

Расчет добротности СВЧ-резонатора на отрезке круглого двухслойного экранированного волновода

А.А. Басов, А.А. Радионов, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Минина, 24

Описано влияние на величину собственной добротности резонатора, построенного на отрезке круглого двухслойного экранированного волновода, работающего в режиме комплексного резонанса, его электрических и геометрических параметров.

Ключевые слова: комплексный резонанс, комплексные волны, собственная добротность резонатора, двухслойный экранированный волновод.

Введение

В круглом двухслойном экранированном волноводе, несмотря на отсутствие в системе диссипации энергии, могут существовать при определенных условиях электромагнитные волны с комплексными волновыми числами [1]. Возбуждаясь парами, они образуют поле стоячей волны, локализованное вблизи источника. Энергия в среднем за период при этом через поперечное сечение не переносится [2]. В результате во всем частотном диапазоне существования комплексных волн обнаруживается явление запаса энергии вблизи источника или так называемый комплексный резонанс.

Целью настоящей работы является исследование поведения величины собственной добротности резонатора, построенного на отрезке круглого двухслойного экранированного волновода, в широком диапазоне изменения его электрических и геометрических параметров, таких как: частота комплексной волны (f); коэффициент заполнения (a/b); диэлектрическая проницаемость стержня волновода (ϵ_1); тангенс угла потерь в диэлектрике ($\text{tg } \delta$).

1. Круглый двухслойный волновод

Поперечное сечение структуры изображено на рис. 1.

В общем случае при наличии азимутной зависимости поля собственные волны волновода являются гибридными, поэтому электрический и магнитный векторы Герца в областях I и II за-

писываются в виде:

$$\Pi_{z1}^e = A_1 J_1(\alpha_1 r) \sin n\varphi e^{-i\beta z},$$

$$\Pi_{z1}^m = B_1 J_1(\alpha_1 r) \cos n\varphi e^{-i\beta z},$$

$$\Pi_{z2}^e = A_2 \chi_1(\alpha_2 r) \sin n\varphi e^{-i\beta z},$$

$$\Pi_{z2}^m = B_2 \chi_2(\alpha_2 r) \cos n\varphi e^{-i\beta z},$$

где $A_{1,2}, B_{1,2}$ – амплитудные коэффициенты.

В дальнейшем полагаем $n = 1$, что соответствует основной комплексной волне HE_{11} , тогда

$$\chi_1(\alpha_2 r) = \frac{J_1(\alpha_2 r) Y_1(\alpha_2 b) - J_1(\alpha_2 b) Y_1(\alpha_2 r)}{J_1(\alpha_2 a) Y_1(\alpha_2 b) - J_1(\alpha_2 b) Y_1(\alpha_2 a)},$$

$$\chi_2(\alpha_2 r) = \frac{J_1(\alpha_2 r) Y_1'(\alpha_2 b) - J_1'(\alpha_2 b) Y_1(\alpha_2 r)}{J_1(\alpha_2 a) Y_1'(\alpha_2 b) - J_1'(\alpha_2 b) Y_1(\alpha_2 a)},$$

$$\beta^2 = k^2 \epsilon_{1,2} - \alpha_{1,2}^2,$$

где β – продольное волновое число; $\alpha_{1,2}$ – поперечные волновые числа; $k^2 = (2\pi f)^2 \epsilon_0 \mu_0$; ϵ_1, ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость слоев; $J_1(\alpha_2 r)$ и $Y_1(\alpha_2 r)$ – цилиндрические функции первого и второго рода соответственно.

Для вычисления добротности комплексного резонанса необходимо знание волновых чисел, т. е. предварительное решение дисперсионной за-

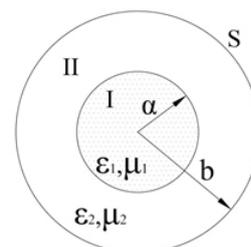


Рис. 1. Поперечное сечение круглого двухслойного волновода

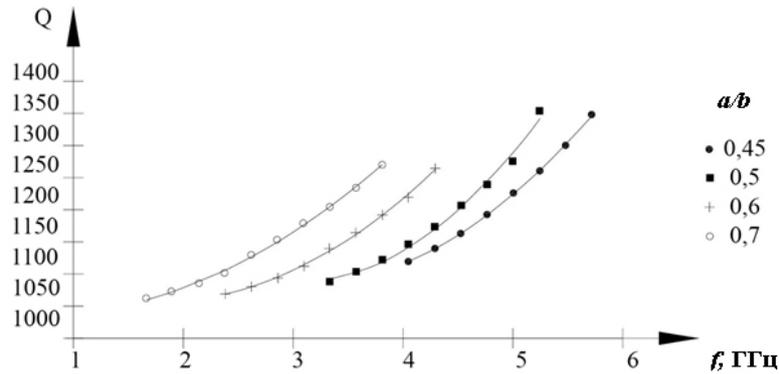


Рис. 2. Зависимость добротности от частоты при различных коэффициентах заполнения

дачи. Результаты решения этой задачи взяты из работы [4], где решение дисперсионного уравнения проводилось в комплексной плоскости поперечных волновых чисел.

2. Расчет добротности

При расчете добротности используется метод возмущений. С учетом потерь в стенках волновода и во внутреннем диэлектрическом слое I (рис. 1) формула для вычисления добротности имеет вид [3]

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_1 \int_{V_1} |\vec{E}_1|^2 dV + \varepsilon_2 \int_{V_2} |\vec{E}_2|^2 dV}{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta \int_{V_1} |\vec{E}_1|^2 dV + \left(\frac{1}{\varepsilon_0 \omega \sigma \Delta}\right) \oint_S |\vec{H}_\tau|^2 dS}, \quad (1)$$

где индексы «1», «2» соответствуют внутренней и внешней областям двухслойного волновода; $\varepsilon_{1,2}$ – относительная диэлектрическая проницаемость стержня (область I) и воздушного зазора (область II) соответственно; S – площадь экранируемой поверхности; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в диэлектрике; \vec{H}_τ – тангенциальная к поверхности экрана составляющая вектора магнитного поля в области II; $\vec{E}_{1,2}$ – вектор электрического поля в области I и в области II, соответственно; Δ – толщина скин-слоя; σ – удельная проводимость металла стенок волновода; $\omega = 2\pi f$ – резонансная частота, которая является функцией электрических параметров и геометрических размеров резонатора.

В соответствии с методом возмущений в (1) подставляются выражения для компонент поля основной комплексной волны HE_{11} в резонаторе без потерь, которые вычисляются через векторы Герца по формулам:

$$\vec{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \Pi_z^e + \varepsilon \mu \omega^2 \Pi_z^e - i \omega \mu \operatorname{rot} \Pi_z^m;$$

$$\vec{H} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \Pi_z^m + \varepsilon \mu \omega^2 \Pi_z^m + i \omega \varepsilon \operatorname{rot} \Pi_z^e.$$

В работе [5] выполнен расчет добротности комплексного резонанса на примере отрезка круглого двухслойного экранированного волновода с фиксированными параметрами: коэффициентом заполнения $a/b = 0,5$ ($a = 1$ см, $b = 2$ см), параметрами диэлектрического стержня $\varepsilon_1 = 17,738$, $\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}$, $\varepsilon_2 = 1$ (воздух); материал экрана – медь ($\sigma = 5 \cdot 10^7$ (1 / Ом · м)).

В дальнейшем при расчетах добротности структуры (рис. 1) с использованием предложенного алгоритма полагаем, что радиус экранирующей поверхности также равен 2 см.

В диапазоне существования комплексной волны HE_{11} исследовано поведение собственной добротности комплексного резонанса при изменении частоты и различных коэффициентах заполнения рассматриваемой структуры.

Зависимость добротности от частоты изображена на рис. 2. При относительном увеличении радиуса диэлектрического стержня область существования комплексных волн смещается в область более низких частот. Расчет производился для $\varepsilon_1 = 20$, $\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_2 = 1$ и медного материала экрана ($\sigma = 5 \cdot 10^7$ (1 / Ом · м)).

Из рис. 2 видно, что добротность комплексного резонанса монотонно убывает с уменьшением частоты в широком диапазоне изменения коэффициента заполнения. При этом при изменении частоты в интервале $\Delta f \approx 2$ ГГц добротность варьируется в пределах не более 15 %. Максимальное значение добротности имеет на верхней частоте диапазона существования комплексных волн (вблизи области существования распространяющихся волн), круто спадает и обращается в нуль на частоте перехода в область реактивно затухающих волн [4].

