

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Марийский Государственный Технический Университет

Кафедра Радиотехники и связи

Пояснительная записка
к курсовой работе

по дисциплине «Электромагнитные поля и волны»

Вариант № 04

Выполнил: студент группы ЗРРТ-31у
Арьев А. Н.

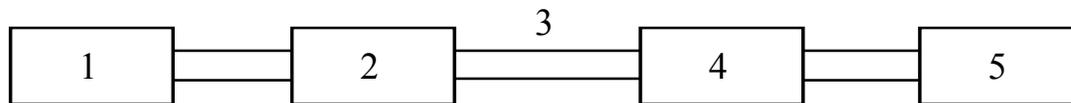
Проверил: к. ф.-м. н., доц. кафедры РТ и С
Бабенко А.Н.

Йошкар-Ола
2010

Инв. № подл.	
Подпись и дата	
Взаим. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подпись и дата	

Задание на курсовую работу

Задана СВЧ цепь:



Задающий генератор (1) генерирует СВЧ колебания частотой f . СВЧ энергия поступает в прямоугольный волновод (3) длиной L через развязывающий вентиль (2). Волновод через щель возбуждает резонатор 4, включенный на проход и нагруженный на согласованную нагрузку (5). Взаимное расположение резонатора и подсоединенных к нему волноводов показано схематически и определяется при выполнении курсовой работы. Тип волны в волноводе и резонаторе задан в табл. 1.

Курсовая работа состоит из набора заданий, перечисленных ниже. Выполнив очередной пункт задания нужно проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

1. Расчет размеров волновода и поля в нем (1, стр. 186 - 207).

Выбрать размеры волновода (3) для передачи волны заданного типа. Привести выражение для электромагнитного поля в волноводе, без учета потерь. Построить поле в трех проекциях (см. замечание 1). Проанализировать полученные результаты.

2. Расчет потерь в линии передачи на прямоугольном волноводе (1, стр. 160 – 162, 212 - 215).

Рассчитать волновые числа, постоянную затухания и потери в линии передачи на прямоугольном волноводе, считая, что его стенки изготовлены из меди и покрыты лаком. Потерями в лаковом покрытии пренебречь. Записать выражения для продольных составляющих поля в волноводе с учетом най-

Подпись и дата	
Инв. № дубл.	
Взаим. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

денных волновых чисел и постоянной затухания. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

3. Расчет параметров цилиндрического резонатора (1, стр. 312 – 313, 305 – 309, 315 - 318).

Определить размеры цилиндрического резонатора, толщину покрытия для заданной моды и собственную добротность резонатора Q_0 , если его стенки покрыты серебром толщиной в 3 скин слоя. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

4. Анализ структуры поля в резонаторе и выбор положения щелей для возбуждения и нагрузки (1, стр. 224 – 233, 305 – 309, 313 - 315).

Привести выражение и построить в масштабе силовые линии для электрического и магнитного поля в трех проекциях. Число сечений выбирается достаточным для того, чтобы разобраться в структуре поля. При необходимости можно построить поле в аксонометрии (см. замечание 1). Проанализировать полученные результаты. Выбрать место и конфигурацию щели для подключения возбуждающего волновода и нагрузки. Размеры щели определять не нужно. Сделать выводы.

5. Расчет параметров колебательного контура, эквивалентного резонатору на заданной резонансной частоте (1, стр. 315 – 318 и результаты по п. 4 настоящей работы).

Рассчитать параметры колебательного контура, эквивалентного резонатору на заданной резонансной частоте и построить его частотную и фазовую характеристики (см. замечание 1).

6. Расчет параметров длинной линии эквивалентной волноводу (1, стр. 292 – 301; 2, лабораторная работа № 1).

Определить КСВ в линии передачи на частоте, считая, что резонатор настроен на эту частоту, а его нагруженная добротность $Q_H = Q_0 / k$ (величина k задана в вашем варианте задания и будет определять коэффициент отраже-

Подпись и дата	
Инв. № дубл.	
Взаим. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

ния в месте подключения нагрузки; коэффициент отражения равен k , а фаза коэффициента отражения равна 180°).

Рассчитать параметры длинной линии, эквивалентной волноводу.

Построить распределение тока и напряжения в эквивалентной волноводу длинной линии. При этом учесть прямую и отраженную волну.

По построенному графику определить длину волны в волноводе.

Рассчитать длину волны в волноводе, исходя из частоты поля и размеров волновода, и сравнить полученные величины.

Замечание 1. Для построения чертежей, диаграмм и рисунков можно воспользоваться ЭВМ, но в этом случае приводится текст оригинальных программ и порядок работы с ними или последовательность операций по построению объекта при использовании стандартных программ.

Таблица 1

№	F , ГГц	L , м	Тип волны		k
			Волновод	Резонатор	
04	8	2	E_{12}	H_{231}	3,5

Инв. № подл.	
Подпись и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подпись и дата	

Содержание

Введение.....	6
1 Расчет размеров волновода и поля в нем.....	7
2 Расчет потерь в линии передачи на прямоугольном волноводе	18
3 Расчет параметров цилиндрического резонатора	21
4 Анализ структуры поля в резонаторе и выбор положения щелей для возбуждения и нагрузки	25
5 Расчет параметров колебательного контура, эквивалентного резонатору на заданной резонансной частоте.....	30
6 Расчет параметров длинной линии эквивалентной волноводу	34
Заключение	39
Библиографический список	41

Подпись и дата		Инв. № дубл.		Взаим. инв №		Подпись и дата			
Инв. № подл.		Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Арьев А.Н.							5	41
Пров.	Бабенко А.Н.						Курсовая работа по дисциплине «ЭМП и В» Пояснительная записка		
Н. контр.									
Утв.									
КНФУ.668820.004 ПЗ							МарГТУ ЗРРТ-31у		

Введение

В курсовой работе рассчитаны конструктивные и электрические параметры элементов СВЧ цепей на волноводных структурах.

В первой главе рассчитаны и выбраны размеры сечения прямоугольного волновода при условии существования колебания E_{12} на частоте 8 ГГц.

Во второй главе определены потери в выбранном прямоугольном волноводе длиной 2 м.

В третьей главе рассчитаны размеры и определены электрические характеристики объемного цилиндрического резонатора работающего на частоте 8 ГГц при условии существования колебания H_{231} .

В четвертой главе составлены соотношения для составляющих поля колебания H_{231} в цилиндрическом резонаторе, проанализированы соотношения составляющих поля и построена картина поля.

Эквивалентные параметры схемы замещения в виде параллельного колебательного контура для объемного цилиндрического резонатора с колебанием H_{231} определены в пятой главе. Построены графики АЧХ и ФЧХ для полученной схемы параллельного контура.

В шестой главе рассчитаны параметры эквивалентной длинной линии для отрезка прямоугольного волновода при условии существования колебания E_{12} на частоте 8 ГГц.

Име. № подл.	Подпись и дата	Име. № дубл.	Подпись и дата
Взаим. име №			

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

КНФУ.668820.004 ПЗ

Лист

6

1 Расчет размеров волновода и поля в нем

Длина волны от генератора

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

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

При частоте 8 ГГц длина волны будет равна

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 10^9} = 0,037 \text{ м} = 37 \text{ мм.}$$

Для выбора размеров волновода при условии распространения волны E_{12} построим диаграмму критических длин волн для магнитного и электрического типа колебаний. Полагаем, что

$$a = 2b, \quad (1.2)$$

где a – широкая стенка прямоугольного волновода;

b – узкая стенка прямоугольного волновода.

Критические длины волн для магнитных и электрических типов определяются из соотношения

$$\lambda_{\text{кр}H_{mn}}(E_{mn}) = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (1.3)$$

где m и n индексы типа колебания H_{mn} (E_{mn}). При этом у E -волн $m \geq 1$ и $n \geq 1$, а у H -волн один из индексов может равняться нулю.

Критические длины волн для различных типов колебаний рассчитаем в программе MathCad. При этом временно полагаем размер $a = 1$ для получения численных значений, а при построении полученные численные результаты будем домножать на размер a .

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$H12 \quad E12 \quad m := 1 \quad n := 2 \quad a := 1 \quad b := \frac{a}{2}$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.485$$

$$H01 \quad m := 0 \quad n := 1$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 1$$

$$H02 \quad m := 0 \quad n := 2$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.5$$

$$H03 \quad m := 0 \quad n := 3$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.333$$

$$H10 \quad m := 1 \quad n := 0$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 2$$

$$H11 \quad E11 \quad m := 1 \quad n := 1$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.894$$

$$H13 \quad E13 \quad m := 1 \quad n := 3$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.329$$

$$H20 \quad m := 2 \quad n := 0$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 1$$

$$H21 \quad E21 \quad m := 2 \quad n := 1$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.707$$

$$H22 \quad E22 \quad m := 2 \quad n := 2$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.447$$

$$H30 \quad m := 3 \quad n := 0$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.667$$

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	

$$H31 \ E31 \quad m := 3 \quad n := 1$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.555$$

$$H32 \ E32 \quad m := 3 \quad n := 2$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.4$$

$$H40 \quad m := 4 \quad n := 0$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.5$$

$$H41 \ E41 \quad m := 4 \quad n := 1$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.447$$

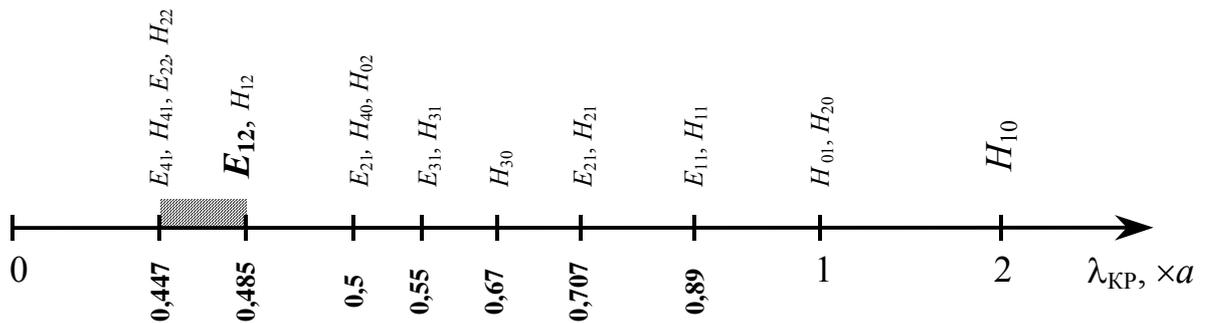


Рисунок 1.1

На основе полученных данных строим диаграмму, по оси x которой откладываем критические длины волн (рис. 1.1).

