DOI: 10.17117/na.2014.01.203

Поступило в редакцию: 14.11.2014

<http://ucom.ru/doc/na.2014.01.203.pdf>**Кузахмедов И.Р.****Расчет прямоугольного волновода и исследование влияния покрытий стенок на характеристики волновода****Kuzakhmedov I.R.****Calculation of a rectangular wave guide and research of influence of coverings of walls for characteristics of a waveguide**

Полученные результаты и их новизна-приведен расчет прямоугольного волновода S-диапазона и показано влияние покрытий стенок волновода на его характеристики

The received results and their novelty-calculation of a rectangular wave guide of S-range is given and influence of coverings of walls of a wave guide for its characteristics is shown

Ключевые слова: волновод, волна H_{10} , коэффициент затухания, удельная проводимость, диэлектрик, стоячая волна

Key words: waveguide, wave H_{10} , attenuation coefficient, conductivity, dielectric, standing wave

Кузахмедов Ильяс Радионович

Инженер

Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи

Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130

Kuzakhmedov Ilyas Radionovitch

Engineer

Rostov research institute of a radio communication
Rostov-on-Don, Nansen st., 130

Волноводные линии передач обладают рядом преимуществ по сравнению с коаксиальными и двухпроводными линиями [1, с.6]. Для них характерны простота и жесткость конструкции. Отсутствуют потери энергии на излучение, вследствие закрытой конструкции. Кроме того, внутри волновода в большинстве случаев имеется либо воздух, либо вакуум, поэтому потерями в этих средах можно пренебречь. Из-за отсутствия диэлектрика и центрального проводника пробивная прочность волновода больше, чем у коаксиальной линии. Наконец, потери в стенках волновода также меньше по сравнению с потерями в коаксиальном кабеле. В статье приведен порядок расчета прямоугольного волновода и исследование влияния покрытий стенок на характеристики волновода.

Волновод представляет собой полую металлическую трубу прямоугольного сечения $a \times b$ (рисунок 1).

Рис. 1. Конструкция прямоугольного волновода

Основная волна в прямоугольном волноводе – Н₁₀. Условие распространения волн в волноводе:

$$\lambda_0 < \lambda_{кр}, \quad (1)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве,

$\lambda_{кр} = 2a$ – критическая длина волны.

Рассчитаем прямоугольный волновод в полосе частот 2-3 ГГц (S- диапазон). Согласно требованиям технического задания расчет характеристик прямоугольного волновода следует проводить в полосе частот $2,5 \pm 0,5$ ГГц ($\pm 40\%$ от f_0). Определяем длины волн, соответствующие данному частотному диапазону. Находим длину волны на средней частоте диапазона:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,5 \cdot 10^9} = 0,12 = 12 \text{ см},$$

где c – скорость света.

Находим длину волны, соответствующую нижней границе частотного диапазона:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9} = 0,15 = 15 \text{ см}.$$

Находим длину волны, соответствующую верхней границе частотного диапазона:

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0,10 = 10 \text{ см}.$$

Волновод должен обеспечивать распространение только волны H_{10} . Для обеспечения распространения волны H_{10} необходимо выполнение следующего условия [2, с.420]:

$$\begin{cases} a \approx \frac{\lambda_0}{1,4} = \frac{12}{1,4} = 8,57 \text{ см} \\ b \approx 0,4 \cdot \lambda_0 = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ см}. \end{cases}$$

В инженерной практике рекомендуется использовать стандартные волноводы. По таблице параметров стандартных прямоугольных волноводов [3]

получим следующие размеры волновода: $a = 86,36$ мм, $b = 43,18$ мм (волновод WR 340).

Одной из важных характеристик волновода является длина волны в волноводе. Определяем длину волны в волноводе на центральной частоте и на границах частотного диапазона. Находим длину волны в волноводе, соответствующую нижней границе частотного диапазона:

$$\Delta_{\max} = \frac{\lambda_{\max}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\max}}{2a}\right)^2}} = \frac{15}{\sqrt{1 - \left(\frac{15}{2 \cdot 8,63}\right)^2}} = 30,32 \text{ см.}$$

Находим длину волны в волноводе, соответствующую верхней границе частотного диапазона:

$$\Delta_{\min} = \frac{\lambda_{\min}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{2a}\right)^2}} = \frac{10}{\sqrt{1 - \left(\frac{10}{2 \cdot 8,63}\right)^2}} = 12,26 \text{ см.}$$

Находим длину волны в волноводе на центральной частоте диапазона:

$$\Delta_0 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} = \frac{12}{\sqrt{1 - \left(\frac{12}{2 \cdot 8,63}\right)^2}} = 16,69 \text{ см.}$$

На рисунке 2 представлена зависимость длины волны в волноводе от частоты.

