

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Введение

В настоящее время объектом научных исследований, а в прикладном плане – важным узлом при построении новых радиотехнических систем, – остаются резонансные структуры волноводно-диэлектрического типа. Отдельную группу в классе таких резонаторов составляют волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР). Важной особенностью ВДР является возможность механической перестройки резонансной частоты в широком частотном диапазоне.

Ниже представлены результаты исследования особенностей плавной перестройки резонансной частоты основного несимметричного колебания магнитного типа в ВДР. Рассчитаны и измерены собственные частоты и добротности колебания H_{111} в ВДР сантиметрового (см) и миллиметрового (мм) диапазонов длин волн. Показано влияние зазора между короткозамыкающим (КЗ) поршнем и стенкой запердельного волновода на характеристики перестройки резонансной частоты и добротности колебания.

Методика расчетов и техника эксперимента

Волноводно-диэлектрический резонатор состоит из отрезка прямоугольного или круглого волновода, частично заполненного высококачественным диэлектриком [1, 2] с невысокой относительной диэлектрической проницаемостью. В случае использования запердельного волновода такой резонатор имеет разреженный спектр собственных колебаний, широкий диапазон частотной перестройки и обладает малыми размерами и весом. Как показали исследования [3, 4], ВДР имеет высокие электрические параметры как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазонах СВЧ.

Методика расчета характеристик ВДР изложена в ряде статей и в монографии [1], а ВДР с КЗ поршнем – в работах [3, 5], однако в этих работах отсутствуют экспериментальные исследования возможностей плавной перестройки основных электрических параметров резонатора от положения КЗ поршня. До сих пор не проведены экспериментальные исследования резонансной частоты и добротности ВДР в зависимости от положения КЗ поршня.

В статье изложены результаты исследования характеристик перестройки резонансного колебания H_{111} в ВДР сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Проведено сравнение результатов расчета и экспериментальных данных.

Электродинамическая задача по определению спектра собственных частот колебаний H -типа в ВДР с КЗ поршнем решалась методом частичных областей, при этом потери энергии в металлических стенках резонатора и в объеме диэлектрика не учитывались. Рассматривался случай, когда незаполненные диэлектриком участки волновода для резонансной частоты являются запердельными, а часть волновода с диэлектриком остается регулярной.

Выражение для определения спектра собственных частот H -типов колебаний в ВДР с КЗ поршнем, взятое из [3] и использованное в настоящих расчетах, выглядит так:

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

где $\beta_{mn} = \sqrt{k^2 \varepsilon - \left(\frac{\zeta_{mn}}{a}\right)^2}$; $\gamma_{mn} = \sqrt{\left(\frac{\zeta_{mn}}{a}\right)^2 - k^2}$ – постоянные распространения волны в волноводе с диэлектрическим элементом (ДЭ) и затухания в пустом волноводе соответственно;

L – расстояние между ДЭ и КЗ поршнем; l – длина ДЭ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – резонансная длина волны; ζ_{mn} – корни уравнения $J'_{mn}(\zeta_{mn}) = 0$; J'_{mn} – производная функции Бесселя первого рода m -го порядка; ε – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; a – радиус волновода.

Собственные добротности резонатора на основных несимметричных колебаниях магнитного типа H_{111} рассчитывались с привлечением понятия частичных добротностей [1, 3]. В этом случае учитывались потери электромагнитной энергии как в диэлектрике, так и в металлических частях резонатора. Ввиду громоздкости выражений здесь они не приводятся.