Для распространения колебания E_{12} необходимо выполнение условия

$$\lambda < \lambda_{кр}^{E_{12}}. \quad (1.4)$$

Для фильтрации волн более высших типов (например, E_{41} , H_{41} , E_{22} , H_{22} и других с более высокими значениями индексов m и n) необходимо, чтобы выполнялось условие

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

$$0,447a < \lambda < 0,485a. \quad (1.5)$$

Кроме волны E_{12} при заданной частоте f (см. диаграмму на рис. 1.1), будут распространяться и типы волн $H_{10}, H_{20}, H_{01}, E_{11}, H_{11}, E_{21}, H_{21}, H_{30}, E_{31}, H_{31}, E_{21}, H_{40}, H_{02}$ и H_{12} . Для их подавления необходимо использовать соответствующие фильтры.

$\lambda = 37$ мм, следовательно, $0,447a < 37 < 0,485a$, то есть размеры широкой стенки волновода должны быть

$$a_{max} := \frac{37}{0.447} \quad a_{max} = 82.774 \text{ мм} \quad a_{min} := \frac{37}{0.485} \quad a_{min} = 76.289 \text{ мм}$$

$$76,289 < a < 82,774 \text{ мм.}$$

Выбираем волновод с внутренними размерами 80×40 мм.

Выражения для электромагнитного поля в волноводе в случае волн электрического типа [1, с. 191]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_x = -\frac{i \cdot h \cdot m \cdot \pi}{g^2 \cdot a} \cdot C_E \cdot \cos\left(m \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{y}{b}\right) \cdot e^{-ihz} = \\ \quad = i \cdot E_0 \cdot g_x \cdot \cos(g_x \cdot x) \cdot \sin(g_y \cdot y) \cdot e^{-ihz}, \\ \dot{E}_y = -\frac{i \cdot h \cdot n \cdot \pi}{g^2 \cdot b} \cdot C_E \cdot \sin\left(m \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \cos\left(n \cdot \pi \cdot \frac{y}{b}\right) \cdot e^{-ihz} = \\ \quad = i \cdot E_0 \cdot g_y \cdot \sin(g_x \cdot x) \cdot \cos(g_y \cdot y) \cdot e^{-ihz}, \\ \dot{E}_z = C_E \cdot \sin\left(m \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{y}{b}\right) \cdot e^{-ihz}, \\ \dot{H}_x = -\frac{\dot{E}_y}{z_{cE}} = -i \cdot \frac{E_0}{z_{cE}} \cdot g_y \cdot \sin(g_x \cdot x) \cdot \cos(g_y \cdot y) \cdot e^{-ihz}, \\ \dot{H}_y = \frac{\dot{E}_x}{z_{cE}} = i \cdot \frac{E_0}{z_{cE}} \cdot g_x \cdot \cos(g_x \cdot x) \cdot \sin(g_y \cdot y) \cdot e^{-ihz}, \\ \dot{H}_z = 0, \end{array} \right. \quad (1.6)$$

где $E_0 = h \cdot \frac{C_E}{g^2}$;

$a \times b$ – размеры сечения прямоугольного волновода;

Ине. № дубл.	Подпись и дата
Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	
Ине. № ине	
Ине. № подл.	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$g = \pi \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} - \text{поперечное волновое число};$$

$$g_x = \frac{m \cdot \pi}{a}; \quad g_y = \frac{n \cdot \pi}{b};$$

$$h = \sqrt{\omega^2 \mu_a \varepsilon_a - g^2} - \text{продольное волновое число};$$

$$z_{cE} = \frac{h}{\omega \cdot \varepsilon_a} = \frac{2\pi}{\omega \cdot \varepsilon_a \cdot \lambda_B} = z_{c0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{KP}}\right)^2} - \text{волновое сопротивление.}$$

Перейдём от комплексных амплитуд к функциям от времени $y(t) = \text{Re}\{\dot{Y} \cdot e^{j\omega t}\}$, допуская, что картину поля рассматриваем в момент времени $t = 0$ и $C_E = 1$.

$$\left\{ \begin{aligned} E_x(t) &= \text{Re}\{\dot{E}_x \cdot e^{j\omega t}\} = \text{Re}\left\{i \cdot \frac{h}{g^2} \cdot \frac{m \cdot \pi}{a} \cdot \cos\left(m \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{y}{b}\right) \cdot e^{-ihz} \cdot e^{j\omega t}\right\} = \\ &= -\frac{h}{g^2} \cdot \frac{m \cdot \pi}{a} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \cdot x\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{b} \cdot y\right) \cdot \sin(-h \cdot z), \\ E_y(t) &= -\frac{h}{g^2} \cdot \frac{n \cdot \pi}{b} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{b} \cdot y\right) \cdot \sin(-h \cdot z), \\ E_z(t) &= \sin\left(m \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{y}{b}\right) \cdot \cos(-h \cdot z), \\ H_x(t) &= \frac{h}{z_{cE} \cdot g^2} \cdot \frac{n \cdot \pi}{b} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{b} \cdot y\right) \cdot \sin(-h \cdot z), \\ H_y(t) &= -\frac{h}{z_{cE} \cdot g^2} \cdot \frac{m \cdot \pi}{a} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \cdot x\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{b} \cdot y\right) \cdot \sin(-h \cdot z), \\ H_z(t) &= 0. \end{aligned} \right. \quad (1.7)$$

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

Численные коэффициенты рассчитаем в программе MathCad.

$$f := 8 \cdot 10^9 \text{ Гц} \quad a := 0.08 \text{ м} \quad b := 0.04 \text{ м} \quad m := 1 \quad n := 2$$

$$c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \varepsilon := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \quad \mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.037 \text{ м}$$

$$g := \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad h := \sqrt{\omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon - g^2} \quad \lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.039 \text{ м}$$

$$g = 161.914$$

$$Z_{cE} := \frac{h}{\omega \cdot \varepsilon} \quad Z_{cE} = 97.546 \text{ Ом}$$

$$\lambda_B := \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \quad \lambda_B = 0.146 \text{ м}$$

$$\frac{h \cdot m \cdot \pi}{g^2 \cdot a} = 0.065 \quad \frac{m \cdot \pi}{a} = 39.27 \quad \frac{n \cdot \pi}{b} = 157.08 \quad h = 43.393$$

$$\frac{h \cdot n \cdot \pi}{g^2 \cdot b} = 0.26 \quad \frac{h \cdot n \cdot \pi}{g^2 \cdot b \cdot Z_{cE}} = 2.665 \cdot 10^{-3} \quad \frac{h \cdot m \cdot \pi}{g^2 \cdot a \cdot Z_{cE}} = 6.664 \cdot 10^{-4}$$

$$E_x = -0.065 \cdot \cos(39.27 \cdot x) \cdot \sin(157.08 \cdot y) \cdot \sin(-43.393 \cdot z)$$

$$E_y = -0.26 \cdot \sin(39.27 \cdot x) \cdot \cos(157.08 \cdot y) \cdot \sin(-43.393 \cdot z)$$

$$E_z = \sin(39.27 \cdot x) \cdot \sin(157.08 \cdot y) \cdot \cos(-43.393 \cdot z)$$

$$H_x = 2.665 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(39.27 \cdot x) \cdot \cos(157.08 \cdot y) \cdot \sin(-43.393 \cdot z)$$

$$H_y = -6.664 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(39.27 \cdot x) \cdot \sin(157.08 \cdot y) \cdot \sin(-43.393 \cdot z)$$

$$H_z = 0$$

При построении и анализе структуры поля необходимо учитывать следующие положения:

- волны E -типа имеют продольную составляющую вектора \vec{E} , ориентированную вдоль оси волновода;
- магнитные и электрические силовые линии ортогональны;
- электрические силовые линии проходят нормально к поверхности металла;

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

- магнитные силовые линии подходят тангенциально к поверхности металла;
- индекс m показывает число вариаций поля между стенками волновода в направлении оси x ;
- индекс n показывает число вариаций поля между стенками волновода в направлении оси y ;
- задавшись произвольным направлением \vec{H} (или \vec{E}), направление \vec{E} (или \vec{H}) определяется согласно выражению $\vec{n} = \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^*$. Ориентацию векторного произведения определяют по правилу движения правого винта, рукоятка которого поворачивается по кратчайшему пути от вектора $\dot{\vec{E}}$ к вектору $\dot{\vec{H}}^*$.

