

**Р. И. Белоус, А. П. Моторненко, И. Г. Скуратовский, О. И. Хазов**  
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
 E-mail: [briz@ire.kharkov.ua](mailto:briz@ire.kharkov.ua)

## ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С РЕЗОНАНСНЫМ КОРОТКОЗАМЫКАЮЩИМ ПОРШНЕМ

К основным параметрам резонатора относятся его частота и добротность. Недостатком волноводно-диэлектрического резонатора (ВДР) является уменьшение его добротности при приближении к диэлектрику короткозамыкающего поршня в процессе перестройки частоты. В работе исследована возможность увеличения собственной добротности ВДР, перестраиваемого с помощью резонансного короткозамыкающего поршня. Обнаружено и изучено негативное влияние на характеристики  $H_{111}$ -колебания в исследуемом резонаторе 3-см диапазона. Показано, как исключить такое влияние, чтобы получить собственные частоты и добротности основного колебания в ВДР, соответствующие расчетным данным во всем диапазоне частотной перестройки. Результаты исследования расширяют возможности практического использования такого резонатора. Ил. 2. Библиогр.: 3 назв.

**Ключевые слова:** волноводно-диэлектрический резонатор, колебания магнитного типа, собственные частота и добротность.

В работах [1, 2] была показана возможность существенного повышения собственной добротности электромагнитных колебаний  $H$ -типа в волноводно-диэлектрическом резонаторе (ВДР) с короткозамыкающим (КЗ) поршнем. Для этого поршень был выполнен резонансным, сходным с дроссельным поршнем в регулярном волноводе. Свойства ВДР с таким поршнем были исследованы на примере основного несимметричного колебания  $H_{111}$  в резонаторе на отрезке круглого запердельного волновода в 3-см диапазоне.

При изучении ВДР с резонансным короткозамыкающим (РКЗ) поршнем в миллиметровом (мм) диапазоне было обнаружено при определенных условиях негативное влияние поршня на электрические характеристики резонатора, в частности, на его добротность. Причиной этого могла быть большая неточность изготовления размеров резонансного поршня в мм диапазоне по сравнению с сантиметровым (см). Для проверки этого предположения мы провели дополнительные исследования в см диапазоне, выполнив РКЗ-поршень с меньшей точностью.

Результатам проведенных исследований посвящена настоящая статья.

**1. Методика расчета и техника эксперимента.** Численный расчет собственных частот  $f_{\text{расч}}$  и добротностей  $Q_{\text{расч}}$  основного несимметричного колебания  $H_{111}$  в ВДР на отрезке круглого запердельного волновода с КЗ-поршнем, как и ранее, осуществлялся по методике, описанной в работе [3]. В расчетах использовались следующие физические параметры материалов резонатора: диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь тефлона  $\epsilon = 2,05$  и  $\text{tg}\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$  соответственно; проводимость бескислородной меди  $\gamma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м. Решение электродинамической задачи по определению спектра собственных частот колебаний  $H$ -типа в ВДР с КЗ-поршнем про-

водилось методом частичных областей. Потери энергии в металлических частях резонатора, а также в диэлектрике не учитывались.

Собственная добротность колебания  $H_{111}$  рассчитывалась с привлечением понятия частичных добротностей. В этом случае учитывались потери энергии как в объеме диэлектрика, так и в металлических частях резонатора, включая КЗ-поршень.

На вставке рис. 1, а схематически изображены две модели исследуемого ВДР. Резонатор состоял из отрезка круглого запердельного волновода 1 длиной 100 мм, диэлектрического элемента (ДЭ) 2 длиной  $l$  и КЗ-поршня. Внутренний диаметр волновода и ДЭ был равен 13,05 мм. В случае КЗ-поршня 3 простейшей конструкции он представлял отрезок сплошного цилиндра, максимально плотно входящего в волновод. При перемещении КЗ-поршня к диэлектрику локальный зазор его со стенками волновода мог изменяться от 0 до 0,07 мм.

РКЗ-поршень состоял из двух четверть-волновых отрезков коаксиальных линий 4 и 5 с диаметрами стержня коаксиала  $2b$  и  $2a$  соответственно. Диаметры и длины этих отрезков коаксиалов были выбраны из условия резонанса на выбранной частоте по отношению к волне  $H_{111}$ . Полуволновая коаксиальная линия, составленная из отрезков 4 и 5, соединялась с частью поршня 3, плотно входящего в волновод.