Макет ВДР 3-см диапазона представлял отрезок круглого волновода диаметром 13,05 мм, внутри которого поочередно размещались диэлектрические элементы (ДЭ) разной длины. В одном из отрезков пустого волновода находился подвижный КЗ поршень, а второй отрезок использовался для связи резонатора с источником возбуждения колебаний. КЗ поршень представлял собой цилиндр с плоскими торцами, плотно входящий в отрезок пустого волновода, который мог перемещаться в нем вплоть до соприкосновения с ДЭ. Все ДЭ были выполнены из тефлона ($\varepsilon = 2,05$; $tg\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$) и плотно входили в волновод. Металлические части резонатора и КЗ поршень были изготовлены из бескислородной меди ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м). Из этих же материалов был изготовлен и макет ВДР 8-мм диапазона. Он представлял собой отрезок волновода диаметром 4,6 мм, в котором помещались ДЭ и КЗ поршень. В наших экспериментах зазор между КЗ поршнем и внутренней стенкой волновода в 3-см и 8-мм диапазонах составлял 0,06 – 0,07 и 0,01 – 0,02 мм соответственно.

Для возбуждения колебаний и измерения резонансных частот использовались панорамные измерители КСВН типа Р2-67 (8-мм диапазон) и Р2-61 (3-см диапазон), причем в первом случае комплект СВЧ узлов панорамного измерителя был дополнен волномером, а во втором – частотомером типа ЧЗ-54. Узел связи представлял собой отрезок прямоугольного волновода с круглым фланцем, соединенным с аналогичным фланцем круглого волновода ВДР.

Величина связи регулировалась изменением длины запредельного участка волновода, примыкающего к панорамному измерителю.

Собственные добротности колебаний ВДР определялись в режиме связи генератора с нагрузкой ниже критической.

Результаты расчетов и эксперимента

Первоначально были выполнены расчеты и проведены контрольные измерения резонансных частот и добротностей выбранного колебания в ВДР. При контрольных измерениях волноводная часть резонатора была изготовлена толстостенной. ДЭ помещался на требуемое расстояние L от одного из торцов волновода (0 – 10 мм в сантиметровом и 0 – 5 мм в миллиметровом диапазоне). Этот торец плотно прикрывался медным диском, и таким образом диск заменял КЗ поршень. Для уменьшения влияния зазора между диском и поперечной стенкой волновода соответствующие поверхности диска и волновода притирались. Необходимые расстояния обеспечивались перемещением ДЭ относительно неподвижного диска. Очевидно, что в случае $L = 0$ ДЭ касался диска. Для плавного изменения собственных частот и добротностей ВДР в этот узел резонатора помещался КЗ поршень, который перемещался относительно неподвижного ДЭ.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости резонансной частоты f колебания H_{111} в ВДР 3-см диапазона от величины L для двух значений длин ДЭ: $l = 6,02$ и $13,96$ мм (кривые 1 и 2 соответственно). На каждой из этих кривых отмечены экспериментальные точки контрольных измерений резонансных частот. Как видно, имеет место хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений (отличие расчетных и экспериментальных данных в большинстве случаев не превышает ± 10 МГц, что составляет примерно $\pm 0,1\%$). Пунктирными линиями 3 и 4 на рис.1 отмечены значения критических частот волны H_{11} в пустом вол-

новоде выбранных поперечных размеров (13,48 ГГц) и в волноводе, заполненном диэлектриком с $\varepsilon = 2,05$ (9,42 ГГц). Измерения резонансных частот колебания H_{111} в ВДР с КЗ поршнем показали, что они отличались от расчетных не более чем на $\pm 0,2\%$, и на рисунке не показаны.

