**Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах**

**Лекция 13.** Энергетические характеристики волноводов

# 1. Предельная и допустимая рабочая мощность, и их зависимость от режимов работы волновода. Способы повышения электрической прочности волноводов

К основным энергетическим характеристикам волновода относятся: предельная и допустимая рабочая мощность, коэффициент затухания, затухание и коэффициент полезного действия. Рассмотрим каждую из них.

Мощность, передаваемая по волноводу, определяется амплитудами напряженностей электрического и магнитного полей. Согласно теореме Умова-Пойнтинга:

, (1)

где - комплексно сопряженная амплитуда напряженности магнитного поля.

Применим это выражение к волноводу прямоугольного сечения, для чего векторы  и  нужно разложить по ортам прямоугольной системы координат и подставить в уравнение (1). При этом нужно учесть, что в переносе энергии по волноводу участвуют только поперечные составляющие поля. В результате получим

. (2)

В качестве примера найдем мощность, передаваемую волной по прямоугольному волноводу. Для этого вначале подставим *Ex, Ey, Hx* и *Hy* из системы уравнений для составляющих поля волны типа *H10* в выражение (2) и получим

.

Подставив эти уравнения в формулу (2), получим

. (3)

Из этого выражения найдем постоянную интегрирования *D*, характеризующую амплитуду электромагнитного поля

. (4)

Используя найденную константу, теперь можно получить окончательные выражения для нахождения всех составляющих напряженностей поля в прямоугольном волноводе, в том числе и для волны типа ***H10***. Например,

, (5)

где

.

В случае вакуумного заполнения волновода амплитуда напряженности электрического поля вычисляется по формуле

. (6)

Третий сомножитель формулы - корень квадратный из волнового сопротивления волновода . С учетом этого выражение (6) приобретает вид

.

Решив его относительно ***P,*** найдем мощность, передаваемую по волноводу:

. (7)

Из полученного выражения видно, что мощность, передаваемая по волноводу, пропорциональна квадрату напряженности электрического поля и размерам поперечного сечения.

Поскольку размеры ***a*** и ***b*** рассчитываются, исходя из необходимости существования в волноводе только волны основного типа, мощность определяется, в основном, квадратом напряженности электрического поля.

В свою очередь, напряженность ***E*** нельзя увеличивать бесконечно, поскольку при достижении некоторого предельного значения наступит электрический пробой волновода. Он происходит в области наибольшей напряженности электрического поля. Пробой, при давлении близком к атмосферному, имеет вид искрового разряда и обычно сопровождается сильным звуковым хлопком и выделением тепловой энергии, что приводит к плавлению волновода. В случае понижения давления пробой сходен с тлеющим разрядом.

Предельной называется наибольшая мощность, которая передается по волноводу без электрического пробоя.

Предельная напряженность электрического поля ***Епред***, при котором в сухом воздухе наступает пробой, составляет в диапазоне сантиметровых волн 30 кВ/см. Тогда

. (8)

Для воздушного наполнения

. (9)

Если в выражение (9) подставить формулу (8) и числовые значения ***Епред*** и ***Z0*** получим

. (10)

В этом выражении числовой коэффициент выбран таким образом, что ***Рпред*** получается в киловаттах, если размеры ***a*** и ***b*** подставить в сантиметрах.

Точно также получаются выражения для определения различных типов волн в различных волноводах. Для круглого волновода:

; (11)

. (12)

Для коаксиального волновода:

. (13)

Полученные формулы не учитывают возможных неоднородностей, приводящих к локальному повышению ***Em*** и облегчающих наступление пробоя.

При возникновении стоячей волны ***Рпред*** оказывается меньше расчетной, так как в результате интерференции падающей и отраженной волн величина  практически удваивается, что снижает электрическую прочность волновода.

Поскольку на практике наиболее распространенным режимом является режим смешанных волн, допустимая рабочая мощность, передаваемая по волноводу, принимается с необходимым запасом и составляет 20-30% от рассчитанной предельной мощности.

Выясним, как зависит передаваемая по волноводу мощность от режима его работы? Для этого рассмотрим режим смешанных волн, когда присутствуют падающая и отраженная волны.

. (14)

Выражение в скобках представим в виде

.

и подставим в уравнение (14)

.

Умножив числитель и знаменатель на ***Емакс,*** и учитывая, что

,

получим

. (15)

Из уравнения (15) следует, что в режиме бегущей волны (***Кс=1***) передаваемая мощность принимает максимальное значение.

При стоячей волне передача мощности не происходит ***Кс=∞, Р=0***.

Для прямоугольного волновода МЭК-100 с размерами сечения 22,86х10,16 мм при длине волны λ=3,2 см предельная мощность составляет

.

В современных РЛС передаваемые мощности составляют несколько мегаватт, поэтому возникает необходимость повышения электрической прочности волноводов.

Рассмотрим некоторые из них.

1. Из формулы (15) следует, что с увеличением размеров поперечного сечения волновода предельная мощность увеличивается, однако возникают высшие типы волн. Поэтому данный способ на практике не применяется.