Графики составляющих поля $E_y(x)$, $E_x(y)$ и $E_y(z)$ построены в программе MathCad (рис. 1.2, 1.3 и 1.4 соответственно).

$$x := 0,03 \cdot 10^{-3} .. 80 \cdot 10^{-3} \quad E_y(x) := \sin(39,27 \cdot x)$$

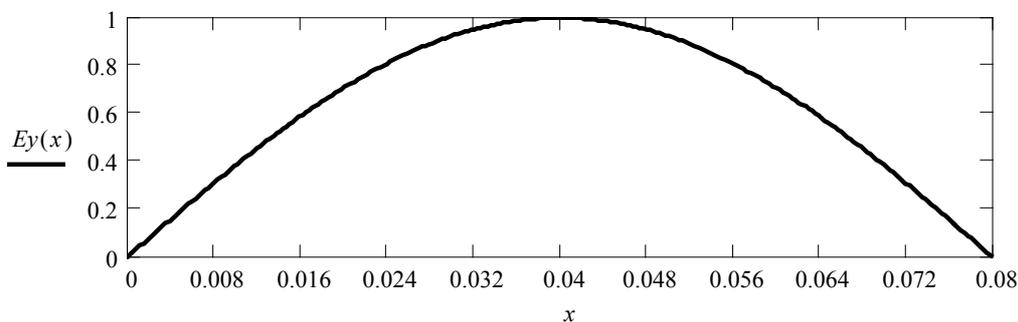


Рисунок 1.2

$$y := 0,03 \cdot 10^{-3} .. 40 \cdot 10^{-3} \quad E_x(y) := \sin(157,08 \cdot y)$$

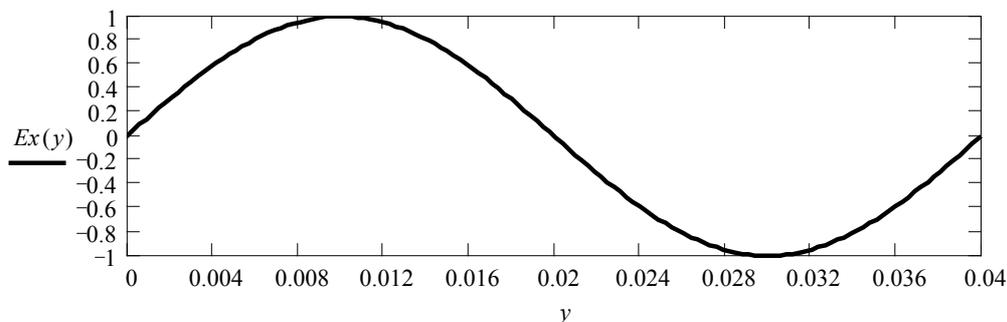


Рисунок 1.3

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата
Ине. № подл.	Ине. № дубл.

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$z := 0, 0.3 \cdot 10^{-3} .. 200 \cdot 10^{-3}$$

$$E_y(z) := \sin(-43.393 \cdot z)$$

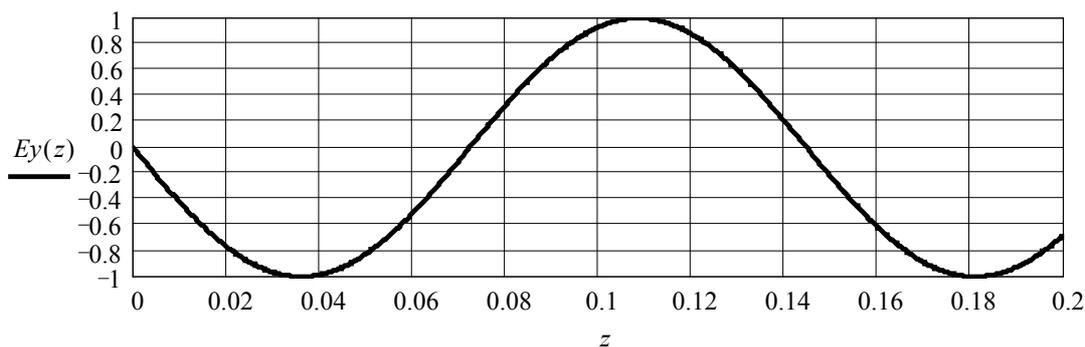


Рисунок 1.4

Картина поля в волноводе колебания E_{12} в трех проекциях приведена на рис. 1.5.

Картина поля в поперечном сечении (плоскость xOy) построена в сечении $z = 0$. Амплитуда $E_y(x)$ соответственно меняется вдоль широкой стенки по закону синуса и имеет один максимум в центре (рис. 1.2). Амплитуда $E_x(y)$ соответственно меняется вдоль узкой стенки по закону синуса и укладывается один период колебания соответственно с минимумом на краях и в центре и положительным и отрицательным максимумами на расстояниях $1/4$ от стенок (рис. 1.3). В соответствии с этим будет две локальные точки по сечению: из одной точки силовые линии будут выходить, а в другую - входить. При этом силовые линии замыкаются нормально на стенки волновода, и они искажаются при приближении к углам волновода. Пусть из левой локальной точки силовые линии выходят, тогда в правую локальную точку они будут входить. В соответствии с вышесказанным проводим силовые линии электрического поля. Силовые линии магнитного поля ортогональны электрическим силовым линиям, и они должны подходить тангенциально к поверхности стенок. Этим условиям будут соответствовать замкнутые силовые линии вокруг соответственно левой и правой локальных точек. Направление обхода силовых линий определяем по правилу правого винта, соответственно для

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

левой локальной точки – против часовой стрелки, правой – по часовой стрелке.

При построении картины поля в плоскости yOz рассматриваем сечение $A - A$ проходящее по середине широкой стенки. Амплитуда электрического поля вдоль оси z изменяется по синусоидальному закону (см. рис. 1.4), причём период составляет 146 мм, что соответствует длине волны колебания E_{12} (расчет в MathCad на стр. 12). Максимумы густот силовых линий будут наблюдаться по координатам $z = 38$ мм; 111 мм и т.д. через 73 мм. Электрические силовые линии замыкаются на стенки волновода (исключение составляют линии в центре) и представляют собой замкнутые окружности овальной формы вытянутые вдоль оси z . Направление силовых линий определяем в соответствии с направлением на плоскости xOy . Магнитные силовые линии в виде овалов лежат в плоскости xOy , и здесь будут отображаться в виде окружностей с указанием направления силовых линий (точка – направление к нам, плюс – от нас). Направление магнитных силовых линий определяем из сечения xOy .

В плоскости zOx картину поля строим в сечении $B - B$. Максимальная густота электрических силовых линий будет по центру широкой стенки. Густота электрических силовых линий вдоль оси z будет меняться по закону синуса с периодом 146 мм, что соответствует длине волны в волноводе колебания E_{12} . Электрические силовые линии замыкаются на стенки волновода соответственно на оси x в центре, а по оси z по координатам 38 мм; 111 мм и так далее через 73 мм. Направление определяем по картине поля в плоскости xOy . Магнитные силовые линии имеют максимальную густоту в местах схождения электрических силовых линий и будут отображаться в виде окружностей с точкой или плюсом соответственно.

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

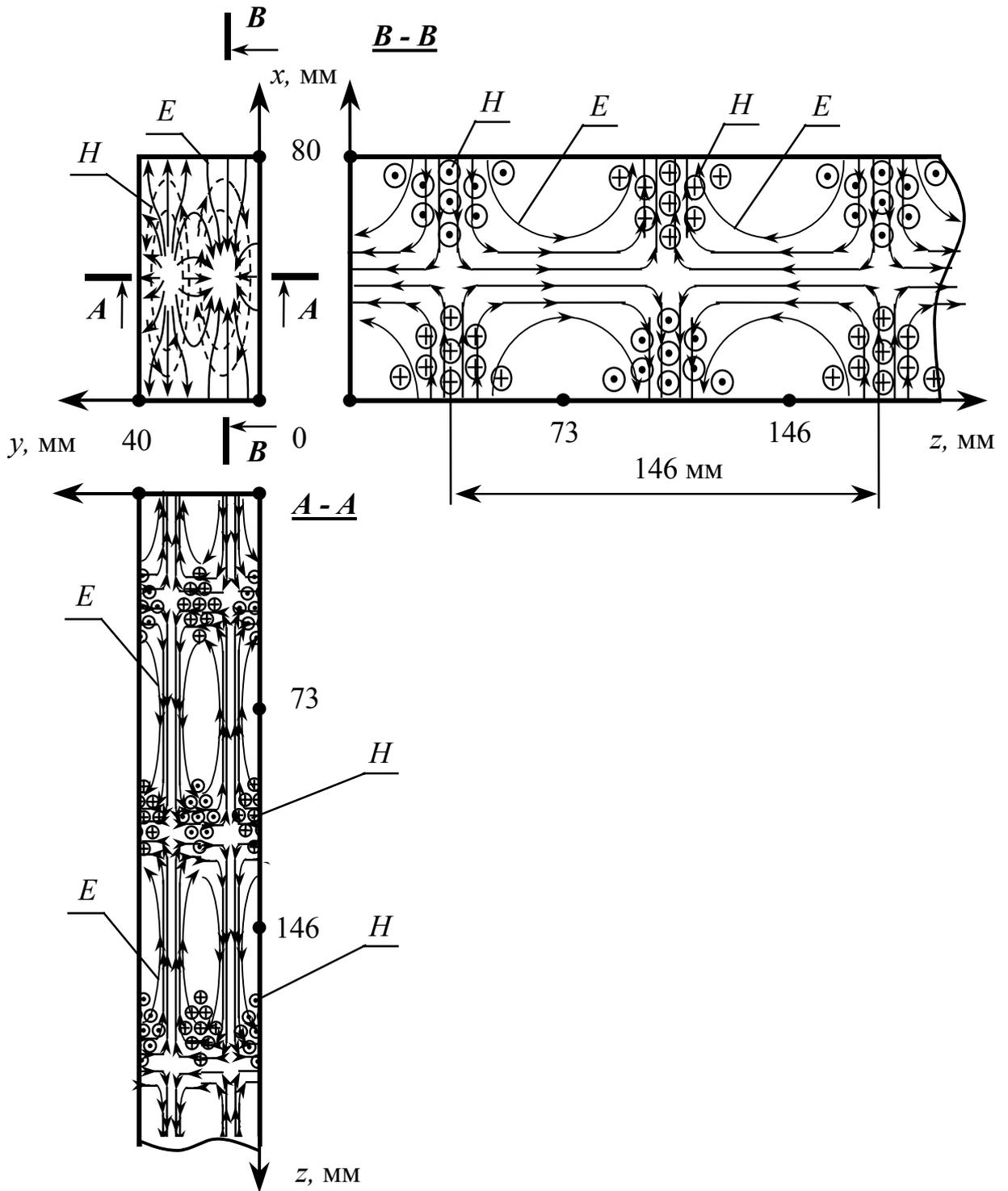


Рисунок 1.5

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата
Изм	Лист
№ документа	Подпись
Дата	Дата

КНФУ.668820.004 ПЗ

Лист

16

Выводы. Для распространения колебания E_{12} в прямоугольном волноводе возможно использование сечения 80×40 мм на частоте 8 ГГц.