В настоящих исследованиях использовались две модификации РКЗ-поршня. Поршень № 1 был рассчитан и изготовлен на частоту  $f_{\text{рез1}} = 13,12$  ГГц, а второй № 2 – на частоту  $f_{\text{рез2}} = 11,32$  ГГц. Размеры первого поршня были выполнены с точностью  $\pm 0,01 \div 0,02$  мм, а № 2 – с точностью на порядок хуже. Кроме этого, для контроля был сделан еще один поршень № 2'. Этот поршень был изготовлен с высокой точностью, аналогичной поршню № 1.

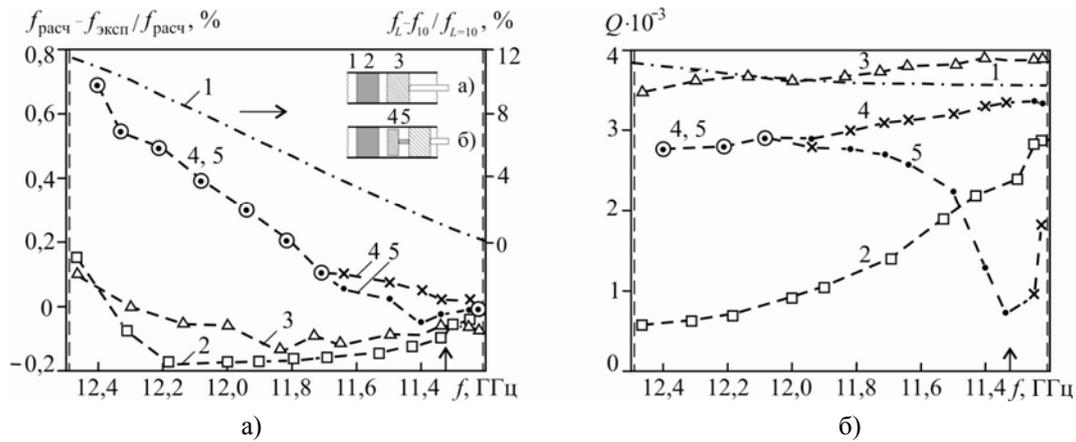


Рис. 1. Частотные характеристики и добротности  $H_{111}$ -колебания в ВДР с  $l = 8,02$  мм в интервале перестройки частоты: а) – 1 – расчетная; 2 – относительные изменения частот в случае обычного КЗ-поршня; 3 – в случае РКЗ-поршня № 1; 4, 5 – в случае РКЗ-поршня № 2; б) – 1 – расчетная изменения добротностей; 2 – КЗ-поршнем; 3 – с РКЗ-поршнем № 1; 4, 5 – с РКЗ-поршнем № 2

Частота РКЗ-поршня № 1 была выбрана заведомо больше максимальной частоты в диапазоне перестройки ВДР, а частоты поршней № 2 и 2' находились в диапазоне частотной перестройки резонатора. Заметим также, что поршни № 1 и № 2 отличались также отношением диаметров отрезков коаксиалов  $2a/2b$ . Для поршня № 1 оно составляло величину 0,42, а для № 2 и № 2' – 0,60. Большой диаметр  $2b$  был выбран одинаковым и равнялся 12,1 мм.

Измерение характеристик колебаний в резонаторе осуществлялось с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячей волны напряжения Р2-61 и частотомера ЧЗ-51. Возбуждающая петля помещалась в одном из отрезков пустого запердельного волновода. Величина связи регулировалась положением петли относительно ДЭ. Собственные добротности  $H_{111}$ -колебания определялись в режиме связи меньше критической, для чего при изменении положения поршня относительно ДЭ перемещался и узел связи.

Плавные изменения собственных частот  $H_{111}$ -колебания в ВДР производились с помощью обычного или резонансного КЗ-поршня, поочередно помещаемых в одно из плеч запердельного волновода.