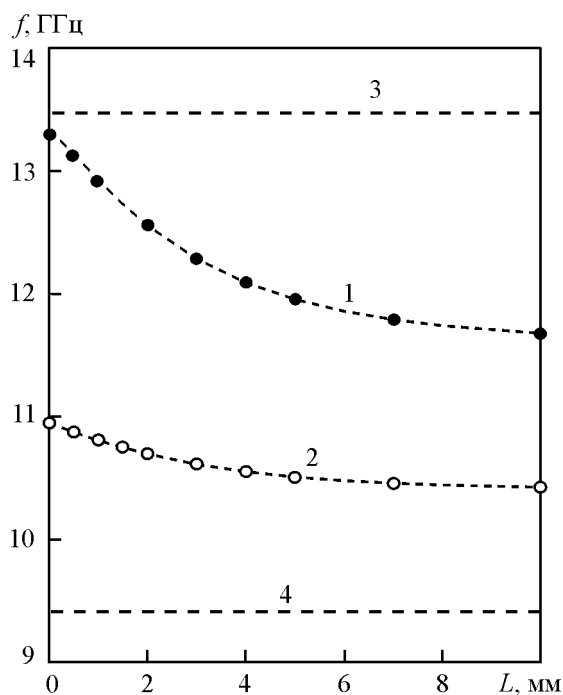


Рис. 1

Результаты этих измерений позволяют сделать вывод о том, что влияние зазора между КЗ поршнем и внутренней поверхностью волновода в наших условиях не сказывается заметно на резонансной частоте исследуемого колебания. (Как оказалось, расхождения между расчетными и экспериментальными данными определялись, в основном, неточностью установки расстояния L , которая была примерно одинаковой как при контрольных измерениях, так и при измерениях с КЗ поршнем).

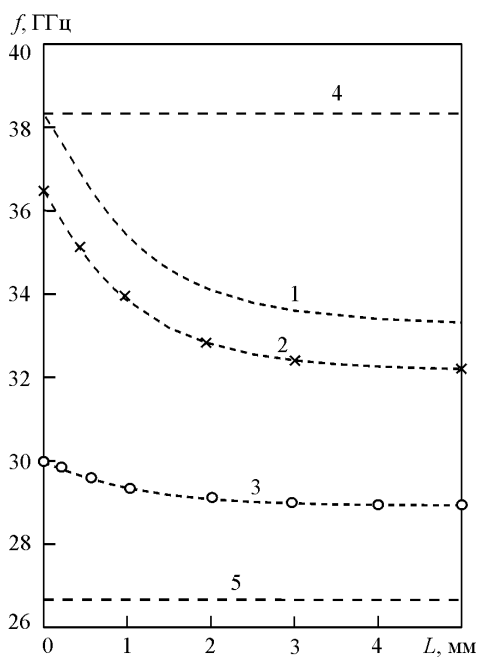
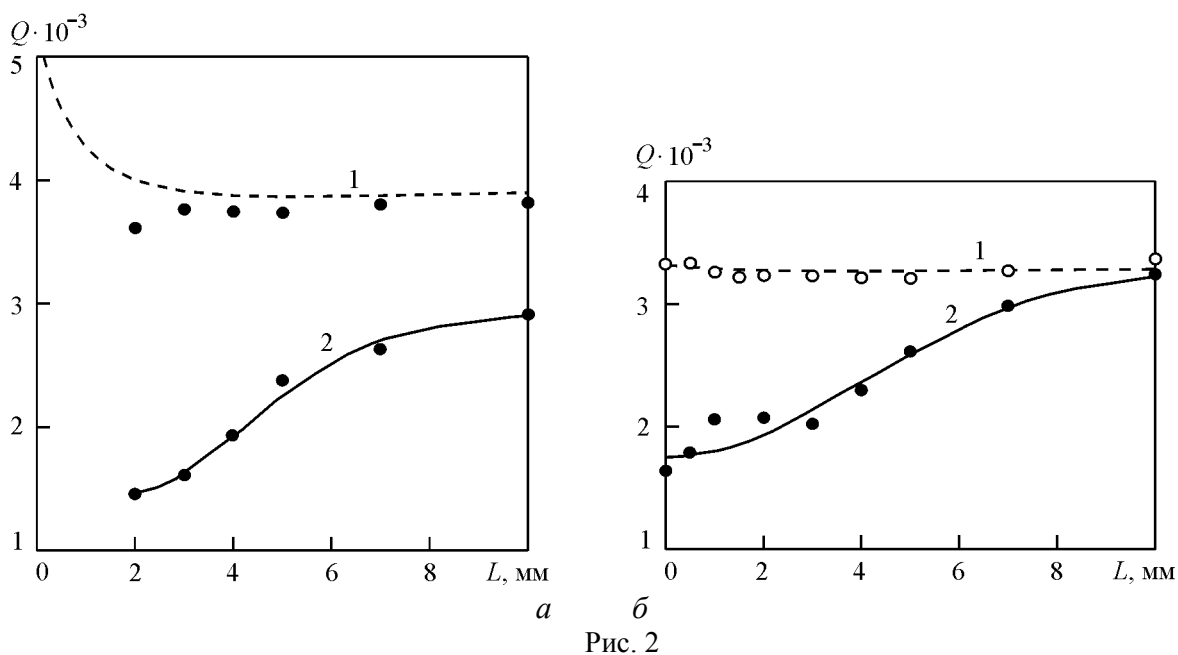
На рис. 2 представлены зависимости собственных добротностей Q колебания H_{111} в ВДР от величины L для тех же длин ДЭ, что и на рис. 1: $l = 6,02$ и $13,96$ мм (рис. 2, а и б соответственно). На рисунках пунктирные кривые 1 – расчетные, а результаты контрольных измерений добротностей отмечены значками ● и ○ соответственно.

