

УДК 621.3.083.2, 004.942

DOI 10.52928/2070-1624-2026-46-1-40-46

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОДОБРОТНОГО
БИКОНИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА**

*д-р техн. наук, проф. А. В. ГУСИНСКИЙ, д-р техн. наук, проф. М. В. ТУМИЛОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. Н. А. ПЕВНЕВА, канд. физ.-мат. наук В. Н. РОДИОНОВА,
В. А. ШУТОВИЧ*

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

канд. техн. наук О. В. ТАНАНА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Проведено численное моделирование биконического резонатора (БР) в CST Microwave Studio в частотном диапазоне 24–40 ГГц. Решена краевая задача определения собственных колебаний биконического резонатора. Получена частотная зависимость коэффициентов отражения и передачи биконического резонатора от геометрических размеров.

Ключевые слова: СВЧ-диапазон, СВЧ-резонаторы, биконический резонатор, добротность, коэффициенты отражения и передачи, диэлектрики, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

Введение. Одной из приоритетных научных задач микро- и нанoeлектроники является поиск и освоение новых материалов для приборов функциональной микро-, опто-, нано- и СВЧ-электроники. В настоящее время радиоэлектроника представляет собой обширную область науки и техники, которая стремительно развивается, охватывая новые сферы применения. Можно выделить следующие направления ее развития: разработка и создание новой элементной базы в уже освоенных частотных диапазонах; освоение новых частотных диапазонов, включая создание радиоэлектронных систем с новыми свойствами и характеристиками, а также элементной базы и средств метрологического обеспечения для них; разработка новых научных и технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции, связанной с радиоэлектроникой; совершенствование метрологического обеспечения в целях повышения эффективности управления современными изделиями радиоэлектроники¹. Одной из наиболее важных технических задач является разработка методов и измерительной аппаратуры в миллиметровом диапазоне для измерения параметров новых материалов. В настоящее время точные и надежные бесконтактные методы измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материалов в широком интервале частот СВЧ- и КВЧ-диапазона разработаны в недостаточной степени. Существующие методы измерения диэлектрической проницаемости материалов с использованием измерительных линий не позволяют в полной мере обеспечить автоматизацию измерений [1].

В соответствии с ГОСТ Р 8.623–2015 методы измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ-диапазоне делятся на две группы: резонансные и широкополосные². Резонансные методы используют для исследования диэлектрических свойств вещества в диапазоне частот от 0,6 до 120 ГГц. Они основываются на измерении изменения параметров резонатора: сдвига его резонансной частоты и уменьшения добротности при контакте с исследуемым образцом³.

Резонаторы являются важнейшими узлами радиотехнических систем СВЧ: на их основе строятся многие частотно-избирательные устройства. Широкое применение резонаторы нашли в измерительной технике СВЧ-диапазона для измерения различных электрических и неэлектрических величин [2].

Резонансные методы характеризуются высокой точностью и применяются при измерении материалов с малыми потерями [3]. В резонансных методах измерение параметров происходит только на собственных резонансных частотах используемого СВЧ-резонатора. При размещении в полости резонатора исследуемого образца происходит изменение его собственной резонансной частоты и добротности, что и позволяет вычислить значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ [4]. Традиционно в данных методах используются металлические объемные резонаторы (прямоугольные или цилиндрические).

¹ Гусинский А. В. Средства измерений миллиметрового диапазона длин волн на основе обобщенной модели многополюсника: дис. д-ра техн. наук: 05.11.08. – Мн., 2022. – 279 л.

² ГОСТ Р 8.623–2015. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот. – М.: Стандартинформ, 2016. – 35 с.

³ Measuring Dielectric Properties Using Keysight's Materials Measurement Solutions / Keysight Technologies. – URL: <https://www.rftest.co.nz/assets/Downloads/Accessible/Keysight/72a0707b1f/KEYSIGHT-Materials-Measurement.pdf>, свободный (дата обращения: 24.11.2025).

Моделирование биконического резонатора в миллиметровом диапазоне длин волн. С целью повышения добротности и упрощения установки в резонатор исследуемых образцов мы разработали модифицированную конструкцию резонатора на отрезках нерегулярных волноводов, сечение которых уменьшается от центра к краям, – так называемый биконический резонатор. На рисунке 1 приведены обозначения длин конической L_1 и цилиндрической L_2 частей БР.