Построенная картина поля колебания E_{12} в прямоугольном волноводе показывает, что в соответствии с индексами картина поля имеет одну вариацию вдоль широкой стенки, две вариации вдоль узкой стенки. Магнитные силовые линии являются замкнутыми, подходящими к стенкам волновода и проходящими параллельно им и для колебания электрического типа они расположены в плоскости, ортогональной оси z . Электрические силовые линии вытянуты вдоль оси z . Картина поля повторяется через пол длины волны в волноводе со сменой направлений силовых линий на противоположные, а в общем случае периодичность картины наблюдается на расстоянии длины волны в волноводе.

Ине. № подл.	Подпись и дата	Взаим. инв №	Ине. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

КНФУ.668820.004 ПЗ

Лист

17

2 Расчет потерь в линии передачи на прямоугольном волноводе

Погонные потери в прямоугольном волноводе рассчитаем по формуле, приведённой в [1, с. 212]

$$\Delta_{\text{пог}}[\text{Нп}] = 2 \cdot h''; \Delta_{\text{пог}}[\text{дБ}] = 8,69 \cdot h'', \quad (2.1)$$

где h'' - мнимая часть комплексного продольного волнового числа $h = h' - i \cdot h''$.

Для волн электрического типа мнимая часть комплексного продольного волнового числа [1, с. 215]

$$h'' = \frac{2}{z_c \cdot \sigma_{\Omega} \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}} \cdot \frac{m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^3 + n^2}{m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2}, \quad (2.1)$$

где $a \times b$ – сечение волновода, м;

m, n – индексы типа колебания;

σ_{Ω} - проводимость металла, из которого выполнен волновод, Сим/м;

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma_{\Omega}}} - \text{глубина скин-слоя, м;}$$

λ - длина волны в свободном пространстве, м;

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} - \text{критическая длина волны, м.}$$

Для расчёта погонного затухания воспользуемся программой MathCad.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$a := 0.08 \text{ м} \quad b := 0.04 \text{ м} \quad f := 8 \cdot 10^9 \text{ Гц} \quad m := 1 \quad n := 2$$

$$\varepsilon a := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \quad \mu a := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.037 \text{ м}$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_B := \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \quad \lambda_B = 0.146 \text{ м}$$

$$\lambda_{кр} = 0.039 \text{ м}$$

$$g := \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad g = 161.914 \quad \sigma := 5.7 \cdot 10^7 \frac{\text{Сим}}{\text{м}}$$

$$h := \sqrt{\omega^2 \cdot \mu a \cdot \varepsilon a - g^2} \quad h = 43.393 \quad d := \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu a \cdot \sigma}} \quad d = 7.453 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$z_c := 120 \cdot \pi \text{ Ом}$$

$$h'' := \frac{2}{z_c \cdot \sigma \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \cdot \frac{m^2 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^3 + n^2}{m^2 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2} \quad h'' = 0.012$$

$$\Delta_{\text{погл}} := 2 \cdot h'' \quad \Delta_{\text{погл}} = 0.024 \frac{\text{Нп}}{\text{м}}$$

$$\Delta_{\text{пог}} := 8.69 \cdot h'' \quad \Delta_{\text{пог}} = 0.102 \frac{\text{дБ}}{\text{м}}$$

Учитывая длину волновода $l = 2 \text{ м}$, потери в нём составят

$$l := 2 \text{ м} \quad \Delta := l \cdot \Delta_{\text{погл}} \quad \Delta = 0.047 \text{ Нп}$$

$$\Delta := l \cdot \Delta_{\text{пог}} \quad \Delta = 0.205 \text{ дБ}$$

Выражения для продольных составляющих поля в волноводе с учетом найденных волновых чисел и постоянной затухания будут иметь вид

$$\dot{E}_z = \sin\left(m \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{y}{b}\right) \cdot e^{-i \cdot h \cdot z} \cdot e^{-h'' \cdot z},$$

$$\dot{H}_z = 0.$$

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Численные значения рассчитаем в программе MathCad.

$$m := 1 \quad n := 2 \quad a := 80 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad b := 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\frac{m \cdot \pi}{a} = 39.27 \quad \frac{n \cdot \pi}{b} = 157.08 \quad h = 43.393 \quad h'' = 0.012$$

$$\dot{E}_z = \sin(39,27 \cdot x) \cdot \sin(157,08 \cdot y) \cdot e^{-i \cdot 43,39 \cdot z} \cdot e^{-0,012 \cdot z}; \quad \dot{H}_z = 0.$$

Выводы. При распространении волны электрического типа E_{12} в прямоугольном волноводе размерами 80×40 мм, изготовленном из меди, стенки которого покрыты лаком на частоте 8 ГГц погонные потери составят 0,024 Нп/м или 0,102 дБ/м без учета потерь в лаковом покрытии. С учетом длины волновода 2 м, потери в волноводе будут составлять 0,047 Нп или 0,205 дБ. С учетом найденных волновых чисел и постоянной затухания продольные составляющие поля E_{12} в прямоугольном волноводе сечением 80×40 мм будут иметь вид

$$\dot{E}_z = \sin(39,27 \cdot x) \cdot \sin(157,08 \cdot y) \cdot e^{-i \cdot 43,39 \cdot z} \cdot e^{-0,012 \cdot z};$$

$$\dot{H}_z = 0.$$

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

3 Расчет параметров цилиндрического резонатора

В качестве основания цилиндрического резонатора используем отрезок круглого волновода. Обозначим размеры цилиндрического резонатора: длину - l , а радиус - r . В резонаторе существуют колебания типа H_{231} .

Резонансная частота для волн магнитного типа

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{p\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)^2}, \quad (3.1)$$

где $\mu_{mn} = \mu_{23} = 9,969$ - корень производной от функции Бесселя [1, с. 229],

$p = 1$ – третий индекс в колебании H_{mnp} (H_{231}).

Длина волны в резонаторе

$$\lambda_p = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{p\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)^2}}. \quad (3.2)$$

В соответствии с вариантом $m = 2; n = 3; p = 1$.

Длина волны колебания равна резонансной длине волны. Критическая длина волны для волн электрического типа

$$\lambda_{\text{кр}H_{mn}} = \frac{2\pi r}{\mu_{mn}}. \quad (3.3)$$

Ближайший больший из корней производной от функции Бесселя и корней производной от функции Бесселя ($\mu_{23} = 9,969$) - $\nu_{13} = 10,17$. Радиус круглого волновода выбираем из условия распространения в волноводе только колебаний H_{231}

$$\frac{2\pi r}{10,17} < \lambda < \frac{2\pi r}{9,969} \quad (3.4)$$

$$\text{или } r > \frac{9,969\lambda}{2\pi} \text{ и } r < \frac{10,17\lambda}{2\pi}.$$

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

$$f := 8 \cdot 10^9 \quad \text{Гц} \quad \lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad \lambda = 0.0375 \quad \text{м}$$

$$\frac{9.969 \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} = 0.0595 \quad \text{м} \quad \frac{10.17 \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} = 0.0607 \quad \text{м}$$

Выбираем волновод радиусом 60 мм или диаметром 120 мм.

Длину резонатора l определим из формулы (3.2).

$$\mu m n := 9.969 \quad r := 0.06 \quad \text{м} \quad p := 1$$

$$0 = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{p \cdot \pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{\mu m n}{r}\right)^2}} - \lambda$$

$$\left[\begin{array}{l} \frac{1}{\left(\mu m n^2 - 4 \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot r^2\right)} \cdot \pi \cdot p \cdot r \cdot \sqrt{-\mu m n^2 + 4 \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot r^2} \\ -1 \\ \frac{-1}{\left(\mu m n^2 - 4 \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot r^2\right)} \cdot \pi \cdot p \cdot r \cdot \sqrt{-\mu m n^2 + 4 \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot r^2} \end{array} \right]$$

$$l := \frac{-1}{\left(\mu m n^2 - 4 \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot r^2\right)} \cdot \pi \cdot p \cdot r \cdot \sqrt{-\mu m n^2 + 4 \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot r^2} \quad l = 0.1453 \quad \text{м}$$

Таким образом, длина цилиндрического резонатора равна $l = 145$ мм.

Стенки резонатора покрыты серебром толщиной три скин слоя.
Толщина скин слоя

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma_s}} \quad (3.5)$$

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. инв. №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

Толщина покрытия составит

$$S = 3 \cdot d. \quad (3.6)$$

$$f := 8 \cdot 10^9 \quad \text{Гц} \quad \sigma_{Ag} := 6.1 \cdot 10^7 \quad \frac{\text{Сим}}{\text{м} \cdot \text{м}} \quad \mu_a := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$d := \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \sigma_{Ag}}} \quad S := 3 \cdot d$$

$$S = 2.1614 \cdot 10^{-6} \quad \text{м}$$

Таким образом, толщина покрытия составит $S = 2,2$ мкм.

