

*Р.И. БЕЛОУС, канд. физ.-мат. наук, С.П. МАРТЫНЮК, канд. физ.-мат. наук,  
А.П. МОТОРЕНКО, канд. физ.-мат. наук, И.Г. СКУРАТОВСКИЙ, О.И. ХАЗОВ*

## СВОЙСТВА ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С РЕЗОНАНСНЫМ КОРОТКОЗАМЫКАЮЩИМ ПОРШНЕМ

### Введение

В настоящее время волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР) занимают достойное место в ряду резонансных структур волноводно-диэлектрического типа [1, 2]. Возможности практического использования таких резонаторов были расширены введением перестраивающего короткозамыкающего поршня (КЗ поршня) [3]. Однако при экспериментальном исследовании ВДР с КЗ поршнем выяснилось, что в процессе перестройки резонансной частоты с помощью поршня простейшей конструкции происходит уменьшение добротности колебаний [4]. Проведенные недавно исследования показали возможность ослабления влияния этого недостатка за счет использования в ВДР специально рассчитанного резонансного КЗ поршня (РКЗ поршня) [5].

Настоящая работа посвящена исследованию свойств ВДР с РКЗ поршнем. Приведены экспериментальные характеристики такого резонатора для нескольких поршней, рассчитанных и изготовленных на разные частоты. Проведено сравнение полученных зависимостей с расчетными данными и с характеристиками ВДР с обычным КЗ поршнем.

### Основная часть

Волноводно-диэлектрический резонатор состоит из отрезка прямоугольного или круглого волновода, частично заполненного диэлектриком с небольшой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon < 20$ ) [1]. Обычно в случае использования перестраивающего КЗ поршня он помещается в одном из плеч волновода ВДР, а в другом находится узел связи. Основным требованием, предъявляемым к поршню, является получение стоячей волны в линии при КСВ близком к бесконечности [6].

В работе [4] были проведены экспериментальные исследования ВДР с КЗ поршнем в двух частотных диапазонах: сантиметровом (см) и миллиметровом (мм). Экспериментально было показано, что в случае поршня простейшей конструкции для плавной механической перестройки частоты  $H_{111}$  колебания резонансная частота изменяется в соответствии с расчетной с точностью до  $\pm 0,2\%$ . Экспериментальные значения собственных добротностей были ниже расчетных, причем тем ниже, чем ближе КЗ поршень находился к диэлектрику. Основной причиной этого является несовершенный контакт КЗ поршня со стенками круглого волновода. В работе [5] была предпринята попытка использовать в ВДР резонансный КЗ поршень для повышения собственной добротности  $H_{111}$  колебания.

При проектировании РКЗ поршня использовались свойства четвертьволновых и полуволновых коаксиальных резонаторов. Напомним, что полуволновая линия (коаксиальная или волноводная) обладает трансформирующим действием и переносит любое сопротивление в пространстве, не изменяя его величины. При закороченной на одном конце идеальной четвертьволновой линии ее входное сопротивление является бесконечным, что эквивалентно параллельному резонансному контуру. Увеличение длины линии приводит к постепенному уменьшению модуля ее сопротивления, и при достижении ее длины, равной или кратной половине длины волны в волноводе, ее входное сопротивление становится равным нулю (в этом случае реализуется резонанс последовательного колебательного контура).

На вставке рис. 1, а схематически изображен ВДР с РКЗ поршнем. В отрезок круглого волновода 1 с диэлектрическим элементом 2 помещен поршень, который представляет

последовательное соединение двух четвертьволновых коаксиальных отрезков 3 и 4 и отрезка цилиндрической формы 5, плотно входящего в волновод. Четвертьволновые отрезки линий были рассчитаны на одну из резонансных частот ВДР. Можно ожидать, что в этом случае для выбранной частоты в сечении *c-c*, показанном на вставке, будет иметь место достаточно хороший электродинамический контакт.