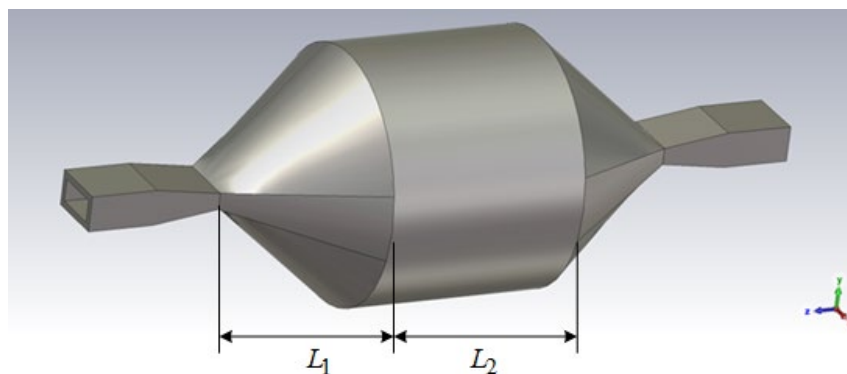


Рисунок 1. – Биконический резонатор

Выбор биконической формы резонатора обусловлен его повышенной добротностью (Q) по сравнению с цилиндрическими резонаторами, а также простотой размещения исследуемого образца.

Коническая форма обеспечивает плавное изменение импеданса и оптимальное распределение поля, что минимизирует краевые эффекты и омические потери на торцевых стенках, в отличие от плоских торцевых стенок у цилиндрических резонаторов. Высокая собственная добротность (Q_0) резонатора критически важна для точного измерения малых диэлектрических потерь исследуемых материалов.

Биконическая форма используется в сочетании с центральной цилиндрической частью, формируя резонансную камеру. Цилиндрическая центральная камера разделена на две части, одна из которых плотно вставляется в другую на регулируемое расстояние. Это позволяет варьировать объем резонатора, и, соответственно, изменять резонансную частоту. Данное конструктивное решение упрощает ввод и позиционирование исследуемых образцов внутри резонатора. Также для удобства работы с объектами диаметр одной цилиндрической вставки выбран равным 36 мм, другой – 35 мм. Толщина стенки составляет 1 мм. Кроме того, данная геометрия позволяет использовать конус как элемент настройки. С помощью него можно влиять на типы мод, распространяющиеся внутри резонатора.

Основным преимуществом использования данного резонатора является то, что вектор E напряженности электромагнитного поля перпендикулярен направлению распространения электромагнитной волны. Резонаторы данного типа можно создавать на волноводах любого сечения. На практике наиболее часто применяют резонаторы на базе волновода круглого сечения с азимутально-симметричными колебаниями H_{0np} .

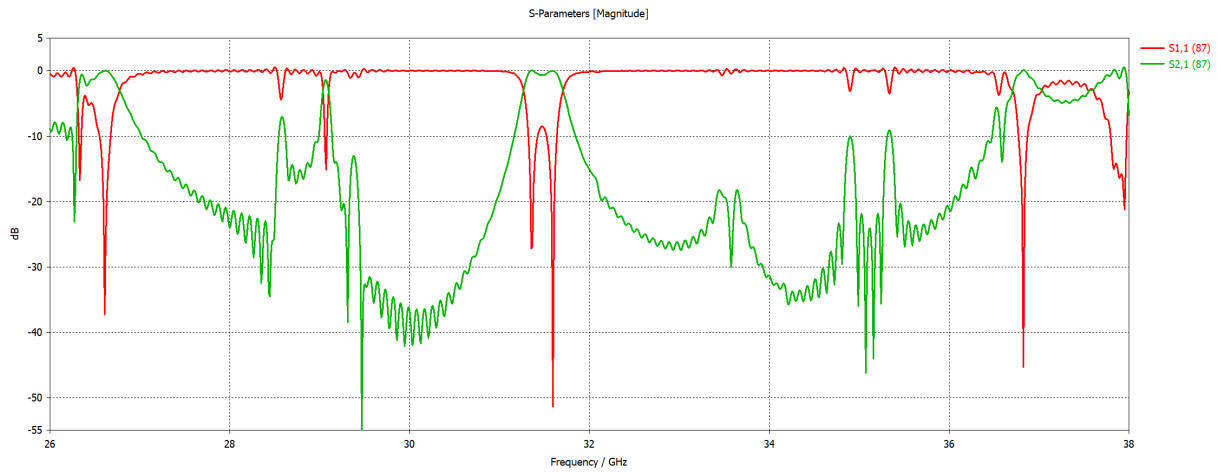
В таких резонаторах удастся получить максимально высокую добротность благодаря малым продольным токам в металлических стенках. Наличие отверстий в запердельных областях обеспечивает возможность размещения исследуемых образцов во внутренней полости резонатора, что и способствует применению биконических резонаторов в измерительной технике.

При математическом моделировании биконического резонатора можно использовать упрощенные выражения для расчета собственных частот с большими углами при вершинах конических элементов по двум симметричным точкам, расположенным на границах взаимно пересекающихся частичных областей, имеющих форму сферического сектора.

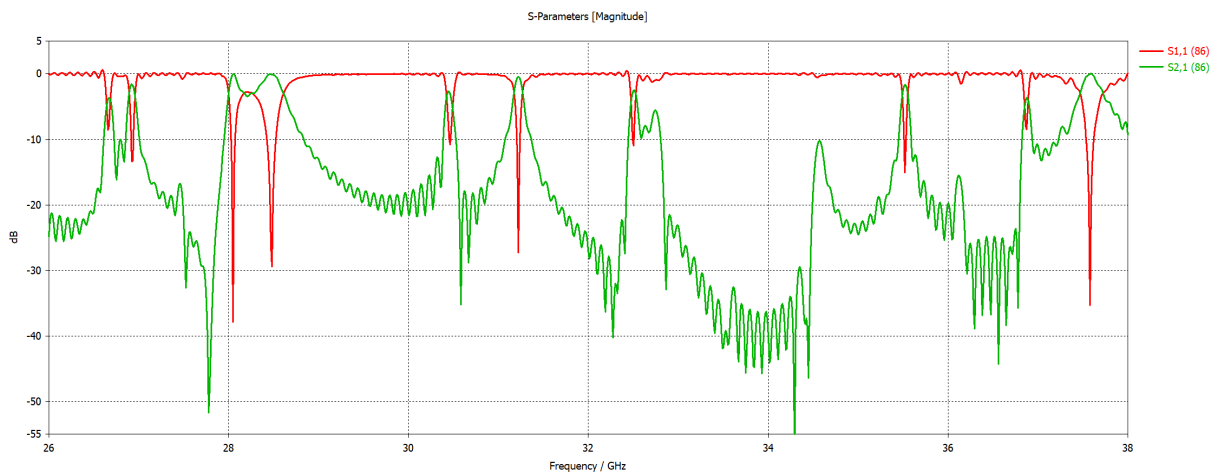
Результаты математического моделирования БР. Целью настоящей работы являлось вычисление собственных частот биконического резонатора. Получено уравнение для собственных частот биконического резонатора для азимутально-симметричного поперечного электрического поля при произвольном числе пар точек коллокации. Уравнение сводится к двум уравнениям, решение которых требует гораздо меньших вычислительных затрат по сравнению с исходным. В решениях одного из двух уравнений допускаются моды, симметричные относительно плоскости симметрии резонатора, а решения другого допускают антисимметричные моды. Применение метода эталонных уравнений в рамках квазирегулярного одномодового приближения позволяет получать приближенные оценки значений резонансной частоты азимутально-симметричных колебаний БР [5; 6].

Моделирование БР в диапазоне частот 24–40 ГГц выполнялось в пакете CST Microwave Studio (подпрограмма расчета в частотной области Frequency Domain Solver для решения широкополосных задач).