2. Введение в волновод диэлектриков, у которых  выше, чем у воздуха, позволяет существенно повысить электрическую прочность. Но это, в свою очередь, приводит к ряду негативных явлений:

а) сильному нагреву диэлектрика за счет диэлектрических потерь;

б) возникновению опасности пробоя при наличии зазоров между металлом и диэлектриком;

в) трудности согласования температурных коэффициентов расширения диэлектрика и металла.

Исходя из этого, твердые диэлектрики для наполнения волноводов применяют в исключительных случаях.

Использование жидких диэлектриков имеет ряд достоинств, заключающихся в идеальном заполнении и хорошем охлаждении волновода. Однако при этом имеются и недостатки, связанные с устранением течей в местах соединений волноводов и наличием пороговых напряженностей, при которых резко возрастают потери.

Применение газообразных диэлектриков, например, эле газа (***SF6*** - шести фтористой серы) позволяет увеличивать ***Епред*** в три раза, а ***Рпред*** - приблизительно на порядок.

Этот способ достаточно часто используется в современных радиолокационных станциях. Единственный недостаток его заключается в необходимости всегда иметь запас газа.

Наполнение волноводной системы сжатым воздухом позволяет повысить ***Рпред***. В частности, если увеличить давление до трех атмосфер, предельная мощность возрастет в пять раз, при повышении давления в четыре раза - ***Рпред*** увеличивается в восемь раз.

Достоинство последнего способа заключается в простоте, поскольку избыточное давление можно создать с помощью компрессора, входящего в состав аппаратуры РЛС.

К недостаткам следует отнести необходимость увеличения механической прочности стенок волновода.

|  |
| --- |
| **Выводы:**   1. Предельная мощность, передаваемая по волноводу, возрастает при увеличении размеров волновода и уменьшается с увеличением длины волны. 2. Применение газообразных диэлектриков позволяет увеличивать ***Епред*** в три раза, а ***Рпред*** - приблизительно на порядок. |

# 2. Учет потерь энергии в стенках волновода

При передаче энергии по волноводу имеют место потери мощности за счет конечного сопротивления металла, из которого он изготовлен. Потерями в диэлектрике (в воздухе) можно пренебречь ввиду их малости.

Теоретически строго определить потери в волноводах трудно в связи с необходимостью учета новых граничных условий. По этой причине обычно пользуются приближенным методом оценки потерь, сущность которого состоит в следующем:

1) отыскивается решение краевой задачи (получаются уравнения поля и находятся величины токов в стенках) без учета потерь;

2) делается предположение, что потери не изменяют структуру поля и величин токов в стенках волноводов;

3) используя токи, найденные в предположении об отсутствии потерь, вычисляются джоулевы потери при конечной проводимости стенок.

Учитывая высокую проводимость стенок реальных волноводов (медь, серебро, алюминий), структуру поля приближенно считают такой же, как и в случае идеально проводящих стенок. Реально в волноводах появляется весьма малая касательная составляющая  вектора и нормальная составляющая вектора  на поверхности стенок.

За счет протекания токов в стенках волновода тепловые потери будут иметь место. Но на расстоянии длины волны в волноводе они будут незначительными по сравнению с передаваемой мощностью, поэтому можно считать, что структура поля практически остается неизменной в сравнении с идеальным волноводом.

Доказательство сходимости результатов при сделанных предположениях впервые проведено С.М.Рытовым в 1940 году.

При наличии потерь ***γ=β-iα*** напряженность электрического поля в волноводе изменяется по закону:

. (16)

Найдем коэффициент затухания ***α***, руководствуясь следующими соображениями. При длине волновода, равной одному метру, напряженность поля уменьшается в ***eα*** раз, а мощность, пропорциональная квадрату напряженности, уменьшается в ***e2α*** раз. Следовательно, мощность, поглощаемая в стенках на единице длины волновода, равна

,

где ***Рпот1***- мощность потерь в волноводе единичной длины;

***Р*** - мощность, поступающая на вход волновода.

Отсюда

.

Обычно потери в волноводе невелики и можно допустить, что

.

Раскладывая ***e2α*** в ряд по малому параметру и используя два первых члена разложения, получим

. (17)

Таким образом, вычислив ***Pпот1*** , рассеиваемую в стенках волновода при длине 1 метр, и ***P*** по известной формуле:

, (18)

можно определить ***α***.

Рассмотрим участок стенки волновода (рис. 1). Найдем **активное сопротивление слоя** единичной длины шириной ***dl*** и толщиной *δ* (*δ* - глубина проникновения токов в металл).

, (19)

где *Rs*- активное сопротивление слоя;

*σст* - удельная проводимость стенок.



Рис. 1

Найдем мощность потерь в рассматриваемом элементе стенки при амплитуде тока ***dI***.

, (20)

.

Величина ***dI*** связана с плотностью поверхностного тока соотношением

.