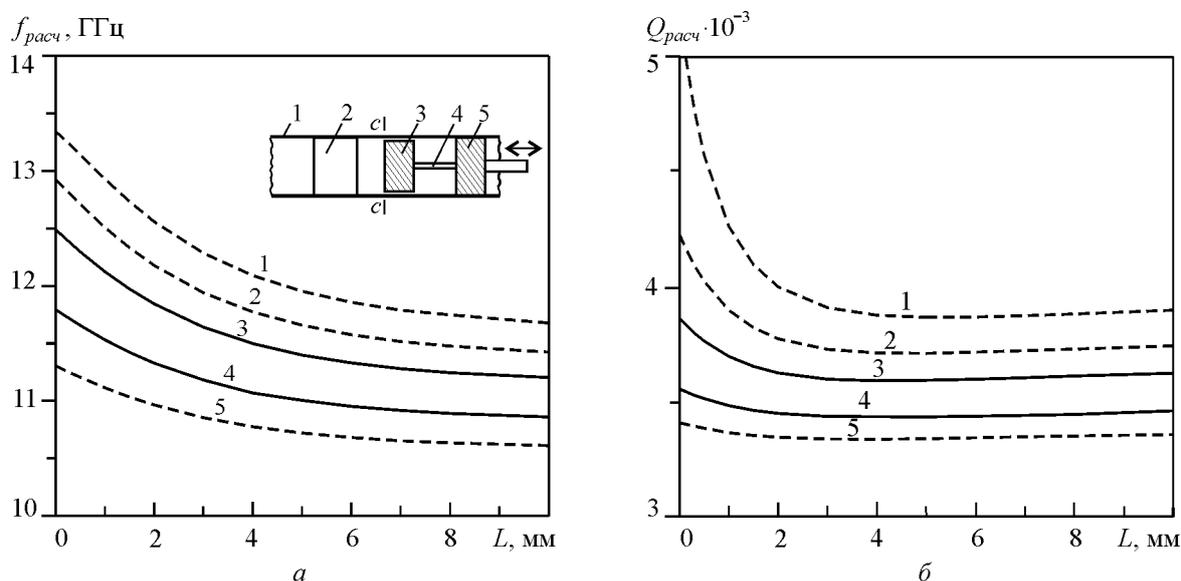


Рис. 1

Свойства РКЗ поршня обусловлены тем, что он, в отличие от дроссельного поршня, перемещается не в регулярном волноводе, а в поле затухающей волны запредельного волновода. В работе [5] на одном из вариантов ВДР с использованием РКЗ поршня были получены обнадеживающие результаты, что стимулировало настоящие исследования.

Макет исследуемого резонатора состоял из отрезка круглого волновода из бескислородной меди диаметром 13,05 мм, внутри которого поочередно помещались диэлектрические элементы (ДЭ) разной длины  $l$  из тефлона. В одной из частей отрезка пустого волновода находился КЗ поршень цилиндрической формы, изготовленный также из меди, а вторая часть использовалась для размещения узла связи резонатора с источником возбуждения колебаний, выполненного в виде петли. Ввиду несовершенства изготовления волновода и КЗ поршня величина зазора между КЗ поршнем и внутренней стенкой волновода в процессе его перемещения составляла от 0 до 0,07 мм. Исследовались резонансные свойства основного несимметричного колебания магнитного типа  $H_{111}$ . Необходимые расчетные значения собственных частот и добротностей колебаний при перемещении КЗ поршня были получены по выражениям, приведенным в работе [7]. При расчетах использовались следующие параметры тефлона и меди:  $\varepsilon = 2,05$ ;  $tg\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$ ;  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м.

Возбуждение колебаний в резонаторе и измерение частот осуществлялось с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-61 и частотомера ЧЗ-51. Возбуждающая петля помещалась в части запредельного волновода, противоположной отрезку с КЗ или РКЗ поршнем. Величина связи регулировалась изменением положения петли относительно ДЭ. Собственные добротности  $H_{111}$  колебаний определялись в режиме связи ниже критической.

Первоначально производились измерения величин собственной частоты  $f$  и добротности  $Q$   $H_{111}$  колебания, названные нами контрольными. Суть их состояла в том, чтобы исключить влияние поршня, удалив его из резонатора. В этом случае для закорачивания одного из торцов волновода использовался медный диск, диаметр которого больше диаметра волновода. Для улучшения контакта между диском и торцом волновода соответствующие по-

верхности притирались, и диск плотно прижимался к торцу волновода. Необходимые расстояния от ДЭ до закороченного участка волновода  $L$  обеспечивались перемещением ДЭ. Очевидно, что в случае  $L = 0$  ДЭ был прижат к диску.

Плавные изменения собственных частот и добротностей колебаний в ВДР производились с помощью обычного или резонансного КЗ поршней, которые поочередно помещались в одно из плеч волновода.

На рис. 1 приведены характерные расчетные зависимости собственных частот  $f_{\delta\dot{a}\dot{n}^+}$  и добротностей  $Q_{\delta\dot{a}\dot{n}^+}$   $H_{111}$  колебания в ВДР от положения поршня для разных длин ДЭ  $l$  (кривые 1 – 5). При расчете металлические части ВДР и КЗ поршень были выбраны медными, а ДЭ – из тефлона. Необходимые расчетные данные были получены с использованием выражений, приведенных в работе [7]. Кривые 1 – 5 соответствуют длине ДЭ  $l = 6,02$ ;  $7,00$ ;  $8,02$ ;  $10,03$  и  $12,00$  мм соответственно. При этом сплошными кривыми 3 и 4 представлены зависимости для длин ДЭ, выбранных для экспериментального исследования. Были рассчитаны и изготовлены три РКЗ поршня: №1 – №3, рассчитанные на резонансную частоту  $f_{\delta\dot{a}\dot{c}} = 11,800$ ;  $12,490$  и  $14,000$  ГГц соответственно.

Как следует из рис. 1, а, для ДЭ длиной  $l = 8,02$  мм (кривая 3)  $f_{\delta\dot{a}\dot{c}}$  поршня № 1 соответствует  $f_{\delta\dot{a}\dot{n}^+}$   $H_{111}$  колебания в ВДР при  $L \approx 2,2$  мм, № 2 – при  $L = 0$  и № 3 – когда резонансная частота РКЗ поршня значительно выше частоты  $H_{111}$  колебания при  $L = 0$  ( $f_{\delta\dot{a}\dot{c}} \gg f_{\delta\dot{a}\dot{c}}^{L=0}$ ). Для ДЭ длиной  $l = 10,03$  мм (кривая 3)  $f_{\delta\dot{a}\dot{c}}$  поршня № 1 соответствует расчетной частоте  $H_{111}$  колебания ВДР при  $L = 0$ ; № 2 –  $f_{\delta\dot{a}\dot{c}} > f_{\delta\dot{a}\dot{c}}^{L=0}$ , а № 3 –  $f_{\delta\dot{a}\dot{c}} \gg f_{\delta\dot{a}\dot{c}}^{L=0}$ .

Большие диаметры составной части 3 РКЗ поршня были выбраны равными 11,8 мм (поршни № 1 и 3) и 12,0 мм (№ 2), а меньшие 4 – соответственно 5,0 мм (№ 1) и 7,0 мм (№ 2 и 3). Указанные диаметры отрезков коаксиальных линий РКЗ поршней выбирались из условия минимального сопротивления в сечении  $c-c$  (см. вставку на рис. 1, а), а также требований технологичности их изготовления. При расчете длин четвертьволновых отрезков учитывалась дисперсионность волны  $H_{11}$ . Необходимые значения критической длины волны в коаксиальной линии были получены с использованием выражений, приведенных в работе [8]. При этом значения резонансных частот четвертьволновых отрезков 3 и 4 изготовленного РКЗ поршня отличались друг от друга не более чем на 1 %.

На рис. 2, а приведены кривые относительного отклонения от расчетных экспериментально полученных резонансных частот  $f_{\delta\dot{a}\dot{c}}$   $H_{111}$  колебания в ВДР в процентах

$$\frac{\Delta f}{f_{\delta\dot{a}\dot{n}^+}} = \frac{f_{\delta\dot{a}\dot{n}^+} - f_{\delta\dot{a}\dot{c}}}{f_{\delta\dot{a}\dot{n}^+}},$$

а на рис. 2, б – экспериментальные зависимости собственных добротностей, соответствующие частотным зависимостям, от положения КЗ поршня  $L$  для длины ДЭ 8,02 мм. Кривой 1 представлены результаты контрольных измерений; 2 – результаты измерения с КЗ поршнем простейшей конструкции, а кривые 3–5 – с РКЗ поршнями № 1 – 3 соответственно.