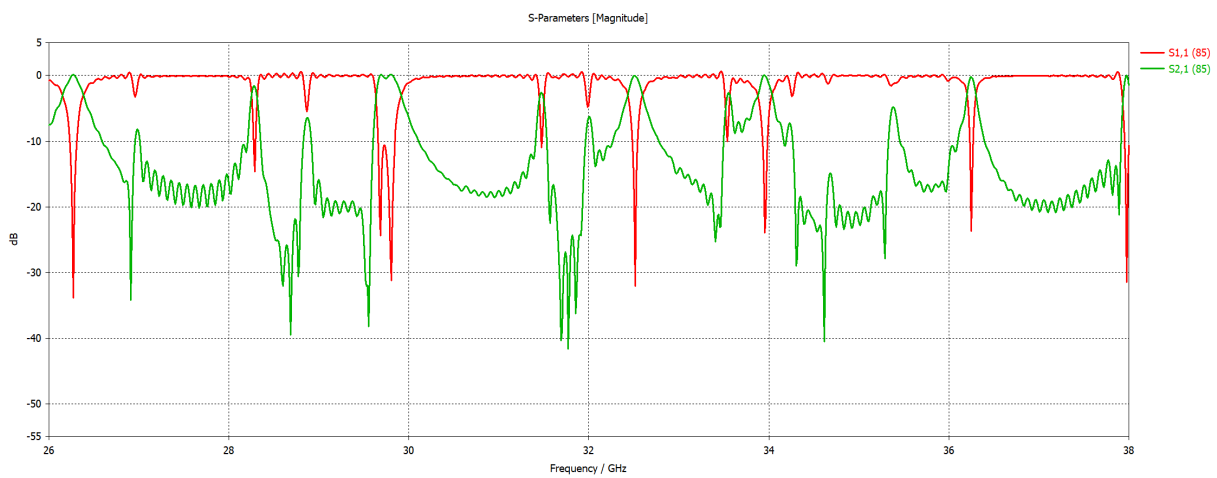
Расчет проводился для резонатора с внутренним диаметром $D = 36$ мм, постоянным значением $L_1 = 12$ мм и изменяющимся L_2 . Результаты моделирования представлены на рисунке 2 (красная кривая соответствует комплексному коэффициенту отражения S_{11} , зеленая – коэффициенту передачи S_{21}).