Рис. 2. Зависимость длины волны в волноводе от частоты

Определяем волновое сопротивление волновода на центральной частоте и на границах частотного диапазона. Находим волновое сопротивление на нижней границе частотного диапазона:

$$z_{\lambda_{\max}} = 754 \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\Delta_{\max}}{\lambda_{\max}} = 754 \cdot \frac{4,31}{8,63} \cdot \frac{30,32}{15} = 778 \text{ Ом.}$$

Находим волновое сопротивление на верхней границе частотного диапазона:

$$z_{\lambda_{\min}} = 754 \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\Delta_{\min}}{\lambda_{\min}} = 754 \cdot \frac{4,31}{8,63} \cdot \frac{12,26}{10} = 463 \text{ Ом.}$$

Находим волновое сопротивление на центральной частоте:

$$z_{\lambda_0} = 754 \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\Delta_0}{\lambda_0} = 754 \cdot \frac{4,31}{8,63} \cdot \frac{16,69}{12} = 527 \text{ Ом.}$$

На рисунке 3 представлена зависимость волнового сопротивления волновода от частоты.

Рис. 3. Зависимость волнового сопротивления волновода от частоты

Определяем предельную мощность, которая может быть передана по данному волноводу в режиме бегущей волны на центральной частоте и на границах частотного диапазона. Находим предельную передаваемую мощность на нижней границе частотного диапазона:

$$P_{\lambda_{\max}} = \frac{a \cdot b \cdot E_{np}^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\max}}{2a} \right)^2} = \frac{8,63 \cdot 4,31 \cdot 29^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{15}{2 \cdot 8,63} \right)^2} = 10248 \text{ кВт.}$$

(где: E_{np} – предельная напряженность поля (для воздуха $E_{np} = 29$ кВ/см)).

Находим предельную передаваемую мощность на верхней границе частотного диапазона:

$$P_{\lambda_{\min}} = \frac{a \cdot b \cdot E_{np}^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{2a} \right)^2} = \frac{8,63 \cdot 4,31 \cdot 29^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{10}{2 \cdot 8,63} \right)^2} = 16885 \text{ кВт.}$$

Находим предельную передаваемую мощность на центральной частоте

$$P_{\lambda_0} = \frac{a \cdot b \cdot E_{np}^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2} = \frac{8,63 \cdot 4,31 \cdot 29^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{12}{2 \cdot 8,63} \right)^2} = 14890 \text{ кВт.}$$

На рисунке 4 представлена зависимость предельной передаваемой мощности от частоты.

Рис. 4. Зависимость предельной передаваемой мощности от частоты

Допустимая мощность – это предельная мощность пропускания, умноженная на коэффициент запаса электрической прочности. Она учитывает неоднородности, вызывающие местные концентрации электрического поля, климатические факторы и наличие стоячей волны. Допустимая мощность $P_{доп}$ равняется:

$$P_{доп} = \left(\frac{1}{3} \cdots \frac{1}{5} \right) P_{\lambda},$$

$$P_{доп} = \frac{1}{4} \cdot 14890 = 3723 \text{ кВт}.$$

Определяем коэффициент затухания электромагнитной энергии в прямоугольном волноводе

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_g + \alpha_c, \quad (2)$$

где: α_g – коэффициент затухания в диэлектрике (для воздуха $\alpha_g = 0$),

α_c – коэффициент затухания в стенках волновода, дБ/м.

Поэтому $\alpha_{\lambda} = \alpha_c$. Коэффициент затухания вычисляется в дБ/м, по формуле (3)

$$\alpha_{\lambda_{\max}} = \frac{0,793 \cdot (1 + 2b(\lambda/2a)^2/a)}{b\sqrt{j_n \cdot \lambda} \cdot \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}. \quad (3)$$

Находим коэффициент затухания на нижней границе частного диапазона:

$$\alpha_{\lambda_{\max}} = \frac{0,793 \cdot (1 + 2 \cdot 0,043 \cdot (0,15/2 \cdot 0,0863)^2/0,0863)}{0,048\sqrt{2,62 \cdot 10^7 \cdot 0,15} \cdot \sqrt{1 - (0,15/2 \cdot 0,0863)^2}} = 0,032 \text{ дБ/м}.$$

где: размеры a , b и λ берутся в метрах;

j_n – удельная проводимость материала стенок волновода (для латуни $j_n = 2,62 \cdot 10^7 \text{ См/м}$).

