

## ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ МИКРОВОЛНОВЫХ БИКОНИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ

Д. Ю. САЛТЫКОВ

В статье рассмотрены микроволновые биконические резонаторы, перестраиваемые с помощью аксиальных металлических и диэлектрических стержней, исследованы возможности применения квазирегулярного одномодового приближения в сочетании с методом эталонных уравнений для расчета параметров рассматриваемых структур.

Ключевые слова: биконический резонатор, резонансная частота, добротность, метод эталонных уравнений.

### ВВЕДЕНИЕ

Объемные резонаторы являются одним из основных элементов техники микроволнового диапазона. Резонаторы являются важнейшими узлами генераторных систем СВЧ, на их основе строятся фильтры и другие частотно-избирательные устройства, широкое применение резонаторы нашли в измерительной технике микроволнового диапазона для измерения различных электрических и неэлектрических величин. В этой связи особый практический интерес представляют объемные резонаторы, обладающие как широким диапазоном перестройки резонансной частоты, так и возможностью размещения исследуемых образцов в резонансном электромагнитном поле. К таким системам относятся открытые волноводные резонаторы предельного типа на основе волноводов переменного сечения, в частности, биконические резонаторы (БКР) [1-4].

Резонансные колебания в структурах на основе волноводов переменного сечения возникают за счет переотражений электромагнитных волн высших типов от каустических поверхностей, возникающих в сужающихся частях волноводов. Резонаторы данного типа сочетают преимущества как закрытых резонаторов волноводного типа, так и открытых. Конический профиль резонатора обеспечивает снятие частотного вырождения между колебаниями  $H_{01p}$  и  $E_{11p}$  типов. Последний фактор чрезвычайно важен, поскольку более низкодобротные  $E_{11p}$  колебания возбуждаются на любых неоднородностях внутри резонатора, что приводит к существенному снижению добротности резонансной системы, использующей азимутально-симметричные колебания  $H_{01p}$  в качестве рабочих.

Несмотря на существующее многообразие способов электронной перестройки резонансной частоты резонаторов СВЧ, сохраняется практический интерес к резонаторам с механической перестройкой частоты, осуществляющейся за счет изменения геометрических размеров резонаторов, введения в их объем проводников, диэлектриков или изменения взаимного положения конструктивных элементов резонаторов.

Для обеспечения изменения параметров резонаторов при механической перестройке в заданном диапазоне требуется не только высокая точность взаимного позиционирования конструктивных элементов резонаторов, но и понимание особенностей изменения структуры электромагнитных полей в объеме резонатора, которые при этом происходят.

Одним из наиболее распространенных способов перестройки резонансных частот осесимметричных резонаторов является введение аксиальных металлических или диэлектрических стержней в объем резонатора [6, 7]. Такой способ обеспечивает достаточно широкий допустимый диапазон перестройки резонансных частот.

При перестройке резонансной частоты цилиндрических резонаторов путем перемещения азимутально-симметричных элементов может наблюдаться нарушение или полное отсутствие электрического контакта по периметру подвижного элемента. В случае динамических перемещений подвижного элемента, например, при измерении механических перемещений и вибраций [9, 10], обеспечение такого контакта представляет собой достаточно сложную техническую задачу. Азимутально-симметричные колебания магнитного типа  $H_{0np}$  обладая наибольшей собственной добротностью наименее критичны к нарушению электрического контакта по периметру подвижного элемента. Кроме того, колебания  $H_{0np}$  типа обладают наименьшей чувствительностью к отклонениям формы и нарушению соосности перестраиваемого элемента и резонатора. Все это в значительной мере обуславливает тот факт, что при проектировании различных контрольно-измерительных устройств СВЧ диапазона на базе осесимметричных направляющих структур именно эти колебания наиболее часто используются в качестве рабочих.

