

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

ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С РЕЗОНАНСНЫМ КОРОТКОЗАМЫКАЮЩИМ ПОРШНЕМ

Резонансные структуры волноводно-диэлектрического типа остаются объектом научных исследований, способствующих созданию новых разновидностей резонаторов с повышенными параметрами. Волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР) с короткозамыкающим (КЗ) поршнем находят широкое практическое использование благодаря большому диапазону частотной перестройки, однако собственные добротности колебаний в таких резонаторах ниже расчетных из-за несовершенства контакта поршня с волноводом. В работе обосновано использование резонансного КЗ поршня в ВДР для повышения добротности резонансных колебаний в таких резонаторах. Проведены исследования характеристик H_{111} -колебания в ВДР 3-см диапазона с резонансным КЗ поршнем и обычным КЗ поршнем простейшей конструкции. Сопоставлены резонансные характеристики собственной частоты и добротности основного колебания H -типа в двух макетах ВДР от положения КЗ поршня. С помощью резонансного КЗ поршня получены добротности, близкие к расчетным значениям. Ил. 4. Библиогр.: 5 назв.

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

В настоящее время волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР) находят практическое применение в технике сверхвысоких частот и в измерительной технике. Основные параметры колебаний в таких резонаторах (собственные частоты и добротности) могут быть рассчитаны по выражениям, приведенным в монографии [1].

Функциональные возможности ВДР можно расширить введением в одно из плеч отрезка пустого волновода перестраивающего короткозамыкающего (КЗ) поршня [2]. Резонаторы с КЗ поршнем характеризуются простотой конструкции, большим диапазоном частотной перестройки, а в случае использования заперделного волновода – еще и малыми размерами и весом.

В работе [3] были исследованы расчетные и экспериментальные зависимости собственных частот f и добротностей Q основного несимметричного колебания магнитного типа H_{111} от положения КЗ поршня в ВДР на основе круглого заперделного волновода. КЗ поршень был изготовлен в виде сплошного цилиндра, плотно входящего в волновод. Исследования были проведены в двух частотных диапазонах: сантиметровом и миллиметровом. Они показали, что по методике, изложенной в работе [2], можно рассчитать и изготовить перестраиваемые ВДР в диапазоне СВЧ. При этом для плавной механической перестройки резонансной частоты может быть использован КЗ поршень в его простейшей конструкции. Расчетные характеристики величин f при этом достаточно хорошо согласуются с экспериментальными в обоих частотных диапазонах. В то же время измеренные с таким поршнем добротности колебания H_{111} оказались ниже расчетных, причем тем ниже, чем ближе КЗ поршень находился к диэлектрическому элементу. Основной причиной этого оказался несовершенный контакт КЗ поршня

со стенками круглого волновода, приводящий в процессе его перемещения к образованию неконтролируемого и изменяющегося зазора. Настоящая работа посвящена исследованию возможности уменьшения влияния этого зазора.

Техника и методика исследований, результаты расчетов и эксперимента. Модель исследуемого нами ранее ВДР с КЗ поршнем показана на рис. 1, а. Это, по существу, отрезок полубесконечного круглого волновода 1 внутренним диаметром $2a$, частично заполненный диэлектрическим элементом (ДЭ) 2 такого же диаметра длиной l . С одной стороны от ДЭ на расстоянии L расположен КЗ поршень в виде сплошного цилиндра 3 с возможностью его перемещения относительно диэлектрика вплоть до касания ДЭ при $L = 0$.