Добротность резонатора для заданного магнитного типа волн [1, стр. 317]

$$Q_{H_{mnp}} = \frac{\mu_a}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_a \cdot \omega_p}{\mu_{a2}}} \cdot \frac{l \cdot r \cdot \left(1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{p \cdot \pi \cdot r}{l \cdot \mu_{mn}}\right)^2\right)}{l \cdot \left(1 + \left(\frac{p \cdot \pi \cdot r \cdot m}{l \cdot \mu_{mn}^2}\right)^2\right) + 2 \cdot r \cdot \left(\frac{p \cdot \pi \cdot r}{l \cdot \mu_{mn}}\right)^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}}\right)^2\right)} \quad (3.7)$$

Добротность рассчитаем в программе MathCad.

$$f := 8 \cdot 10^9 \quad \text{Гц} \quad l := 0.145 \quad \text{м} \quad r := 0.06 \quad \text{м} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$m := 2 \quad n := 3 \quad p := 1 \quad \mu_{mn} := 9.969$$

$$\mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad \sigma := 6.1 \cdot 10^7 \quad \frac{\text{Сим}}{\text{м}} \quad \mu_a := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$Q := \frac{\mu}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma \cdot \omega}{\mu}} \cdot \frac{l \cdot r \cdot \left[1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{p \cdot \pi \cdot r}{l \cdot \mu_{mn}}\right)^2\right]}{l \cdot \left[1 + \left(\frac{p \cdot \pi \cdot r \cdot m}{l \cdot \mu_{mn}^2}\right)^2\right] + 2 \cdot r \cdot \left(\frac{p \cdot \pi \cdot r}{l \cdot \mu_{mn}}\right)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}}\right)^2\right]}$$

$$Q = 9.658 \cdot 10^4$$

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Выводы. Для того, чтобы существовали колебания H_{231} в цилиндрическом резонаторе на частоте 8 ГГц необходимо использовать конструкцию длиной 145 мм и радиусом 60 мм. Для уменьшения потерь стенки резонатора необходимо покрыть серебром толщиной не менее 3 скин-слоя - 2,2 мкм. Такая конструкция резонатора на частоте 8 ГГц при условии существования в нем колебания H_{231} будет иметь добротность равную 96580.

Ине. № подл.	Подпись и дата	Взаим. инв №	Ине. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

КНФУ.668820.004 ПЗ

4 Анализ структуры поля в резонаторе и выбор положения щелей для возбуждения и нагрузки

Для колебания H_{231} в цилиндрическом резонаторе магнитная и электрическая составляющие имеют вид [4, стр. 226]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_{r1} = -2 \cdot j \cdot \frac{\pi \cdot r_0}{l \cdot \mu_{23}} \cdot J_2' \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \cos(2 \cdot \varphi) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{H}_{\varphi 1} = 2 \cdot j \cdot \frac{\pi \cdot r_0^2}{l \cdot r \cdot \mu_{23}^2} \cdot 2 \cdot J_2 \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \sin(2 \cdot \varphi) \cos \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{H}_{z1} = -2 \cdot j \cdot J_2 \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \cos(2 \cdot \varphi) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{E}_{r1} = 2 \cdot \frac{\omega_p \cdot \mu_a \cdot r_0^2}{r \cdot \mu_{23}^2} \cdot 2 \cdot J_2 \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \sin(2 \cdot \varphi) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{E}_{\varphi 1} = 2 \cdot \frac{\omega_p \cdot \mu_a \cdot r_0}{\mu_{23}} \cdot J_2' \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \cos(2 \cdot \varphi) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{E}_{z1} = 0, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

где φ, r, z – переменные цилиндрической системы координат,

$r_0 = 60 \cdot 10^{-3}$ м – радиус цилиндрического резонатора;

$l = 145 \cdot 10^{-3}$ м – длина резонатора;

$\mu_{23} = 9,969$ – корень от производной функции Бесселя;

$\mu_a = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума.

Графики в сечениях соответствующих составляющих поля в резонаторе сделаем в MathCad.

При вычислении производной n -го порядка функции Бесселя используется формула

$$J_n'(x) = \frac{J_{n+1}(x) - J_{n-1}(x)}{2}. \quad (4.2)$$

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

Построение начинаем с магнитных силовых линий. Силовые магнитные линии параллельны основанию, так как составляющая $\dot{E}_{z1} = 0$, они представляют собой замкнутые линии. В общем случае индекс m показывает число вариаций полей по угловой координате, а n – число вариаций по радиусу, а p – число вариаций поля по оси цилиндра. График изменения густот силовых линий приведен на рис. 4.1.

$$\phi := 0, 1 \dots 360 \quad m := 2$$

$$H(\phi) := \sin\left(\phi \cdot \frac{\pi \cdot m}{180}\right)$$

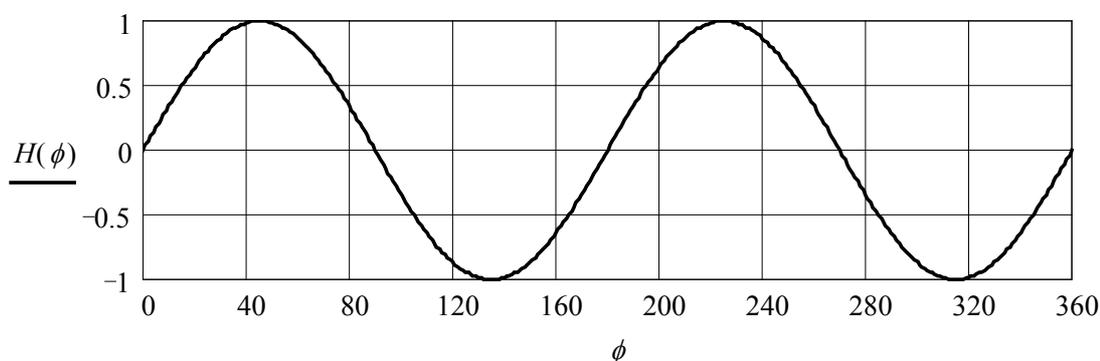


Рисунок 4.1

Из приведенного графика видно, что густота силовых линий будет максимальной в направлениях 45° , 135° , 225° и 315° (рис. 4.4). Отрицательные максимумы говорят о том, что направление силовых линий меняется на противоположное. Таким образом, картина замкнутых магнитных линий будет наблюдаться в четырех четвертях окружности, причем замкнутые силовые линии, поочередно меняют свои направления вращения при переходе от одной четверти к другой по часовой стрелке. Вся картина симметрична относительно направления 0° .

Вдоль радиуса (в направлении 0°) густота силовых линий магнитного поля будет изменяться по закону функции Бесселя третьего порядка (рис. 4.2).

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$m := 2 \quad n := 3 \quad p := 1 \quad \mu m n := 9.969$$

$$r := 0, 10^{-3} .. 0.06 \quad r0 := 0.06 \quad m$$

$$H(r) := J_n \left(m, \frac{\mu m n \cdot r}{r0} \right)$$

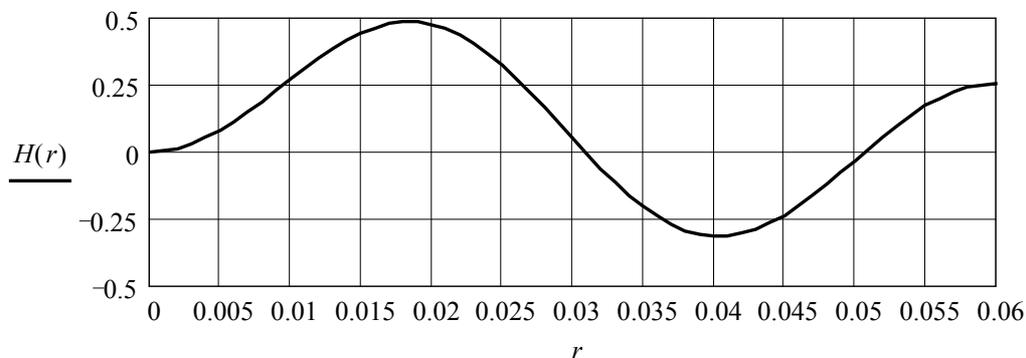


Рисунок 4.2

Будет наблюдаться две координаты максимальных густот линий от центра на расстоянии 18 мм, на расстоянии 40 мм и близко к стенке резонатора. Отрицательный и положительный максимумы говорят о том, что направления силовых линий разные. Таким образом, образуется в угловом секторе от 0 до 90° три замкнутые силовые группы. Пусть в направлении от центра группа силовых линий направлена по часовой стрелке, тогда направление следующей группы замкнутых силовых линий будет против часовой стрелки и т.д.. При смене сектора углов, лежащие рядом силовые линии меняют направление на противоположное.

Вдоль оси z густота силовых линий изменяется по закону синуса. График приведен на рис. 4.3.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$l := 0.145 \quad \text{м} \quad z := 0,10^{-3} .. 0.145$$

$$H(z) := \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

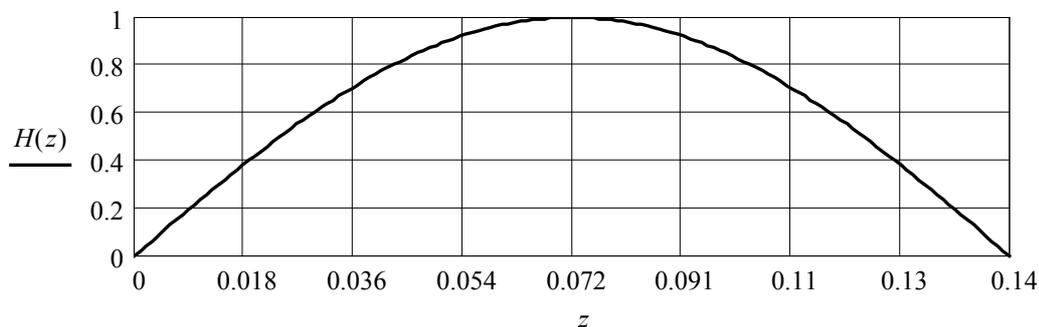


Рисунок 4.3

Электрические силовые линии пронизывают магнитные и замыкаются на стенки резонатора. Густота их наибольшая в тех местах, где наибольшая густота магнитных силовых линий. Полученная картина поля H_{231} приведена на рис. 4.4. Направление обхода силовых линий электрического поля определяем исходя из правила буравчика.

На рисунке силовые электрические линии изображены сплошными линиями, а магнитные силовые линии - пунктирными линиями.