**2. Основные результаты.** Как известно, резонансное колебание  $H_{111}$  в ВДР на круглом запердельном волноводе является поляризационно-вырожденным. В реальных условиях эксперимента вырождение снимается благодаря наличию в резонаторе небольших неоднородностей. Колебание  $H_{111}$  в этом случае фиксируется в виде двух рядом расположенных по частоте резонансов с близкой добротностью. Собственная частота и добротность колебания  $H_{111}$  в настоящей статье будут приведены в виде средних величин  $f_{\text{эксп}}$  и  $Q_{\text{эксп}}$  двух вырожденных колебаний. В случае необходимости такие зависимости для обоих вырожденных колебаний будут представлены отдельно.

На рис. 1 и 2 приведены характеристики  $H_{111}$ -колебания в ВДР для двух выбранных длин ДЭ  $l_1 = 8,02$  мм и  $l_2 = 10,03$  мм соответственно. По осям абсцисс отложены расчетные значения частот при разных положениях поршня  $L = 10 \pm 0$  мм относительно ДЭ. Граничные положения частот отмечены пунктирными вертикальными линиями. На рис. 1 они соответствуют частотам 11,20 ГГц (при  $L = 10$  мм) и 12,49 ГГц (при  $L = 0$ ), а на рис. 2 – 10,86 и 11,79 ГГц. Фактически на осях абсцисс обозначен частотный диапазон перестройки ВДР с помощью поршня для каждой из длин ДЭ.

По осям ординат рис. 1, а и 2, а в процентах отложена величина  $\frac{f_{\text{расч}} - f_{\text{эксп}}}{f_{\text{расч}}}$ , характери-

зующая отклонение экспериментального значения резонансной частоты резонатора от расчетного. На осях ординат на этих рисунках справа также в процентах приведена величина  $\frac{f_L - f_{L=10}}{f_{L=10}}$ .

Она характеризует относительную перестройку частоты при перемещении поршня. На рис. 1, б и 2, б представлены зависимости собственной добротности  $H_{111}$ -колебания в резонаторе, соответствующие условиям рис. 1, а и 2, а.

На рис. 1, а и 2, а кривые 1 характеризуют расчетные зависимости изменения частоты при перемещении поршня, а на рис. 1, б и 2, б – расчетные зависимости соответствующих добротностей. Кривая 2 рис. 1, а и 2, а характеризует отличие экспериментальных значений частоты от расчетных при перемещении поршня простейшей конструкции, а кривая 3 – при перемещении РКЗ-поршня № 1. Соответствующие им зависимости добротностей представлены на рис. 1, б и 2, б кривыми 2 и 3 соответственно. В этом случае шкала частот на осях абсцисс рассматривалась как экспериментальная.

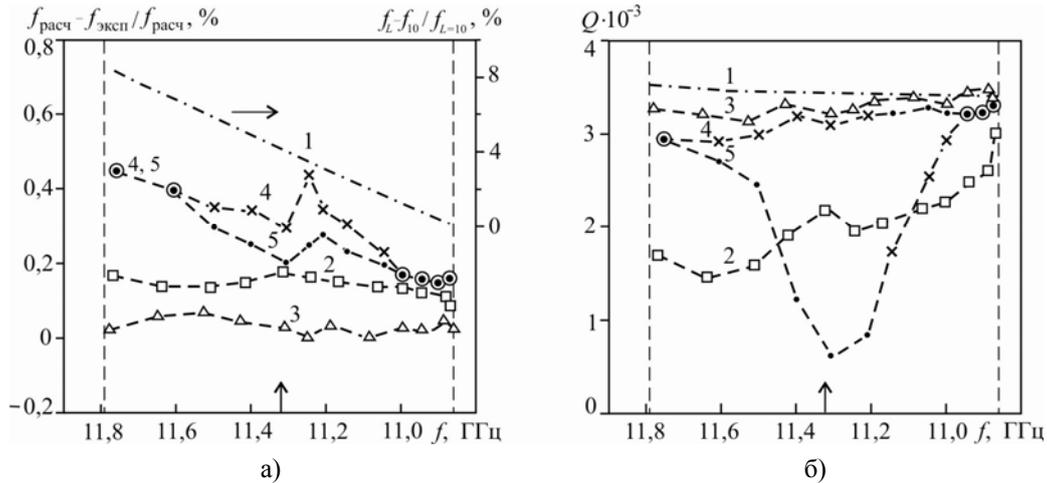


Рис. 2. Частотные характеристики и добротности  $H_{111}$ -колебания в ВДР с  $l = 10,03$  мм в интервале перестройки частоты: а) – 1 – расчетная; 2 – относительные изменения частот в случае обычного КЗ-поршня; 3 – в случае РКЗ-поршня № 1; 4, 5 – в случае РКЗ-поршня № 2; б) 1 – расчетная изменения добротностей; 2 – с КЗ-поршнем; 3 – с РКЗ-поршнем № 1; 4, 5 – с РКЗ-поршнем № 2