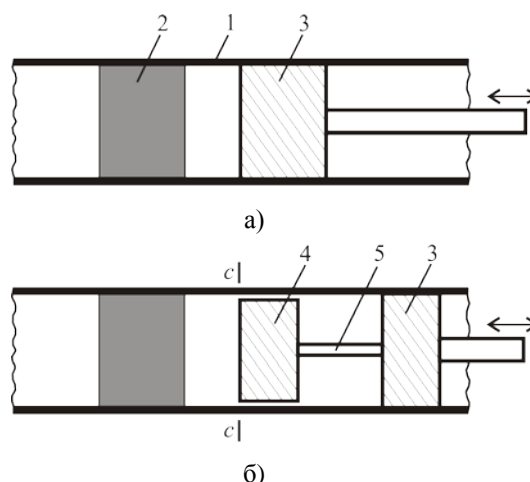


Рис. 1. Модель ВДР с КЗ поршнем: а) – с поршнем простейшей конструкции; б) – с резонансным КЗ поршнем

Металлические части экспериментального макета резонатора были изготовлены из бески-

слородной меди ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м). В качестве диэлектрика для ДЭ был выбран тефлон ($\varepsilon = 2,05$; $\operatorname{tg} \delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$). В связи со специфической твердостью тефлона ДЭ можно было изготовить и поместить в резонатор без зазора между диэлектриком и стенками волновода.

Основным требованием, предъявляемым к КЗ поршню, является обеспечение минимальных СВЧ-потерь в контактах его с внутренними стенками волновода, для чего он должен достаточно плотно входить внутрь волновода. В наших экспериментах в 3-см диапазоне зазор между КЗ поршнем 3 и стенками отрезка волновода 1 диаметром 13,05 мм изменялся при перемещении поршня в пределах $0 \div 0,07$ мм.

Возбуждение колебаний в резонаторе и измерение частот осуществлялись с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-61 и частотомера ЧЗ-51. Возбуждающая петля помещалась во второй отрезок пустого запердельного волновода, противоположного отрезку с КЗ поршнем. Величина связи регулировалась изменением положения петли связи относительно ДЭ. Собственные добротности колебаний определялись в режиме связи ниже критической.

В технической литературе описаны электродинамические свойства четвертьволновых и полуволновых коаксиальных резонаторов (например, [4, 5]). Напомним, что полуволновая линия (волноводная или коаксиальная) обладает трансформирующим действием и переносит любое сопротивление в пространстве, не изменяя его величины. В случае закороченной на одном конце четвертьволновой линии, в идеале ее входное сопротивление ∞ . В этом случае она ведет себя как параллельный резонансный контур. Увеличение длины линии приводит к уменьшению ее сопротивления, и при достижении ее длины, равной половине длины волны λ , или кратной $\lambda/2$, входное сопротивление становится равным нулю, так как в этом случае реализуется резонанс последовательного колебательного контура.

На рис. 1, б схематически изображен КЗ поршень, представляющий последовательное соединение двух четвертьволновых коаксиальных отрезков 4 и 5 и части поршня 3, плотно входящей в волновод. Четвертьволновые отрезки линий настроены в резонанс на частоту ВДР, закороченного на конце, при выбранной величине l ДЭ. Можно ожидать, что в плоскости эффективного короткого замыкания $c-c$, показанного на рис. 1, б, будет иметь место достаточно хороший электродинамический контакт. Диаметры отрезков 4 и 5 были выбраны из условий минимального сопротивления в сечении $c-c$ и требований технологичности их изготовления.

Свойства КЗ поршня (рис. 1, б) отличаются от описанных в литературе [4, 5] свойств дроссельного поршня тем, что он перемещается не в регулярном волноводе, а в поле затухающей волны запердельного волновода. Такой поршень мы назвали резонансным. Эффективность резонансного поршня по сравнению с поршнем простейшей конструкции (рис. 1, а) исследовалась далее экспериментально.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости величины длин l_1 и l_2 двух коаксиальных отрезков 4 и 5 от частоты при выбранных диаметрах. Интервал частот на графике был выбран примерно равным расчетному диапазону резонансной частоты H_{111} -колебания в ВДР с КЗ поршнем.