Как видно из рис. 2, результаты расчетов и контрольных измерений достаточно хорошо совпадают (различие составляет не более 5 %). Несколько худшее совпадение наблюдается лишь при малых значениях параметра L , где расчетные значения Q отличаются от контрольных примерно на 10 %.

Кривыми 2 на этих рисунках представлены экспериментальные зависимости добротностей выбранного колебания, полученные с КЗ поршнем. Видно, что они ниже расчетных кривых и контрольных значений, причем отличия тем больше, чем ближе КЗ поршень к ДЭ. Например, при $l = 6,02$ мм и $L = 2$ мм (рис. 2, а) добротность понизилась по сравнению с расчетной на 2500 единиц, что составляет 63,5%, а при $l = 13,96$ мм и $L = 2$ мм (рис. 2, б) – на 1200 единиц, или около 37%.

Как следует из рис. 1, с увеличением продольных размеров ДЭ уменьшается резонансная частота, что приводит к проникновению электромагнитного поля на меньшую длину предельного волновода. Поэтому для наибольшей из выбранных величин l (рис. 2, б) при $L = 10$ мм экспериментальные значения добротностей (контрольные и полученные с КЗ поршнем)

практически совпадают. В этих условиях влияние зазора между поршнем и стенкой волновода становится незаметным.



На рис. 3 приведены зависимости резонансной частоты колебания H_{111} в ВДР 8-мм диапазона от параметра L . Пунктирные кривые 1, 2 и 3 – расчетные и соответствуют значениям $l = 2,0; 2,52$ и $6,02$ мм. Пунктирными линиями 4 и 5 указаны значения критических частот волны H_{11} в выбранном волноводе без диэлектрика ($38,33$ ГГц) и с диэлектриком ($26,66$ ГГц). Крестиками \times и кружками \circ на кривых 2 и 3 представлены экспериментальные значения частот (контрольные измерения). Оценки показывают, что отличия расчетных и контрольных значений частот составляют не более 40 МГц или менее $0,13\%$. Все экспериментальные точки, в отличие от ВДР 3-см диапазона, оказались несколько выше расчетных, что может быть обусловлено неточностью выбора в расчетах значения величины ε .

На рис. 4 приведены расчетные зависимости добротностей колебания H_{111} (кривые 1), а также полученные при контрольных измерениях (2) и с КЗ поршнем (3) от параметра L . При этом рис. 4, а соответствует значению $l = 2,52$ мм, а 4, б – $l = 6,02$ мм. По сравнению с зависимостями, приведенными на рис. 2, в миллиметровом диапазоне результаты контрольных измерений добротностей отличаются от расчетных значений несколько больше. Видно также, что, как и в 3-см диапазоне, измеренные зависимости добротностей с использованием КