|  |
| --- |
|  |
| МИНОБРНАУКИ РОССИИ |
| Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **«МИРЭА – Российский технологический университет»**  **РТУ МИРЭА** |

|  |
| --- |
| Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем (ИРТС) |
| Кафедра телекоммуникаций (КТ) |

|  |  |
| --- | --- |
| **ПРИНЯТО**  на заседании кафедры телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем от «\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2020 г.  протокол № \_\_ | **УТВЕРЖДАЮ**  И.о. заведующего  кафедрой телекоммуникаций \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ С.В. Тулинов  «\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2020 г. |

**Методические указания к курсовой работе**

**по дисциплине**

«**Антенны систем связи**»

Москва

## 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа является одной из форм самостоятельной работы студентов. Тематика курсовой работы включает применяющиеся в настоящее время в системах радиосвязи антенны.

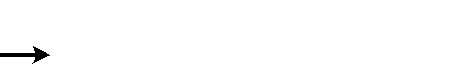
Цель выполнения курсовой работы изучение и закрепление компетенций по проектированию антенн в системах радиосвязи, развитие практических навыков самостоятельного решения инженерных задач, навыков работы с научно-технической литературой, нормативными документами, государственными стандартами.

Порядок проведения курсовой работы соответствует инструкции по организации и проведению курсового проектирования СМКО МИРЭА 7.5.1/04.И.05-18, размещенной на сайте РТУ МИРЭА.

## НАЗНАЧЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН СИСТЕМ СВЯЗИ

* 1. **Основные расчетные соотношения**

**Передающая антенна**. Комплексная характеристика направленности передающей антенны по электрическому полю в дальней зоне (рис.1), т. е. на расстоянии *r*  2*A*max /  (*A*max – максимальный размер антенны,  – длина излучаемой волны), описывается выражением:

*E* ,  *E* , *p*,exp *i*, (1)

где *Е*(θ, )*, р*(θ, ) и Ф(θ, ) – соответственно амплитудная, поляризационная и фазовая диаграммы направленности антенны.

*x*

*M*(*r*, θ,φ)

*r*

0

*y*

θ

φ

Передающая антенна

*z*

Рис.1. Система координат, используемая при расчете ДН Нормированные амплитудные ДН определяются в соответствии с

соотношениями: по полю

по мощности

*F* ,  *E* , ;

*E*max *m* ,*m* 

(2)

 *E*  ,

*F* ,  *E* 

 ,   .

(3)

max *m m*

Здесь 1 / *Е*max(θ*m*, *m*) – нормирующий множитель, а *Е*max(θ*m*, *m*) – значение амплитуды вектора напряженности электрического поля в точке максимума, θ*m*, *m* – угловое направление на точку максимума.

Часто ДН выражают в логарифмическом масштабе (в децибелах):

*F*  ,  lg *F* , lg *F*  ,.

(4)

Пространственное изображение нормированной амплитудной ДН имеет вид, показанный на рис. 2 *а.* Для полноты представления ДН обычно интересуются сечениями ее в главных плоскостях: плоскости  = 0 (кривая 1) и плоскости  = /2 (кривая 2). При этом сечение ДН главной плоскостью, в которой колеблется при распространении вектор напряженности электрического поля, называется ДН в плоскости *Е,* а сечение главной плоскостью, в которой колеблется при распространении вектор напряженности магнитного поля, – ДН в плоскости *Н.*

Плоские сечения нормированных амплитудных ДН изображают как в полярных (рис. 2, *б*), так и в прямоугольных (рис. 2, *в*, *г*) координатах, причем первый способ используют преимущественно для построения ДН слабонаправленных антенн, а второй – остронаправленных. Из графического построения нормированных ДН определяют следующие параметры:

* коэффициент равномерности ДН (в случае слабонаправленной антенны)

*N*  *F*min ,

(5)

где *F*min(θ) – значение ДН в направлении минимального излучения антенны (рис. 2, *б*);

* ширину главного лепестка (луча) на уровне 0.5 по мощности (0.707 по полю или –3 дБ в логарифмическом масштабе) 2θ0.5 и на уровне нулевого излучения 2θ0, а также значение (уровень максимумов) боковых лепестков *Fq* max и их направления θ*q* max (в случае остронаправленной антенны, рис. 2 *в*, *г*), где *q* – номер бокового лепестка.

Поляризация передающей антенны определяется направлением вектора напряженности электрического поля. Наиболее общим случаем поляризации является эллиптическая поляризация, которая полностью описывается следующими параметрами поляризационного эллипса (рис.3):

* углом  наклона большой оси эллипса к оси θ0 выбранной системы координат (0    /2); коэффициентом равномерности (эллиптичности) поляризации

*K*  *b* , (6)

*э a*

где *b* и *а –* малая и большая полуоси эллипса (0  *K*э  1);

* знаком поляризации sgn *K*э*,* который указывает на направление вращения конца вектора напряженности электрического поля в плоскости эллипса при распространении поля от антенны, если «смотреть» ему вслед: sgn *K*э *>* 0 *–* для правовращающейся поляризации и sgn *K*э *<* 0 – для левовращающейся.

11 0  θ



5



*х*

1

*y*

2

θ

*F*(θ,φ)

φ

*z*

3

*F*(θ)

6

0.6

1.0 6 

0.8 3

*F*

*a*

1.0

*F*2(θ)

3

2

4

3 7

*б* 6

0.4

π

min



2

2

3

5

6

0.6

0.4

0.2

0

2θ0

2θ0.5

*F*1 max

θ1 max θ, рад

*F*2(θ),дБ

θ1 max

θ, рад

2θ0.5

0

-3

-5

*F*1 max

-10

-15

-20

*в г*

Рис. 2. Формы представления ДН: а – объемная характеристика направленности;

*б* – ДН в полярной системе координат;

*в* – ДН в декартовой системе координат c относительным масштабом;

*г* – ДН в декартовой системе координат c логарифмическим масштабом)

Параметры поляризационного эллипса при известных компонентах излучаемого поля определяют по формулам:

  ,arctg *m* cos 

 *m*



 *m*  *m*sin















,



*K*  *m*sin  *m* 

э    



 (7)

где *m* = *E* / *E*θ – отношение амплитуд ортогональных компонент;

 = (arg *E* – arg *E*θ) – разность фаз комплексных амплитуд этих компонент.

Обратные зависимости:





*K* tg  







э

*K* 



э

tg 







*m*  





 

(8)

 arctg 

*K*э 

(  *K*  )sin  

  э

 

Зависимость коэффициента эллиптичности от угловых координат точки наблюдения характеризует поляризационную диаграмму антенны: *p*(θ,) = *K*э(θ,).



*х*

*b*

*a*

0

sgn*Kэ* < 0

θ

γ

0

0

φ

*z*

Рис. 3. Эллипс поляризации поля

Знание амплитудной и поляризационной диаграмм передающей антенны позволяет определить ее КНД. Для антенны линейной поляризации

*D*  



 



 . (9)

   *F*

(,)sin*d**d*

  

Для антенны вращающейся поляризации при совпадающих максимумах парциальных амплитудных ДН

*D*  *D*  *D* , (10)

где

*D*  



   *F*  ,  *F*  ,

 ,

     

sin *d**d*

  

*D* 

*m*  

 ,

(11)

 



 

*m**F*  ,  *F*  , sin *d**d*

   

 

  

– парциальные КНД для компоненты поля *Е*θ и *Е*. Здесь *F*θ(θ, ) и *F*(θ, ) – нормированные амплитудные ДН взаимно перпендикулярных компонент.

На практике широко распространена грубая оценка КНД по формуле:

*D*  *E*



 *H*

, (12)

. .

где 2 *E*

0,5

*H*

0,5

и 2 

– ширины луча антенны на уровне 0.5 по мощности в главных

плоскостях, рад.

КПД передающей антенны находится следующим образом:

 *R*

 *R*  *R*п 

, (13)

где *R*п – сопротивление потерь в антенне, *R*∑.

Коэффициент усиления антенны определяется по формуле:

*G*  *D*η. (14)

Диапазонные свойства передающей антенны характеризуются шириной полосы рабочих частот 2*f*, определяемой в единицах частоты или в процентах к средней частоте диапазона *f*cp:

*f f*cp

  *f*max 

*f*max 

*f*min  , (15)

*f*min

где *f*max и *f*min – максимальная и минимальная частоты, либо коэффициентом перекрытия по частоте:

*K*  *f*cp  *f*

 *f*

 *f*cp

. (16)

п *f*  *f*

 *f*

cp

*f*cp

**Приемная антенна.** По теореме взаимности приемную антенну характеризуют те же параметры, что и передающую.

Максимальная ЭДС, наводимая в приемной антенне соответствует приему с максимального направления ДН и полному согласованию антенны с падающим полем по поляризации:

*Эа* max 

*E* *GRa*

 

. (18)

*Zа*



*Zа*

*l*ф

*Rа*

Э*а*

*Ха*

*R*н

*W*ф

*Х*н

*Z*н *Z*н



*Rа*

Э*а*

*Ха*

*R*н

*Х*н

*a б*

Рис. 4. Эквивалентная схема приемной антенны: *а* – с непосредственным

подключением приемника; *б* – при подключении приемника при помощи длинной линии

Максимально возможная (оптимальная) мощность (в ваттах), отдаваемая приемной антенной со входным сопротивлением *Za* = *Ra* + *iXa* в согласованную нагрузку (приемник) *Zн* = *Rн* + *iXн*, непосредственно подключенную к антенне (рис. 4, *а*), имеет место при *Rн* = *Rа*, *Xн* = – *Xа* и определяется по формуле:

*P*max 

*P*пер*G*пер*G*пр

.

*r* 

(19)

Мощность, отдаваемая антенной в несогласованную нагрузку (*Ra*  *R*н, *Xa*  – *X*н), рассчитывается по формуле:

*P*  *P*max



*Ra*

* *R*í

*Ra R*í

   *X*

*a*

* *X* í

 *P*max

, (20)

где  *–* коэффициент согласования антенны с нагрузкой.

Мощность, которую приемная антенна отдает в нагрузку в случае, когда входное сопротивление антенны чисто активное и равно волновому сопротивлению фидера *Za* = *Ra* = *W*ф, а сопротивление нагрузки не равно волновому сопротивлению фидерной линии передачи *Z*н  *W*ф (рис. 4, *б*), находится при помощи выражения:

*P*  *K*б.в 



*P* , (21)

 *K*



б.в

АФУ max

где *K*б.в – коэффициент бегущей волны в фидере, несогласованном с нагрузкой; АФУ – КПД антенно-фидерного устройства.

Эффективная площадь (в квадратных метрах) приемной антенны:

 

*S*эф   *D*   *G* . (22)

Собственная шумовая температура приемной антенны (в кельвинах) определяется по формуле:

*T*a.c  *T*   , (23)

где *Т*0 – температура окружающей среды, *К*.

Максимальная мощность полезного сигнала *Рс* (Вт) на выходе приемной антенны, находящейся в дальней зоне передающей антенны, рассчитывается по формуле идеальной радиопередачи (19):

*Pc* 

*P*пер*G*пер*G*пр

*r* 

, (24)

где *Р*пер – мощность сигнала, излучаемого передающей антенной, Вт; *G*пер – коэффициент усиления передающей и приемной антенн;  – длина волны, м; *r* – расстояние между антеннами, м*.*

Отношение мощности полезного сигнала *Рc*, принятого антенной, к мощности помех *Рп*, поступающих в антенну равномерно со всех сторон, равно:

*P*  *E*  *D*

*c*   

, (25)

*Pп*  *Eп*  

где *Eп* – напряженность поля внешних помех, действующих на антенну.

Коэффициент защитного действия приемной антенны, определяемый из ее нормированной амплитудной ДН, находится так:

  

*F*

  

*K*ç.ä 

 

  

(26)

*F*   

 

– в относительных единицах;

*K*

з.д





 lg 



*F*    

  

   

  

(27)

 *F*   

  

– в децибелах. Причем в формулы подставляется наибольшее из значений ДН в интервале углов /2 ÷ 3/2.

## ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АНТЕНН СИСТЕМ СВЯЗИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

* 1. **Зеркальные антенны**

В настоящее время широко применяются зеркальные антенны, как наиболее технологичные и недорогие из всех антенн СВЧ. Простота конструкции, малая масса, хорошие электрические характеристики – вот

основные причины широкого использования зеркальных антенн в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн.

Параболическая зеркальная антенна  одна из наиболее часто применяемых антенн. Теория и вопросы проектирования параболических зеркальных антенн достаточно полно описаны в [1, 7, 11].

В качестве облучателя параболического зеркала часто используют прямоугольный волновод с волной типа *Н*10. Часто применяют прямоугольный или круглый волновод, нагруженный на рупор. Широко используют облучатель двухщелевого типа, а также вибраторный облучатель. Антенная система со щелевым облучателем оказывается очень компактной. Облучатель создает малое затемнение зеркала. Примером облучателя с круглой поляризацией является спиральная антенна. В качестве облучателя может также использоваться антенна волновой канал и микрополосковая антенна.

С развитием техники СВЧ усилителей, обладающих чрезвычайно низким уровнем шумов, оказалось, что антенна дает значительный вклад в общую шумовую температуру системы. Шумовую составляющую можно уменьшить путем тщательного проектирования антенны.

## 2.1.1 Основные геометрические соотношения и расчет направленных свойств зеркальных антенн

Чаще всего рефлектор является симметричной или несимметричной поверхностью вырезанной из параболоида вращения (рис. 5), который в прямоугольной системе координат (*x*, *y*, *z*) описывается уравнением:

*x*2  *y*2  4 *fz* , (28)

а в сферической (*r*, ψ, α) с началом в фокусе параболоида:

*r* ,  *r*    *f*  *f* sec  . (29)

 cos 



*y*

*x*

ρ

*r*

0

*R*

α

ψ

*f*

*z*

*D*

2

Рис. 5. Параболическая зеркальная антенна

Радиус раскрыва *R*, угол раскрыва ψ0 и фокусное расстояние *f* связаны соотношениями:

*R R*

sin  *f* ; tg  *f* ; tg  

*R* . (30)

  *R*    *R* 

  *f*

   *f*     *f* 

   

В большинстве практических случаев 45° < ψ0 < 90°, так что .  *R*

 *f*

Из (30) легко определить глубину зеркала:

.

*d*  *R*  

  



 tg   . (31)

*f*   *f*  

Наиболее просто направленные свойства параболической антенны рассчитываются так называемым апертурным методом, т. е. по полю в ее апертуре, представляющей собой минимальную плоскую поверхность, закрывающую антенну.

При установке в фокусе параболического рефлектора облучателя с диаграммой направленности *F*обл(ψ, α) в апертуре зеркала наводится синфазное поле с амплитудным распределением:

cos   

*Ep* 



*r* 

 

*Fî áë* ,    *Fî áë* , . (32)



*f*

При этом координаты точек раскрыва *x*р, *y*р, или ρр, αр связаны с углами ψ и α соотношениями, обусловленными геометрией задачи.

*x*   *f* tg  cos,

  

p  

*y*   *f* tg  sin ,

  

p  

   *f* tg  ,

(33)

p  



 

p  .

По известному полю в апертуре зеркала рассчитывается диаграмма направленности антенны *F*(θ, φ):

*F* ,   cos 

 *s**s*

*T*

*E*p*e jk**rds* , (34)

где

Δ*r*  *x*p sinθcos  *y*p sinθsin ; *s* – поверхность раскрыва; *sT* – площадь

проекции на апертуру затеняющих элементов (облучателя и элементов его крепления).

Коэффициент направленного действия антенны с учетом апертурного коэффициента использования γ*a*, обусловленного амплитудной неравномерностью поля в раскрыве, и коэффициента перехвата мощности облучателя зеркала γп рассчитывается по формуле:

*F* 

где

*F*max

  

*T*

 *s**s*

*E*p*ds* .

*D*   

#  

 

max

*Fî áë* ,sin*d**d*

, (35)

Общая эффективность антенны γ = γ*а* γ*п* определяется из соотношения:

 *D*

*s*

. (36)

Ширина диаграммы направленности синфазного раскрыва в общем случае обратно пропорциональна размеру раскрыва, выраженному в длинах волн, и также зависит от его формы и распределения поля на нем. В таб. П.6. и П7 приложения Б, приведены основные расчетные соотношения для синфазных раскрывов прямоугольной и круглой формы при некоторых законах распределения поля, допускающих аналитическую оценку интеграла

в (35). Как видно из таблиц, чем сильнее спадает поле в раскрыве к его краям, тем при тех же размерах антенны больше ширина главного лепестка и ниже уровень боковых лепестков. Необходимо отметить, что затенение раскрыва зеркала облучателем или другими элементами антенны может значительно повысить уровень боковых лепестков по сравнению с незатененным раскрывом.

В качестве облучателей параболических рефлекторов могут использоваться простые слабонаправленные излучатели: рупорные, вибраторные, спиральные, щелевые, полосковые.

Форма диаграммы направленности облучателя должна соответствовать форме раскрыва зеркала. Необходимый спад интенсивности облучения к краям зеркала определяется двумя факторами: общей эффективностью антенны и уровнем боковых лепестков (УБЛ). Если УБЛ не задан, то при проектировании антенны следует добиваться максимальной эффективности. Можно показать, что при этом облучение краев зеркала должно быть на 9-11 дБ ниже, чем облучение центра, а эффективность составляет 70-80%. Если же требуется низкий УБЛ, то уровень облучения краев может быть ниже 9-11 дБ, что приводит также к снижению общей эффективности антенны.

## Волноводные излучатели и рупорные антенны

Волноводные излучатели и рупорные антенны являются одним из распространенных типов антенн СВЧ и используются не только как самостоятельные антенны, но и как первичные излучатели других, более сложных антенн этого диапазона частот (зеркальных, линзовых).

Простейшим излучателем сантиметровых волн является открытый конец прямоугольного или круглого волновода (рис. 6).



*y*

*x*

*E*

0

*а*

θ

φ

*b*

*z*

*y*

*x*

0

*E*

θ

φ

2*r*

*z*

*а б*

Рис. 6. Антенна в виде открытого конца волновода: *а* – прямоугольный волновод;

*б* – круглый волновод

Так как размеры выходного отверстия волновода невелики (обычно меньше длины волны), то антенны в виде открытого конца волновода – принципиально слабонаправленные антенны.

Излучатель в виде открытого конца прямоугольного волновода (рис. 6,

*а*), возбуждаемого волной *H*10, характеризуют параметры:

а) ширина луча на уровне 0.5 по мощности (в радианах) в плоскости

*H*(φ = 0):

*H*



.

.  , (37)

*a*

в плоскости *E*(φ = π/2):

*E*



.

 .  , (38)

*b*

где λ – длина волны, см; *а*, *b*– размеры сечения волновода; б) КНД:

*D*  *ab* , (39)



где ν – КИП раскрыва, равный 0,81.

Такими же параметрами характеризуется и излучатель в виде открытого конца круглого волновода (рис. 6, *б*) при возбуждении его волной *H*11:

*H*



.

. 

*r*

, (40)

*E*



.

. 

*r*

, (41)

 *r* 

*D*      . (42)

 

Здесь 2*r* – внутренний диаметр волновода; ν – КИП раскрыва, равный 0.84.

*а б*

*в г*

Рис. 7. Рупорные антенны: *а* – *Е* секториальный; *б* – *Н* секториальный;

*в* – пирамидальный; *г* – конический

Для получения большей направленности волноводный излучатель превращают в рупорную антенну. Наиболее распространены секториальные (рис. 7, *а*, *б*), пирамидальный (рис. 7, *в*) и конический (рис 7, *г)* рупоры с прямолинейными образующими.

Форма главного лепестка амплитудной ДН рупорной антенны зависит от угла раствора рупора. Исследования показали, что при постоянной длине рупора наибольшая направленность излучения для секториальных рупоров получается при углах раствора рупора, которые соответствуют следующим фазовым ошибкам (в радианах) на краях раскрыва: Ф = 3π / 4 в плоскости *Н*, Ф = π / 2 в плоскости *Е*. Рупоры с такими значениями максимальных фазовых ошибок получили название оптимальных.

Размеры оптимального *H* - плоскостного секториального рупора (рис. 7, *а*) связаны между собой соотношением:

*a*

*H*

*l*

опт

 р , (43)



где *l*опт – оптимальная длина и ширина раскрыва рупора.

Ширина луча такого рупора на уровне 0.5 по мощности (в радианах) рассчитывается по формулам:

в плоскости *H*:

*H*



.

. 

*à*ð

; (44)

в плоскости *Е*:

*E*



.

 .  . (45)

*b*

Размеры оптимального *E*-плоскостного секториального рупора (рис. 7, *б*) связаны между собой соотношением:

*b*

*l*

где *b*p – ширина раскрыва рупора.

*E*

опт

 р , (46)



Ширина луча на уровне 0.5 по мощности (в радианах) этого рупора определяется по формулам:

в плоскости *H*:

*H*



.

.  ; (47)

*à*

в плоскости *E*:

*E*



.

 . 

*b*ð

. (48)

КНД оптимальных секториальных рупоров рассчитывается так:

*D*  *S*р , (49)



где *S*р – площадь раскрыва рупора; ν – КИП раскрыва, равный 0.64.

Пирамидальный рупор может быть клиновидным (как показано на рис. 7, *в*) или остроконечным (когда ребра рупора сходятся в одной точке).

Нормированные амплитудные ДН пирамидальной рупорной антенны при возбуждении ее волной *H*10 приближенно можно рассчитать по формулам для прямоугольной синфазной апертуры с косинусоидальным в плоскости *H* и постоянным в плоскости *E* амплитудными распределениями:

в плоскости *H*:

cos *a*р sin*H* 



*H*    cos*H*

*F* (

)    ; (50)

*a*

 

  р sin*H* 

  

в плоскости *E*:

sin *b*р sin *E* 

*E*    cos*E*



*F* (

)    , (51)

*b*р sin*E* 



где θ*H* и θ*E* – углы, отсчитываемые от оси рупора в плоскостях *H* и *E*.

Улучшенными характеристиками с точки зрения диапазонности и уровня боковых лепестков амплитудной ДН обладают рупорные антенны со ступенчатыми, криволинейными (в частности, экспоненциальными) и гребенчатыми образующими. Подбором ступенек и формы кривой образующей диапазон рабочих частот таких антенн может быть расширен в 1,5–2 раза, а пространственная амплитудная ДН приближена к осесимметричной.

Коэффициент усиления рупорных антенн практически равен КНД:

*G*  *D*  *D* , (52)

поскольку потери в таких антеннах обычно малы.

## Проволочные антенны

К так называемым «проволочным» антеннам можно отнести все типы штыревых антенн, антенны типа «волновой канал», петлевые антенны.

Проволочные антенны представляют собой конструкции, состоящие из отрезков прямолинейных проводов, определенным образом расположенных в пространстве. Современные проволочные антенны широко используются как в виде самостоятельных элементов (одиночные вибраторы), так и в составе антенных решеток. В волноводных, рупорных, зеркальных и других антеннах их используют в качестве возбудителей.

Основной задачей теории излучения является определение электромагнитного поля излучения антенн. Принципиально эта задача может быть решена путем применения уравнений Максвелла с учетом граничных условий на поверхности антенны. Антенна в общем случае рассматривается как проводящее, полупроводящее или непроводящее тело определенной конфигурации, возбуждаемое заданной системой источников и

расположенное в свободном пространстве или вблизи других тел. При этом учитываются реальные свойства среды и граничные условия, необходимые для получения однозначного результата решений уравнений Максвелла. Решение задачи о распределении тока в антенне в строгой постановке обычно сопряжено с математическими трудностями. Однако к настоящему времени получен ряд новых положительных результатов и роль строгой теории антенн неуклонно растет благодаря появлению возможностей решения сложных задач с помощью ЭВМ.

При решении задачи о прямолинейном тонком электрическом вибраторе в строгой постановке функция распределения тока по вибратору считается неизвестной, а проекции векторов электрического поля выражаются через эту функцию. Из условия равенства нулю касательной к поверхности вибратора составляющей напряженности электрического поля составляют интегральное уравнение относительно искомой функции тока вибратора. Решая это уравнение, находят функцию распределения тока по вибратору, а затем и все необходимые вторичные параметры [18]. Такой способ расчета антенн называется методом интегрального уравнения.

В результате решения основной задачи теории излучения определяют параметры антенны как излучающего устройства: входное сопротивление, коэффициент бегущей волны, относительную полосу пропускания, добротность, коэффициент полезного действия, диаграмму направленности, коэффициенты направленного действия, усиления, эллиптичности поляризационной характеристики, действующую длину антенны и др. Первые три из перечисленных параметров характеризуют антенну как нагрузку для генератора (приемника) переменных токов высокой частоты, а остальные в большей степени − как излучатель (приемник) электромагнитной энергии. Эти параметры необходимы при изготовлении, настройке и эксплуатации вибраторных антенн.

Данные антенны широко используются в радиосвязи, в том числе и подвижной, в радиовещании и телевидении, а также радиолокации. Теория и вопросы проектирования проволочных антенн различного назначения достаточно полно описаны в [1, 4, 14, 15, 18, 19].

При расчете рекомендуется использовать программы MMANA, NEC-2 for MMANA [14, 15], Mininec classic и др. При этом в отчете приводятся входной файл и результаты расчетов.

## Симметричный вибратор

Симметричный вибратор является одной из наиболее широко распространенных простых антенн, применяемых главным образом в диапазонах коротких и ультракоротких (метровых и дециметровых) волн.

Комплексная амплитуда электрического в дальней зоне симметричного вибратора в предположении синусоидального закона распределения тока *I* вдоль вибратора (рис. 8) для воздушной среды определяется по формуле:

*E*  *i*

*Ia*

*r* sin *kl*

*F* ()exp*ikr*  , (53)

где *I*a, – амплитуда тока в точках питания вибратора; *r* – расстояние от вибратора до точки наблюдения; *k* = 2/ – волновое число, в котором  – длина волны; *l* – длина плеча вибратора; *F*() – нормированная амплитудная ДН вибратора в плоскости, проходящей через ось вибратора (плоскость *Е*), причем:

*F*    cos*kl* cos  cos *kl* . (54)

 cos *kl* sin

в выражении (54)  – угол между осью вибратора и направлением в точку наблюдения (рис. 8).

Выражением (53) можно пользоваться при длине вибратора 2*l <* 5/4. Если 2*l >* 5/4, то необходимо определить направление максимального излучения, затем вычислить нормирующий множитель.

*M*(*r*, θ)



*z*

*r*

θ

*I*

*M*(*r*, Δ) *M*(*r*, Δ)



*r r*

*l h h*

Δ Δ

*h h*

*l*

*a б*

Рис. 8 Симметричный вибратор Рис. 9 Вибратор над землей

Для наиболее распространенного на практике полуволнового вибратора (2*l* = /2) имеем:

*F* ()  cos.cos . (55)

sin

В плоскости, перпендикулярной к оси (плоскость *Н*), симметричный вибратор любой длины свойством направленности излучения не обладает и его амплитудная ДН в этой плоскости имеет вид окружности, поскольку *F*() = 1.

При расположении вибратора над землей, которую принято считать идеально проводящей, результирующая амплитудная ДН с учетом влияния земли находится по правилу перемножения диаграмм: *F*рез = *FуFз*, где *Fу* – нормированная амплитудная ДН уединенного вибратора; *Fз* – множитель, которым учитывается влияние земли. При этом горизонтальный вибратор, размещенный на высоте *h* над поверхностью земли (рис. 9, *а*), и его зеркальное изображение образуют систему двух противофазных излучателей, расположенных на расстоянии 2*h* друг от друга, так что пространственная характеристика направленности системы принимает вид:

*F* ,  cos*kl* coscos  cos *kl* sin*kh*sin , (56)

 coscos

*Г*  cos *kl* 

где  – угол возвышения (между поверхностью земли и направлением в точку наблюдения), а  – угол, отсчитываемый от оси вибратора в горизонтальной плоскости.

При определении амплитудной ДН поднятого над землей вертикального вибратора (рис. 9, *б*) последний вместе с его зеркальным изображением образует систему двух синфазных излучателей, расположенных на расстоянии 2*h* друг от друга, и пространственная характеристика направленности в этом случае будет:

*F* ,  *F*

  cos*kl* sin   cos *kl* cos*kh*sin , (57)

в в

так как *F*в() = 1.

 cos *kl* cos

Действующая длина (в метрах) симметричного вибратора при *l*  /2 определяется по формуле:

*l*   tg *kl*  . (58)

ä  

 





Для полуволнового вибратора (2*l* = /2) действующая длина равна:

*l*   . (59)

ä 

Зная действующую длину вибратора, можно найти его сопротивление излучения, связывающее мощность излучения с квадратом действующего значения тока. При длине вибратора 2*l*  /2 сопротивление излучения (в Омах) определяется по формуле:

 *l* 

*R*   д 



 

. (60)

Сопротивление излучения может быть отнесено к току в точках питания вибратора или к току в пучности. Выше оно было приведено к току в точках питания *Iа*. Сопротивление излучения, отнесенное к пучности тока *I*п:

*R*  *R* sin *kl* , (61)





П

где *R* – сопротивление в точках питания симметричного вибратора.

При небольших тепловых потерях электромагнитной энергии в проводе вибратора, что чаще всего имеет место на практике, входное сопротивление симметричного вибратора (в Омах) может быть вычислено по приближенной формуле:

*Z*  *R*

* *iX*  *R* П
  + *i Wa*

sin *kl*

, (62)

*a a a* 



 *R*



  *R* 

  П 

* sin *kl*

  П 

* sin *kl*

 *Wa*   *Wa* 

где *Wa* – волновое сопротивление вибратора, обычно рассчитываемое (в Омах) по формуле Кессениха:

*W* lg 

 ,  lg,   . (63)

*a*  (*r*)

    *r* 

   

Здесь *r* – радиус провода вибратора.

Резонансное укорочение плеча симметричного вибратора рассчитывается по формуле:

*l*   , *l* , (64)

  

 



где  – коэффициент укорочения волны в вибраторе.

В случае полуволнового вибратора укорочение плеча:

*l*  , 

*Wa*

. (65)

Относительная ширина полосы рабочих частот (в процентах) такого вибратора:

*f f*cp

 *Ra* . (66)

*Wa*

КНД симметричного вибратора рассчитывается по формуле:

*D*    cos *kl*  . (67)

*R*

П

## Директорные антенны

Директорная антенна, или антенна типа «волновой канал», образуется из проволочных вибраторов, расположенных параллельно в одной плоскости (рис. 10). Вибратор 1 (обычно полуволновой) соединяется с фидером и является первичным излучателем антенны. Все остальные вибраторы с фидером не связываются и являются вторичными излучателями, причем те из них, которые расположены в направлении максимального излучателя антенны (на рис. 10 это вибраторы 2), имеют длину 2*l*д < λ/2 и называются директорами, а вибратор 3, находящийся по другую сторону от вибратора 1 и имеющий длину 2*l*p > λ/2 – рефлектором. Широкое применение такие антенны получили на метровых и дециметровых волнах: в телевидении и радиовещании, на радиорелейных линиях небольшой протяженности, радиолокации и так далее.



2*l*

3

1

*d*

2

*d*

θ

*d*

φ

*d*

*dд*

*z*

Рис. 10. Антенна «волновой канал»

Вибраторы 2 и 3 антенны возбуждаются за счет взаимных связей между ними и вибратором 1. Размеры и расположение директора должны быть подобраны так, чтобы вдоль антенны распространялась замедленная поверхностная волна, и обеспечивался режим осевого излучения. Токи во всех вибраторах директорной антенны находятся из системы уравнений Кирхгофа:

*I*p *Z*p.p  *I*изл *Z*и.р  *I*д*1Z*д*1*р  ...  *I*д*N Z*д*N*p  ; 

*I Z*  *I Z*  *I Z*  ...  *I Z*  *U* ; 

p p.и изл и.и д д1и д*N* д*N*и изл



*I*p *Z*и.д1  *I*изл *Z*и.и  *I*д1*Z*д1д1  ...  *I*д*N Z*д*N*и  ;

.........................................................................

*I*p *Z*pд*N*  *I*изл *Z*и.д*N*  *I*д1*Z*д1д*N*  ...  *I*д*N Z*д*N*д*N*

, (68)





 

где *I*р, *I*изл, *I*д*n* – комплексные амплитуды токов в рефлекторе, излучателе и в одном из директоров соответственно; *Z*р.р, *Z*и.и, *Z*д.д – собственные сопротивления рефлектора, излучателя и одного из директоров соответственно; *Z*р.и, *Z*рд*N* – взаимные сопротивления рефлектора и излучателя или директора соответственно; *b*и.д*N –* взаимные сопротивления излучателя и одного из директоров; *Z*д*m*д*n* – взаимные сопротивления *т-*го и *n*-го директоров; *U*изл – напряжение на зажимах излучателя.

После того как из системы уравнений найдены токи во всех вибраторах при заданной геометрии директорной антенны, можно рассчитать ее амплитудные ДН по формулам:

в плоскости *Н*(φ = π/2)

*N*

*F* (*H* )   *I*

*n*

*n* exp*ikdn*

cos*H*  ; (69)

в плоскости *E*(φ = 0)

*N* cos*kIn* cos*E*  cos *kIn*

*F* *E*    . (70)

*n*1

1 cos *kIn* sin *E*

Здесь θ – угол между осью антенны и направлением в точку наблюдения; *N* – полное число вибраторов в антенне; *k* = 2π/λ – волновое число, в котором λ – длина волны.

В формулах (69) и (70) все вибраторы пронумерованы с помощью индекса *п,* причем *п* = 1, 2, 3, ..., *N.* Рефлектору соответствует *n* = 1, первичному излучателю – *n* = 2 и так далее. Начало системы координат находится в центре первичного излучателя и *d*1 = – *d*p.

Для приближенной оценки характеристик директорной антенны можно считать, что *dn* = *nd*ср, 2*ln* = λ/2, *In* = *I*0exp[–*i*(*n* – 1)ψ], ψ = π/2.

в плоскости *Н*(φ = π/2):

sin  *N* *d*cp  cos*H* 

  

*F* *H*     ; (71)

*N* sin *d*cp  cos*H* 

  

 

в плоскости *E*(φ = 0):

sin  *N* *d*cp  cos*E* 

*E*

cos.sin    

*F* *H*  

  . (72)

cos*E*

*N* sin *d*cp  cos*E* 

  





Ширина луча антенны на уровне 0.5 по мощности в плоскости *Е*

(в радианах) определяется по формуле:

*E* 

.

, ,

*N* 

(73)

а в плоскости *H* – по формуле:

*H*

2



0.5

3,8

*N* 1

. (74)

КНД и эффективная площадь директорной антенны

рассчитываются по формулам:

*D*  *d*cp (*N* )  , (75)

   

 

*D*

*S*эф   . (76)

Точный расчет геометрии директорной антенны по заданным характеристикам приводит к задаче ее конструктивного синтеза. В качестве целевой функции задают максимум КНД или приближение к

заданной ДН. В процессе решения находят длины всех вибраторов 2*ln* и все расстояния *dn*.

## Спиральные антенны

Спиральные антенны относятся к типу антенн, электромагнитное поле излучения которых имеет вращающуюся (круговую) поляризацию в направлении оси антенны. Такие антенны широко используются в радиолокации для получения более контрастного изображения цели на фоне помех, а также при работе с летательными и космическими аппаратами, положение антенн которых изменяется в пространстве во времени.

Спираль может работать как самостоятельная антенна или являться элементом антенной решетки либо облучателем зеркальной антенны. Наиболее часто применяются цилиндрическая и каническая спиральные антенны с односторонним излучением (рис. 11), получаемым с помощью плоского сплошного или сетчатого металлического экрана, помещаемого перед спиралью и выполняющего роль рефлектора.



2β

*z*

*la*

*r*max



α

θ

*r*

*z*

*s*

*l*

*a б*

Рис. 11 Спиральные антенны: *а* – цилиндрическая спираль; *б* – коническая спираль

Геометрическими параметрами цилиндрической спирали (рис. 11, *а*) являются: *lа* – осевая длина; *l* – длина одного витка; *s* – расстояние между соседними витками (шаг спирали; *r* – радиус намотки; *N* – число витков и α - угол подъема витка (шаговый угол). Между этими параметрами существует связь:

*l*2  2π*r* 2  *s*2; α  arctg *s* 2π*r* ; *l*

 *Ns* . (77)

  *a*

*r*min

У конической спирали (рис. 11, *б*) длина витка и расстояние между витками переменны, ее параметрами являются: *lа* – осевая длина; *r*min –

минимальный радиус намотки; *r*maх – максимальный радиус намотки; *N* – число витков; α – угол подъема витка и β – половина угла при вершине конуса. Геометрические размеры конической спирали определяются по формулам:

*r*  .mintgsin ; *r*

 *r e**N*tgsin , (78)

min

exptgsin 

max min

где λmin – нижняя длина волны рабочего диапазона антенны.

В режиме осевого излучения вдоль оси цилиндрической спиральной антенны распространяется замедленная волна. Это происходит при условии, если вдоль одного витка спирали укладывается одна длина волны λ, то есть

*l*  2π*r*  . (79)

Чтобы получить максимальный КНД антенны, надо взять длину спиральной антенны, равную:

*la*.опт

 *Ns* 



 

, (80)

где ξ = 1 ÷ 1.4 – коэффициент укорочения волны, бегущей вдоль антенны. При этом ДН антенны рассматривается по формуле:

sin *Ns*   cos

*F*  

 

 cos, (81)

*N* sin *s*   cos

  

где θ – угол между осью антенны и направлением в точку наблюдения.

В режиме осевого излучения при оптимальном значении ξ и *N* > 3 цилиндрическую спиральную антенну характеризуют параметры:

а) ширина луча на уровне 0.5 по мощности (в радианах)

  .  , (82)

.

*l la*

на уровне нулевого излучения (в радианах):

    



; (83)

*l la*

б) КНД:

*la*  *l* 2 ; (84)

*D*  15    

 

в) входное сопротивление (в Омах) :

*R*  *l* . (85)

*a* 

При настройке цилиндрической спиральной антенны на максимальный КНД в направлении ее оси будет не круговая, а эллиптическая поляризация. Чтобы получить круговую поляризацию, размеры антенны должны

удовлетворять соотношению

*k**l*  *ks*  2, откуда:

*l*  *s*   . (86)



Таким образом, условие получения максимального КНД и условие излучения поля круговой поляризации противоречивы. На практике отдают предпочтение первому или второму условию в зависимости от того, что важнее - направленность спиральной антенны или круговая поляризация ее излучения.

Конические спиральные антенны более широкополосны, но имеют меньший КНД из-за уменьшения числа витков, для которых выполняется условие обеспечения режима осевого излучения.

## Антенные решетки

Антенные решетки (АР) представляют собой комбинацию отдельных излучающих элементов. Параметры АР определяются геометрическим расположением излучающих элементов, а также амплитудой и фазой сигналов возбуждения. В пределах апертуры АР находятся множество одинаковых излучающих элементов, таких, как щели, диполи, волноводы, микрополосковые (печатные) излучатели (в принципе любая антенна, в том числе и зеркальная).

В настоящее время отчетливо выявились широкие области использования АР. Такие системы необходимы в остронаправленных

антеннах с электрическим сканированием для высокой скорости обзора пространства или многоцелевой работы радиолокационных станций. В радиоастрономии и системах дальней связи решетки из больших зеркальных антенн резко увеличивают КНД. Применение АР в бортовых устройствах позволяет использовать в качестве антенны внешнюю поверхность аппарата.

Бурное развитое микроэлектроники в последние годы нашло отражение в антенной технике. Действительно, антенны и устройства СВЧ радиосистем в обычном (не микроэлектронном) исполнении занимают не менее половины всего объема радиотехнической системы и, переход на микроэлектронное исполнение только аппаратуры не приводит к желаемому результату.

Микроэлектронное исполнение всей радиосистемы потребовало создание модулей АР, в частности, микрополосковых (печатных) излучающих элементов [8].

Теория и вопросы проектирования антенных решеток различного назначения достаточно полно описаны в [1, 7, 8].

## 2.4.1 Волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР)

Компактность и возможность выполнения щелевых антенн заподлицо с металлической обшивкой делают их чрезвычайно удобными для размещения на летательных аппаратах, особенно на скоростных самолетах и ракетах.

На рис. 12, *а* изображена многощелевая антенна СВЧ, состоящая из полуволновых резонансных щелей, прорезанных в шахматном порядке по обе стороны от средней линии широкой стенки прямоугольного волновода

с волной

*H*10 . Нормированная амплитудная ДН такой антенны в

продольной плоскости определяется произведением нормированной амплитудной ДН одиночной щели *F*1(θ) на нормированный множитель системы *Fс*(θ):

*F* ()  *F*  *F* 

 cos.sin sin.*Nk*B sin , (87)

 c cos

*N* sin.*k*B

sin

где θ – угол между нормалью к широкой стенке волновода и направлением в точку наблюдения; *N* – число щелей; *k* = 2π/λ – волновое число, в котором λ – длина волны в свободном пространстве; λB – длина волны в волноводе, рассчитываемая по формуле:

B 

, (88)



 *a*











в которой *а* – размер широкой стенки волновода.

поршень



*х*



1

в

2



2

*a*

*a*

*х*2



в

*b*

λв 4



2

*a*

*б*

в

2

*b*

Рис. 12. Варианты расположения щелей в волноводно-щелевой антенной решетке резонансного типа: *а* – продольные противофазные щели; *б* - поперечные щели

В другом варианте синфазной многощелевой антенны СВЧ с поперечными щелями (рис. 12, *б*) нормированная амплитудная ДН в продольной плоскости описывается выражением:

*F*  

sin.*Nk*B sin . (89)

*N* sin.*k*B sin

Щель, прорезанная в волноводе, нарушает режим бегущих волн внутри волновода и вызывает отражение электромагнитной энергии. На эквивалентной схеме волновода щель можно представить в виде некоторого сопротивления, включенного параллельно или последовательно в зависимости от положения щели. Продольная щель эквивалентна параллельно включенному сопротивлению, поперечная – последовательному. При расчете согласования многощелевых антенн СВЧ обычно пользуются последовательным сопротивлением и параллельной проводимостью.

Эквивалентная проводимость продольной полуволновой щели, расположенной на расстоянии *x*1 от середины широкой стенки волновода с волной *H*10, рассчитывается по формуле:

*G*  . *a* B cos   sin  *x*  , (90)

эк *b* 

 

  *a* 

 B   

где *a*, *b –* размеры волновода.

Эквивалентное последовательное сопротивление поперечной полуволновой щели, нормированное к волновому сопротивлению волновода

с волной

*H*10 , определяется так:

 

 

    *x* 

*R*  .

B cos

cos 

, (91)

эк    *ab*  *a*   *a* 

     

где *x*2 – смещение центра щели относительно середины широкой стенки волновода.

Для того чтобы в возбуждающем антенну волноводе установился режим бегущих волн, должно выполняться условие:

*R*эк *N* ,

*G*эк *N* .

(92)

*a*

*х*2 



*d* в 2





2

Поглощающая нагрузка

*d* < λв



2

*б*

Рис. 13. Варианты расположения щелей в волноводно-щелевой антенной решетке бегущей волны: *а* – продольные противофазные щели; *б* - поперечные щели

Синфазные волноводно-щелевые антенны – узкополосны. Чтобы расширить диапазон рабочих частот, применяют несинфазные-антенны (рис. 13), соседние щели которых возбуждаются со сдвигом фаз ψ = 2π*d*/λв (*d* – расстояние между центрами соседних щелей).

При небольшом расфазировании щелей нормированные амплитудные ДН таких антенн рассчитываются по формулам (87), (89), а смещение

главного максимума ДН относительно нормали к широкой стенке волновода (в радианах) определяется по формуле:

  arcsin   *q*  , (93)



*d*

 

 B 

где *q* = 0.5 – для переменнофазно-связанных щелей с возбуждающим волноводом; *q* = 0 *–* для синфазно-связанных щелей.

## 3. ПОЛОСКОВЫЕ АНТЕННЫ

В ДМ и СМ диапазонах волн находят применение антенны, выполненные по технологии печатных схем. Такие антенны отличаются пониженным весом и габаритами, а также технологичностью изготовления. На рис. 14 приведены эскизы двух разновидностей наиболее употребительных на практике полосковых антенн – прямоугольной и круглой, с возбуждением полосковой и коаксиальной линией. Для согласования точка возбуждения смещена от края антенны (размеры *y*0 и ρ0 на рис. 14).

В режиме основного типа колебаний антенны, изображенные на рис. 14 имеют ДН однолепесткового характера с максимумом, ориентированным в направлении нормали к плоскости диска (θ = 0°).

*a*



*a*

ρ0

*b*

*y*0

*a б*

Рис. 14. Микрополосковый излучатель: *а* – прямоугольный; *б* – круглый

Приведем расчетные формулы для прямоугольной антенны. Входное сопротивление в точке резонанса чисто активное и равно:

cos2 π *y*

0

*R*вх 

*b* , (95)

2*G*

изл

где *G*изл

– проводимость излучения торца резонатора:

*G*èçë

  *a*

377 

Î ì 1 . (96)

Резонансная длина антенны:

*b*ðåç

 0.48

, (97)

ε*r* – относительная диэлектрическая проницаемость материала положки.



0

*r*

Рекомендуемый размер *a* от , до , .

Диаграмма направленности прямоугольной антенны рассчитывают по формуле:

sin  *ka* sin cos cos *kb* sin sin  

2 2 

 2   2

1 sin2 sin2 

 2  sin

sin  cos

*F* ,  

  

     . (98)

*ka* sin cos

 *kb* 2

2 1  2 sin sin 

 

Входное сопротивление круговой дисковой антенны (рис. 14, *б*) в точке резонанса:

 *J* 1,84 *a* 2



*R*âõ  

1 0

*J*1 1,84

*G*èçë



 , (99)

где *J*1(*x*) – функция Бесселя первого порядка.

Резонансная частота для основного типа колебаний дисковой полосковой антенны определяется формулой:

*f*ðåç 



2*xa*ýô 2

1,84*c*

, (100)

где:

*a*ýô  *a*

1 

2*d*

*a*



 ln *a* 1, 772 



2



2*d*





. (101)

Выражение для ДН дисковой антенны

*F* ,  cos *J* *ka* sin  *J* *ka*sin cos sin   cos  . (102)

  

*ka*sin 

Прямоугольная и круглая полосковая антенны, работающие в режиме основного типа колебаний, излучает поле линейной поляризации (вектор *E* в плоскости *Y*0*Z*) c высокой степенью подавления кроссполяризационной составляющей.

## ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

Антенная решетка (АР) представляет собой группу излучающих элементов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, причем токи в каждом элементе, в общем случае, имеют определенную амплитуду и фазу. Поле решетки определяется путем суперпозиции полей отдельных элементов. Это приводит к представлению суммарного поля в виде ряда. Линейное изменение фаз в элементах АР приводит к перемещению луча антенны в пространстве – сканированию. Антенны такого класса называются фазированными антенными решетками – ФАР. На практике находят применение линейные, плоские, осесимметричные (например, кольцевые) решетки.

## Плоские решетки

Для формирования узконаправленного излучения в двух взаимно- перпендикулярных плоскостях и обеспечения возможностей управления лучом в некотором пространственном секторе углов необходимо использовать двумерную (поверхностную) решетку излучателей.

На практике находят применение поверхностные АР самой разнообразной формы и структуры. Однако, наибольшее распространение имеет АР, схема расположения элементов которой изображена на рис. 15.

*y*



*dx*

*dy*

*x*

Рис. 15. Плоская эквидистантная АР

Эта плоская решетка идентичных и одинаково ориентированных излучателей, расположенных в узлах прямоугольной эквидистантной сетки с периодом *dx* и *dy*.

Рассмотрим прямоугольную решетку с неравномерным амплитудным и линейным фазовым распределением, сфокусированную для ориентации луча под углами 0, 0. В этом случае распределение тока по элементам записывается как:

*I pq* 

*I pq*

 *e* *j**pq* , (103)

где

 *pq*  *x*  *p*  *pср*    *y* *q*  *qср* ,

*q*  *n*  1 ,

ср 2

*x*  *kdx* sin cos ,

  *kdy* sin 0 sin 0 .

*y*

*x*

и *y*

– необходимые сдвиги фаз между соседними

элементами в строке и столбце.

Проанализируем два частных случая амплитудного распределения токов в АР:

а) Закон распределения «Косинус на пьедестале»:

*I pq*



 *I*0 *x*  1 *x* cos

π *p*  *pср*  

*y* 1 *y* cos

       

π *p*  *pср* 

. (104)



 *m* 1

 

*n* 1 

ДН в этом случае определяется формулой:

*F* ,,,  

 sin *mU x*

sin *m* *U*

  

sin *m* *U*

  

  

  *x m*   

  *x m* 

 *F* ,  *x*   *x*

   *x*

 (105)

 sin *Ux*  sin  *U*

  

 sin  *U*

   

    *x*

*m* 

  *x*

*m*  

     

 sin *mU y*

sin *n* *U*

  

sin *n* *U*

  

   *y*

  *y m* 

  *y*

  *y m* 

 *y*  

  

 

 sin *Uy*

 

 sin  *U*

 *y*



 

*m* 



 sin  *U*

 *y*



   

*m*  



     

*F*1(θ, φ) – ДН одиночного элемента.

б) Закон распределения «Косинус квадрат на пьедестале»:

*I pq*



 *I* *x*   *x* cos

  *p*  *p*ср  

   *y*    *y* cos

 *q*  *q* 

 .(106)

  ср 



Выражение для ДН:

*F* ,;,   *F* , 

*m* 

 

*m*  

 sin *mU x*

sin *m* *U*

  

sin *m* *U*

  

   

  *x*

*m* 

 

  *x*

*m* 

 *x*   *x*    *x*   (107)

  sin *Ux*  sin  *U*

  

 sin  *U*

   

    *x*

*m* 

  *x*

*m*  

     

 sin *nU y*

sin *n* *U*

  

sin *n* *U*

  

  *y*

  *y*

  *y n* 

  *y*

  *y n* 

  

  

 .

  sin *Uy*  sin  *U*

  

 sin  *U*

   

    *y*

*n* 

  *y*

*n*  

     

Для обоих законов распределения амплитуд:

*Ux*  *kdx* sincos  sin cos , *Uy*  *kdy* sincos  sin cos  (108)

Из формулы (104) следует частный случай равноамплитудного распределения ( *x*   *y*  1).

В двумерной решетке также как в линейной происходит расширение главного лепестка ДН при отклонении луча от нормали. Если решетка является остронаправленной ( θ0,5  10), то можно считать, что расширение

происходит лишь в плоскости сканирования. В этих случаях для ширины ДН справедливы приближенные формулы (равноамплитудные распределения):

   ,   ;

   ,   , (109)

, *x*

*mdx*

cos

, *y*

*ndy*

cos

где θ0

– угол отклонения луча от нормали.

КНД ФАР с равномерным по амплитуде распределением определяется

следующим выражением

*D*  4 *mndxdy* cos

. (110)

2 0

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Предполагается использование 2 способов выдачи задания.

**Способ 1.** Для эскизной разработки одного из вариантов антенной системы исходные данные расположены в таблицах 1–8. Тип антенны указан в соответствии с номером по журналу группы и номером группы в табл. 1.

Значения центральной частоты антенны в ГГц (для проволочных антенн частота указана в МГц) приведены в табл. 2.

В табл. 3 заданы значения ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности, выраженной в градусах, причем для зеркальных антенн значения ширины ДН равны в *Е* и *Н* плоскостях, волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) проектируется линейными.

Микрополосковые АР имеют указанные в табл. 3 значения ширины ДН в плоскостях *Е* и *Н* в соответствии с табл. 4, в которой указана форма излучателя АР и вид поляризации.

Дополнительные данные для ВЩАР с частотным сканированием приведены в табл. 5. Дополнительные данные для многолучевой АР приведены в табл. 6.

В табл. 7 заданы требования к уровню боковых лепестков всех типов антенн. Проектируемая антенна должна иметь уровень боковых лепестков близкий к значению, указанному в таблице, но не выше указанного.

В соответствии с табл. 8 для передающих антенн рассчитывается напряженность электрического поля, либо плотность потока мощности, создаваемой антенной на расстояниях 10, 25, 50, 75 км (результаты сводятся в таблицу). Для приемной антенны рассчитывается сигнал, поступающий на вход согласованного приемника для тех же расстояний, при этом параметры передающей антенны считаются аналогичными параметрам приемной антенны.

Таблица 1

Тип проектируемой антенны

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер группы | Номер по журналу группы | | | | | | | | | | | |
| 1,14 | 3,16 | 5,18 | 7,20 | 9,22 | 11,2  4 | 2,1  3 | 4,15 | 6,17 | 8,1  9 | 10,2  1 | 12,2  3 |
| 1 | А | Б | В | Г | Д | Е | Ж | З | И | К | Л | М |
| 2 | Н | А | Б | В | Г | Д | Е | Ж | З | И | К | Л |
| 3 | М | Н | А | Б | В | Г | Д | Е | Ж | З | И | К |
| 4 | Л | М | Н | А | Б | В | Г | Д | Е | Ж | З | И |
| 5 | А*ц* | Л | М | Н | А | Б | В | Г | Д | В*ц* | Г*ц* | Б*ц* |
| 6 | И | К | Л | М | Н | А | Б | В | Г | Д | Е | Ж |

Примечание: А, Б, В, Г, Д – параболическая однозеркальная антенна, где А – рупорный облучатель, прямоугольный волновод; Б – двухщелевой облучатель; В – спиральный облучатель; Г – вибраторный облучатель; Д – рупорный облучатель, круглый волновод, Е, Ж, З, И, К – антенная решетка, где И – волноводно-щелевая антенная решетка (ВЩАР) резонансного типа; Е

– ВЩАР нерезонансного типа; Ж – ВЩАР с частотным сканированием; З – микрополосковая антенная решетка; К – многолучевая антенная решетка; Л – антенна «волновой канал»; М – штыревая антенна λ/4; Н – штыревая антенна 5λ/8. Индекс – *ц* при типе зеркальной антенны означает, что антенна проектируется цилиндрической, при этом ширина ДН в плоскости, проходящей через ось цилиндра, берется в два раза меньше заданной в табл. 3.

Таблица 2

Рабочая частота антенны (ГГц)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  групп ы | Последняя цифра номера зачетной книжки | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 7,6 | 4,7 | 15,1 | 8,2 | 9,3 | 3,7 | 3,3 | 5,6 | 22,4 | 21,2 |
| 2 | 15,6 | 9,2 | 10,4 | 7,5 | 34,1 | 6,2 | 18,1 | 11,6 | 12,0 | 5,8 |
| 3 | 27,6 | 5,1 | 7,2 | 3,1 | 21,0 | 2,3 | 5,4 | 10,1 | 14,2 | 3,8 |
| 4 | 8,2 | 32,2 | 4,1 | 5,0 | 6,3 | 7,4 | 22,9 | 18,2 | 9,3 | 5,4 |
| 5 | 23,6 | 4,2 | 7,1 | 9,1 | 5,2 | 8,4 | 34,3 | 9,4 | 4,4 | 12,5 |
| 6 | 1,6 | 2,8 | 5,1 | 18,2 | 19,3 | 33,7 | 6,3 | 15,6 | 2,4 | 11,2 |

Примечание: для антенн типов М, Л, Н частота задана в МГц.

Ширина ДН (градусы)

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер групп ы | Последняя цифра суммы номеров  (номер зачетной книжки + номер в журнале группы) | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 1,0 | 2,2 | 3,5 | 1,1 | 2,6 | 1,5 | 8,5 | 1,8 | 8,2 | 3,4 |
| 2 | 3,0 | 7,0 | 4,5 | 1,5 | 2,3 | 4,2 | 5,1 | 6,2 | 7,5 | 1,7 |
| 3 | 8,0 | 4,1 | 0,9 | 2,5 | 2,0 | 1,7 | 1,3 | 4,6 | 7,3 | 3,0 |
| 4 | 1,0 | 5,4 | 1,7 | 8,5 | 3,2 | 2,5 | 6,5 | 3,4 | 2,0 | 3,3 |
| 5 | 11,0 | 6,7 | 1,2 | 2,5 | 2,1 | 1,6 | 2,2 | 9,1 | 12,0 | 2,3 |
| 6 | 9,0 | 3,4 | 2,7 | 4,3 | 4,2 | 4,8 | 4,3 | 6,2 | 2,8 | 4,3 |

Примечание: для антенн типа «волновой канал» ширина ДН может корректироваться преподавателем, либо рассчитывается антенная решетка из этих антенн, для штыревых антенн ширина ДН не задается, а подлежит расчету. При расчете штыревых антенн в КВ диапазоне параметры «земли» следующие: ε = 13, ζ = 0.005 См («средняя земля»).

Таблица 4

Дополнительные данные для МПА

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер по  журналу группы | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 |
| Форма излучателя (поляризация  ) | П (КП  ) | К (КП  ) | П (КП  ) | К (КП  ) | П (КП  ) | К (ЛП  ) | П (ЛП  ) | К (ЛП  ) | П (ЛП  ) | К (ЛП  ) |

Примечание: КП – круговая поляризация; ЛП – линейная поляризация; П – прямоугольный излучатель; К – круглый излучатель.

Таблица 5 Дополнительные данные для ВЩАР с частотным сканированием

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Дополн ительны  е данные | Номер по журналу группы | | | | | | | | | | | |
| 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 |
| ср | 8 |  | 10 | 2 |  | 6 |  | 5 | 3 | 4 | 7 |  |
| Δ/ср (%) | 12 | 20 |  | 15 | 8 | 10 | 12 |  |  | 18 | 14 | 5 |
| Δ |  | 10 | 20 |  | 12 |  | 8 | 5 | 9 |  |  | 3 |

Примечание: Δ – сектор сканирования; Δ/ср – относительное изменение длины волны генератора (%); ср – направление главного максимума ДН на центральной частоте антенны.

Таблица 6

Дополнительные данные для многолучевой АР

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер по журналу  группы | 1 | 3 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 19 | 21 | 23 |
| Количество лучей (*N*) | 4 | 6 | 8 | 12 | 16 | 5 | 7 | 9 | 10 | 14 |

Примечание: при *N* = 2*n*

образующая схема.

применяется параллельная диаграммо-

Таблица 7

Уровень боковых лепестков антенны (не более –дБ)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номе | Номер по журналу группы | | | | | | | | | | | |
| р  групп ы | 1,2 | 3,4 | 5,6 | 7,8 | 9,10 | 11,1  2 | 13,1  4 | 15,1  6 | 17,1  8 | 19,2  0 | 21,2  2 | 23,2  4 |
| 1 | 13/1 | 17/2 | 20/2 | 24/3 | 13/2 | 17/2 | 20/3 | 24/1 | 13/2 | 17/3 | 20/1 | 24/2 |
| 7 | 0 | 4 | 1 | 0 | 4 | 1 | 7 | 4 | 1 | 7 | 4 |
| 2 | 24/3 | 13/1 | 17/2 | 20/2 | 24/1 | 13/2 | 17/2 | 20/2 | 24/2 | 13/2 | 17/3 | 20/2 |
| 1 | 7 | 0 | 4 | 7 | 0 | 4 | 4 | 0 | 4 | 1 | 4 |
| 3 | 20/2 | 24/3 | 13/1 | 17/2 | 20/1 | 24/2 | 13/2 | 17/3 | 20/2 | 24/2 | 13/3 | 17/2 |
| 4 | 1 | 7 | 0 | 7 | 0 | 4 | 1 | 0 | 4 | 1 | 4 |
| 4 | 17/2 | 20/2 | 24/3 | 13/1 | 17/2 | 20/3 | 24/2 | 13/2 | 17/2 | 20/2 | 24/1 | 13/2 |
| 0 | 4 | 1 | 7 | 4 | 1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 7 | 4 |
| 5 | 13/3 | 17/2 | 20/2 | 24/2 | 13/1 | 17/2 | 20/2 | 24/3 | 13/3 | 17/1 | 20/2 | 24/1 |
| 1 | 4 | 0 | 4 | 7 | 0 | 4 | 1 | 0 | 7 | 4 | 7 |
| 6 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 | 13/2 |
| 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

Примечание: в числителе указано значение для прямоугольного (квадратного) раскрыва, в знаменателе – для круглого раскрыва. Для антенн типа «волновой канал» уровень боковых лепестков задается в плоскости *Е*, при этом берется цифра в числителе. Для штыревых антенн уровень боковых лепестков не задается.

Таблица 8

Дополнительные данные для расчета

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер по журна  лу | 1,3 | 5,7 | 9,11 | 2,4 | 6,8 | 10,1  2 | 14,1  6 | 18,2  0 | 22,2  4 | 13,1  5 | 17,1  9 | 21,2  3 |
| Вид антенн ы/мощ  ность (Вт) | Пр. 5 | Пр. 10 | Пер  . 15 | Пер  . 20 | Пр. 25 | Пр. 35 | Пер  . 5 | Пер  . 10 | Пр. 15 | Пр. 20 | Пер  . 25 | Пер  . 30 |

Примечание: Пр. – приемная антенна, Пер. – передающая антенна.

Все недостающие дополнительные данные, необходимые для расчетов, но не приведенные в таблицах, студенты выбирают самостоятельно и уточняют у руководителя.

В случае возникновения противоречий между различными данными, студент должен либо обосновать выбор параметров антенны, либо проконсультироваться с преподавателем.

## Способ 2.

ЗАДАНИЕ 1

Спроектировать рупорно-линзовую антенну для радиорелейной линии связи, работающую в диапазоне

частот f ± ∆f ГГц. Линза выполнена из искуственного диэлектрика. Антенна должна обеспечить на выходе

приемника мощность сигнала Рпр.= … мкВт, при мощности передатчика Р = 3 Вт. Длина ретрансляционного

участка r = ... км. Высота подъема передающей и приемной антенны одинакова и равна 60 м. Длина фидера

между антенной и передатчиком (или приемником) – 5 м. Поляризация излучаемого поля – вертикальная. Ширина диаграммы направленности в двух главных плоскостях должна быть примерно одинаковой.

В расчете необходимо:

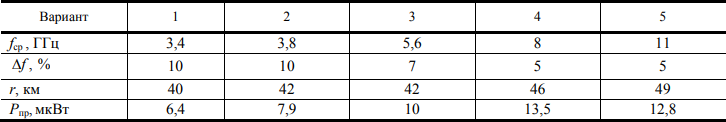
1. выбрать тип и конструктивные размеры фидера и рассчитать его затухание на средней и крайних частотах диапазона;
2. определить требуемые коэффициент усиления и коэффициент направленного действия антенны на

средней частоте и его изменение в полосе частот;

1. рассчитать конструктивные размеры антенны;
2. рассчитать и построить профиль линзы в плоскостях Е и H;
3. рассчитать диаграммы направленности антенны в плоскостях Е и Н;
4. рассчитать и построить амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве антенны;
5. рассчитать технические допуски на изготовление линзы;
6. оценить влияние линзы на облучатель и предусмотреть устройство для снижения этого влияния.

Графический материал:

1. конструктивный эскиз антенны;
2. графики диаграммы направленности антенны. Числовые значения исходных данных приведены в табл. 9.

Таблица 9

ЗАДАНИЕ 2

Спроектировать рупорно-линзовую антенну с металло-пластинчатой линзой, предназначенную для малоканальной радиорелейной линии связи. Антенна работает на частоте fср … ГГц и должна обеспечивать в месте приемной станции напряженность электрического поля Е = ... мВ/м при мощности передатчика – Р = 5 Вт. Диапазон рабочих частот 2∆f = 20 % .

Высота передающей и приемной антенн одинакова и равна h = … м. Длина ретрансляционного участка r = … км. Поляризация излучаемого электромагнитного поля – горизонтальная.

Ширина главного лепестка диаграммы направленности должна быть примерно одинаковой в плоскостях Е и Н.

Длина фидера – 7 м.

В расчете необходимо:

1. избрать тип и конструктивные размеры питающего фидера и рассчитать его основные электрические

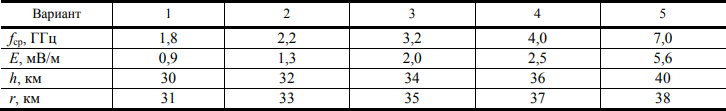
параметры;

1. рассчитать конструктивные размеры рупора и линзы;
2. рассчитать и построить профиль линзы в плоскостях Е и Н;
3. рассчитать диаграммы направленности в плоскостях Е и Н;
4. рассчитать и построить амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве антенны;
5. определить коэффициент усиления антенны на средней частоте и его изменение в полосе частот;
6. оценить влияние линзы на облучатель и предусмотреть меры для уменьшения этого влияния.

Графический материал:

1. конструктивный эскиз антенны;
2. графики диаграммы направленности антенны.

Числовые значения исходных данных приведены в табл. 10.

Таблица 10

ЗАДАНИЕ 3

Спроектировать рупорно-параболическую антенну, предназначенную для радиорелейной линии связи. Антенна работает в диапазоне частот, f ± ∆f ср ГГц и должна обеспечивать на входе приемника мощность сигнала Рпр..… мкВт при мощности передатчика 3 Вт. Длина ретрансляционного участка r = ... км. Высота подъема передающей, и приемной антенны одинакова и равна 100 м. Поляризация излучаемого поля – вертикальная.

Длина фидера между антенной и передатчиком (или приемником) 100 м. В расчете необходимо:

1. выбрать конструктивные размены фидера и рассчитать его затухание на средней и крайней частотах

диапазона;

1. определить требуемые коэффициент усиления и коэффициент направленного действия антенны на

средней частоте и его изменение в полосе частот;

1. рассчитать конструктивные размеры антенны (размеры апертуры, углы раскрыва и облучения, фокусное

расстояние и др.);

1. рассчитать диаграммы направленности антенны в плоскостях Е и Н и по ним определить ширину главного лепестка по половинной мощности;
2. определить величину защитного действия антенны под углами 90° и 180° к направлению главного излучения;
3. выбрать конструкцию и рассчитать основные размеры согласующего перехода от питающего волновода

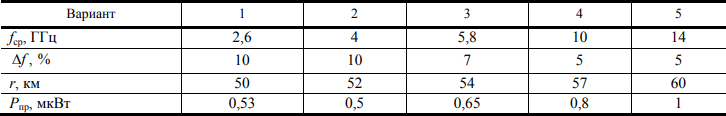
к рупору;

1. рассчитать и построить амплитудное распределение поля при раскрыве антенны.

Графический материал:

1. конструктивный эскиз антенны;
2. графики диаграммы направленности.

Числовые значения исходных данных приведены в табл. 11.

Таблица 11

ЗАДАНИЕ 4

Спроектировать перископическую антенную систему для радиорелейной линии связи. Средняя рабочая

частота fср… ГГц.

Полоса рабочих частот 2∆f = 20 % . Антенна должна обеспечивать в месте приемной станции напряженность электрического поля Е = ... мВ/м при мощности передатчика Р = 5 Вт. Высота мачты (расстояние между зеркалами) равна h = ... м. Длина ретрансляционного участка r = … км.

Поляризации излучаемого электромагнитного поля – горизонтальная. Излучатель (нижнее зеркало) выполнен в виде эллипсоида вращения, переизлучатель (верхнее зеркало) – в виде параболоида вращения.

Облучатель – пирамидальный рупор. Длина питающего фидера – 5 м. В расчете необходимо:

1. определить коэффициент усиления антенны на средней частоте и его изменение в полосе частот;
2. определить конструктивные размеры элементов, антенной системы;
3. рассчитать диаграммы направленности в плоскостях Е и Н и по ним определить ширину главного лепестка по половинной мощности;
4. определить коэффициент использования верхнего зеркала и КПД антенны; уточнить коэффициент усиления;
5. рассчитать технические допуски на изготовление элементов антенной системы и точность взаимного

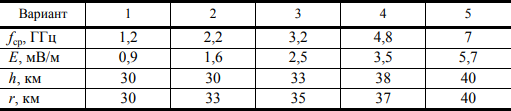
расположения излучателя и переизлучателя;

1. рассчитать величину защитного действия и переходное затухание между антеннами, расположенными в

одном ретрансляционном пункте на расстоянии 20 м друг от друга. Графический материал:

1. конструктивный эскиз антенной системы;
2. графики диаграммы направленности.

Числовые значения исходных данных приведены в табл. 12.

Таблица 12

ЗАДАНИЕ 5

Рассчитать антенну для передвижной телевизионной станции внестудийного вещания, работающей на несущей частоте видеосигнала fн

=… ГГц. Антенна выполнена в виде параболоида вращения и должна в месте расположения приемной антенны (на радиоцентре) обеспечить напряженность электрического поля Е = …

мВ/м при мощности передатчика Р = 5 Вт. Расстояние между передвижной станцией и радиоцентром r = … км.

Высота приемной антенны 100 м, высота передающей антенны 5 м. Полоса рабочих частот 2∆f = 8 МГц. Поляризация излучаемого поля – вертикальная. Длина фидера – 5 м.

В расчете необходимо:

1. выбрать конструктивные размеры фидера и рассчитать его затухание в рабочей полосе частот;
2. определить требуемые коэффициенты усиления и направленного действия антенны на несущей частоте

с учетом затухания в фидере;

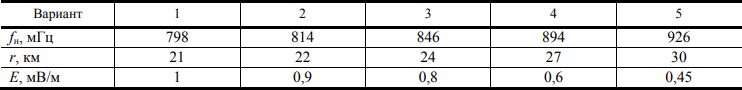
1. выбрать тип облучателя и рассчитать его основные размеры и диаграммы направленности в плоскостях

Е и Н;

1. рассчитать конструктивные размеры параболического зеркала (диаметр, угол раскрыва, фокусное расстояние);
2. рассчитать диаграммы направленности антенны в плоскостях Е и Н и из них определить ширину главного лепестка по нулям и по половинной мощности;
3. определить неравномерность коэффициента усиления антенн в рабочей полосе частот,
4. рассчитать технические допуски на изготовление антенны;
5. оценить влияние зеркала на облучатель и рассчитать устройства для уменьшения этого влияния.

Графический материал:

1. конструктивный чертеж антенны и облучателя;
2. графики диаграммы направленности антенны и облучателя. Числовые значения исходных данных приведены в табл. 13.

Таблица 13

ЗАДАНИЕ 6

Спроектировать двухзеркальную антенну для наземной станции связи через ИСЗ. Антенна работает в диапазоне частот f ± ∆f ГГц и должна обеспечивать на выходе приемной антенны ИСЗ с коэффициентом усиле

ния 20 ДБ уровень сигналу Рпр. = … мВт при расстоянии 40 тыс. км и при мощности передатчика 5 кВт. Длина

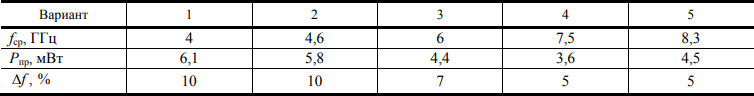
фидера между антенной и передатчиком 3 м. В расчете необходимо:

1. выбрать конструктивные размеры фидера и рассчитать его затухание в рабочей полосе частот;
2. рассчитать требуемые коэффициент усиления и коэффициент направленного действия антенны на средней частоте диапазона;
3. выбрать тип облучателя и рассчитать его размеры;
4. выбрать профили большого и малого зеркала и рассчитать конструктивные размеры (диаметр, угол раскрыва, фокусное расстояние);
5. рассчитать диаграммы направленности антенн в плоскостях Е и Н; определить ширину главного лепестка

по нулям и по половинной мощности;

1. определить изменение коэффициента усиления антенны в рабочем диапазоне частот;
2. оценить экранирующее действие малого зеркала. Графический материал:
3. конструктивный эскиз антенны;
4. графики диаграммы направленности антенны.

Числовые значения исходных данных приведены в табл. 14.

Таблица 14

ЗАДАНИЕ 7

Спроектировать трехэлементную директорную антенну (волновой канал), предназначенную для приема

телевидения. Антенна настроена на частоту fср = … МГц и должна обеспечить прием сигнала на телевизор с

чувствительностью 100 мкВ при напряженности электрического поля Е = … мкВ/м. Полоса рабочих частот

2∆f = 8 МГц. Вход приемника несимметричный с сопротивлением 75 Ом.

Минимально допустимое значение

коэффициента бегущей волны в фидере Kдоп > 0,8. Длина фидера 30 м. В расчете необходимо:

1. определить коэффициент усиления и коэффициент направленного действия на средней частоте;
2. определить резонансную длину одиночного вибратора и изменение его длины с учетом взаимодействия

вибраторов в системе;

1. определить длины всех вибраторов и расстояния между ними;
2. определить волновое сопротивление вибраторов и полное входное сопротивление антенны, а также его

изменение на краю полосы пропускания;

1. выбрать тип фидера и осуществить согласование его с антенной, выбрать тип и конструктивные размеры согласующего или симметрирующего устройства;
2. рассчитать затухание фидера на средних и крайних частотах диапазона;
3. рассчитать диаграммы направленности антенны в Е и Н плоскостях и определить ширину главного лепестка по половинной мощности. Графический материал:
4. конструктивный чертеж антенны;
5. графики диаграммы направленности.

Числовые значения исходных данных приведены в табл. 15.

Таблица 15

## 6 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НЕЙ

Пояснительная записка к курсовой работе должна состоять из шести разделов. Объѐм пояснительной записки составляет 20-30 страниц рукописного текста, в том числе необходимое количество рисунков, чертежей, графиков, таблиц. Материал пояснительной записки располагается следующим образом: титульный лист, техническое задание на курсовое проектирование, содержание, разделы курсовой работы, заключение, список литературы, приложение.

Во введении определяются и формулируются основные задачи курсовой работы, намечаются план и пути решения задачи. Объем введения не должен превышать 1-2 страниц. Во введении отмечается место и значение разрабатываемой антенны в системах радиосвязи. Кратко рассматривается техническое задание, на базе чего выделяются основные конструкторские задачи, подлежащие решению в данной работе. Намечаются возможные пути, методы решения поставленных задач.

Обзор технической литературы является важным разделом курсовой работы. Обзор производится на основе Интернета. В результате обзора студент должен хорошо разобраться в сути решаемой задачи, познакомиться с существующими аналогичными конструкциями и методами их расчѐта, дать критическую оценку этих конструкций с позиций поставленной задачи, сделать выводы о пригодности той или иной конструкции для условий, поставленных техническим заданием. Таким образом, обзор технической литературы с анализом существующих конструкций и методов их расчѐта становится одним из разделов научно-исследовательской работы, входящей в курсовое проектирование. Перечень литературы общей для большинства проектов дан в конце настоящей методической разработки. Обязательным для

студентов является самостоятельный поиск и анализ дополнительной литературы, которая может включать монографии и периодические издания, как на русском, так и на иностранных языках.

Во втором разделе анализируют задание на проект, обосновывают выбор метода расчета антенны, выбор линии передачи, типа излучателя или облучателя и антенны в целом. В этом разделе приводятся также особенности распространения радиоволн расчетного диапазона в атмосфере (ионосфере) и учет этих особенностей при выборе и проектировании антенн.

В ходе выполнения этого раздела предусматривается выбор варианта конструкции и технико-экономическое обоснование этого выбора. Это означает, что вариант конструкции должен быть выбран из нескольких (двух, трѐх) примерно равноценных с точки зрения обеспечения заданных радиотехнических характеристик. Целесообразность применения одной из равноценных конструкций определяют при этом не только технические, но и экономические факторы. Принцип технико-экономического отбора варианта конструкции должен использоваться на всех этапах конструирования, начиная с выбора типа конструкции устройства в целом и кончая разработкой конструкции отдельных деталей. В число технико-экономических показателей, служащих для сравнения вариантов конструкции, могут входить масса, габариты, сложность конструкции, количество нормализованных узлов и деталей, технологичность, себестоимость, ремонтопригодность и др. Сравнение по этим показателям может быть как количественным, так и качественным. Рекомендуется составление принципиальной электрической схемы устройства, в котором может работать разрабатываемое устройство, что преследует цель проиллюстрировать назначение этого устройства, возможности его применения. Принципиальная схема выполняется на листах формата А4 в соответствии со стандартами ЕСКД и помещается в приложении пояснительной записки.

В третьем разделе приводят расчеты заданного антенно-фидерного устройства. Этот раздел является важнейшим, его разработке должно уделяться основное внимание. Расчеты проектируемого устройства обычно начинают с выбора и расчета линии передачи (ЛП) (волновода, коаксиальной линии передачи, полосковой линии), определения характеристик [9, 10] (максимальной мощности, диапазона частот и пр.). Затем рассчитывают основные характеристики и размеры элементов устройства (излучателя, облучателя) и всего устройства в целом.

Расчетная часть заканчивается разработкой конструкции проектируемого устройства. Конструкция антенны разрабатывается студентом самостоятельно и представляет собой эскиз антенны в составе радиотехнической системы, а также описание функций, которые выполняет антенна. При выполнении этого раздела используются литературные данные.

Для проектируемой антенны приводятся методики измерений основных характеристик. Например, для антенн – это методики измерения диаграммы

направленности (ДН), коэффициента усиления, поляризационной характеристики. Причем, нужно из ряда существующих методик выбрать методику, подходящую для данного устройства [6]. При необходимости методики измерения дополняют методикой настройки и регулировки антенно-фидерного устройства.

Существенно, что антенной технике характеристики напрямую связаны с конструкцией антенны. Поэтому электрический и конструктивный расчѐт всегда совмещаются в единый конструктивно-электрический расчѐт. Следует иметь в виду, что разработка конструкции всегда основана на определѐнной конкретной технологии. При выборе конструктивных решений в значительной степени предопределяются и технологические процессы, их реализующие, поэтому, выбирая и обосновывая конструкцию устройства, наряду с обеспечением технических требований, связанных с условиями эксплуатации изделия, необходимо в равной мере учитывать производственно-технологические требования, добиваясь технологичности конструкции.

Результаты расчетов записывают в таблицы, которые оформляют следующим образом. Записывают номер таблицы и ее название. Каждый столбец (или строка) таблицы должны иметь свое назначение, обозначение и единицу измерения.

Для каждой рассчитываемой величины записывают алгебраическую формулу, затем переписывают ту же формулу с подставленными в нее числовыми значениями и, наконец, приводят результаты вычислений. Расчеты выполняют с помощью ПК.

В последнем разделе разделе приводят результаты расчетов напряженностей электрического поля для передающих антенн, либо значения сигнала на входе согласованного приемника для приемных антенн и выводы по проделанной работе.

Заключение по проделанной работе – это качественная или количественная оценка источников погрешностей методов расчета устройства, измерения его характеристик, это предложения по устранению различных источников ошибок, по совершенствованию методических пособий, а также анализ соответствия характеристик рассчитываемого устройства техническому заданию.

## 5 ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовую работу оформляют в виде пояснительной записки объемом 20–30 с. и необходимых графиков, а также следующих чертежей: общий вид антенны в трех проекциях и элементов ее крепления, чертежи облучателей антенны и элементов антенно-фидерного тракта, рассчитанные ДН облучателей (излучателей) и всей антенны, деталировка элемента (по указанию преподавателя).

Записку нужно оформлять в соответствии с требованиями ГОСТов [2, 3, 12]. При оформлении пояснительной записки следует руководствоваться ЕСКД (ГОСТ 2.105 − 95 «Общие требования к текстовым документам») и ГОСТ 2.106− 96 п.11.

За титульным листом следует техническое задание на работу. С третьего листа начинается перечень содержания. Первый лист перечня каждого раздела пояснительной записки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.104 − 68 лист заключается в рамку и снабжается заполненным штампом. Последующие листы рекомендуется заключать в рамку и снабжать штампом. Текст пояснительной записки пишется от руки, чѐрными чернилами или чѐрной пастой, или набирается на компьютере на одной стороне листа формата А4. Если лист не обведѐн рамкой, то должны быть оставлены поля сверху и снизу по 20 мм, слева − 25 мм, справа − около 20 мм.

Текст пояснительной записки делится на разделы, подразделы и пункты. Разделы нумеруются арабскими цифрами, после которых не ставится точка. Номер подраздела образуется из номера раздела и порядкового номера подраздела в этом разделе, например, в раздел 3 входят подразделы 3.1. 3.2,

3.3 и т. д. Номер пункта образуется из номера подраздела и порядкового номера пункта в этом подразделе, например, а подраздел 3.2 входят пункты 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 и т. д. Названия разделов пишутся заглавными буквами, а названия подразделов и пунктов − строчными. Каждый раздел начинается с новой страницы. Изложение содержания должно быть кратким, чѐтким, исключающим возможность субъективного истолкования. Терминология и условные буквенные обозначения должны быть едиными. Они должны соответствовать установленным стандартам или общепринятым обозначениям, принятым в отечественной научно технической литературе. Сокращение слов в тексте и надписях под рисунками не допускается, кроме общепринятых. Для обозначения физических величин, применяемых в расчѐтах и описательной части работы, должны использоваться только единицы СИ (ГОСТ 8.417 − 2002) и производные этой системы единиц.

Формулы, содержащиеся в тексте, нумеруются арабскими цифрами. Нумерация может быть сквозной или по разделам. Номер ставятся в круглых скобках, справа от формулы, у края листа. Обозначения, вводимые в формулу, должны расшифровываться непосредственно под формулой. Если формула заимствована из литературы, то обязательна ссылка на литературный источник. При ссылке в тексте на порядковый номер формулы, его указывают в круглых скобках, например, «из формулы (18) следует, что...». При ссылке на литературный источник его порядковый номер указывается в квадратных скобках, например, «В работе [15] установлена зависимость…». На все литературные источники, приведѐнные в перечне литературы, должны быть ссылки в тексте.

Таблицы в расчѐтно-пояснительной записке имеют сквозную нумерацию. Обозначения «Таблица 1», «Таблица 2» , и т. д. располагают справа над таблицей.

Количество рисунков в пояснительной записке должно быть достаточным для пояснения текста. Рисунки и графики выполняются на отдельных листах, располагаются по тексту сразу за страницей, где они впервые упоминаются, нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или по разделам и снабжаются тематическими наименованиями (надписями под рисунками). Графики должны иметь чѐткую координатную сетку с указанием масштаба и обозначением величин, координатная сетка при этом выполняется более тонкими линиями, чем функциональные кривые.

Разработка конструкции отдельных узлов и деталей проектируемого устройства должна отражаться в конструкторских эскизах или вспомогательных чертежах. Эти эскизы и чертежи выполняются в соответствии с государственными стандартами на листах формата А4, снабжаются штампом, помещаются в пояснительной записке после основного текста в виде приложения и не входят в состав основных чертежей, указанных в техническом задании.

Кроме вспомогательных чертежей и эскизов, в приложении помещается материал, необходимый для проведения расчѐтов на компьютере, а также спецификации, которые должны выполняться в соответствии с ЕСКД, снабжаться рамкой и штампами.

Последним разделом пояснительной записки должен быть указатель литературы, ссылки на которую помещаются в тексте. Литературные источники указываются следующим образом (ГОСТ 7.1 −2003: книги − фамилия и инициалы первого автора, наименование, место издания, издательство, год издания и объѐм в страницах; журнальные статьи − фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, наименование серии, год выпуска, том, номер выпуска, страницы; иностранные статьи, не имеющие перевода на русский язык − все данные приводятся на языке оригинала; стандарты − обозначение, наименование, место издание, издательство, год издания и объем издания; ссылки на номер из списка − [1, 2 ].

Курсовую работу студент защищает перед комиссией, назначаемой заведующим кафедрой. Предварительно работу представляют руководителю для проверки, который и допускает студента к защите курсовой работы.

Порядок защиты следующий: автор курсовой работы в кратком докладе (продолжительностью 5 мин) излагает основные результаты работы, затем члены комиссии и присутствующие студенты задают вопросы по защищаемой работе.

После ответов преподавателем выставляется оценка. При защите работы требуется:

1. Знать теоретический материал, основные законы и формулы и их физический смысл.
2. Уметь обосновать допущения и предложения, принятые при выполнении расчетов, объяснять основные закономерности полученных результатов.
3. Иметь представление о последних достижениях в области теории и техники антенн.

Учитывается также использование пакетов прикладных программ для ПЭВМ при выполнении расчетов, умение работать с литературой, качество выполнения расчетной и графической части, самостоятельность при оформлении отчета.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1975.

1. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. М.: Энергия,
2. ГОСТ 2.734-68. Обозначения условные графические в схемах. Линии

сверхвысокой частоты и их элементы.

1. ГОСТ 2.735-68. Обозначения условные графические в схемах. Антенны.
2. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. М.: Высшая школа, 1988.
3. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержевский. М.: Горячая линия – Телеком, 2004г. 491 с.
4. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. В. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др. М.: Радио и связь, 1985.
5. Антенны и устройства СВЧ / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев. М.: МАИ, 1999.
6. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов / Д. И. Воскресенский, В. И. Степаненко, В. С. Филиппов и др. М.: Радиотехника, 2003.
7. Ефимов, И. Е. Радиочастотные линии передачи / И. Е. Ефимов, Г. А. Останькович. М.: Связь, 1977.
8. Гальперович, Д. Я. Радиочастотные кабели / Д. Я. Гальперович, А. А. Павлов, Н. Н. Хренков. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Фролов, О. П. Антенны и фидерные тракты для радиорелейных линий связи / О.П. Фролов. М.: Радио и связь, 2001.
10. Стандарт предприятия: общие требования к оформлению текстовых и графических студенческих работ. Текстовые материалы и иллюстрации / СТП КГТУ 01-02 / Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 53 с.
11. Ефанов, В. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В. И. Ефанов, А. А. Тихомиров. Томск: 2004.
12. Гончаренко, И. В. Антенны КВ и УКВ. Ч.1. Компьютерное моделирование. MMANA / И. В. Гончаренко. М.: ИП Радио Софт, 2004.
13. Гончаренко, И. В. Антенны КВ и УКВ. Ч.2. Основы и практика. MMANA / И. В. Гончаренко. М.: ИП Радио Софт, 2005.
14. Сборник «Антенны».
15. Журнал «Известия вузов. Сер. Радиофизика».
16. Электродинамические методы анализа проволочных антенн / А.Л. Бузов, Ю.М. Сподобаев, В. В. Филиппов и др. М.: Радио и связь, 2000. 153 с.
17. Антенно-фидерные устройства систем сухопутной подвижной радиосвязи / А. Л. Бузов, Л. С. Казанский, В. А. Романов и др. М.: Радио и связь, 1997. 149 с.
18. Антенно-фидерные устройства: технологическое оборудование и экологическая безопасность / А. Л. Бузов, Л. С. Казанский, А. Д. Красильников и др. М.: Радио и связь, 1998. 212 с.

## Приложение А

**Основные документы государственной системы управления качеством промышленной продукции**

При выполнении курсового проекта использование Государственных стандартов обязательно. В настоящей разработке даны указания только на некоторые стандарты, необходимость применения которых при курсовом проектировании наиболее вероятна.

## Система проектно-конструкторской документации

ГОСТ 2.001 − 93 ЕСКД. Общие положения. ГОСТ 2.101 − 68 ЕСКД. Виды изделий.

ГОСТ 2.102 − 68 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов. ГОСТ 2.103 − 68 ЕСКД. Стадии разработки.

ГОСТ 2.104 − 68 ЕСКД. Основные надписи.

ГОСТ 2.105 − 95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. ГОСТ 2.106 − 96 ЕСКД. Текстовые документы.

ГОСТ 2.109 − 73 ЕСКД. Основные требования.

ГОСТ 2.114 − 95 ЕСКД. Технические условия. Правила изложения и оформления.

ГОСТ 2.119 − 73 ECKД. Эскизный проект. ГОСТ 2.120 − 73 ЕСКД. Технический проект.

ГОСТ 2.123 − 93 ЕСКД. Классификация и обозначения изделий и конструкторских документов.

ГОСТ 2.301 − 68 ЕСКД. Форматы.

ГОСТ 2.302 − 68 ЕСКД. Масштабы.

ГОСТ 2.303 − 68 ЕСКД. Линии.

ГОСТ 2.304 − 81 ЕСКД. Шрифты чертѐжные.

ГОСТ 2.305 − 68 ЕСКД. Изображения. Виды. Разрезы. Сечения.

ГОСТ 2.306 − 68 ЕСКД. Обозначения графических материалов и правила их нанесения на чертѐж.

ГОСТ 2.307 −68 ECKД. Нанесение размеров и предельных отклонений.

ГОСТ 2.308 − 79 ЕСКД. Указание на чертежах предельных отклонений формы и расположения поверхностей.

ГОСТ 2.309 − 73 ECКД. Указание шероховатостей поверхностей.

ГОСТ 2.310 − 68 ЕСКД. Нанесение на чертежах обозначений покрытий, ГОСТ 2.311 − 68 ЕСКД. Изображение резьбы.

ГОСТ 2.312 − 72 ЕСКД. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений.

ГОСТ 2.315 − 68 ЕСКД. Изображения упрощѐнные и условные крепѐжных деталей.

ГОСТ 2.316 − 68 ЕСКД. Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц.

ГОСТ 2.401 − 68 − ГОСТ 2.422 − 70 ЕСКД. Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения.

ГОСТ 2.701 − 84 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.

ГОСТ 2.702 − 75 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. ГОСТ 2.705 − 70 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем обмотки изделий с обмотками.

ГОСТ 2.721 − 74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения.

ГОСТ 2.723 − 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы, магнитные усилители.

ГОСТ 2.725 − 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутирующие.

ГОСТ 2.728 − 74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы.

ГОСТ 2.729 − 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы электроизмерительные. ГОСТ 2.730 − 73 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые.

ГОСТ 2.734 − 68 ECКД. Обозначения условные графические в схемах. Линии сверхвысокой частоты и их элементы.

ГОСТ 2.735 − 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Антенны.

ГОСТ 2.747 − 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических изображений.

## Система технологической документации

ГОСТ 14.004 − 83 Единая система технологической подготовки производства. Технология. Основные положения, термины и определения основных понятий.

Государственная система обеспечения единства измерений ГОСТ 11472 − 69 Допуски и посадки. Классы точности 02-09. ГОСТ 11472 − 69 Допуски и посадки. Классы точности 02-09. ГОСТ 7713 − 62 Допуски и посадки. Основные определения. ГОСТ 1171 − 7I Допуски и посадки деталей из пластмасс.

ГОСТы, относящиеся к технике СВЧ:

ГОСТ 18238 − 72 Линии передачи сверхвысоких частот. Термины и определения.

ГОСТ 11326.86 − 79 + ГОСТ 11326.92 − 75. Кабели высокочастотные.

## Приложение Б

**Справочные данные, используемые при выполнении курсовой работы**

Таблица П.1

Свойства некоторых металлов и сплавов, используемых на сверхвысоких частотах

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Металл (сплав) | Плотность, г/см3 | Температура плавления,С | Удельная проводимость ζ при температуре 20  С, См/м |
| Серебро | 10,5 | 960,5 | 6,28107 |
| Медь (отожжѐнная) | 8,92 | 1083 | 5,80107 |
| Золото | 19,3 | 1063,5 | 4,10107 |
| Алюминий | 2,702 | 657 | 3,72107 |
| Вольфрам | 19,3 | 3370 | 1,81107 |
| Латунь (*Cu*=60%,  *Zn*=40%) | 8,5 | 930 | 1,65107 |
| Никель | 8,8 | 1455 | 1,28107 |
| Железо | 7,86 | 1535 | 1,00107 |

*Примечание.* В качестве проводника на сверхвысоких частотах применяется также графит, имеющий удельную проводимость 1,25 107 См/м. Температура плавления графита равна 3572 С.

Таблица П. 2 Свойства некоторых диэлектриков, используемых на сверхвысоких частотах

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Диэлектрик | Частота *f* = 1ГГц  (λ = 30 см) | | Частота *f* = 3ГГц  (λ = 10 см) | | Частота *f* = 10ГГц  (λ = 3 см) | |
| ε | tgδ | ε | tgδ | ε | tgδ |
| Политетрафторэтилен | 2,1 | 0,0001  5 | - | - | - | - |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Полиэтилен | 2,25 | 0,0002 | 2,25 | 0,0004 | 2,25 | 0,0005 |
| Полистирол | 2,55 | 0,0004 | 2,55 | 0,0005 | 2,55 | 0,00007 |
| Пенистый  полистирол | - | 0,0009 | 1,05 | 0,0003 | - | - |
| Эскапон | 2,4 | 0,006 | - | - | - | - |
| Совенит | 3,47 | 0,0036 | - | - | - | - |
| Микалекс | 7 | 0,0004 | 6,91 | 0,0036 | - | - |
| Стеатит | 6,25 | - | 6,25 | 0,0005 | - | - |
| Плавленый кварц | - | 0,0003 | 3,8 | 0,0001 | 3,8 | 0,0001 |
| Слюда мусковит | 5,4 | 0,005 | 5,4 | 0,0003 | 5,4 | 0,0003 |
| Слюда флогопит | 5 | - | - | - | - | - |
| Плексиглас | - | - | - | - | 2,61 | 0,0084 |
| Текстолит | - | - | - | - | 3,67 | 0,060 |
| Эбонит | - | - | - | - | 2,67 | 0,006 |
| Фторопласт – 4 | 2 | 0,0002 | - | - | 2,08 | 0,00037 |
| Керамика стеатитовая | 5,5 | 0,0015 | 5,2 | - | 5,2 | 0,003 |
| Керамика  форстеритовая | 5,9 | 0,0005 | 5,8 | - | 5,8 | 0,0001 |
| Стекло С49 – 2 | - | - | - | - | 5,2 | 0,009 |
| Стекло С38 – 1 | - | - | - | - | 4,2 | 0,0029 |
| Стекло С48 – 1 | - | - | - | - | 4,9 | 0,0065 |
| Вода | - | - | 77 | 0,15 | 59 | 0,46 |

Таблица П. 3

Электрические характеристики кабелей с изоляцией из стабилизированного полиэтилена

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка кабеля | Волновое сопротивле ние, Ом | Погонная Ёмкость, ПФ/м | Частота, МГц | | | | |
| 10 | 100 | 1000 | 3000 | 10000 |
| Максимальное погонное затухание,  дБ/м | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Рк-50-2-11 Рк-50-2-13 Рк-50-3-11 Рк-50-3-13 Рк-50-4-11 Рк-50-4-13 Рк-50-7-11 Рк-50-7-15 Рк-50-7-12 Рк-50-7-16 Рк-50-11- 11  Рк-50-11- 13  Рк-75-4-11 Рк-75-4-15 Рк-75-4-12 Рк-75-4-16 Рк-75-7-11 Рк-75-7-15 Рк-75-7-12  Рк-75-7-16 Рк-75-7-18 | 50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  50  2  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  100  5  100  5  - | 115  115  110  110  110  110  115  115  115  115  115  72  76  76  76  75  76  78  76  69  57  57  - | 0,05  0,05  0,04  0,03  0,03  0,03  0,02  0,02  0,02  0,02  0,018  0,018  0,032  0,032  0,021  0,021  0,02  0,02  0,03  0,029  0,06  0,025  0,025 | 0,18  0,18  0,13  0,13  0,10  0,10  0,08  0,08  0,09  0,09  0,06  0,06  0,10  0,10  0,105  0,105  0,07  0,07  0,10  0,09  0,22  0,75  0,88 | 0,62  0,68  0,60  0,1  0,50  0,51  0,42  0,43  0,50  0,50  0,26  0,29  0,45  0,45  0,60  0,60  0,30  0,34  0,4  0,4  0,81  0,10  0,32 | 1,35  1,40  1,30  1,40  1,20  1,30  0,7  0,7  1,10  1,15  0,5  0,52  1,0  1,0  1,5  1,2  1,0  1,0  0,9  1,0  1,5  0,54  0,6 | -  -  -  -  3,0  3,0  -  -  2,3  2,3  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  - |

Таблица П. 4

Электрические характеристики коаксиальных кабелей со сплошной изоляцией из фторопласта

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка кабеля | Волновое сопротивл ение, Ом | Погонная ѐмкость, пФ/м | Частота, МГц | | | | |
| 10 | 100 | 1000 | 3000 | 10000 |
| Максимальное погонное затухание, дБ/м | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| РК-50-2-21 РК-50-3-21 РК-50-4-21 РК-50-7-21 РК-50-11-21 РКТФ-6  РК-75-2-21 РК-75-3-21 РК-75-4-21 РК-75-4-22 РК-75-7-21 РК-75-7-22  РК-100-7-21 | 50  2  50  2  50  2  50  2  52,5  2,5  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  75  3  100  5 | 105  106  106  106  106  101  70  70  70  70  70  70  50 | 0,052  0,022  0,03  0,021  0,02  - 0,05  0,04  0,028  0,023  0,02  0,02  0,021 | 0,016  0,1  0,08  0,06  0,06  - 0,15  0,10  0,07  0,07  0,055  0,06  0,062 | 0,63  0,6  0,5  0,4  0,32  -  0,6  0,5  0,4  0,4  0,34  0,36  0,35 | 1,2  1,2  1,1  1,0  0,6  -  1,2  1,1  1,0  1,0  0,8  0,62  0,8 | -  -  2,4  -  -  -  -  -  -  -  -  -  - |