В этой связи целью данной работы было исследование возможностей механической перестройки БКР, работающих на колебаниях азимутально-симметричных типов с помощью аксиальных металлических и диэлектрических стержней, вводимых через отверстия, расположенных в закритических областях резонаторов.

## 1. ПЕРЕСТРОЙКА БИКОНИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА АКСИАЛЬНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ

Биконические резонаторы, работающие на азимутально-симметричных колебаниях магнитного типа  $H_{0np}$ , обладают высокой собственной добротностью  $Q_0 \sim 10^5$ . При этом критические сечения располагаются на значительном расстоянии от вершин конусов, что позволяет без заметного ущерба для качества колебательной системы создавать отверстия в закритических областях для введения конструктивных элементов для перестройки частоты внутрь резонатора, практически не нарушая при этом структуры поля в резонаторе.

К недостаткам БКР следует отнести достаточно сложный вид зависимости параметров резонатора от свойств вносимых объектов, что обусловлено возникающим при этом смещением местоположения критических сечений и, следовательно, изменением рабочего объема резонатора.

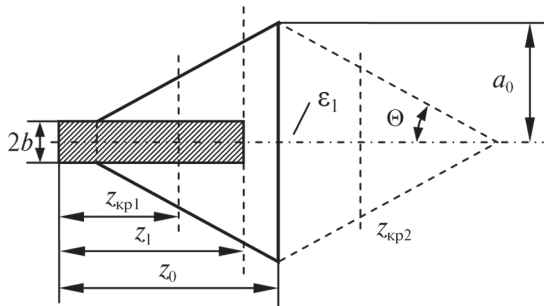


Рис. 1. Биконический резонатор с перестройкой аксиальным металлическим стержнем

На рис. 1 представлена схема биконического резонатора, перестраиваемого с помощью цилиндрического стержня, вводимого вдоль оси резонатора. Введение металлического стержня будет приводить к увеличению резонансной частоты колебаний магнитного типа, в том числе и осесимметричных  $H_{0np}$ . Степень изменения частоты напрямую связана с глубиной введения стержня в объем резонатора. Диапазон перестройки резонатора будет определяться диаметром стержня.

На рис. 2 показаны графики зависимости резонансной частоты колебания  $H_{011}$  биконического резонатора максимального радиуса  $a_0 = 25$  мм с углом при вершине  $\Theta = 30^\circ$  от глубины введения аксиальных металлических стержней, радиусами  $b = 5$  мм (сплошная линия) и  $b = 2,5$  мм (пунктир), полученные экспериментально. Резонансная частота пустого резонатора составляла 9,560 ГГц, добротность  $\sim 15500$ . Точность измерения частоты составляла  $\pm 1$  МГц. Из графиков видно, что в интервале перемещения стержня от сечения  $z/z_0 \approx 0,7$  вблизи  $z_{кр1}$  ( $z/z_0 = 0,875$ ) до среднего сечения резонатора  $z_0$  ( $z/z_0 = 1,0$ ) в обоих случаях зависимости носят плавный монотонный характер. После прохож-

дения среднего сечения резонатора для стержня радиусом 2,5 мм зависимость продолжает оставаться монотонной, для более толстого стержня радиусом 5 мм монотонный характер зависимости нарушается и принимает осциллирующий характер. Осцилляционные изменения обусловлены как интерференционными явлениями между торцевой поверхностью стержня и критическим сечением полой части биконического резонатора, так и взаимодействием с гибридной модой  $EH_{311}$ . Структура поля колебания типа  $EH_{311}$  характеризуется концентрацией электрического поля вблизи стенок резонатора, поэтому при перемещении аксиального стержня величина резонансной частоты этой моды остается практически неизменной и для рассматриваемого резонатора составляет  $\sim 10,620$  ГГц. Поэтому при приближении частоты колебания  $H_{011}$  к частоте колебания  $EH_{311}$  их взаимодействие становится существенным и режим одномодовости нарушается. Для рассматриваемой резонансной структуры данная ситуация наблюдается при приближении металлического стержня радиусом 5 мм к сечению  $z/z_0 = 1,15$ .