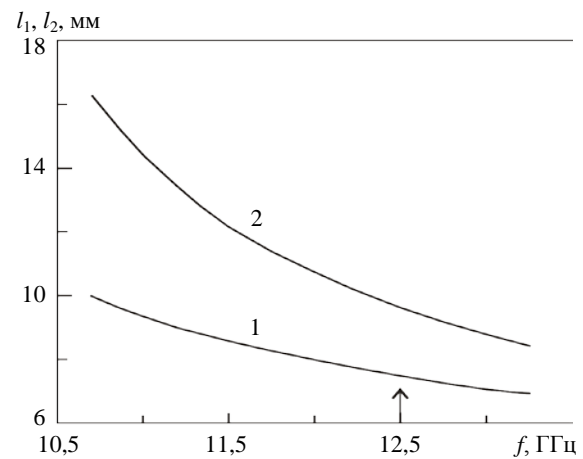


Рис. 2. Расчетные зависимости длин отрезков коаксиальных линий l_1 и l_2

Для исследования была выбрана длина ДЭ l , равная 8,02 мм, что соответствовало резонансной частоте ВДР $f = 12,5$ ГГц при $L = 0$, показанной стрелкой на рис. 2. Длины четвертьволновых резонаторов l_1 и l_2 определялись по графикам рис. 2, а их диаметры для расчетов были выбраны равными 11,8 и 7,0 мм соответственно.

На рис. 3, а приведена расчетная кривая изменения резонансной частоты H_{111} -колебания в ВДР от положения КЗ поршня для длины l ДЭ, равной 8,02 мм. Как видно, диапазон частот перестройки такого резонатора составляет 1,3 ГГц.

На рис. 3, б представлены кривые относительного отклонения экспериментально полученных резонансных частот от расчетных в зависимости от положения КЗ поршня $\frac{\Delta f}{f_{\text{расч}}} = \frac{f_{\text{расч}} - f_{\text{эксп}}}{f_{\text{расч}}} \cdot 100\%$. Кривая 1 – контрольные измерения, 2 – измерения с простейшим КЗ поршнем, 3 – с резонансным КЗ поршнем.

Расчетные значения $f_{\text{расч}}$ были получены по уравнению

$$\frac{\beta_{11}}{\gamma_{11}}(1 + \text{th } \gamma_{11}l) = \left\{ \frac{\beta_{11}^2}{\gamma_{11}^2} \text{th } \gamma_{11}L - 1 \right\} \text{th } \beta_{11}l,$$

где $\beta_{11} = \sqrt{k^2 \varepsilon - \left(\frac{\xi_{11}}{a}\right)^2}$; $\gamma_{11} = \sqrt{\left(\frac{\xi_{11}}{a}\right)^2 - k^2}$ –

постоянные распространения волны в волноводе с диэлектриком и затухания в пустом волноводе радиусом a соответственно; L – расстояние между ДЭ и КЗ поршнем; l – длина ДЭ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – резонансная длина волны; ξ_{11} – корни выражения $J'_{11}(\xi_{11}) = 0$; J'_{11} – производная функции Бесселя первого рода 1-го порядка; ε – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика.