а



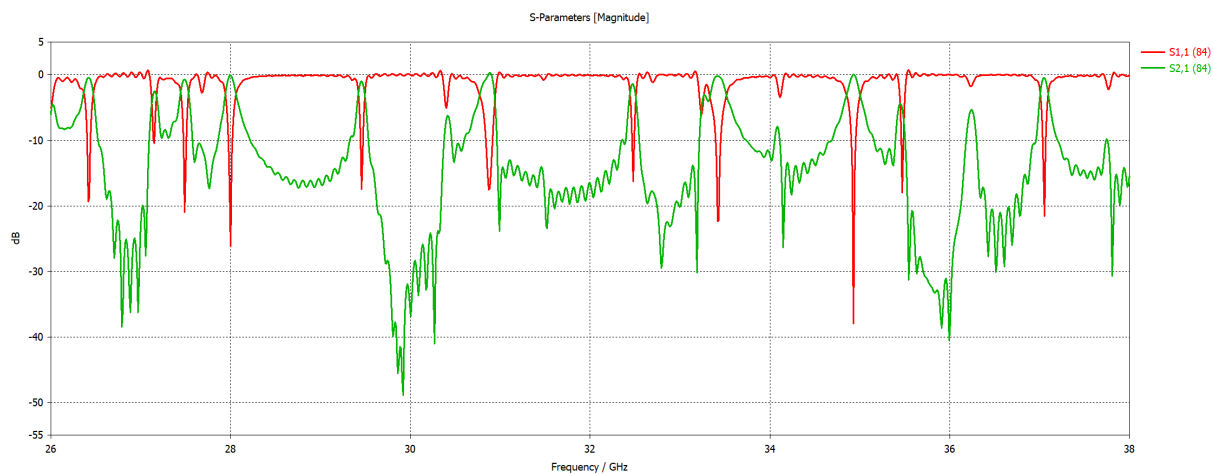
б



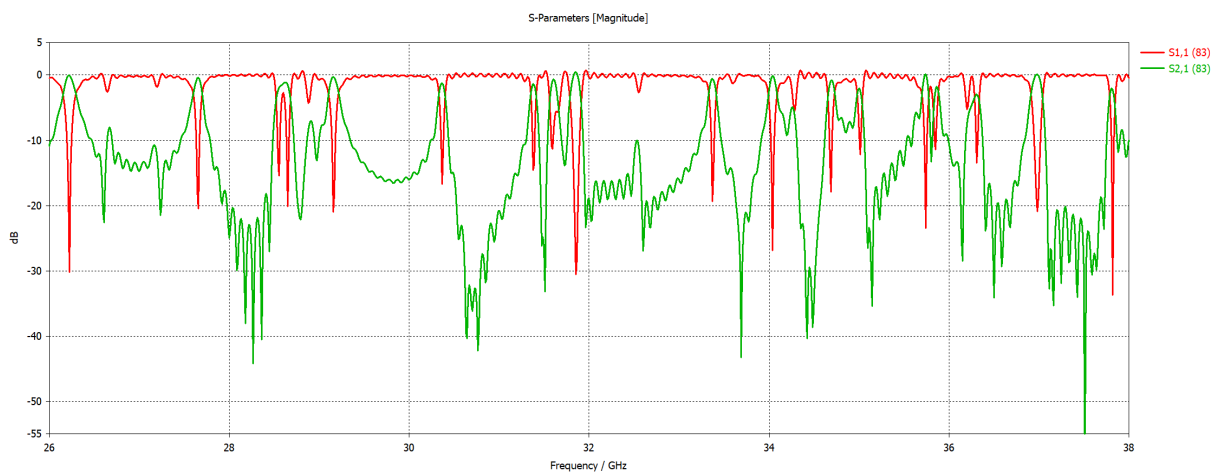
в

а – при $L_2 = 4$ мм; б – при $L_2 = 6$ мм; в – при $L_2 = 8$ мм

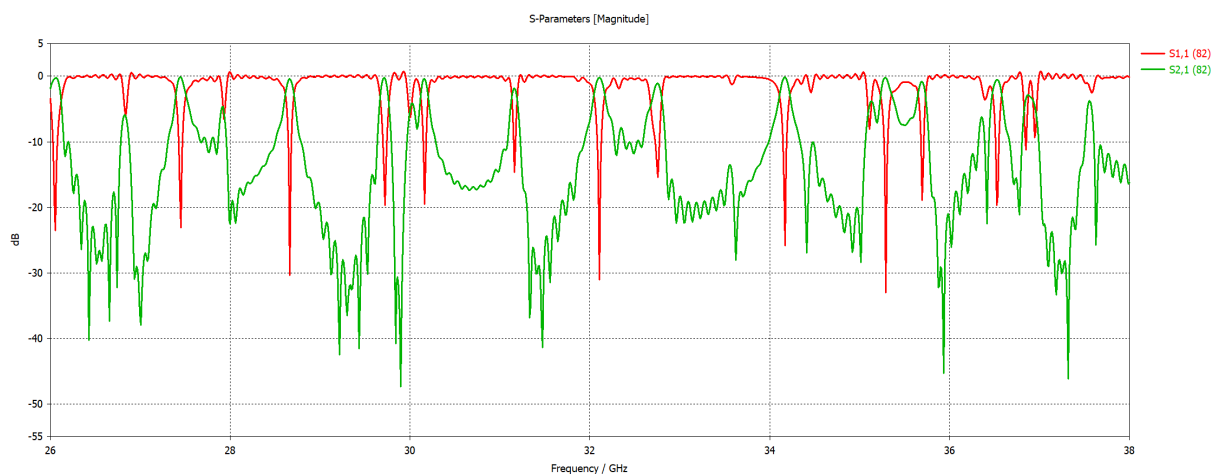
Рисунок 2. – Результаты моделирования частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи биконического резонатора (начало)



z



д



e

z – при $L_2 = 10$ мм; д – при $L_2 = 12$ мм; e – при $L_2 = 14$ мм

Рисунок 2. – Результаты моделирования частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи биконического резонатора (окончание)

Из проведенных расчетов прослеживаются следующие зависимости:

1. При увеличении L_1 снижаются пики параметра S_{11} . Они находятся в диапазоне 0 ... -20дБ.
2. При увеличении L_2 :
 - усиливается «рябь» параметра S_{11} возле отметки 0 дБ;
 - снижаются пики параметра S_{11} ;
 - растет количество пиков параметра S_{11} .