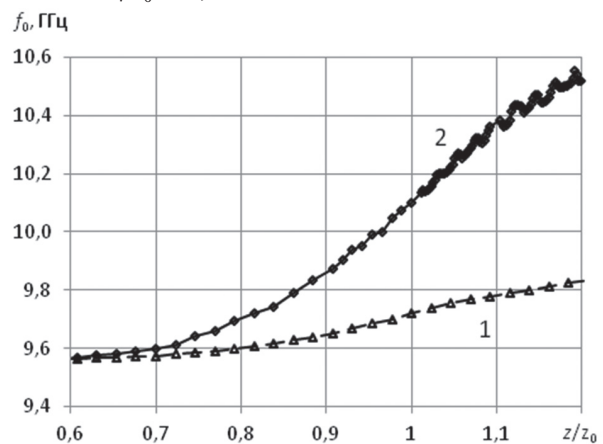


Рис. 2. Экспериментальная зависимость резонансной частоты БКР от глубины введения аксиального металлического стержня: 1 —  $b = 2,5$  мм; 2 —  $b = 5$  мм

Диапазон перестройки частоты с помощью более тонкого стержня радиусом 2,5 мм составил примерно 250 МГц ( $\sim 2,5\%$ ), для более толстого радиусом 5 мм — примерно 1 ГГц ( $\sim 10\%$ ), при этом с учетом осциллирующего характера зависимости при глубине введения стержня  $z_1/z_0 > 1,1$  практическую ценность представляет диапазон перестройки частоты 500 МГц ( $\sim 5\%$ ).

Перестройка с помощью аксиальных металлических стержней сопровождается снижением добротности. При полном введении стержня радиусом 2,5 мм, изготовленного из латуни, добротность колебания  $H_{011}$  уменьшалась на 39% с 15500 до 9500, при перестройке стержнем радиусом 5 мм — на 63% до 5800.

Точный расчет биконического резонатора, перестраиваемого с помощью аксиального металлического стержня, является довольно сложной электродинамической задачей

с некоординатными граничными условиями. Построение даже неортогональной системы координат, в которой бы поверхности раздела областей с различным заполнением, а также металлической оболочки резонатора совпадали с координатными, практически невозможен. Кроме того, даже для более простых задач, например, в случае перестройки цилиндрического резонатора [6, 7], строгий электродинамический расчет представляет собой довольно громоздкую вычислительную процедуру. Поэтому для быстрого расчета резонансных частот рассматриваемой структуры представляется целесообразным использование приближенных методик.

Традиционным приближенным подходом для расчета резонансных частот предельных резонаторов переменного сечения является применение метода поперечных сечений в квазирегулярном одномодовом приближении с последующим решением возникающей при этом краевой задачи методом присоединенных или, другими словами, эталонных уравнений (МЭУ) [4, 5]. Принцип синфазного сложения волн в любом сечении резонатора, лежащей в основе МЭУ, приводит к интегрированию переменного коэффициента фазы. При этом предполагается плавное непрерывное изменение фазы, что справедливо для волноводов и резонаторов с медленным изменением поперечного сечения.

БКР даже с малыми углами при вершине конуса лишь частично удовлетворяют данным требованиям. В биконических резонаторах присутствует скачкообразное изменение профиля в среднем сечении, что не может не привести к скачкообразному изменению фазы волны при прохождении через него. Тем не менее, для колебаний  $H_{0np}$  типа МЭУ обеспечивает погрешность вычисления резонансных частот БКР, не превышающую 2-3%, для углов при вершине конуса вплоть до 30° [8]. Это связано, в первую очередь, со структурой электромагнитного поля азимутально-симметричных мод резонатора, для которых характерно стремление к нулю напряженности электрического поля вблизи проводящих стенок. Благодаря этому азимутально-симметричные колебания обладают малой чувствительностью к небольшим скачкам внешнего сечения резонатора, чем и обусловлена хорошая точность МЭУ при расчетах биконических резонаторов.