В связи с поставленной задачей особый интерес представляют экспериментальные зависимости, полученные с РКЗ-поршнем № 2 (кривые 4 и 5). Здесь средние значения частот и добротностей  $H_{111}$  вырожденных колебаний обозначены кружками  $\odot$ ; в случае низкочастотного вырожденного колебания – крестиками  $\times$ ; а высокочастотного – точками  $\bullet$ .

Видно, что негативное воздействие РКЗ-поршня № 2 на добротность вырожденного колебания происходит поочередно: с приближением поршня вначале – на низкочастотное колебание, а затем – на высокочастотное. Напомним, что резонансная частота РКЗ-поршня № 2 равна 11,32 ГГц, которая на осях абсцисс отмечена стрелочкой.

Количественно и качественно зависимость 5 РКЗ-поршня № 2 на рис. 1, б и 2, б отличается от соответствующих кривых 3, полученных с РКЗ-поршнем № 1. Видно, что зависимости 5 носят резонансный характер в области частот, близких к резонансной частоте этого поршня. Можно предположить, что кривые 4 отражают истинную добротность  $H_{111}$ -колебания, а кривые 5 характеризуют поочередное понижение добротности каждого из вырожденных колебаний под влиянием поршня. Такое предположение подтвердилось контрольными измерениями с более точно изготовленным РКЗ-поршнем № 2'. В этом случае была получена зависимость добротности, практически совпадающая с кривой 4, поэтому на рисунке она не приведена.

Как видно из кривых 4 и 5 рис. 1 и 2, влияние РКЗ-поршня № 2 сказывается как на частотах, так и на добротностях колебания.

Отметим, что кривая добротности 3 несколько выше кривой 4 в связи с разным отношением диаметров коаксиалов в поршне № 1 и № 2, 2'.

Данные с РКЗ-поршнем № 1 (кривые 3 рис. 1 и 2) показывают, что с таким поршнем имеет место хорошее соответствие экспериментальных данных с расчетными значениями как по частоте, так и по добротности колебания.

Мы провели измерения характеристик  $H_{111}$ -колебания в ВДР с диэлектриками разной длины от 6 до 20 мм в условиях максимального влияния поршня, т. е. при  $L = 0$ .

Эти измерения показали, что во всем выбранном интервале длин ДЭ в ВДР с РКЗ-поршнем № 1 экспериментальные значения собственных частот и добротностей колебаний соответствовали расчетным данным. Добротности  $H_{111}$ -колебания в резонаторе с обычным КЗ-поршнем по мере уменьшения длины ДЭ понижались с 2 000 до 500. С РКЗ-поршнем № 2 зависимости собственных частот и добротностей от длины ДЭ качественно напоминали кривые рис. 2. При этом негативное влияние РКЗ-поршня проявлялось при длинах ДЭ в интервале 12÷18 мм. Вместе с тем РКЗ-поршень № 2', изготовленный с более высокой точностью, обеспечивал характеристики ВДР, аналогичные полученным с РКЗ-поршнем № 1. Отсюда можно сделать вывод, что если по какой-либо причине прикладного характера потребуется РКЗ-поршень с резонансной частотой, находящейся в диапазоне частотной перестройки резонатора, то в этом случае потребуется изготовление КЗ-поршня с повышенной точностью.

Сопоставление данных, полученных с РКЗ-поршнем № 1 в ВДР по сравнению с результатами с обычным КЗ-поршнем, показало, что во всем интервале изменения длин ДЭ собственные добротности  $H_{111}$ -колебания были значительно выше. Это увеличение было тем больше, чем меньше была длина ДЭ, и составляло 66÷150 % при изменении  $l$  ДЭ от 20 до 6 мм.