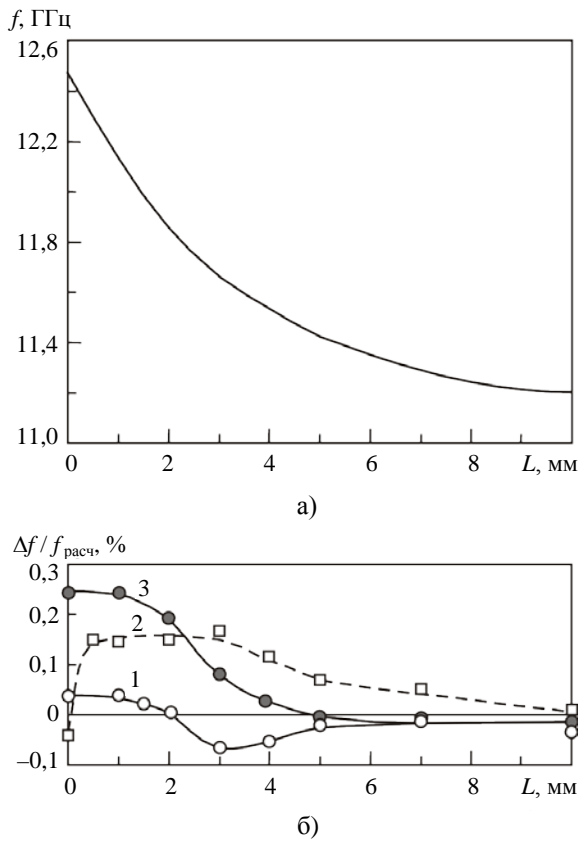


Рис. 3. Расчетная кривая зависимости частоты H_{111} -колебания от положения КЗ поршня (а) и относительное отклонение экспериментальной резонансной частоты от расчетной в зависимости от положения КЗ поршня (б): 1 – контрольные измерения; 2 – измерения с обычным КЗ поршнем; 3 – с резонансным

Суть контрольных измерений состояла в следующем: в этом случае КЗ поршня как такового не было, а необходимые расстояния от ДЭ до закороченного участка волновода обеспечивались положением ДЭ. Для этого ДЭ размещался на

требуемое расстояние относительно одного из торцов отрезка волновода. К этому торцу плотно прижимался медный диск, больший диаметра волновода. Для уменьшения влияния зазора между диском и поперечным сечением волновода соответствующие поверхности диска и волновода притирались. Разные значения L обеспечивались перемещением ДЭ относительно неподвижного диска. Очевидно, в случае $L = 0$ ДЭ прижимался к диску.

Для плавного изменения собственных частот и добротностей колебаний в ВДР в этот узел поочередно помещались обычный КЗ поршень простейшей конструкции или резонансный. Как следует из рис. 3, б, во всех трех случаях экспериментальные зависимости резонансных частот достаточно хорошо согласуются с расчетными, отличия составляют менее 0,3 %.

На рис. 4 приведены зависимости добротностей колебания H_{111} от положения КЗ поршня, кривая 1 – расчетная, полученная по выражениям работы [2]. Ввиду громоздкости мы здесь их не приводим. Заметим только, что необходимые выражения в работе [2] были получены с привлечением понятия частичных добротностей. При этом учитывались потери электромагнитной энергии во всех частях резонатора: как в металлических, так и в диэлектрике.

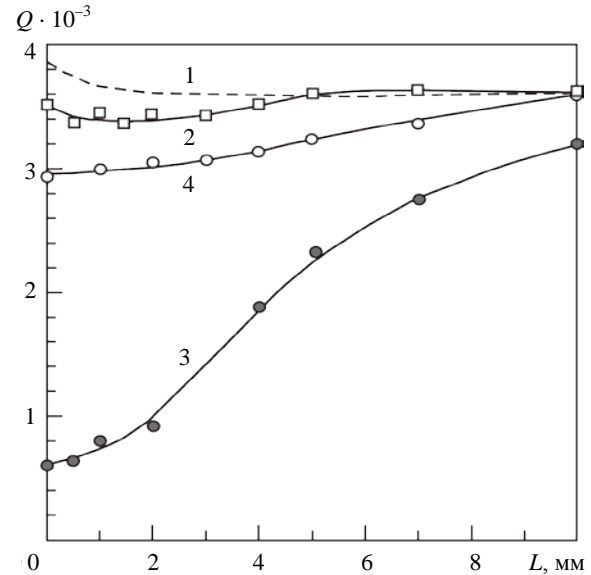


Рис. 4. Зависимости добротностей H_{111} -колебания в ВДР от положения КЗ поршня: 1 – расчетная; 2 – контрольные измерения; 3 – измерения с обычным КЗ поршнем; 4 – с резонансным

Из рис. 4 видно, что наиболее близкой к расчетной оказалась зависимость добротности H_{111} -колебания, полученная при контрольных измерениях. Кривая 4, полученная с резонансным КЗ поршнем, намного ближе к расчетной по

сравнению с зависимостью 3 с обычным поршнем. В диапазоне длин $L = 0 \div 10$ мм добротность с резонансным КЗ поршнем выше на $12 \div 380$ % по сравнению с обычным.