Другой характерной особенностью азимутально-симметричных колебаний  $H_{0np}$  является равенство нулю напряженности поля на оси резонатора. Этот факт позволяет сделать предположение, что наличие небольших нерегулярностей в осесимметричном заполнении биконических резонаторов не должно оказывать заметного влияния на условия распространения азимутально-симметричных волн, и, следовательно, применение МЭУ позволит получить приемлемую для практического использования точность при расчете подобных структур.

Таким образом, с учетом сделанных предположений уравнение для нахождения резонансных частот, полученное в рамках МЭУ, примет вид [5]

$$\int_{z_{кр1}}^{z_1} \gamma_1(z) dz + \int_{z_1}^{z_{кр2}} \gamma_2(z) dz = \left( p - \frac{1}{2} \right) \pi, \quad p = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – продольные волновые числа (постоянные распространения);  $z_{кр1}$  и  $z_{кр2}$  – координаты критических сечений в коаксиальной и полой областях резонатора, соответственно.

Значения  $\gamma_1$  и  $z_{кр1}$  находятся из характеристического уравнения регулярного коаксиального волновода, которое для магнитных типов волн имеет вид [11]

$$\frac{N_1(\kappa a)}{J_1(\kappa a)} = \frac{N_1(\kappa b)}{J_1(\kappa b)}, \quad (2)$$

где  $\kappa$  – поперечное волновое число коаксиального волновода;  $J_1$  и  $N_1$  – цилиндрические функции Бесселя и Неймана первого порядка соответственно.

Для полой части резонатора интеграл берется в явном виде и имеет вид

$$\int_{z_{кр2}}^{z_p} \gamma_2(z) dz = k_0 \left( \sqrt{z_0^2 - z_p^2} - \sqrt{z_0^2 - z_{кр2}^2} - z_p \arccos \frac{z_p}{z_0} - z_{кр2} \arccos \frac{z_{кр2}}{z_0} \right), \quad (3)$$

радиус критического сечения для колебания  $H_{011}$  в полой части резонатора  $a_{кр2} = 3,832/k_0 = z_{кр2} \operatorname{tg} \Theta$ .

При изменении глубины введения стержня в резонатор в приближении метода эталонных уравнений возможны следующие ситуации:

1. Стержень не доходит до критического сечения пустого БКР  $z_1 < z_{кр1}$ , резонансная частота при этом не изменяется и равна частоте пустого резонатора.

2. Конец стержня находится в интервале между критическими сечениями заполненной и пустой части резонатора  $z_{кр1} < z_1 < z_{кр2}$ , при этом частота монотонно возрастает с увеличением глубины введения стержня.

3. Стержень пересекает оба критических сечения, в этом случае перестройка частоты достигает максимального значения, дальнейшее перемещение стержня не приводит к изменению частоты.

При этом абсолютно не учитываются явления, возникающие при приближении конца стержня к области критических сечений резонатора.

На рис. 3 для сравнения показаны зависимости относительного изменения резонансной частоты  $\Delta f / f_0$  ( $f_0$  – частота резонатора без стержня) колебания  $H_{011}$  биконического резонатора максимального радиуса  $a_0 = 25$  мм с углом при вершине  $\Theta = 30^\circ$  от глубины введения аксиальных металлических стержней, полученные экспериментально (сплошная линия) и рассчитанные с помощью МЭУ (пунктир). Диапазон пере-



мещения стержней составляет  $0,9 < z/z_0 < 1,1$ , что соответствует перемещению стержня от  $z_{кр1}$  до  $z_{кр2}$ . Для металлического стержня радиусом 2,5 мм расхождение абсолютных значений частоты составляет примерно 220 МГц (~2,3%) на протяжении всего диапазона перемещения стержня, для стержня радиусом 5 мм наклон кривых заметно отличается, расхождение результатов возрастает по мере увеличения глубины введения стержня и при  $z/z_0 = 1$  достигает величины 450 МГц (~4,3%).