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости для длины ДЭ  $l = 10,03$  мм. Здесь кривая 1 – результат контрольных измерений; 2 – измерения с обычным КЗ поршнем; 3 и 4 – с РКЗ поршнями № 1 и 3.

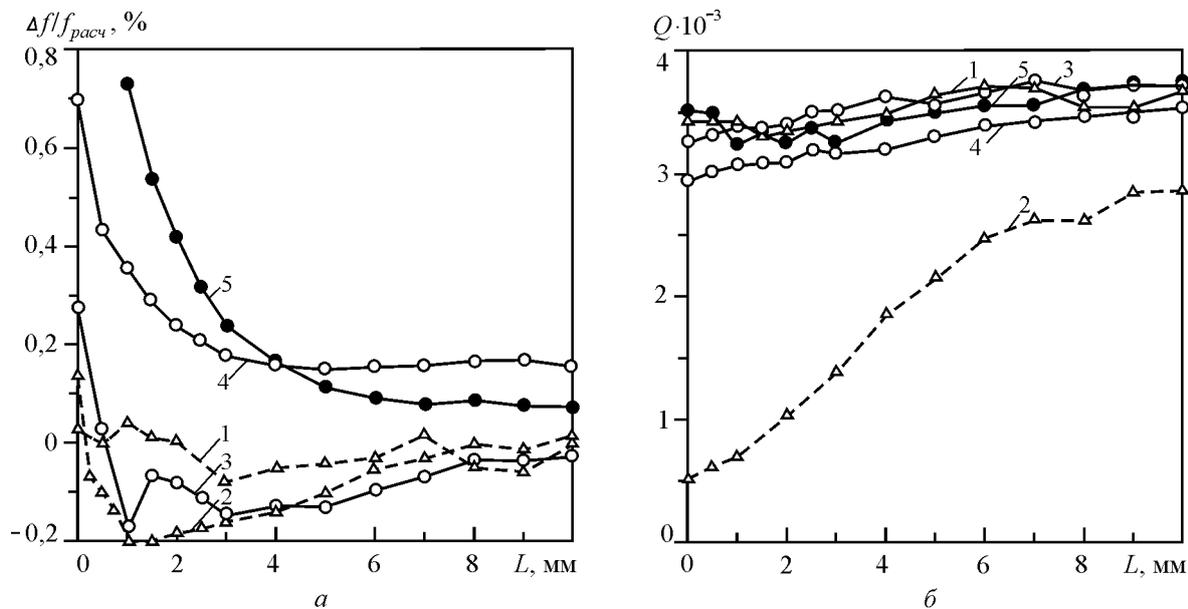


Рис. 2

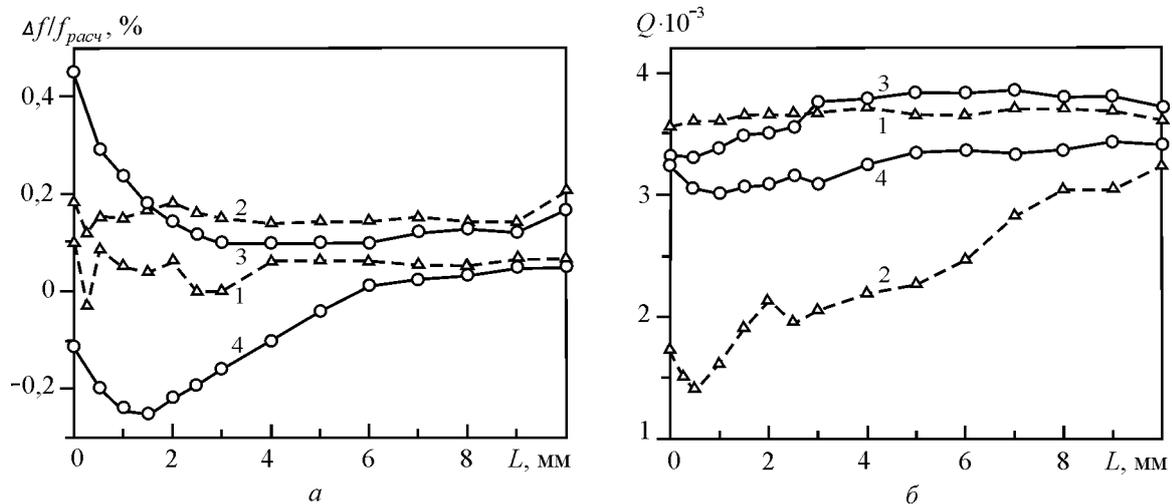


Рис. 3

Как видно из рис. 3, а, для всех выбранных условий экспериментальные характеристики резонансной частоты  $H_{111}$  колебания в ВДР достаточно хорошо совпадают с расчетными данными, причем при использовании РКЗ поршней, рассчитанных на разные частоты, значения резонансной частоты  $H_{111}$  колебания отличаются от расчетных менее чем на 1 %. Это несколько хуже, чем в случае обычного КЗ поршня или при контрольных измерениях.

Особый интерес представляют семейства кривых собственных добротностей  $H_{111}$  колебаний, приведенных на рис. 2, б и 3, б. Сопоставление кривых 1 контрольных измерений с соответствующими расчетными данными (кривые 3 и 4 на рис. 1, б) показывает достаточно хорошее соответствие между ними. Однако при использовании обычного КЗ поршня, как видно из рисунков, происходит уменьшение добротности по мере приближения его к ДЭ. Например, для  $l = 8,02 мм$  добротность уменьшается по сравнению с расчетным значением примерно на 21 % при  $L = 10 мм$  и более чем на 86 % при  $L = 0$ , а для  $l = 10,03 мм$  соответственно на 3 % при  $L = 10$  и на 53 % при  $L = 0$ . При использовании РКЗ поршней, рассчитанных на разные частоты, экспериментальные зависимости добротностей практически близки как к контрольным, так и к соответствующим им расчетным данным. Следует отме-

тять, что все эти зависимости характеризуют добротности, практически не изменяющиеся при изменении частоты, что важно при практическом использовании такого резонатора.

### **Заключение**

На основе проведенных исследований можно заключить, что использование резонансного КЗ поршня в ВДР позволяет существенно повысить собственную добротность резонатора во всем диапазоне перестройки частоты.

Важно отметить, что расчетные значения резонансных частот и добротностей колебания  $H_{111}$  в ВДР достигаются и с помощью одного РКЗ поршня. В нашем случае это может быть РКЗ поршень с резонансной частотой более высокой, чем максимальная частота в диапазоне перестройки частоты.

В дальнейшем предполагается изучение возможности построения ВДР с РКЗ поршнем в мм-диапазоне волн на  $H$  колебаниях, а также его использование в волноводно-коаксиальном резонаторе на  $T$  колебаниях.

**Список литературы:** 1. *Диэлектрические резонаторы* ; под ред. М.Е. Ильченко. – М. : Радио и связь, 1989. – 328 с. 2. *Каплевич, Б.Ю., Трубехин Е.Р.* Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с. 3. *Макеев, Ю.Г., Моторненко, А.П.* Исследование электрических характеристик цилиндрического ВДР // Радиофизика и электроника / Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 1999. – Т. 4. – №1. – С. 37-42. 4. *Белоус, Р.И., Мартынюк, С.П., Моторненко, А.П., Скуратовский, И.Г., Хазов, О.И.* Особенности механической перестройки резонансной частоты волноводно-диэлектрического резонатора // Радиотехника. – 2012. – Вып. 168. – С. 103-107. 5. *Моторненко, А.П., Скуратовский, И.Г., Хазов, О.И.* Волноводно-диэлектрический резонатор с резонансным короткозамыкающим поршнем // Радиофизика и электроника / Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2012. – Т. 3(17). – № 4. – С. 14-17. 6. *Лебедев, И.В.* Техника и приборы сверхвысоких частот / И.В.Лебедев. – М. ; Л. :Госэнергоиздат, 1961. – Т. 1. – 512 с. 7. *Белоус, Р.И., Макеев, Ю.Г., Моторненко, А.П., Моторненко, Л.П.* Расчет и экспериментальное исследование волноводно-диэлектрического резонатора // Радиотехника. – 2003. – Вып. 131. – С. 139-144. 8. *Никольский, В.В.* Теория электромагнитного поля / В.В. Никольский. – М. : Высш. шк., 1961. – 372 с.

*Институт радиофизики, и электроники  
им. А.Я. Усикова НАН Украины*

*Поступила в редколлегию 23.05.2013*