При выборе места и конфигурации щели для подключения возбуждающего волновода и нагрузки необходимо, чтобы она пересекала путь поверхностного тока под прямым углом (силовые линии электрического поля в щели являются продолжением линий тока). Выбранное местоположение щелей «Выход» и «Вход» для подключения нагрузки и генератора соответственно показано на рис. 4.4.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

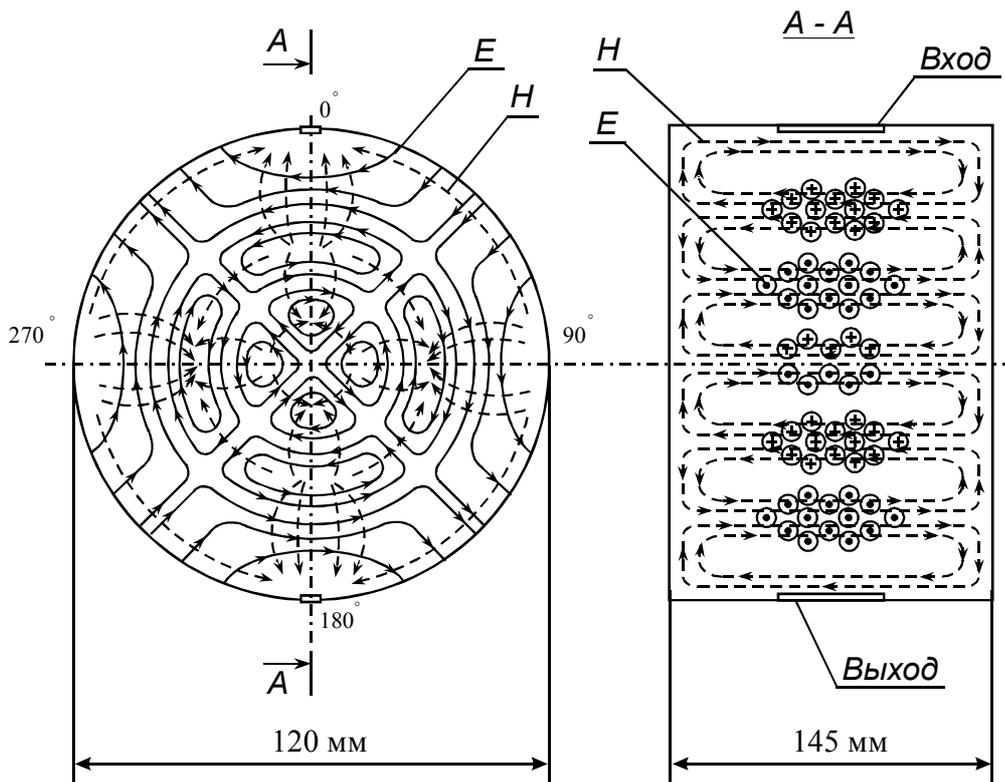


Рисунок 4.4

Выводы. Проведен анализ проекций магнитной и электрической составляющих поля колебания H_{231} в цилиндрическом резонаторе диаметром 120 мм и длиной 145 мм на частоте 8 ГГц. По результатам анализа построенных графиков сечений составляющих поля построена картина поля в цилиндрическом резонаторе для заданного колебания. Из построенной картины поля видно, что электрические силовые линии расположены в плоскости, ортогональной оси z (плоскость параллельная основанию резонатора), что и должно быть для колебаний магнитного типа. По углу наблюдается две вариации поля, что соответствует индексу $m = 2$. Вдоль радиуса имеется три вариации картины поля, что соответствует индексу $n = 3$. В наконец вдоль длины цилиндрического резонатора одна вариация картины поля, соответствующая индексу $p = 1$. Щели, прорезанные ортогонально протекающим поверхностным токам внутри стенок резонатора в местах наибольшей плотности, обеспечат эффективный ввод и вывод энергии.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата
Име. № подл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

5 Расчет параметров колебательного контура, эквивалентного резонатору на заданной резонансной частоте

Резонатор можно представить в виде параллельного колебательного контура с эквивалентными параметрами $L_{\text{ЭКВ}}$, $C_{\text{ЭКВ}}$, $R_{\text{ЭКВ}}$ (рис. 5.1) [4, стр. 242].

Резонансная частота колебательного контура:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\text{ЭКВ}} \cdot C_{\text{ЭКВ}}}} \quad (5.1)$$

Определив $C_{\text{ЭКВ}}$, оставшийся параметр $L_{\text{ЭКВ}}$ можно найти из формулы (5.1).

Энергия электрического поля $W_{\text{э}}$, запасенная в конденсаторе

$$W_{\text{э}} = \frac{C_{\text{ЭКВ}} |\dot{U}|^2}{2} \quad (5.2)$$

где $|\dot{U}|$ - модуль комплексной амплитуды разности потенциалов на обкладках конденсатора.

Модуль заряда конденсатора

$$|\dot{Q}_{\text{э}}| = C_{\text{ЭКВ}} |\dot{U}| \quad (5.3)$$

Выражая $|\dot{U}|$ из (5.3) и подставляя в выражение (5.2), можно найти емкость $C_{\text{ЭКВ}}$

$$C_{\text{ЭКВ}} = \frac{|\dot{Q}_{\text{э}}|^2}{2W_{\text{э}}} \quad (5.4)$$

Энергию электрического поля можно определить с помощью формулы

$$W_{\text{э}} = \int_{V_1} \frac{\varepsilon_a |\dot{E}|^2}{2} dV \quad (5.5)$$

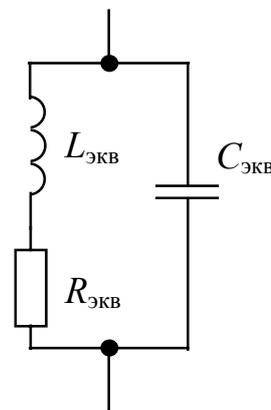


Рисунок 5.1

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

Заряд конденсатора определим из выражения

$$Q_{\Sigma} = 4 \cdot \int_0^{l/2} \int_{-\pi/4}^{\pi/4} E_{rp} \cdot r dz d\varphi, \quad (5.6)$$

где l – длина цилиндрического резонатора;

r - радиус цилиндрического резонатора.

Энергия электрического поля определится путём интегрирования по объёму резонатора:

$$W_{\Sigma} = \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{1}{2} (E_{rp}^2 + E_{\varphi p}^2) r dz d\varphi dr \quad (5.7)$$

Для волн магнитного типа H_{231} в цилиндрическом резонаторе справедливо выражения

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_{r1} = -2 \cdot j \cdot \frac{\pi \cdot r_0}{l \cdot \mu_{23}} \cdot J_2' \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \cos(2 \cdot \varphi) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{H}_{\varphi 1} = 2 \cdot j \cdot \frac{\pi \cdot r_0^2}{l \cdot r \cdot \mu_{23}^2} \cdot 2 \cdot J_2 \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \sin(2 \cdot \varphi) \cos \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{H}_{z1} = -2 \cdot j \cdot J_2 \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \cos(2 \cdot \varphi) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{E}_{r1} = 2 \cdot \frac{\omega_p \cdot \mu_a \cdot r_0^2}{r \cdot \mu_{23}^2} \cdot 2 \cdot J_2 \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \sin(2 \cdot \varphi) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{E}_{\varphi 1} = 2 \cdot \frac{\omega_p \cdot \mu_a \cdot r_0}{\mu_{23}} \cdot J_2' \left(\frac{\mu_{23}}{r_0} \cdot r \right) \cdot \cos(2 \varphi) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{l} \cdot z \right), \\ \dot{E}_{z1} = 0. \end{array} \right. \quad (5.8)$$

Расчёты эквивалентных параметров резонатора выполним в программе MathCad.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$f := 8 \cdot 10^9 \text{ Гц} \quad l := 145 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad r0 := 60 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad \mu23 := 9.969$$

$$m := 2 \quad n := 3 \quad p := 1 \quad \mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad \varepsilon := 8.842 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad Q := 96580 \quad \sigma := 6.1 \cdot 10^7 \frac{\text{Сум}}{\text{м}}$$

$$Hrp(\phi, z, r) := -2 \cdot i \cdot \frac{\pi \cdot r0}{l \cdot \mu23} \cdot \frac{\left(Jn\left(3, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) - Jn\left(1, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) \right)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \phi) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

$$H\phi p(\phi, z, r) := 2 \cdot i \cdot \frac{\pi \cdot r0^2}{l \cdot r \cdot \mu23^2} \cdot 2 \cdot Jn\left(2, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) \cdot \sin(2 \cdot \phi) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

$$Hzp(\phi, z, r) := -2 \cdot i \cdot Jn\left(2, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) \cdot \cos(2 \cdot \phi) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

$$Erp(\phi, z, r) := 2 \cdot \frac{\omega \cdot \mu \cdot r0^2}{r \cdot \mu23^2} \cdot 2 \cdot Jn\left(2, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) \cdot \sin(2 \cdot \phi) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

$$E\phi p(\phi, z, r) := 2 \cdot \frac{\omega \cdot \mu \cdot r0}{\mu23} \cdot \frac{\left(Jn\left(3, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) - Jn\left(1, \frac{\mu23 \cdot r}{r0}\right) \right)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \phi) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

$$Ezp(\phi, z, r) := 0 \quad Erp1(\phi, z) := 2 \cdot \frac{\omega \cdot \mu \cdot r0^2}{r0 \cdot \mu23^2} \cdot 2 \cdot Jn\left(2, \frac{\mu23 \cdot r0}{r0}\right) \cdot \sin(2 \cdot \phi) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right)$$

$$Qe1 := \int_0^l \int_0^{\frac{\pi}{4}} 8 \cdot Erp1(\phi, z) \cdot r0 \, dz \, d\phi$$

$$We := \int_0^l \int_0^{2 \cdot \pi} \int_0^{r0} \frac{1}{2} \cdot \left[(|Erp(\phi, z, r)|)^2 + (|E\phi p(\phi, z, r)|)^2 \right] \cdot r \, dz \, d\phi \, dr$$

$$C := \frac{Qe1^2}{2 \cdot We} \quad C = 2.694 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad L := \frac{1}{\left[4 \cdot \left[f^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot C} \right) \right] \right]} \quad L = 1.469 \cdot 10^{-16} \text{ Гн}$$

$$Q = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} \quad R := \frac{\sqrt{L}}{C} \quad R = 7.645 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}$$

Таким образом, $C_{\text{ЭКВ}} = 2,7 \text{ мкФ}$, $L_{\text{ЭКВ}} = 1,47 \cdot 10^{-16} \text{ Гн}$ и $R_{\text{ЭКВ}} = 7,65 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}$.