Таблица П.5

Конструктивные и электрические данные стандартных прямоугольных волноводов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип волновода | Диапазон рабочих  частот, ГГц | | Внутренние размеры, мм | | Максимальное погонное затухание на частоте  *f* = *f* 1.5 *f*кр | |
| от | до | Ширина | Высота | Затухание,  дБ/м | Частота,  ГГц |
| МЭК-5 | 0,41 | 0,62 | 457,2 | 258,6 | 0,00141 | 0,49 |
| МЭК-6 | 0,49 | 0,75 | 381,0 | 190,6 | 0,00186 | 0,59 |
| МЭК-8 | 0,6 | 0,98 | 292,1 | 146,1 | 0,00278 | 0,77 |
| МЭК-9 | 0,76 | 1,15 | 247,65 | 123,8 | 0,00351 | 0,91 |
| МЭК-12 | 0,96 | 1,46 | 195,58 | 97,79 | 0,00506 | 1,15 |
| МЭК-14 | 1,14 | 1,73 | 165,10 | 82,55 | 0,00653 | 1,36 |
| МЭК-18 | 1,45 | 2,20 | 129,54 | 64,77 | 0,00936 | 1,64 |
| МЭК-22 | 1,72 | 2,61 | 109,22 | 54,61 | 0,0121 | 2,06 |
| МЭК-26 | 2,17 | 3,30 | 86,36 | 43,18 | 0,0173 | 2,61 |
| МЭК-32 | 2,60 | 3,95 | 72,14 | 34,04 | 0,0236 | 3,12 |
| МЭК-40 | 3,22 | 4,90 | 58,17 | 29,083 | 0,0311 | 3,87 |
| МЭК-48 | 3,94 | 5,99 | 47,55 | 22,149 | 0,0443 | 4,73 |
| МЭК-58 | 4,64 | 7,05 | 40,39 | 20,193 | 0,0539 | 5,57 |
| МЭК-70 | 5,38 | 8,18 | 34,85 | 15,799 | 0,0720 | 6,46 |
| МЭК-81 | 6,58 | 10,0 | 28,499 | 12,624 | 0,0993 | 7,89 |
| МЭК-100 | 8,20 | 12,5 | 22,860 | 10,160 | 0,127 | 9,84 |
| МЭК-120 | 9,84 | 15,0 | 19,050 | 9,525 | 0,166 | 11,8 |
| МЭК-140 | 11,9 | 18,0 | 15,799 | 7,899 | 0,220 | 14,2 |
| МЭК-180 | 14,5 | 22,0 | 12,954 | 6,477 | 0,298 | 17,4 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| МЭК-220 МЭК-260 МЭК-320 МЭК-400 МЭК-500 МЭК-620 МЭК-740 МЭК-900 МЭК-1200 | 17,6  21,7  26,4  33,0  39,3  49,9  60,5  73,8  92,3 | 26,7  33,0  40,1  50,1  59,7  75,8  92,0  112,0  140,0 | 10,668  8,636  7,112  5,690  4,775  3,759  3,099  2,540  2,032 | 4,318  4,318  3,556  2,845  2,388  1,180  1,550  1,270  1,016 | 0,463  0,544  0,729  1,02  1,33  1,90  2,54  3,43  4,78 | 21,1  26,1  31,6  39,5  47,1  59,9  72,6  88,6  111,0 |

*Примечание*. МЭК – Международная электрическая комиссия, разработавшая данный стандарт волноводов. Содержащееся в обозначении типа волновода число показывает приближенно среднюю частоту рабочего диапазона в сотнях мегагерц.

Таблица П.6

Размеры волноводов круглого сечения, рекомендуемыe международной электротехнической комиссией (МЭК) для применения на частотах (1,5-8,8) ГГц

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип волновод а | Предельная частота колебаний волны основного  и высших волн, ГГц | | | | | Внутреннее сечение, мм | | Внешнее сечение стенок, мм | | Затухание волн ***Н*11**, дБ/м | | |
| ***H*11** | ***E*01** | ***H*21** | ***H*01** | ***H*02** | диаметр,  *D* | допуск (±) | диаметр, | допуск  **(±)** | частот а, ГГц | расчѐтное | максим ально |
| С16 | 1,31 | 1,71 | 2,17 | 2,73 | 4,99 | 134,11 | 0,13 | **-** | **-** | 1,572 | 0,00175 | 0,0093 |
| С18 | 1,53 | 2,00 | 2,54 | 3,19 | 5,84 | 114,58 | 0,11 | **-** | **-** | 1,841 | 0,00966 | 0,012 |
| С22 | 1,79 | 2,34 | 2,98 | 3,74 | 6,84 | 97,87 | 0,10 | **-** | **-** | 2,154 | 0,0115 | 0,05 |
| С25 | 2,10 | 2,74 | 3,49 | 4,37 | 8,01 | 83,62 | 0,08 | **-** | **-** | 2,521 | 0,0140 | 0,018 |
| C30 | 2,46 | 3,21 | 4,08 | 5,12 | 9,37 | 71,42 | 0,07 | 74,72 | 0,095 | 2,952 | 0,0184 | 0,024 |
| С35 | 2,88 | 3,76 | 4,77 | 5,99 | 11,0 | 61,04 | 0,06 | 64,34 | 0,095 | 3,455 | 0,0233 | 0,030 |
| С40 | 3,38 | 4,41 | 5,61 | 7,03 | 12,9 | 51,99 | 0.05 | 55,29 | 0,095 | 4,056 | 0,0297 | 0,039 |
| С48 | 3,95 | 5,16 | 6,56 | 8,23 | 15,1 | 44,45 | 0,044 | 47,75 | 0,080 | 4,744 | 0,0375 | 0,019 |
| С56 | 4,61 | 6,02 | 7,65 | 9,60 | 17,6 | 38,10 | 0,038 | 41,40 | 0,080 | 5,534 | 0,0473 | 0,062 |
| С65 | 5,40 | 7,05 | 8,96 | 11,2 | 20,6 | 32,54 | 0,033 | 34,84 | 0,080 | 6,480 | 0,0599 | 0,078 |
| С76 | 6,32 | 8,26 | 10,5 | 13,2 | 24,1 | 27,788 | 0,028 | 30,328 | 0,080 | 7,588 | 0,0759 | 0,099 |
| С89 | 7,37 | 9,63 | 12,2 | 15,3 | 28,1 | 23,885 | 0,024 | 26,365 | 0,065 | 8,850 | 0,0956 | 0,124 |

Таблица П.7

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Форма раскрыва – линейная | Распределение поля в раскрыве | Диаграмма направленности *F* *U*  | Скачок на краю Δ | Ширина  ДН (град) | | Апертурный коэффициент использования  (при Δ*y* = 1) | Уровень боковых лепестков,  дБ |
| по  нулю | по -3  дБ |
|  |  | *F* *U*    sin*U*  21  cos*U*  *U*   2*U* 2  1       | 0 | 171,8 | 68,8 | 0,81 | -23 |
|  |  | 0,2 | 156,3 | 61,1 | 0,89 | -21,3 |
|  | *Ep*    1 cos *x*  *E*max *A* | 0,4  0,6 | 138,6  130,2 | 58,9  57,4 | 0,94  0,97 | -19,3  -16,5 |
| *U*  *A* sin  |  | 0,8 | 120,3 | 55,7 | 0,99 | -14,7 |
|  |  | 1,0 | 114,6 | 50,8 | 1,0 | -13,2 |
|  | *F* *U*    sin*U*  21  cos*U*  *U*   2*U* 2  1       | 0 | 229,2 | 83,2 | 0,67 | -32 |
|  | *Ep*    1 cos2 *x E*max *A* | 0,2  0,4  0,6 | 179,3  149,6  134,6 | 72,2  62,7  58,3 | 0,82  0,92  0,97 | -30,4  -25,1  -20 |
|  |  | 0,8 | 123,7 | 52 | 0,99 | -15,5 |

Таблица П.8

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Форма раскрыва – круглая | Распределение поля в раскрыве | Диаграмма направленности *F* *U*  | Уровень на краю Δ | Ширина  ДН (град) | | Апертурный коэффициент использования (при Δ*y* = 1) | Уровень боковых лепестков, дБ |
| по  нулю | по -3  дБ |
|  | *Ep*   *p* 2   *E*    1  1  *R*    max     | *F* *U*    *U*  1   *U*   1 2 2   *U*   *n*! *Jn* *U*   *n*  *U* 2   2     | 0 | 186,3 | 72,2 | 0,75 | -24,6 |
| *U*  2*R* sin    | 0,2  0,4  0,6 | 171,3  152,9  145,5 | 71  66,2  63,8 | 0,87  0,94  0,98 | -23,5  -21,5  -19,8 |
|  | 0,8 | 141,5 | 61,2 | 0,99 | -18,6 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 1,0 | 139,6 | 58,9 | 1,0 | -17,6 |
| 2 2  *Ep*    1     *p*    *E* 1  *R*    max     | *F* *U*    *U*  1   *U*   1 3 3 | 0 | 232,6 | 84,2 | 0,56 | -30,6 |
| 0,2 | 191,7 | 74,6 | 0,79 | -28,9 |
| 0,4 | 169,6 | 69,3 | 0,91 | -25,4 |
| 0,6 | 152,9 | 65,3 | 0,94 | -23,2 |
| 0,8 | 145,5 | 63,6 | 0,97 | -20,8 |

## Диапазоны радиочастот

Диапазоны радиочастот принято классифицировать по десятичному принципу. В таблице 1 приведены диапазоны частот и длин волн. В литературе встречается и иное деление на диапазоны. Диапазон МВ называется УКВ – ультракороткими волнами; часто сверхвысокими частотами (СВЧ) называют интервал от 300 МГц до 30 ГГц, за рубежом используют термин микроволны (microwaves). Диапазон от 30 до 100 ГГц относят к крайне высоким частотам (КВЧ), а от 100 до 1000 ГГц – к гипервысоким частотам (ГВЧ). Весь диапазон КВЧ обычно делят на три интервала: 30 – 100 ГГц, 100 – 200 ГГц и более 200 ГГц. Гипервысокие частоты называют субмиллиметровыми.

Таблица П.9

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Радиочастоты | | Радиоволны | |
| Назвавние | диапазон | Назвавние | диапазон |
| Крайненизкие (КНЧ) | 3–30 Гц | Декамегаметровые | 100 000–10 000 км |
| Сверхнизкие (СНЧ) | 30–300 Гц | Мегаметровые | 10 000–1 000 км |
| Инфранизкие (ИНЧ) | 300–3000 Гц | Гектокилометровые | 1000–100 км |
| Очень низкие (ОНЧ–  VLF) | 3–30 кГц | Мириаметровые | 100–10 км |
| Низкие (НЧ– LF) | 30–300 кГц | Километровык | 10–1 км |
| Средние (СЧ- MF) | 300–3000 кГц | Гектометровые | 1000–100 м |
| Высокие (ВЧ– HF) | 3–30 МГц | Декаметровые | 100–10 м |
| Оченьвысокие(ОВЧ– | 30–300 МГц | Метровые | 10–1 м |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| VHF) |  |  |  |
| Ультравысокие (УВЧ–  UHF) | 300–3000МГц | Дециметровые | 100–10 см |
| Сверхвысокие (СВЧ–  SHF) | 3–30 ГГц | Сантиметровые | 10–1 см |
| Крайне высокие (КВЧ–  EHF) | 30–300 ГГц | Миллиметровые | 10–1 мм |
| Гипервысокие(ГВЧ–  HHF) | 300–3000 ГГц | Децимиллиметровые | 1–0,1 мм |

За рубежом принято буквенное обозначение СВЧ диапазонов, причѐм используется несколько систем буквенных обозначений. В таблице 10 приведена одна из наиболее распространѐнных старых (до 1970 г.) систем обозначения диапазонов, а в таблице 11 – новая система обозначений

Таблица П.10

Буквенные обозначения диапазонов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Обозначение диапазона | Частота ГГц | Обозначение диапазона | Частота ГГц |
| *J* | 0,35 – 0,53 | *Y* | 12,4 – 18,0 |
| *L* | 1,12 – 1,70 | *K* | 18,0 – 26,5 |
| *R* | 1,70 – 2,60 | *U* | 26,5 – 40,0 |
| *S* | 2,60 – 3,95 | *Q* | 33,0 – 50,0 |
| *H* | 3,95 – 5,85 | *M* | 50,0 – 75,0 |
| *C* | 5,85 – 8,20 | *E* | 60,0 – 90,0 |
| *W* | 7,05 – 10,0 | *F* | 90,0 – 140,0 |
| *X* | 8,20 – 12,4 | *G* | 140,0 – 220,0 |

Новая система обозначения, принятая в США

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Новое обозначение | | Старое обозначение | |
| Буква | Частоты, ГГц | Буква | Частоты, ГГц |
| *A* | до 0,25 | *I* | 0,1 – 0,15 |
| *B* | 0,25 – 0,5 | *G* | 0,15 – 0,225 |
| *C* | 0,5 – 1,0 | *P* | 0,225 – 0,39 |
| *D* | 1,0 – 2,0 | *L* | 0,39 – 1,55 |
| *E* | 2,0 – 3,0 | *S* | 1,55 – 5,2 |
| *F* | 3,0 – 4,0 | *C* | 3,9 – 6,2 |
| *G* | 4,0 – 6,0 | *X* | 5,2 – 10,9 |
| *H* | 6,0 – 8,0 | *K* | 10,9 – 36,0 |
| *I* | 8,0 – 10,0 | *Q* | 36,0 – 46,0 |
| *J* | 10,0 – 20,0 | *V* | 46,0 – 56,0 |
| *K* | 20,0 – 40,0 | - | - |
| *L* | 40,0 – 60,0 | - | - |

Буквенное обозначение диапазонов КВЧ и ГВЧ

Таблица П.11

Таблица П.12

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Частота, ГГц | США 1980 г. | США | Англия | ФРГ | | Watkins Johnson  1971 г. | TRG 1971 г. | | Baytron 1975 г. | | Hughes 1979 г. | |
| 1960-1970 гг. | | | |
| 26.5 | ***K*** |  | |  | | ***Ka*** | ***A*** | | ***Ka*** | | ***Ka*** | |
| 27.0 | ***Ka*** | ***Q*** |
| 33.0 | ***Ka*** |  |
| 36.0 |  | ***B*** |  | ***B*** |  | ***Q*** |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 |  |  |  |  | ***Q*** |  |  |  |  |  |  |  |
| 46 | ***L*** | ***mm*** | ***V*** |  | ***U*** | ***Q*** |  |
| 50 | ***V*** | |
| 56 | ***V*** | ***V*** | ***V*** |
| 60 | ***W*** | |
| 75 | ***M*** | ***O*** | ***E*** | ***E*** | ***E*** |
| 90 | ***W*** | ***R*** | ***W*** |
| 100 |  | ***F*** | ***N*** | ***F*** |
| 110 |  |  |  | |
| 140 | ***D*** | ***T*** | ***D*** |
| 170 | ***G*** | ***G*** | ***G*** |
| 220 |  | ***Y*** |  | |
| 260 |  | | ***D*** |  | |
| 325 |  | |