

**Р. И. Белоус, С. П. Мартынюк, А. П. Моторенко, И. Г. Скуратовский**  
 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)

## СВОЙСТВА ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

Резонансные структуры служат основой многих приборов и радиотехнических устройств, поэтому проблема создания эффективного перестраиваемого резонатора является актуальной и важной. Использование волноводно-диэлектрического резонатора обеспечивает возможность механической перестройки частоты в широком диапазоне, однако при этом изменяется его добротность. Последние исследования показали, что уменьшение собственной добротности перестраиваемого волноводно-диэлектрического резонатора на отрезке круглого запердельного волновода может быть ослаблено применением резонансного короткозамыкающего поршня, рассчитанного на определенную частоту. Исследования были проведены в сантиметровом диапазоне. Настоящая работа посвящена изучению возможности повышения добротности резонатора волноводно-диэлектрического типа в миллиметровом диапазоне, где влияние несовершенства контакта поршня со стенками волновода особенно существенно. В результате проведенных исследований была получена добротность резонатора на отрезке круглого запердельного волновода с диэлектриком из тефлона в 8-мм диапазоне, превышающая 2 000 во всем интервале частотной перестройки. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

**Ключевые слова:** волноводно-диэлектрический резонатор, запердельный волновод, собственные частота и добротность.

Волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР) находят практическое применение в технике сверхвысоких частот, в измерительной технике [1] и продолжают оставаться объектом фундаментальных и прикладных исследований. ВДР на отрезке круглого запердельного волновода с перестраиваемым короткозамыкающим (КЗ) поршнем имеет разреженный спектр собственных колебаний и обладает широким интервалом частотной перестройки; он прост в изготовлении, имеет малые размеры и вес. Собственные частоты и добротности резонатора рассчитываются по методике, изложенной в работе [2]. Как показали последние экспериментальные исследования [3], недостаток перестраиваемого ВДР обусловлен зависимостью его собственной добротности от положения КЗ-поршня. Причиной этого является несовершенный контакт поверхности поршня со стенками волновода, что приводит в процессе его перемещения к образованию неконтролируемого и изменяющегося по величине локального зазора. В работе [3] было показано, что собственная добротность ВДР, в котором возбуждались основные несимметричные колебания магнитного типа  $H_{111}$ , по мере приближения поршня к диэлектрику заметно уменьшается. Вблизи диэлектрика уменьшение величины добротности  $Q$  происходило в несколько раз.

В связи с этим возникает потребность устранения этого недостатка или, по крайней мере, уменьшения его влияния.

В работах [4, 5] было показано, что проблему повышения добротности перестраиваемого ВДР можно решить с помощью резонансного КЗ (РКЗ) поршня, рассчитанного на определенную частоту. Исследования были проведены в сантиметровом (см) диапазоне. Возникает

вопрос: можно ли указанным способом повысить собственную добротность ВДР в миллиметровом (мм) диапазоне, где влияние несовершенства контакта поршня со стенками волновода более существенно?

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик ВДР с РКЗ-поршнем в мм диапазоне.

**1. Техника эксперимента и методика расчетов.** Экспериментальный макет ВДР представлял отрезок круглого запердельного волновода диаметром 4,59 мм, частично заполненный диэлектриком длиной  $l$ . С одной стороны от диэлектрического элемента (ДЭ) на расстоянии  $L$  размещался КЗ- или РКЗ-поршень.

Обычный КЗ-поршень представлял отрезок сплошного цилиндра с размерами, обеспечивающими максимально плотное помещение его в волновод. Поршень мог перемещаться в волноводе до соприкосновения с ДЭ.

РКЗ-поршень состоял из последовательного соединения двух четвертьволновых отрезков коаксиальной линии с разными волновыми сопротивлениями и части сплошного цилиндра, плотно входящей в волновод. Образованный полуволновой отрезок неоднородной коаксиальной линии, закороченный на конце, в идеале имеет нулевое входное сопротивление, что позволяет использовать его для улучшения электродинамического контакта поршня в волноводе [6]. Все металлические части резонатора были изготовлены из бескислородной меди ( $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м), а ДЭ разной длины – из тефлона ( $\varepsilon = 2,05$ ,  $\text{tg } \delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$ ).

ДЭ поочередно помещались в волновод без зазора между поверхностью тефлона и стенками волновода.

Возбуждение  $H_{111}$ -колебаний в резонаторе и измерение частот и добротностей производились с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячей волны напряжения P2-65 и прокалиброванного волномера. Величина связи устанавливалась изменением длины запредельного участка волновода перемещением ДЭ. В качестве узла возбуждения использовалось соединение торцов отрезка стандартного волновода мм диапазона панорамы и запредельного волновода. Собственные добротности резонатора определялись в режиме связи ниже критической.

Численный расчет собственных частот и добротностей ВДР с КЗ-поршнем осуществлялся по методике работы [2].

В настоящих исследованиях использовался обычный КЗ-поршень, при перемещении которого к диэлектрику зазор между ним и стенками волновода изменялся в пределах  $0 \pm 0,04$  мм.

Резонансная частота РКЗ-поршня в соответствии с выводами работ [4, 5] выбиралась из условия, чтобы она была больше наиболее высокой из частот в интервале частотной перестройки резонатора. Было изготовлено три варианта РКЗ-поршня, рассчитанного на разную резонансную частоту. Поршень № 1 был рассчитан на частоту  $f_1 = 38,5$  ГГц, № 2 – на  $f_2 = 40,0$  ГГц и № 3 – на  $f_3 = 36,4$  ГГц.

В таблицу для наглядности сведены для выбранных длин ДЭ максимальные расчетные значения частот в каждом интервале частотной перестройки, полученные с КЗ-поршнем, а также резонансные частоты РКЗ-поршней; указана также выбранная величина диаметров четверть-волновых отрезков коаксиалов  $D_1$  и  $D_2$  каждого РКЗ-поршня. При расчете длин отрезков коаксиалов учитывались дисперсионные свойства волны  $H_{11}$  в коаксиальной линии.

Параметры резонансных короткозамыкающих поршней

$l$ , мм	1,45	2,16	3,23
$f_{L=0}$ , ГГц	37,74*	37,74	34,23
$f_{\text{РКЗ-поршня}}$ , ГГц	№ 1 – 38,5	№ 2 – 40,0	№ 3 – 36,4
$D_1$ , мм	4,0	4,0	4,0
$D_2$ , мм	2,2	2,5	2,0

\*Максимальная частота резонатора 37,73 ГГц соответствует в случае ДЭ длиной  $l_1$  положению поршня при  $L = 0,71$  мм

Как видно из таблицы, расчетные частоты РКЗ-поршней удовлетворяли условиям для ДЭ длиной  $l_1 - f_1 > f_{L=0,71\text{мм}}$ , для  $l_2 - f_2 \gg f_{L=0}$ , для  $l_3 - f_3 \gg f_{L=0}$ . Дополнительно РКЗ-поршень № 1 удовлетворял условиям  $f_1 \gg f_3$ . На примере

ВДР с ДЭ длиной  $l_3$  мы хотели выяснить, как зависит добротность резонатора при использовании двух РКЗ-поршней с сильно отличающимися резонансными частотами.

**2. Основные результаты.** На рис. 1–3 приведены зависимости собственных частот (рис. 1, а–3, а) и добротностей (рис. 1, б–3, б)  $H_{111}$ -колебания в ВДР с разными длинами ДЭ: 1,45; 2,16 и 3,23 мм соответственно от положения поршня.

