ” рассмотрено на заседании кафедры АФУ (протокол № 26 от 28.03.2006) и рекомендовано к печати.

Отв. редактор доц. Ликонцев Д.Н.

Составитель: ст. преп. Губенко В.А.

доц. Ликонцев Д.Н.

Редакционно-корректорная комиссия:

редактор доц. Абдуазизов А.А.

корректор асс. Васильева Т.В.

Работа рекомендована ММС ТУИТ  
(протокол №27 от 19 мая 2005 г.)

Бумага офсетная. Заказ № 192

Тираж 100

Отпечатано в ИПЦ «АЛОҚАСН» при ТУИТ  
Ташкент 700084, ул. А. Темура - 108

Формат 60x84 1/16 Заказ № 152 Тираж 50  
Отпечатано в Издательско  
полиграфическом  
центре «ALOQASHI» при ТУИТ  
ул. Ташкент Амир Темура, 108