На рис. 3 приведены результаты исследований зависимости добротности комплексного резонанса на фиксированной частоте комплексной

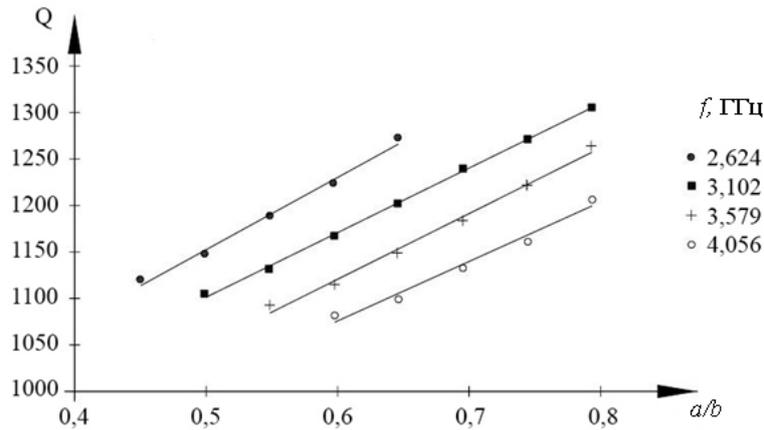


Рис. 3. Влияние на добротность коэффициента заполнения при фиксированных частотах комплексной волны

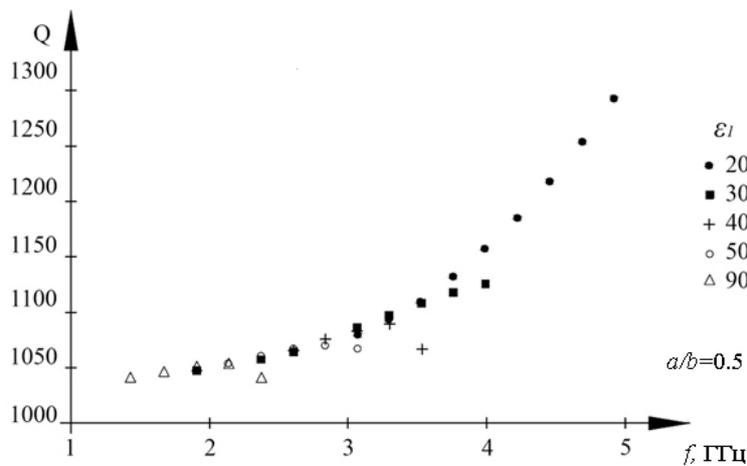


Рис. 4. Частотная зависимость добротности при различных ϵ_1 стержня

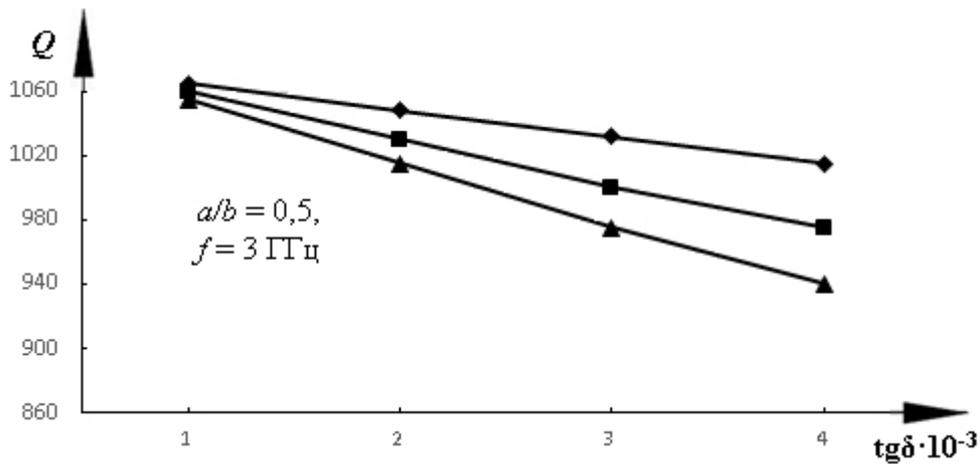


Рис. 5. Зависимость добротности от $\text{tg } \delta$ при различных ϵ_1 : \blacklozenge - $\epsilon_1 = 20$; \blacksquare - $\epsilon_1 = 30$; \blacktriangle - $\epsilon_1 = 40$

волны при различных значениях коэффициента заполнения резонатора.