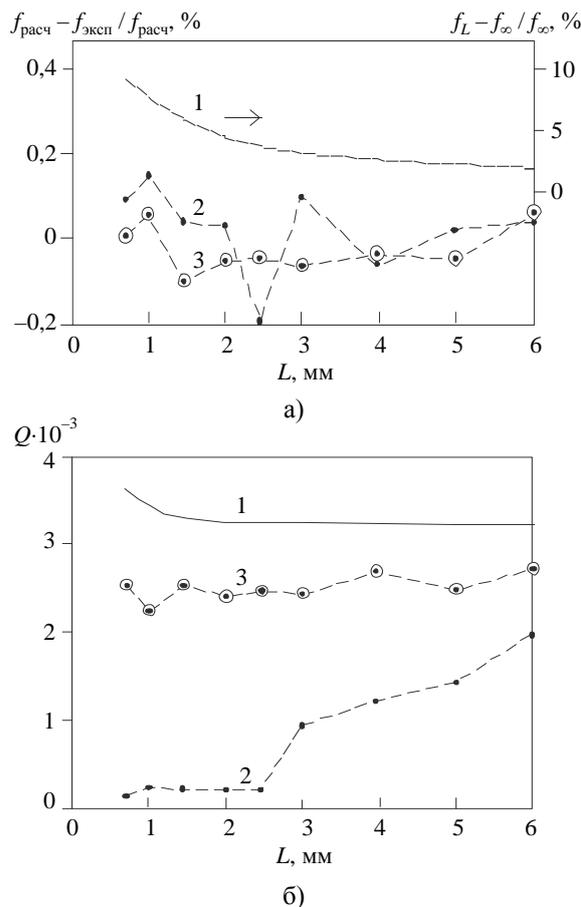


Рис. 1. Характеристики ВДР с ДЭ длиной  $l_1 = 1,45$  мм: а) – собственных частот; б) – собственных добротностей

На рис. 1, а–3, а представлены: 1 – расчетные зависимости изменения частоты  $\frac{f_L - f_\infty}{f_\infty}$

в процентах, где  $f_L$  – частота  $H_{111}$ -колебания в резонаторе с поршнем на расстоянии  $L$  от ДЭ, а  $f_\infty$  – частота колебания в отсутствие поршня;

2 – зависимости  $\frac{f_{\text{расч}} - f_{\text{эксп}}}{f_{\text{расч}}}$  в процентах, характеризующие отличие измеренных значений частоты от расчетных в случае КЗ-поршня;

3 – аналогичные зависимости в случае РКЗ-поршня: на рис. 1, а – в случае РКЗ-поршня № 1, на рис. 2, а –

№ 2, а на рис. 3 – № 3, а также № 1 (кривая 4). Напомним, что резонансные частоты этих поршней указаны в таблице.

На рис. 1, б–3, б приведены зависимости добротностей от положения поршня: 1 – расчетные зависимости; 2 – экспериментальные с обычным КЗ-поршнем, а 3 – с РКЗ-поршнем: на рис. 1, б – с РКЗ-поршнем № 1; на рис. 2, б – № 2, и на рис. 3 – № 3 и еще № 1 (кривая 4).

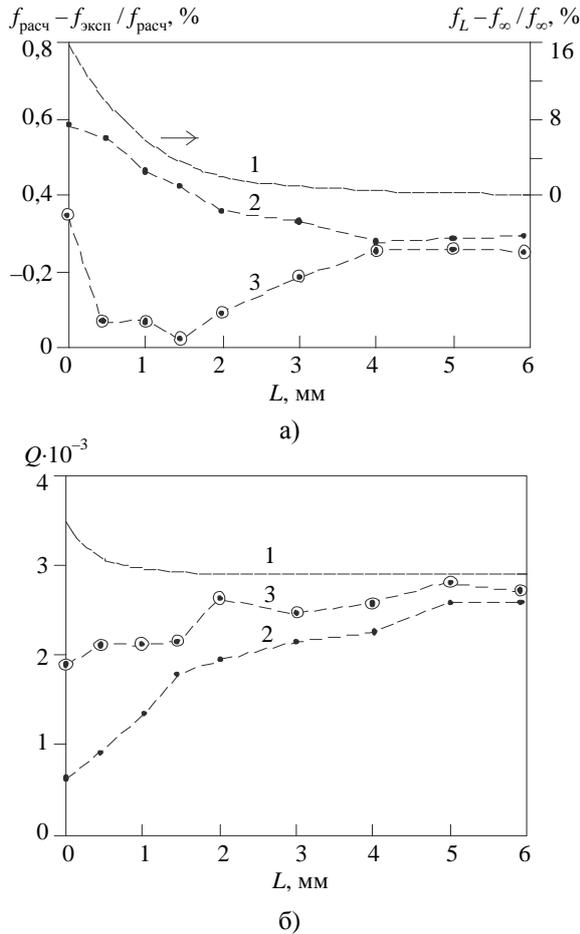


Рис. 2. Характеристики ВДР с ДЭ длиной  $l_2 = 2,16$  мм: а) – собственных частот; б) – собственных добротностей

По зависимостям 1 рисунков можно установить расчетный интервал перестройки частоты резонатора и расчетную зависимость его добротности. Кривые 2–4 рис. 1, а–3, а показывают, что экспериментальные зависимости частот от положения как КЗ-поршня, так и каждого РКЗ-поршня с высокой точностью (не хуже  $0,2 \div 0,9 \%$ ) соответствуют расчетным. Отметим, что с увеличением длины ДЭ отличие экспериментальных частот от расчетных несколько возрастает.

Расчетные значения добротностей резонатора тем выше, чем меньше длина ДЭ (кривые 1 рис. 1, б–3, б). При использовании обычного

КЗ-поршня (кривые 2 рис. 1, б–3, б) экспериментальные значения добротностей ниже расчетных, причем тем ниже, чем ближе КЗ-поршень к ДЭ и тоньше диэлектрик. Все экспериментальные зависимости с РКЗ-поршнем (кривые 3) выше соответствующих кривых с КЗ-поршнем. Чем больше длина ДЭ, тем ближе зависимость величины  $Q$  с РКЗ-поршнем к соответствующей расчетной кривой 1.

Экспериментальные кривые 3 и 4 добротностей на рис. 3, б близки к расчетной, а их практическое совпадение между собой свидетельствует о не критичности выбора величины резонансной частоты поршня.

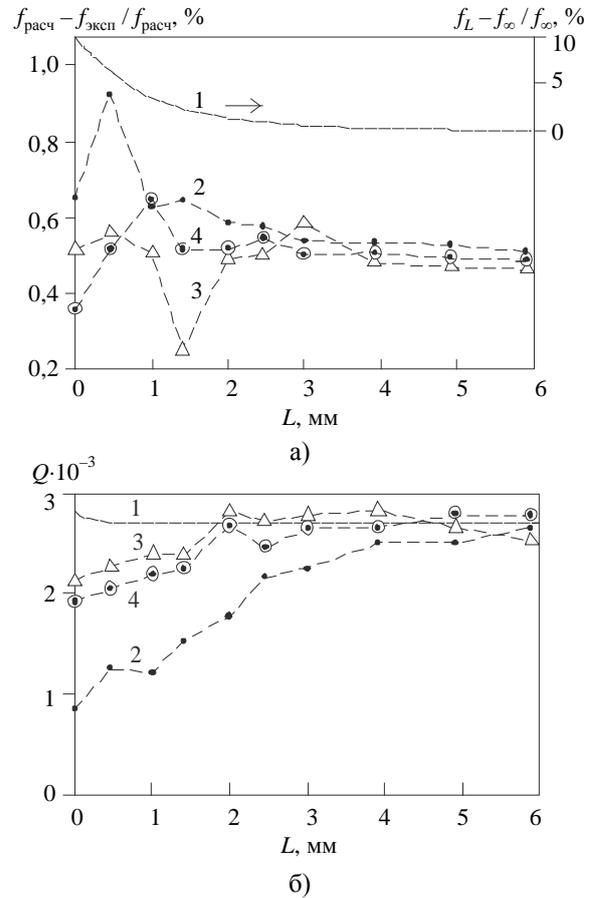


Рис. 3. Характеристики ВДР с ДЭ длиной  $l_3 = 3$ , м: а) – собственных частот; б) – собственных добротностей

Некоторые отличия экспериментальных кривых 3 от расчетных 1 на рис. 1, б–3, б могут быть обусловлены выбором конкретной величины тангенса угла потерь диэлектрика в расчетах, а также погрешностями экспериментальных измерений.

Мы провели также измерения величин  $f$  и  $Q$  резонатора с одним РКЗ-поршнем (№ 1) в широком диапазоне длин ДЭ ( $1,4 \div 10,0$  мм). При этих измерениях мы выбрали положение поршня  $L = 0$ ,

соответствующее его максимальному влиянию на ВДР. Были получены экспериментальные значения частот, примерно соответствующие расчетным, а величины измеренных добротностей превышали 2 000 для всех длин ДЭ.

