

С.К. Бушанский, В.В. Комаров, А.О. Чуркин
(г. Саратов, Саратовский государственный технический
университет им. Гагарина Ю.А.)

S.K. Bushansky, V.V. Komarov, A.O. Churkin
(Saratov, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin)

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RECTANGULAR RESONATORS
WITH METAL INCLUSIONS

Методом конечных элементов анализируются собственные электродинамические характеристики двух прямоугольных резонаторов с металлическими включениями.

Electrodynamic characteristic of two rectangular resonators with metallic inclusions are analyzed by using the finite element method.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, прямоугольный резонатор, численное моделирование.

Keywords: microwave range, rectangular resonator, numerical simulation.

Благодаря простой конфигурации, позволяющей проводить расчет электромагнитных полей, резонансных частот и добротности с помощью аналитических соотношений [1], однородные прямоугольные резонаторы (ПР) нашли широкое распространение в современной радиоэлектронике в качестве базовых элементов различных микроволновых устройств [2]. Неоднородное металлodielectricкое заполнение ПР требует привлечения численных методов их анализа. Один из таких подходов, а именно метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете программ *COMSOL V.5.2* был использован в данной работе для моделирования двух модификаций ПР с металлическими вставками, показанных на рис.1.

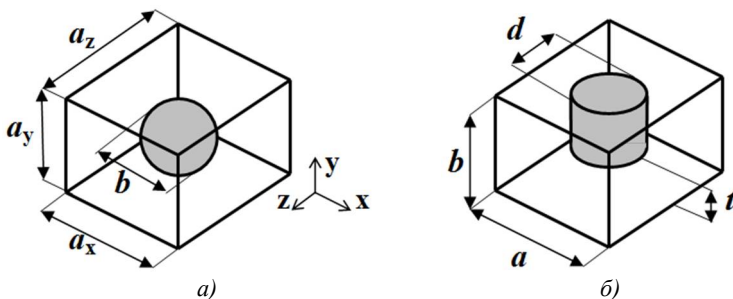


Рис.1. Прямоугольный резонатор со сферическим (а) и цилиндрическим (б) включением

Первая модификация представляет собой ПР со стенками одинакового размера ($a_x = a_y = a_z$) и сферическим включением в геометрическом центре структуры (рис.1,а). Результаты расчета собственных значений (резонансных длин волн) основного Н-типа колебаний, полученные МКЭ были аппроксимированы полиномом третьей степени с привлечением системы математических расчетов MATLAB:

$$\frac{\lambda}{a} = -0.4961\left(\frac{b}{a}\right)^3 + 1.9722\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 0.1278\left(\frac{b}{a}\right) + 1.4115 \quad R^2 = 0.9991 \quad (1)$$

где b - диаметр центральной сферы, a - внешний размер ПР (рис.1,а) и R - коэффициент корреляции. Выражение (1) справедливо при $0.1 \leq b/a \leq 0.9$.

Вторая модификация представляет собой ПР с металлическим цилиндром, соединенным с верхней стенкой, как показано на рис.1,б. Область, ограниченная размерами t и d формирует так называемый емкостной зазор. При $d = const$ электродинамическая структура представляет собой резонатор с емкостным металлическим штырем, а при $d = 0$ - индуктивным. При фиксированных внешних размерах ($b/a = 0.5$) резонансные длины волн такой структуры будут определяться размерами емкостного зазора. Эта зависимость для основного Н-типа колебаний описывается соотношением, установленным в данной работе МКЭ с последующей аппроксимацией численных данных методом наименьших квадратов с привлечением пакета программ *TableCurve3D*:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{a} = & u_1 + u_2\left(\frac{t}{a}\right) + u_3\left(\frac{d}{b}\right) + u_4\left(\frac{t}{a}\right)^2 + u_5\left(\ln\left(\frac{d}{b}\right)\right)^2 + \\ & + u_6\left(\frac{t}{a}\right)\ln\left(\frac{d}{b}\right) + u_7\left(\frac{t}{a}\right)^3 + u_8\left(\ln\left(\frac{d}{b}\right)\right)^3 + u_9\left(\frac{t}{a}\right)\left(\ln\left(\frac{d}{b}\right)\right)^2 + \\ & + u_{10}\left(\frac{t}{a}\right)^2 \ln\left(\frac{d}{b}\right) \end{aligned} \quad R^2 = 0.9989 \quad (2)$$

где b и a - внешние размеры резонатора; t и d - внутренние размеры; $u_{1...10}$ - коэффициенты аппроксимации.

Таблица 1. Коэффициенты аппроксимации уравнения (2)

u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
1.37513	-0.40219	-0.31628	1.0839	0.10943
u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}
-2.46634	-0.70746	0.034375	0.15918	2.54138

Далее в работе с помощью МКЭ были установлены значения собственной добротности двух исследуемых резонаторов. Результаты численного моделирования приведены на рис.2.

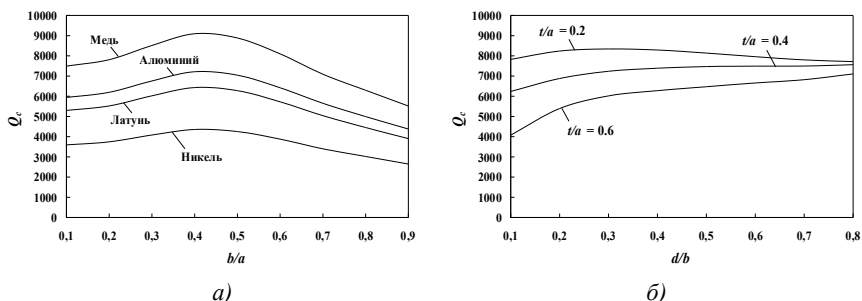


Рис. 2. Собственная добротность прямоугольного резонатора со сферическим (а) и цилиндрическим (б) включениями

Для первой модификации (рис.1,а) были рассмотрены четыре варианта конструкционных материалов резонатора, а для второй (рис.1,б) анализ проводился только для меди. В обоих случаях учитывались резонансные длины волн, определяемые при заданных размерах резонаторов посредством соотношений (1) и (2). Расчеты проводились для K -диапазона частот: 18...26 ГГц.

Исследования показали, что ПР с металлическим включениями обладают более высокими значениями резонансных длин волн низшего типа, чем классические ПР, а соответственно, их габаритные размеры на фиксированной частоте оказываются меньше. Кроме того, было установлено, что собственная добротность ПР со сферическим включением является сложной функцией его размеров, имеющей максимум в интервале вариаций $0.4 \leq b/a \leq 0.5$ для всех четырех металлических конструкционных материалов. В тоже время зависимость добротности ПР с цилиндрическим включением от его внутренних размеров является более монотонной и в ряде случаев может быть даже ниже, чем добротность простого ПР.

Полученные в данной работе приближенные соотношения (1) и (2) могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования микроволновых устройств различного назначения.

Список литературы

1. Пименов, Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
2. Pozar D.M. Microwave Engineering / D.M. Pozar – New York: Wiley, 2005. – 700 p.

Материал поступил в редколлегию 27.09.19.