Переходя от к плотности поверхностного тока и интегрируя выражение (19) по периметру волновода при длине, равной ***1 м***, получим

,

где

.

Это выражение получено с учетом уравнения поверхностного эффекта:

.

Плотность поверхностного тока численно равна касательной составляющей напряженности магнитного поля  у поверхности стенки волновода:

.

С учетом этого равенства получим

. (21)

Величина  определяется из уравнений составляющих поля рассматриваемого типа волны.

Полученные выражения (21) и (18) подставим в уравнение (17). В результате получим формулу для вычисления коэффициента затухания в волноводе

. (22)

|  |
| --- |
| **Выводы:**   1. Коэффициент затухания зависит от частоты СВЧ колебаний, от удельной проводимости стенки волновода, от структуры поверхностных токов, от неровности стенок. 2. Коэффициент затухания не зависит от мощности. |

# 3. Единицы измерения потерь энергии в волноводах. Потери в волноводах прямоугольного и круглого сечений

При инженерных расчетах не всегда удобно пользоваться коэффициентом затухания, поэтому применяют другой параметр - затухание. Пусть в волноводе распространяется волна, характеризуемая величинами ***Евх, Рвх*** на входе, и ***Евых, Рвых*** на выходе. Они связаны между собой соотношениями:

; (23)

. (24)

Исходя из этих выражений, определим затухание следующим образом:

.

При потерях в 1 бел (Б) мощность на выходе линии по сравнению с входом уменьшится в 10 раз. Эта единица измерения крупная, поэтому вводят другую, в 10 раз меньшую - децибел (дБ).

. (25)

**Затухание** связано с **коэффициентом затухания** приближенной зависимостью:

, (26)

где z - длина линии.

В последнем выражении коэффициент затухания α должен выражаться в *дБ/м*, в то время как в уравнении (22) в *1/м*.

Необходимо помнить следующие соотношения:

3 *дБ* соответствует изменению в 2 раза,

6 *дБ* " в 4 раза,

10 *дБ* " в 10 раз,

20 *дБ* " в 100 раз и т. д.

С помощью выражения (25) можно получить формулы для расчета коэффициентов затухания в различных волноводах. Для этого необходимо в указанное выражение подставить уравнения для составляющих поля соответствующего типа волны.

Например, для прямоугольного волновода, в котором распространяется волна основного типа, коэффициент затухания рассчитывается с помощью выражения

.

На практике волноводы изготавливают из неферромагнитного материала (***μ=1***). В этом случае ***ε=μ=1***, а *(λкр)H10=2a*. Уравнение для расчета (α)H10 примет вид

; (27)

для типа Нmn в прямоугольном волноводе (n1)

для волн типа Еmn в прямоугольном волноводе

Для круглых волноводов из немагнитного металла, в которых распространяются волны ***H11*** и ***H01*** , в случае ***ε=μ=1***:

; (28)

, (29)

где *σст* - удельная объемная проводимость материала стенок.

Расчетные формулы получены в предположении, что волновод имеет воздушное заполнение. Если волновод заполнен диэлектриком, то в эти формулы вместо следует подставлять значение длины волны в диэлектрике .

Для расчета коэффициента ослабления за счет потерь в диэлектрике вместо ε следует подставить комплексную проницаемость диэлектрика

В результате получим (

При условии 1 формула может быть упрощена:

где ; — поперечное волновое число, продольное волновое число .

Величина коэффициента затухания, вычисленная с использованием формул (27 - 29), составляет для медных волноводов в диапазоне дециметровых волн 0,005 - 0,015 ***дБ/м***, в сантиметровом диапазоне - 0,015 - 0,6 ***дБ/м***, в миллиметровом диапазоне волн -0,6-10 ***дБ/м***.

Из этого сравнения следует, что наименьшими потерями обладают волноводы в дециметровом диапазоне, но при этом размеры поперечного сечения и их масса весьма велики.

Для сравнения, коэффициент затухания в коаксиальном волноводе РК-75 с полиэтиленовым наполнением в дециметровом диапазоне составляет 0,8 дБ/м.

Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о том, что полый волновод обладает меньшими потерями, чем коаксиальный, но последний имеет меньшие габариты.

Затухание существенно зависит от неровности стенок. Поэтому они обрабатываются по 8-10 классу чистоты поверхности.

Изученные волноводные линии передачи СВЧ-энергии являются основными элементами высокочастотной части РЛС. На их основе создаются различные устройства, с помощью которых над сигналами производятся алгебраические и логические операции.

Волноводы и устройства, созданные на их основе, обладают существенным недостатком - они имеют большие габариты и массу. Для построения малогабаритной аппаратуры в настоящее время стали применяться полосковые волноводы.

|  |
| --- |
| **Выводы:**   1. Наименьшими потерями обладают волноводы в дециметровом диапазоне, но при этом размеры поперечного сечения и их масса весьма велики. 2. Затухание существенно зависит от неровности стенок. Поэтому они обрабатываются по 8-10 классу чистоты поверхности. |