Существенно заметить, что все измерения, результаты которых приведены на рис. 3, 4, получены с одним и тем же резонансным КЗ поршнем, рассчитанным на частоту $f = 12,5$ ГГц.

Выводы. Проведенные исследования показали, что по методике, описанной в работе [2], можно рассчитать характеристики ВДР с КЗ поршнем, причем для получения резонансных частот H_{111} -колебания, хорошо совпадающих с расчетными, достаточно использования КЗ поршня простейшей конструкции.

В случае необходимости получения значений добротностей, близких к расчетным, можно воспользоваться резонансным КЗ поршнем, описанным в настоящей работе. Важно отметить, что при этом во всем диапазоне плавной механической перестройки частоты экспериментальные значения добротности почти не изменяются, что важно при практическом использовании таких резонаторов.

Библиографический список

1. *Диэлектрические резонаторы* / под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 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. у-нт радион. – Х., 2012. – Вып. 168. – С. 103–107.
4. *Лебедев И. В.* Техника и приборы сверхвысоких частот: в 2 т. Т. 1. / И. В. Лебедев. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 512 с.
5. *Автоматизация производства и промышленная электроника*: в 6 т. Т. 2. / под ред. А. И. Берг, В. А. Трапезникова. – М.: Сов. энцикл., 1963. – 528 с.

Рукопись поступила 29.05.2012.

A. P. Motornenko, I. G. Scuratovskiy, O. I. Hazov

WAVEGUIDE-DIELECTRIC RESONATOR WITH RESONANCE SHORT-CIRCUIT PLUNGER

Resonance structures of the waveguide-dielectric type are the matter for the scientific investigations contributing to the development of the resonators of new modifications with the improved parameters. The waveguide-dielectric resonators (WDR) with the short-circuit plunger have widespread application due to the wide band of the frequency tuning. But the eigen Q -factors of the oscillations in these resonators are lower than calculation ones because of the unreliable contact between the plunger and the waveguide. In this paper the use of the resonance short-circuit plunger in the WDR for the Q -factor increase of the resonance oscillations are substantiated. The characteristics of the H_{111} -oscillation in the WDR for 3-cm band with resonance short-circuit plunger and the simple design short-circuit plunger are investigated. The resonance characteristics of the eigen frequency and Q -factor for the fundamental oscillation of the H -type for the two models of the WDR as a function of short-circuit plunger location are compared. The Q -factors obtained with the help of resonance short-circuit plunger agree closely with calculation values.

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

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

ХВИЛЕВОДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР З РЕЗОНАНСНИМ КОРОТКОЗАМИКАЮЧИМ ПОРШНЕМ

Резонансні структури хвилеводно-діелектричного типу залишаються об'єктом наукових досліджень, які сприяють створенню нових різновидів резонаторів з підвищеними параметрами. Хвилеводно-діелектричні резонатори (ХДР) з короткозамикаючим (КЗ) поршнем знаходять широке практичне використання завдяки великому діапазону частотного перестроювання, проте власні добротності коливань в таких резонаторах нижчі розрахункових через недосконалість контакту поршня з хвилеводом. В роботі обґрунтовано використання резонансного КЗ поршня в ХДР для підвищення добротностей резонансних коливань. Проведено дослідження характеристик H_{111} -коливань в ХДР 3-см діапазону з резонансним КЗ поршнем і звичайним поршнем простої конструкції. Порівняно резонансні характеристики власної частоти і добротності основного коливання H -типу в двох макетах ХДР від положення КЗ поршня. За допомогою резонансного КЗ поршня отримано добротності, близькі до розрахункових.

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