**Выводы.** На основе проведенных исследований можно заключить, что при использовании РКЗ-поршня в ВДР 3-см диапазона можно обеспечить существенное повышение добротности колебаний  $H$ -типа в ВДР и получить собственные частоты и добротности резонатора, соответствующие расчетным значениям. Однако при определенных условиях может происходить негативное влияние такого поршня на собственные частоты и добротности резонатора.

Чтобы избежать этого влияния, целесообразно выбирать резонансную частоту поршня выше наиболее высокой из частот ВДР в диапазоне перестройки частоты резонатора. В этом случае размеры РКЗ поршня при его изготовлении необходимо выполнять с погрешностью не хуже нескольких сотых миллиметра.

Мы провели предварительные исследования ВДР с резонансным КЗ-поршнем, рассчитанным в мм диапазоне с учетом высказанных замечаний, и получили хорошие предварительные данные. Результаты исследований по реализации ВДР с резонансным поршнем в мм диапазоне будут изложены в следующей статье.

#### Библиографический список

1. Моторненко А. П. Волноводно-диэлектрический резонатор с резонансным короткозамыкающим поршнем / А. П. Моторненко, И. Г. Скуратовский, О. И. Хазов // 22-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2012): тез. докл. – Севастополь, 2012. – С. 579–580.
2. Моторненко А. П. Волноводно-диэлектрический резонатор с резонансным короткозамыкающим поршнем / А. П. Моторненко, И. Г. Скуратовский, О. И. Хазов // Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 4. – С. 14–17.
3. Макеев Ю. Г. Исследование электромагнитных характеристик цилиндрического волноводно-диэлектрического резонатора / Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1999. – 4, № 1. – С. 37–42.

Рукопись поступила 06.02.2014.

R. I. Bilous, A. P. Motornenko,  
I. G. Skuratovskiy, O. I. Khazov

#### PECULIARITIES OF THE WAVEGUIDE-DIELECTRIC RESONATOR WITH RESONANCE SHORT-CIRCUIT PLUNGER

The fundamental parameters of the resonator are the frequency and  $Q$ -factor. The drawback of the waveguide-dielectric resonator is the decrease of the  $Q$ -factor when the short-circuit plunger approaches the dielectric in the course of frequency tuning. In this paper the possibility of increase of eigen  $Q$ -factor of the waveguide-dielectric resonator tunable with the resonance short-circuit plunger has been investigated. The negative influence of the resonance short-circuit plunger on the  $H_{111}$  mode characteristics in the investigated resonator of the 3-cm band has been found out and studied. It was demonstrated how to eliminate this influence in order to obtain the measurement of eigen frequencies and  $Q$ -factors of the main mode in the waveguide-dielectric resonator corresponding to the computed data for all frequency tuning band. The results of the investigation extend the possibility of the practical use of this resonator.

**Key words:** waveguide-dielectric resonator, magnetic type oscillations, eigen frequency and  $Q$ -factor.

Р. І. Білоус, О. П. Моторненко,  
І. Г. Скуратовський, О. І. Хазов

#### ОСОБЛИВОСТІ ХВИЛЕВОДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА З РЕЗОНАНСНИМ КОРОТКОЗАМИКАЮЧИМ ПОРШНЕМ

До основних параметрів резонатора відносять його частоту та добротність. Недоліком хвилеводно-діелектричного резонатора (ХДР) є зменшення його добротності при наближенні до діелектрика короткозамикаючого поршня в процесі перебудови частоти. У роботі досліджено можливість збільшення власної добротності ХДР, що перебудовується за допомогою резонансного короткозамикаючого поршня. Виявлено та вивчено негативний вплив резонансного короткозамикаючого поршня на характеристики  $H_{111}$ -коливання в досліджуваному резонаторі 3-см діапазону. Показано, як вилучити такий вплив, щоб отримати власні частоти й добротності основного коливання в ХДР, які відповідають розрахунковим даним у всьому діапазоні частотної перебудови. Результати дослідження розширюють можливості практичного використання такого резонатора.

**Ключові слова:** хвилеводно-діелектричний резонатор, коливання магнітного типу, власні частота та добротність.