Графики для АЧХ и ФЧХ комплексного входного сопротивления параллельного колебательного контура, эквивалентного резонатору, приведены на рис. 5.2 и 5.3.

Име. № дубл.	Подпись и дата
Взаим. име №	
Име. № подл.	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$f := 7.9999 \cdot 10^9, 7.9999001 \cdot 10^9 \dots 8.0001 \cdot 10^9 \quad z(f) := \frac{(R + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L) \cdot \frac{1}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}}{(R + i \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot L) + \frac{1}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}}$$

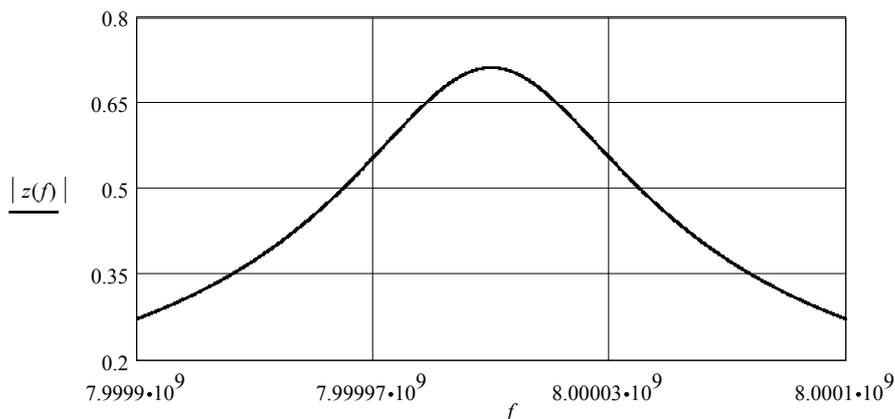


Рисунок 5.2 – Амплитудно-частотная характеристика входного сопротивления параллельного колебательного контура

$$C := 2.694 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \quad L := 1.469 \cdot 10^{-16} \text{ Гн} \quad R := 7.645 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}$$

$$f0 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad f0 = 8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$\Pi := \frac{f0}{Q} \quad \Pi = 8.284 \cdot 10^4 \text{ Гц}$$

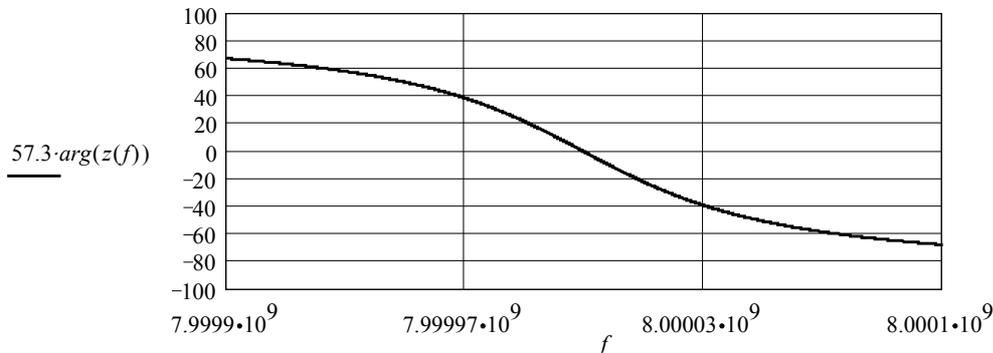


Рисунок 5.3 – Фазо-частотная характеристика входного сопротивления параллельного колебательного контура

Выводы. Согласно сделанным расчетам, цилиндрическому резонатору размерами 120 мм × 145 мм на частоте 8 ГГц при условии существования колебаний магнитного типа H_{231} можно поставить в соответствие схему параллельного колебательного контура с параметрам: $C_{ЭКВ} = 2,7 \text{ мкФ}$, $L_{ЭКВ} = 1,47 \cdot 10^{-16} \text{ Гн}$ и $R_{ЭКВ} = 7,65 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}$, резонансная частота которого 8 ГГц, добротность 96580, а полоса пропускания 82,83 кГц.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	
Име. № дубл.	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

6 Расчет параметров длинной линии эквивалентной волноводу

Для *ТЕМ*-волн в линиях передачи, структура поля которых в поперечной плоскости имеет потенциальный характер, можно, используя векторы \dot{E}_m и \dot{H}_m , однозначно определить соответствующие им напряжение \dot{U}_m и ток \dot{I}_m . При этом для волны, распространяющейся по линии без потерь вдоль оси Z , можно записать

$$\dot{U}_m(z) = U_0 \exp(-ikz); \quad \dot{I}_m(z) = I_0 \exp(-ikz) \quad (6.1)$$

где k - коэффициент фазы рассматриваемой волны.

Рассчитав функции (6.1), можно вычислить волновое сопротивление линии $Z_e = \dot{U}_m(z) / \dot{I}_m(z)$.

Для линии передачи, в которой распространяются *E*-, *H*- или смешанные волны, напряжение и ток в эквивалентной линии могут быть выражены через контурные интегралы от функций $\dot{E}_{m\perp}$ и $\dot{H}_{m\perp}$ соответственно. Указанные функции описывают поперечные составляющие полей в рассматриваемой линии передачи. В отличие от случая *ТЕМ*-волн у *E*-, *H*- и смешанных волн поле, описываемое функциями $\dot{E}_{m\perp}$ и $\dot{H}_{m\perp}$ не является потенциальным. Поэтому значения функций $\dot{U}_m(z)$ и $\dot{I}_m(z)$ определяются неоднозначно: они зависят от выбора контуров интегрирования. Для устранения этой трудности при переходе к эквивалентной линии заранее оговаривают форму указанных контуров.

Используя выражение (1.6) для составляющей \dot{E}_{my} волны E_{12} , определяем комплексную амплитуду напряжения между точками, лежащими на средних линиях широких стенок при $x = a/2$:

$$\dot{U}_m(z) = \int_0^{b/2} \dot{E}_{my} dy \Big|_{x=a/2} = U_0 \exp(-i\beta z). \quad (6.2)$$

Используя выражение (1.6) для составляющей \dot{H}_{mx} напряженности магнитного поля волны E_{12} определяем комплексную амплитуду тока, текущего по широкой ($y = 0$) стенке волновода:

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Подпись и дата
Ине. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$\dot{I}_m(z) = \int_0^a \dot{H}_{mx} dx |_{y=0} = I_0 \exp(-i\beta z). \quad (6.3)$$

Комплексная амплитуда тока $\dot{I}_m(z)|_{y=b}$, текущего по противоположной ($y = b$) широкой стенке волновода, отличается от (6.3) только знаком: $\dot{I}_m(z)|_{y=b} = -\dot{I}_m(z)|_{y=0}$. В этом случае, учитывая (6.2) и (6.3), волновое сопротивление для волны E_{12} можно определить по формуле

$$Z_e^{E_{12}} = \frac{\dot{U}_m(z)}{\dot{I}_m(z)}. \quad (6.4)$$

При расчётах полагаем, что картина наблюдается в момент времени $t = 0$.

KCB характеризует картину амплитуды поля в длинной линии и определяется как

$$KCB = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}, \quad (6.6)$$

где U_{\max} – величина напряжения в максимуме стоячей волны;

U_{\min} – величина напряжения в минимуме стоячей волны.

Коэффициент стоячей волны в линии передачи определяется по формуле

$$KCB = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}, \quad (6.7)$$

где $\rho = \frac{Q_H}{Q_0}$ – коэффициент отражения, в котором $Q_H = Q_0/k$ – нагруженная

добротность;

Q_0 – собственная добротность резонатора.

Расчетав величину максимального значения напряжения из (6.3) модуль полного напряжения в произвольном сечении линии определится соотношением

$$|\dot{U}_m(z)| = |\dot{U}_m^{nad}(z)| \cdot \sqrt{1 + (\Gamma \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z})^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z} \cdot \cos(2 \cdot \beta \cdot z)}, \quad (6.8)$$

где $\Gamma = \frac{KCB - 1}{KCB + 1}$ – модуль коэффициента отражения.

Расчеты проведем с помощью программы MathCad.

Подпись и дата	
Инв. № дубл.	
Взаим. инв №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$Q_0 := 96590 \quad k := 3.5 \quad \rho := \frac{k}{Q_0} \quad KCB := \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad KCB = 1.8$$

$$a := 80 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad b := 40 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad m := 1 \quad n := 2 \quad f := 8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \quad \mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{М}} \quad \epsilon := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{М}}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \alpha := 0.024 \frac{\text{Нп}}{\text{М}} \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.037 \text{ м}$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.039 \text{ м} \quad \lambda_B := \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \quad \lambda_B = 0.146 \text{ м}$$