Из рис. 3 видно, что рассматриваемая зависимость имеет линейный характер в широком диапазоне частот. Причем тангенс наклона графика этой функции к координатной оси практически остается постоянным при изменении частоты.

В качестве материала для изготовления диэлектрического стержня для круглого двух-

слойного экранированного волновода могут использоваться полимеры и неорганические диэлектрики, относительная диэлектрическая проницаемость и $\text{tg } \delta$ изменяются в широком диапазоне возможных значений.

Представляет интерес анализ зависимости собственной добротности от параметров сред, определяющих потери энергии в резонаторе. Поэтой причине, было исследовано влияние ди-

электрической проницаемости стержня и тангенса угла диэлектрических потерь.

Результаты расчета добротности при $a/b = 0,5$, $\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-3}$, $\sigma = 5 \cdot 10^7$ (1 / Ом · м) представлены на рис. 4, из которого видно, что большинство точек, характеризующих добротность, при конкретном коэффициенте заполнения лежат на одной кривой.

При увеличении ϵ_1 на частотах, близких к верхней границе частотного диапазона существования комплексных волн, отчетливо видно снижение добротности. Такое поведение связано с диэлектрическим эффектом. На высоких частотах электрическое поле втягивается в диэлектрический стержень, что приводит к увеличению диэлектрических потерь.

На рис. 5 представлена зависимость добротности от $\operatorname{tg} \delta$ при различных значениях ϵ_1 стержня. Как видно из рисунка, при увеличении ϵ_1 влияние $\operatorname{tg} \delta$ на добротность возрастает, что также объясняется диэлектрическим эффектом.

Расчеты показали, что потери в металлическом экране круглого двухслойного волновода много меньше потерь в диэлектрическом стержне, что объясняется сильным скин-эффектом в частотном диапазоне существования комплексного резонанса: поле проникает в металл при любом значении проводимости материала не более чем на несколько микрон [6].

Из приведенных результатов следует, что наряду с достаточно большой величиной добротности комплексного резонанса отличается относительным постоянством в значительной полосе частот.

Малое изменение величины добротности комплексного резонанса от частоты перспективно для использования рассматриваемой структуры

при построении различных СВЧ-устройств: радиоспектроскопов, широкополосных СВЧ-фильтров, квантовых дискриминаторов и т. п. Также к преимуществам резонаторов с использованием комплексного резонанса относится значительная ширина резонансной кривой и простота конструкции рассматриваемой структуры.

В настоящей работе исследовано влияние относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь, относительных размеров диэлектрического стержня и частоты круглого двухслойного экранированного волновода на величину собственной добротности резонатора, работающего в режиме комплексного резонанса.

Список литературы

1. Раевский А.С., Раевский С.Б. Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами. М.: Радиотехника, 2004. 112 с.
2. Раевский А.С., Раевский С.Б., Титаренко А.А. Основная особенность направляющих структур, описываемых несамосопряженными электродинамическими операторами // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 1 С. 56–64.
3. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
4. Дисперсионные особенности полей волн круглого двухслойного волновода / В.А. Калмык [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–9.
5. Расчет добротности СВЧ-резонатора на отрезке круглого двухслойного экранированного волновода / А.Г. Марчев [и др.] // Техника средств связи. Сер.: Радиоизмерительная техника. 1981. Вып. 2 (34). С. 25–28.
6. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.

Calculation of good quality OHF-resonator on the segment of the round double-layer screened waveguide

A.A. Basov, A.A. Radionov, G.I. Shishkov, V.V. Scherbakov

Described influence on the size of own good quality of resonator, built on the segment of the round double-layer screened waveguide, working in the mode of complex resonance, his electric and geometrical parameters.

Keywords: complex resonance, complex waves, own good quality of resonator, double-layer screened waveguide.