**Выводы.** Проведенные нами измерения, а также более ранние исследования, выполненные в см диапазоне, показывают перспективность использования РКЗ-поршня в перестраиваемом ВДР для повышения его добротности. При использовании обычного КЗ-поршня в процессе перестройки частоты резонатора его добротность уменьшается по мере приближения поршня к диэлектрику. В случае резонансного поршня, рассчитанного так, как описано выше, улучшается электродинамический контакт поршня со стенками волновода, что приводит к повышению добротности резонатора.

Следует подчеркнуть, что применение резонансного поршня в ВДР позволяет повысить его добротность во всем интервале частотной перестройки, которая, как правило, сохраняется по величине, что важно при практическом использовании такого резонатора.

#### Библиографический список

1. *Диэлектрические резонаторы* / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыешев, Л. Г. Гасанов и др. – М.: Радиосвязь, 1989. – 328 с.
2. *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.
3. *Особенности* механической перестройки резонансной частоты волноводно-диэлектрического резонатора / Р. И. Белоус, С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко, и др. // *Радиотехника: науч.-техн. сб.* / Харьк. нац. ун-т радиоэлектрон. – Х., 2012. – Вып. 168. – С. 103–107.
4. *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.
5. *Свойства* волноводно-диэлектрического резонатора с резонансным короткозамыкающим поршнем / Р. И. Белоус, С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко и др. // *Радиотехника: науч.-техн. сб.* / Харьк. нац. ун-т радиоэлектрон. – Х., 2013. – Вып. 174. – С. 55–57.
6. *Лебедев И. В.* Техника и приборы сверхвысоких частот / И. В. Лебедев. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 312 с.

*Рукопись поступила 07.10.2014.*

R. I. Bilous, S. P. Martynyuk,  
A. P. Motornenko, I. G. Skuratovskiy

#### PROPERTIES OF THE TUNABLE WAVEGUIDE-DIELECTRIC RESONATOR OF THE MILLIMETER BAND WITH THE INCREASED Q-FACTOR

The resonance structures serve as the basis for many electronic devices. Therefore the creation of the effective tunable resonator is the actual and important problem. Using of the waveguide-dielectric resonator insures opportunity for the mechanical frequency tuning over a wide range but at the same time the  $Q$ -factor is changed. The last investigations suggested that the decrease of the eigen  $Q$ -factor of the tuning waveguide-dielectric resonator in the section of the circular cut-off waveguide can be decreased by using the resonance short-circuit plunger calculated on the given frequency. The investigations have been conducted for the 3-cm waveband. This paper is devoted to investigation of the possibility to increase  $Q$ -factor of the resonator of the waveguide-dielectric type in the millimeter band where influence of the contact imperfection between the plunger and waveguide walls is essential. As a result of the conducted investigations the  $Q$ -factor more than 2 000 in over the band of the tuning frequency was obtained for the resonator made of the section of the circuit cut-off waveguide with the Teflon dielectric in the 8-mm waveband.

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

Р. І. Білоус, С. П. Мартинюк,  
О. П. Моторненко, І. Г. Скуратовський

#### ВЛАСТИВОСТІ ПЕРЕСТРОЮВАНОВОГО ХВИЛЕВІДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ З ПІДВИЩЕНОЮ ДОБРОТНІСТЮ

Резонансні структури є основою багатьох приладів і радіотехнічних пристроїв, тому проблема створення ефективного перестроюваного резонатора вважається актуальною та важливою. Використання хвилевідно-діелектричного резонатора забезпечує можливість механічної перестройки частоти в широкому діапазоні, однак при цьому змінюється його добротність. Останні дослідження довели, що зменшення власної добротності хвилевідно-діелектричного резонатора на відрізу круглого поза межного хвилеводу може бути послаблено використанням резонансного короткозамикаючого поршня, розрахованого на визначену частоту. Дослідження були проведені в сантиметровому діапазоні. Дана робота присвячена дослідженню можливості підвищення добротності резонатора хвилевідно-діелектричного типу в міліметровому діапазоні, де вплив недосконалого контакту поршня зі стінками хвилеводу особливо суттєвий. У результаті проведених досліджень одержано добротність резонатора на відрізу круглого поза межного хвилеводу з діелектриком із тефлону в 8-мм діапазоні, що перевищила 2 000 в усьому інтервалі частотної перестройки.

**Ключові слова:** хвилевідно-діелектричний резонатор, поза межний хвилевід, власні частота та добротність.