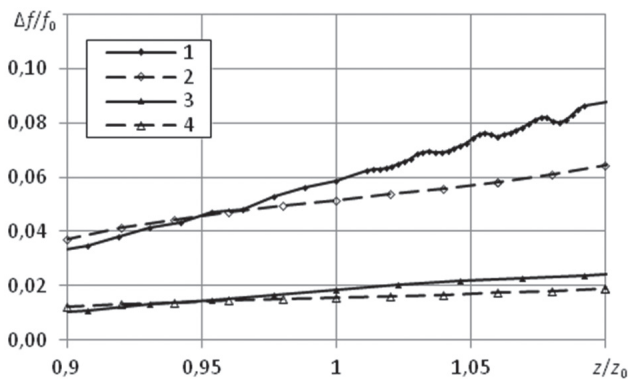


Рис. 3. Зависимости относительного изменения резонансной частоты колебания  $H_{011}$  биконического резонатора от глубины введения аксиального металлического стержня, полученные экспериментально: 1 –  $b = 10$  мм; 3 –  $b = 5$  мм, с помощью метода эталонных уравнений: 2 –  $b = 10$  мм; 4 –  $b = 5$  мм

При расчетах МЭУ не учитывается влияние элементов связи и торцевых отверстий на значение частоты резонатора, что в значительной мере определяет абсолютную погрешность вычислений. Рассмотрение относительного изменения резонансной частоты  $\Delta f/f_0$  позволяет в значительной мере компенсировать отклонение, обусловленное этими факторами. Так для стержня радиусом 2,5 мм максимальное расхождение относительных изменений частоты при  $z/z_0 = 1,1$ , полученных расчетным и экспериментальным путем, не превышает 0,5%. То есть в этом случае погрешность вычислений, вызванная игнорированием скачка фазы на торце металлического стержня, заметно меньше, чем погрешность МЭУ, обусловленная квазирегулярным приближением.

Для стержня радиусом 5 мм ход рассчитанной и экспериментальной кривых довольно сильно различается. Погрешность вычисления методом эталонных уравнений, обусловленная скачком фазы на торце стержня, становится ощутимой. Максимальное отклонение результатов расчета и измерений наблюдается при  $z/z_0 = 1,1$  и составляет примерно 2%, что сопоставимо с диапазоном перестройки резонатора. При дальнейшем увеличении радиуса стержня, т.е. для  $b/a_0 > 0,2$ , применение МЭУ для расчета резонансных частот становится неприемлемым.

## 2. ПЕРЕСТРОЙКА БИКОНИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА АКСИАЛЬНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ

При перестройке БКР аксиальным диэлектрическим стержнем резонансная частота колебаний  $H_{0np}$  будет уменьшаться по мере увеличения глубины введения стержня в объем резонатора.

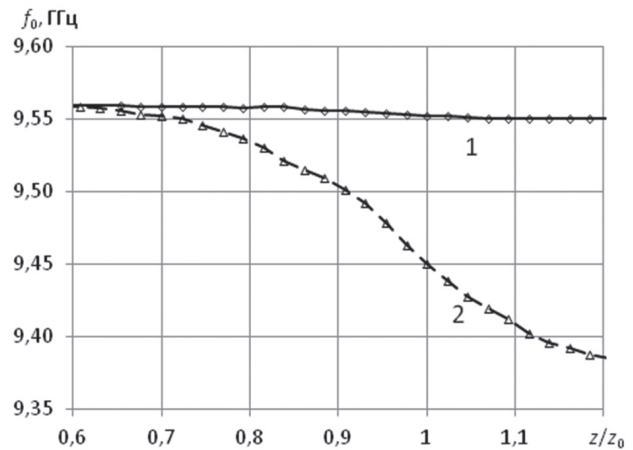


Рис. 4. Экспериментальная зависимость резонансной частоты БКР от глубины введения аксиального диэлектрического стержня ( $\epsilon = 2,08$ ): 1 –  $b = 2,5$  мм; 2 –  $r = 5$  мм

На рис. 4 приведены графики зависимости резонансной частоты колебания  $H_{011}$  биконического резонатора с максимальным радиусом  $a_0 = 25$  мм с углом при вершине  $\Theta = 30^\circ$  от глубины введения аксиальных стержней, изготовленных из фторопласта ( $\epsilon = 2,08$ ) радиусами  $b = 2,5$  мм (сплошная линия) и  $b = 5$  мм (пунктир), полученные экспериментально. Из графиков видно, что зависимости носят плавный монотонный характер. Изменение частоты прекращается при достижении стержнем критического сечения  $z_{кр2}$  ( $z/z_0 \approx 1,15$ ). Полный диапазон перестройки частоты резонатора для стержня радиусом  $b = 2,5$  мм составляет примерно 10 МГц (~0,1%), для более толстого стержня радиусом  $b = 5$  мм – 180 МГц (~1,8%).

При использовании для перестройки стержней из диэлектриков с малыми потерями добротность БКР сохраняется практически неизменной. Так при введении стержня из кварцевого стекла радиусом 3,0 мм наблюдалось уменьшение добротности колебания  $H_{011}$  с 15500 до 15300, что составляет меньше 1%, еще слабее влияют на величину добротности стержни, изготовленными из фторопласта.

При расчете методом эталонных уравнений в (1) постоянная распространения  $\gamma_1$  и критическое сечение  $z_{кр1}$  для заполненной области резонатора определяется из характеристического уравнения для двухслойного круглого волновода, которое для азимутально-симметричных волн типа  $H_{0n}$  имеет вид [12]

$$\frac{\kappa_1 J_0(\kappa_1 b)}{\kappa_2 J_1(\kappa_1 b)} = \frac{J_0(\kappa_2 b) N_1(\kappa_2 a) - J_1(\kappa_2 a) N_0(\kappa_2 b)}{J_1(\kappa_2 b) N_1(\kappa_2 a) - J_1(\kappa_2 a) N_1(\kappa_2 b)}, \quad (4)$$

где  $\kappa_{1,2} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{1,2} - \gamma^2}$  — поперечные волновые числа для областей с различным диэлектрическим заполнением с относительными проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ;  $k_0 = \omega/c$  — волновое число свободного пространства.

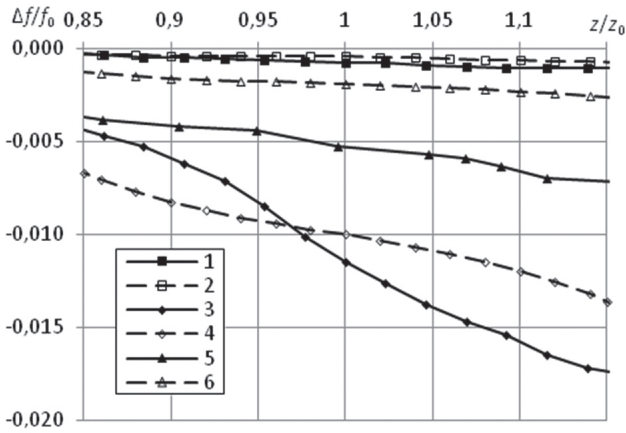


Рис. 5. Зависимости относительного изменения резонансной частоты колебания  $H_{011}$  биконического резонатора от глубины введения аксиальных диэлектрических стержней, полученные экспериментально: 1 —  $\varepsilon_1 = 2,08, b = 2,5$  мм; 3 —  $\varepsilon_1 = 2,08, b = 5$  мм; 5 —  $\varepsilon_1 = 3,8, b = 3,0$  мм; с помощью метода эталонных уравнений: 2 —  $\varepsilon_1 = 2,08, b = 5$  мм; 4 —  $\varepsilon_1 = 2,08, b = 5$  мм; 6 —  $\varepsilon_1 = 3,8, b = 3,0$  мм

На рис. 5 показаны зависимости относительного изменения резонансной частоты  $H_{011}$  колебания БКР от глубины введения аксиальных диэлектрических стержней, полученные с помощью МЭУ (пунктирная линия) в сравнении с данными измерений (сплошная линия).