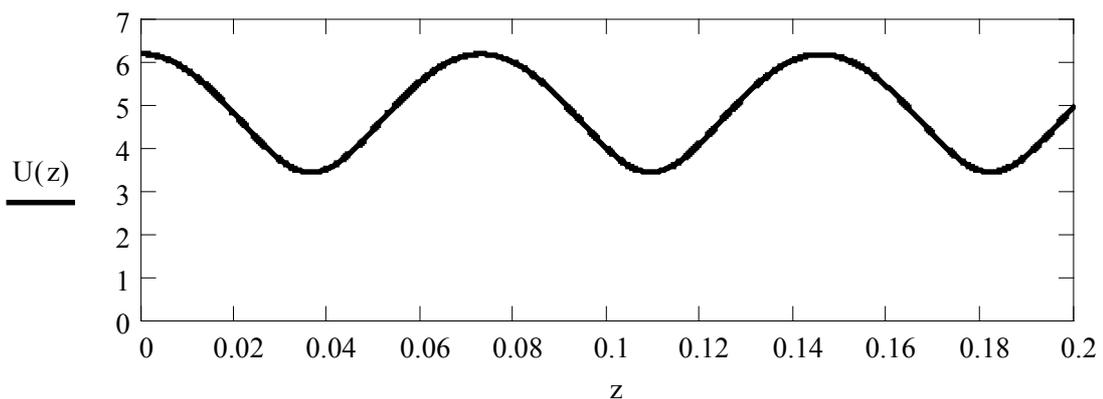
$$g := \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad h := \sqrt{\omega^2 \cdot \mu \cdot \epsilon - g^2} \quad 2 \cdot h = 86.787$$

$$U(z) := \int_0^{\frac{b}{2}} i \cdot \omega \cdot \mu \cdot n \cdot \frac{\pi}{g^2 \cdot b} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi \cdot y}{b}\right) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot h \cdot z} dy \quad \Gamma := \frac{KCB - 1}{KCB + 1} \quad \beta := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_B}$$

$$\Gamma = 0.286 \quad \beta = 43.098$$

$$U_{max} := \int_0^{\frac{b}{2}} \omega \cdot \mu \cdot n \cdot \frac{\pi}{g^2 \cdot b} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi \cdot y}{b}\right) dy \quad U_{max} = 4.819 \text{ В}$$

$$U(z) := U_{max} \cdot \sqrt{1 + \left(\Gamma \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z}\right)^2} + 2 \cdot \Gamma \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z} \cdot \cos(2 \cdot \beta \cdot z)$$



Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

$$Q0 := 96580 \quad k := 3.5 \quad \rho := \frac{k}{Q0} \quad KCB := \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad KCB = 1.8$$

$$a := 80 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad b := 40 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad m := 1 \quad n := 2 \quad f := 8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad \epsilon := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \alpha := 0.024 \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.037 \text{ м}$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.039 \text{ м} \quad \lambda_B := \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \quad \lambda_B = 0.146 \text{ м}$$

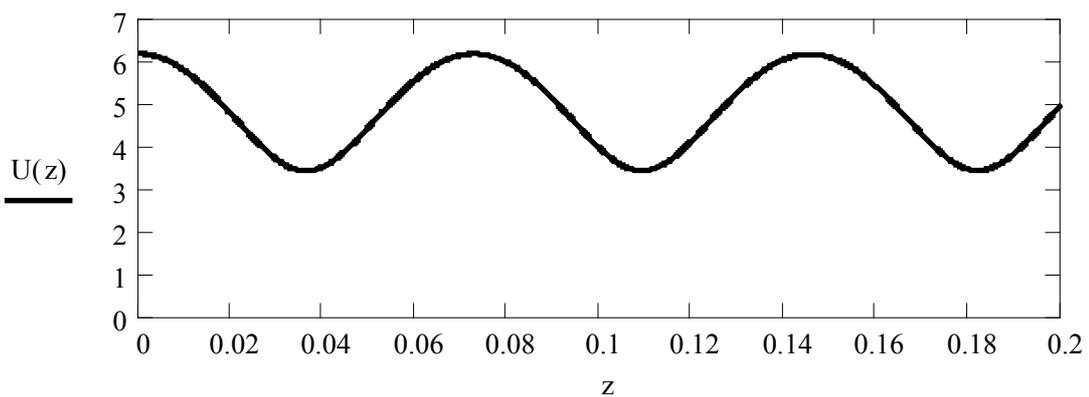
$$g := \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad h := \sqrt{\omega^2 \cdot \mu \cdot \epsilon - g^2} \quad 2 \cdot h = 86.787$$

$$U(z) := \int_0^{\frac{b}{2}} i \cdot \omega \cdot \mu \cdot n \cdot \frac{\pi}{g^2 \cdot b} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi \cdot y}{b}\right) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot h \cdot z} dy \quad \Gamma := \frac{KCB - 1}{KCB + 1} \quad \beta := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_B}$$

$$\Gamma = 0.286 \quad \beta = 43.098$$

$$U_{max} := \int_0^{\frac{b}{2}} \omega \cdot \mu \cdot n \cdot \frac{\pi}{g^2 \cdot b} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi \cdot y}{b}\right) dy \quad U_{max} = 4.819 \text{ В}$$

$$U(z) := U_{max} \cdot \sqrt{1 + \left(\Gamma \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z}\right)^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z} \cdot \cos(2 \cdot \beta \cdot z)}$$



Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

Для волн электрического типа волновое сопротивление прямоугольного волновода заданного сечения

$$Z_{\sigma}^{E_{12}} = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{E_{12}}} \right)^2} \quad (6.6)$$

Рассчитаем волновое сопротивление и длину волны в волноводе, исходя из частоты поля и размеров волновода.

$$a := 0.08 \text{ м} \quad b := 0.04 \text{ м} \quad m := 1 \quad n := 2$$

$$f := 8 \cdot 10^9 \text{ Гц} \quad c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.037 \text{ м}$$

$$\lambda_{кр} := \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \lambda_{кр} = 0.039 \text{ м}$$

$$\lambda_{в} := \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \quad \lambda_{в} = 0.146 \text{ м}$$

$$Z_{в} := 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \quad Z_{в} = 96.97 \text{ Ом}$$

Выводы. Прямоугольный волновод с волной типа E_{12} сечением 80×40 мм на частоте 8 ГГц можно заменить эквивалентной длинной линией, в которой протекает ток $30 \cdot \sqrt{1 + 0,082 \cdot e^{-0,096 \cdot z} + 0,572 \cdot e^{-0,048 \cdot z} \cdot \cos(86,196 \cdot z)}$ мА и действует напряжение $4,82 \cdot \sqrt{1 + 0,082 \cdot e^{-0,096 \cdot z} + 0,572 \cdot e^{-0,048 \cdot z} \cdot \cos(86,196 \cdot z)}$ В с волновым сопротивлением 96 Ом. Параметры эквивалентной линии - волновое сопротивление и длина волны, определяемая из графиков для тока или напряжения как удвоенное расстояние между соседними минимальными (или максимальными) значениями совпадает с расчетными, определенными через сечение волновода и частоту поля $\lambda_{в} = 146$ мм, $Z_{в} = 96$ Ом.

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Заключение

В результате выполнения курсовой работы рассчитаны конструктивные и электрические параметры элементов СВЧ цепи, состоящей из генератора, волноводной линии передачи прямоугольного сечения, объёмного цилиндрического резонатора и согласованной нагрузки.

Для распространения волны E_{12} на частоте 8 ГГц возможно использование прямоугольного волновода сечением 80×40 мм. Построена картина поля для волны E_{12} в прямоугольном волноводе и рассчитаны потери отрезка волновода сечением 80×40 мм длиной 2 м, которые составили 0,047 Нп или 0,205 дБ.

Определены размеры цилиндрического объёмного резонатора для частоты 8 ГГц при условии, что существуют колебания H_{231} – радиус 60 мм, длина 145 мм. Для увеличения добротности необходимо покрыть стенки резонатора серебром толщиной не менее 2,2 мкм. При этом добротность составит 96580.

Приведены соотношения проекций полей и построена картина поля для колебания H_{231} в объёмном цилиндрическом резонаторе. В соответствии с индексами колебание типа H_{231} имеет одну вариацию картины поля вдоль оси z ($p = 1$), две вариации картины поля по угловой координате φ ($m = 2$) и три вариации картины поля вдоль радиуса r ($n = 3$).

Име. № подл.	Подпись и дата
Взаим. име №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

КНФУ.668820.004 ПЗ

Объемный резонатор можно представить в виде параллельного колебательного контура с элементами $C_{ЭКВ} = 2,7$ мкФ, $L_{ЭКВ} = 1,47 \cdot 10^{-16}$ Гн и $R_{ЭКВ} = 7,65 \cdot 10^{-11}$ Ом. Построены графики АЧХ и ФЧХ для рассчитанного параллельного колебательного контура. Полоса пропускания параллельного колебательного контура составляет 82,83 кГц при резонансной частоте 8 ГГц.

Отрезок прямоугольного волновода сечением 80×40 мм с колебанием E_{12} на частоте 8 ГГц можно представить в виде эквивалентной длинной линии с волновым сопротивлением 96 Ом в которой распространяются ток $30 \cdot \sqrt{1 + 0,082 \cdot e^{-0,096 \cdot z} + 0,572 \cdot e^{-0,048 \cdot z} \cdot \cos(86,196 \cdot z)}$ мА и напряжение $4,82 \cdot \sqrt{1 + 0,082 \cdot e^{-0,096 \cdot z} + 0,572 \cdot e^{-0,048 \cdot z} \cdot \cos(86,196 \cdot z)}$ В. При этом КСВ в линии передачи при заданном коэффициенте включения резонатора $k = 3,5$ составит 1,8.

Ине. № подл.	Подпись и дата	Взаим. ине №	Ине. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

КНФУ.668820.004 ПЗ

Библиографический список

1. Бабенко А. Н., Громько А. Н. Электромагнитные поля и волны: Учебное пособие. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.
2. Бабенко А. Н., Павлов В. В. Электромагнитные поля и волны. Лабораторный практикум. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004.
3. Электродинамика и распространение радиоволн: Методические указания к выполнению расчетно-графических и лабораторных работ для студентов специальности 200700 / Сост. А. Н. Бабенко, В.В. Павлов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004.
4. Федоров Н.Н. Основы электродинамики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1980.
5. Баскаков Ю. В., Вольман В. И., Муравцев А. Д. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов специальности «радиотехника». – М.: Высшая школа, 1992.
6. Пименов Ю. В. и др.. Техническая электродинамика. / Пименов Ю.В., Вольман В. И., Муравцов А. Д.. Под ред. Ю. В. Пименова: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2000.
7. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1967.
8. Бабенко А. Н., Громько А. Н. Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 1. Техническая электродинамика: Учебное пособие. – Йошкар-Ола, МарПИ, 1991.
9. Романычева Э.Т. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Радио и связь, 1989.

Ине. № подл.	Подпись и дата
Взаим. ине №	Ине. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

КНФУ.668820.004 ПЗ

Лист

41