Для проходных измерительных резонаторов характерно применение слабой связи с трактом, обеспечивающей коэффициент передачи от резонатора ($25 \div 35$) дБ, что подтверждается расчетами. Лучшие результаты достигнуты для отверстия связи $7,2 \times 0,5$ мм при размерах резонатора $D = 36$ мм, $L_1 = 12$ мм и $L_2 = 8$ мм. Собственная добротность такого резонатора на колебании H_{013} составляет 90 000, а нагруженная добротность (при условии идеального согласования с трактом) – около 30 000. На рисунке 3 приведены частотно-зависимые комплексные коэффициенты передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) такого БР.

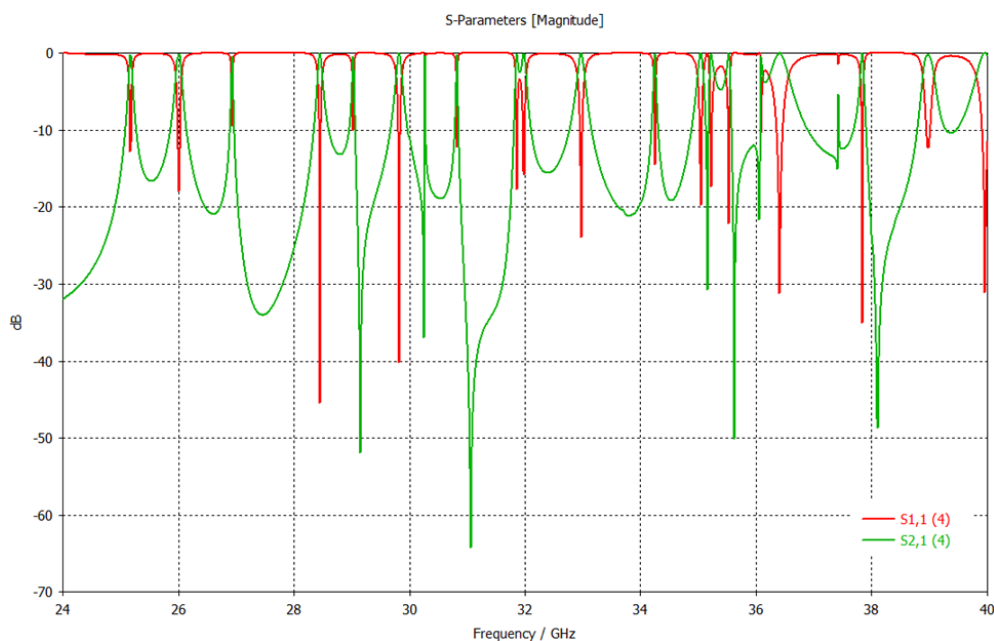


Рисунок 3. – Частотная зависимость коэффициентов отражения и передачи биконического резонатора, выбранного для макетирования

С увеличением добротности наблюдается рост плотности спектра собственных колебаний биконического резонатора. Биконические резонаторы могут быть реализованы на волноводах с различным сечением, однако на практике чаще всего используются резонаторы на основе волноводов с круглым сечением, поддерживающих азимутально-симметричные колебания H_{0np} . В таких резонаторах достигается максимальная добротность, что обусловлено минимальными продольными токами в металлических стенках. При достижении диаметром отверстия связи БР определенных предельных значений, которые могут быть охарактеризованы значением радиуса основания конических составляющих резонатора, добротность резонатора значительно снижается. В разработанной нами конструкции резонатора при измерениях на колебаниях типа H_{0np} образец выполняется в виде цилиндрического диска и располагается между разъемными частями цилиндрической полости БР.

Вычисление $\text{tg} \delta$ сводится к измерению добротности резонатора с веществом и вычислению Q_m . Для определения Δ необходимо измерить добротность пустого резонатора.

Известно следующее выражение для Q [7]:

$$Q = \frac{pD + \frac{1}{\varepsilon} L}{\frac{\Delta}{a} \left(\frac{1}{\beta^2 + k^2} \right) \left[k^2 (pD + L) + \beta p + \beta_0^2 \right] + pD \text{tg} \delta}, \quad (1)$$

где $D = 2d - \frac{1}{\beta} \sin 2\beta d$;

$$L = 2l - \frac{1}{\beta_0} \sin 2\beta_0 l;$$

$$p = \left(\frac{\sin \beta_0 l}{\sin \beta d} \right)^2;$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}};$$

α – радиус резонатора, мм;

d – толщина диэлектрика, мм;

l – длина части резонатора, заполненной воздухом, мм;

Δ – глубина проникновения поля, мм;

β – фазовая постоянная в части резонатора, заполненной диэлектриком;

β_0 – фазовая постоянная в части резонатора, заполненной воздухом;

ϵ – диэлектрическая проницаемость.

Когда потери в диэлектрике пренебрежимо малы, $Q = Q_m^1$ (Q_m^1 – добротность, которую имел бы резонатор при заполнении его идеальным диэлектриком без потерь, имеющим такую же относительную диэлектрическую проницаемость, как и реальный диэлектрик). Если потери малы, можно считать, что $Q_m^1 \approx Q_m$. Экспериментально измеряется Q_m . Из формулы (1) при измеренном Q_m можно вычислить Δ .

Заключение. Решена краевая задача определения собственных колебаний биконического резонатора. Получены зависимости электродинамических характеристик комплексных коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) биконического резонатора от его геометрических параметров. Применение метода эталонных уравнений в рамках квазирегулярного одномодового приближения позволило получить приближенные оценки значений резонансной частоты азимутально-симметричных колебаний БР. Абсолютная погрешность вычислений резонансной частоты для БР с углом при вершине 45° не превышает 3 %, а погрешность вычисления относительного изменения частоты при этом не превышает 0,5 %, что удовлетворяет применению такого резонатора в измерительной технике СВЧ-диапазона для измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Певнева Н. А., Гурский А. Л., Кострикин А. М. Использование метода цилиндрического стерженька и векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ диапазоне // Доклады БГУИР. – 2019. – № 1 (119). – С. 56–61.
2. Улучшенный резонаторный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов / М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, Н. А. Федосеев и др. // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 7. – С. 651–656.
3. Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 5–38.
4. Беляев А. А., Беспалова Е. Е., Паярель С. М. Особенности измерения диэлектрических характеристик с помощью щелевого резонатора // Труды ВИАМ. – 2017. – № 9 (57). – Ст. 8. – DOI: [10.18577/2307-6046-2017-0-9-8-8](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-9-8-8).
5. Простой метод определения собственных частот биконического резонатора / М. В. Андреев, О. О. Дробахин, Д. Ю. Салтыков и др. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 717–724.
6. Применение теории R-функций к задачам дифракции термоупругих волн на объектах сложной формы / В. Ф. Кравченко, В. И. Пустовойт, В. Л. Рвачев, Н. Д. Сизова // Доклады Российской Академии наук. – 2000. – Т. 372, № 2. – С. 487–489.
7. Шестопапов В. П., Яцук К. П. Методы измерения диэлектрической проницаемости веществ на сверхвысоких частотах // Успехи физических наук. – 1961. – Т. 74, вып. 4. – С. 721–755.

Поступила 03.02.2026

MODELING OF A HIGH-Q BICONICAL MEASURING RESONATOR

**A. GUSINSKIY, M. TUMILOVICH, N. PEVNEVA,
V. RODIONOVA, V. SHUTOVICH**

(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

O. TANANA

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A numerical simulation of a biconic resonator (BR) was performed using the finite difference method in the frequency range of 24–40 GHz. An investigation was conducted on the dependence of the resonator's

eigenfrequencies on the angle at the vertices of the conical elements. The results of the studies were compared with those obtained from finite element method calculations. A boundary value problem for determining the eigenmodes of the biconic resonator was solved. The frequency dependence of the reflection and transmission coefficients of the biconic resonator was obtained.

Keywords: *microwave range, microwave resonators, biconic resonator, Q-factor, reflection and transmission coefficients, dielectrics, relative permittivity, tangent of the dielectric loss angle.*