Ход кривых для стержней из фторопласта практически совпадает, расхождение увеличивается по мере увеличения глубины введения стержня. Для стержня из фторопласта радиусом 2,5 мм расхождение данных в диапазоне перемещения стержня  $0,85 < z/z_0 < 1,15$  не превышает 0,05% для стержня из фторопласта радиусом 5 мм — 0,5%.

Для кварцевого стержня радиусом 3 мм крутизна характеристик, полученных экспериментально и МЭУ, заметно различается. Расхождение численных и экспериментальных данных относительного изменения частоты при этом не превышает 0,5%.

Абсолютное отклонение резонансной частоты, рассчитанной с помощью МЭУ, от измеренной для всех случаев в диапазоне перестройки составляло примерно 250 МГц (~2,7%), что обусловлено как погрешностями методики вычислений, так и влиянием конструктивных особенностей резонатора (наличием отверстий связи, конечной проводимостью стенок, отклонением проницаемости и радиуса стержня от расчетных, нарушением соосности и т.п.).

Ближайший к  $H_{011}$  тип колебаний с более низкой частотой  $EH_{211}$  достаточно удален по ча-

стоте, так для резонатора с максимальным радиусом  $a_0 = 25$  мм с углом при вершине  $\Theta = 30^\circ$  его частота составляет примерно 8,150 ГГц. Кроме того, диэлектрическое заполнение оттягивает электрическое поле от стенок резонатора, вследствие чего колебание  $EH_{211}$  сильнее зависит от перемещения диэлектрического стержня, чем  $EH_{311}$  при перестройке резонатора металлическим стержнем. Тем не менее, при использовании для перестройки частоты диэлектрических стержней большого радиуса или с высокой проницаемостью возможна ситуация, когда взаимодействие колебаний  $H_{011}$  и  $EH_{211}$  приведет к нарушению режима одномодовости.

### ВЫВОДЫ

Применение аксиальных металлических и диэлектрических стержней позволяет осуществлять плавную перестройку резонансной частоты БКР, работающих на азимутально-симметричных колебаниях  $H_{0np}$ . Использование металлических стержней позволяет повысить, а диэлектрических — понизить частоту колебаний.

Практический диапазон перестройки частоты ограничен сложными волновыми процессами вблизи критических сечений БКР и наличием соседних резонансных мод, влияние аксиальных стержней на которые незначительно. В случае использования колебания  $H_{011}$  для перестройки с помощью металлических стержней это колебания  $EH_{311}$ , для диэлектрических стержней —  $EH_{211}$ . Теоретический диапазон одномодовости для колебания  $H_{011}$  при перестройке металлическим стержнем составляет примерно 10 %, при перестройке диэлектрическим стержнем — примерно 14,5 %.

Применение метода эталонных уравнений в рамках квазирегулярного одномодового приближения позволяет получать приближенные оценки значений резонансной частоты азимутально-симметричных колебаний БКР, перестраиваемых с помощью аксиальных металлических и диэлектрических стержней, если радиус стержня достаточно мал ( $b/a_0 \sim 0,1 \div 0,15$ ) и диэлектрическая проницаемость невелика ( $\varepsilon \sim 2 \div 4$ ). Абсолютная погрешность вычислений для БКР с углом при вершине  $30^\circ$  при использовании стержней с отношением радиуса к максимальному радиусу резонатора  $b/a_0 < 0,2$  не превышает 3%, погрешность вычисления относительного изменения частоты при этом не превышает 0,5 %, что вполне приемлемо для практических целей.