Находим коэффициент затухания на верхней границе частного диапазона

$$\alpha_{\lambda_{\min}} = \frac{0,793 \cdot (1 + 2 \cdot 0,043 \cdot (0,10/2 \cdot 0,0863)^2 / 0,0863)}{0,043 \sqrt{2,62 \cdot 10^7 \cdot 0,10} \cdot \sqrt{1 - (0,10/2 \cdot 0,0863)^2}} = 0,019 \text{ дБ/м.}$$

Находим коэффициент затухания на центральной частоте:

$$\alpha_{\lambda_0} = \frac{0,793 \cdot (1 + 2 \cdot 0,043 \cdot (0,12/2 \cdot 0,0863)^2 / 0,0863)}{0,043 \sqrt{2,62 \cdot 10^7 \cdot 0,12} \cdot \sqrt{1 - (0,12/2 \cdot 0,0863)^2}} = 0,021 \text{ дБ/м.}$$

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента затухания от частоты.

Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания от частоты

Рассчитанные и построенные характеристики прямоугольного волновода являются основными его характеристиками и однозначно определяют параметры передачи электромагнитной энергии. Удельная проводимость стенок, влияет на такую характеристику волновода как коэффициент затухания. Анализируя формулу (1.1) видно, что чем больше удельная проводимость стенок волновода, тем меньше на данной частоте коэффициент затухания.

В таблице 1 приведены значения удельных проводимостей некоторых материалов.

Таблица 1. Значения удельных проводимостей некоторых материалов

Материал	Удельная проводимость, См/м
Серебро(Ag)	$6,25 \cdot 10^7$
Медь(Cu)	$5,72 \cdot 10^7$
Золото(Au)	$4,1 \cdot 10^7$
Алюминий(Al)	$3,57 \cdot 10^7$
Латунь(L)	$2,62 \cdot 10^7$

Рассчитаем коэффициент затухания по формуле (3) для материалов, указанных в таблице 1. Графическое решение представлено на рисунке 6.

Рис. 6. Зависимость коэффициента затухания от частоты при использовании различных типов покрытий стенок волновода

Выводы:

Для распространения волны H_{10} в полосе частот 2-3 ГГц возможно использование прямоугольного волновода сечением 86,36×43,18. В результате анализа характеристик прямоугольного волновода в полосе частот можно утверждать следующее:

Длина волны в волноводе обратно пропорциональна частоте и прямо пропорциональна длине волны в вакууме. При выборе волновода необходимо чтобы длина волны в волноводе не стала меньше критической длины волны для данного волновода.

Волновое сопротивление представляет собой нелинейную зависимость от частоты и уменьшается с ростом частоты.

Предельная передаваемая мощность увеличивается с ростом частоты, то есть по волноводу на более высоких частотах можно передавать большие мощности.

При уменьшении частоты и приближении ее к критической потери растут за счет увеличения числа отражений плоских волн от стенок волновода, так как при каждом отражении часть энергии теряется. Коэффициент затухания обратно пропорционален частоте и зависит не только от частоты (длины волны), но и от типа покрытия. При увеличении удельной проводимости материала коэффициент затухания уменьшается.

Список литературы:

1. Изюмова Т.И., Свиридов В.Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. М.: Энергия, 1975. 112 с.
2. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971. 482 с.
3. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 660 с.

References:

1. Izyumova T.I., Sviridov V.T. *Wave guides, coaxial and strip lines*. M.: Energy, 1975. 112 p.
2. Goldstein L.D., N.V. Zernov. *Electromagnetic fields and waves*. M.: Soviet radio, 1971. 482 p.
3. Volman V.I., Pimenov Yu.V. *Technical electrodynamics*. M.: Communication, 1971. 660 p.

© 2014, Кузахмедов И.Р.

Расчет прямоугольного волновода и исследование влияния покрытий стенок на характеристики волновода

© 2014, Kuzakhmedov I.R.

Calculation of a rectangular wave guide and research of influence of coverings of walls for characteristics of a waveguide