### Литература

[1] Терещенко А. И., Буртовой Д. П. Анализ частотных свойств цилиндрических нерегулярных предельных резонаторов // Радиотехника. — Харьков: Вища школа, 1975. — Вып. 35. — С. 50–56.  
 [2] Кравченко В.Ф., Ратнер В.И. К теории распространения электромагнитных волн в нерегулярных цилиндрических волноводах // Радиотехника. — Харьков: Вища школа, 1975. — Вып. 35. — С. 36–44.

- [3] Бобрышев В. Л., Кравченко В. Ф., Каретников С. Н. Исследование высокодобротного предельного резонатора // Измерительная техника. – 1975. – №7. – С. 70–73.
- [4] Кравченко В. Ф., Каретников Д. Н., Бобрышев В. Д. К расчету предельных резонаторов // Радиотехника. Харьков: Вища школа, 1970. – Вып. 21. – С. 107–112.
- [5] Машковцев Б. М., Цибизов К. Н., Емелин В. Ф. Теория волноводов. – Л.: Изд. АН СССР, 1966. – 352 с.
- [6] Баринова В. Ф., Раевский С. Б., Рудоясова Л. Г. Расчет волноводного резонатора, перестраиваемого металлическим стержнем // Радиотех. и электрон. 1975. – Т. 20, № 12. – С. 2621–2625.
- [7] Раевский С. Б., Рудоясова Л. Г. Расчет волноводного резонатора, перестраиваемого металлическим стержнем, на основе метода частичных областей // Изв. вузов Радиофиз. 1976. – Т. 19, № 9. – С. 1391–1394.
- [8] Привалов Е. Н. О применимости метода эталонных уравнений к расчету резонансных частот конических и биконических резонаторов // Электродинамика и физика СВЧ. – Днепропетровск, 1985. – С. 51–54.
- [9] Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. Influence of the Dimensional and Form Precision of the Constructional Elements of Biconical Coaxial Microwave Resonator of the Parameter of Sensor of Movement // Telecommunications and Radio Engineering. 2009. 68(9). P. 827–833.
- [10] Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. Displacement sensors based on circular cylindrical microwave resonators // Telecommunications and Radio Engineering. 2009. 68(17). P. 1577–1588.
- [11] Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. – М.: Сов. Радио, 1971. – 664 с.
- [12] Веселов Г. И., Раевский С. Б. Слоистые металлодиэлектрические волноводы. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2014



**Салтыков Дмитрий Юрьевич**, старший преподаватель кафедры прикладной и компьютерной радиофизики Днепропетровского национального университета им. Олеся Гончара. Научные интересы: измерительная техника СВЧ диапазона

УДК 621.317

**Перестроювання частоти мікрохвильових біконічних резонаторів за допомогою металевих та діелектричних стержнів** / Д. Ю. Салтыков // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2014. – Том 13. № 2. – С. 144–149.

У статті розглянуто біконічні резонатори мікрохвильового діапазону, які перестроюються за допомогою аксіальних металевих та діелектричних стержнів як датчик для контролю параметрів діелектриків. Встановлені межі застосування методу еталонних рівнянь для наближеного розрахунку резонансних частот розглянутих структур.

*Ключові слова:* біконічний резонатор, резонансна частота, добротність, метод еталонних рівнянь.

Іл.: 05. Бібліогр.: 12 найм.

UDC 621.317

**Frequency tuning of microwave biconical resonators by using metallic and dielectric rods** / D. Yu. Saltykov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2014. – Vol. 13. – № 2. – P. 144–149.

The paper considers microwave biconical resonators which can be tuned by axial metal or dielectric rods. The limits of applicability of the standard equations method for the approximate calculations of the resonance frequencies of these structures are determined.

*Keywords:* biconical cavity resonator, resonant frequency, Q-factor, standard equations method.

Fig.: 05. Ref.: 12 items.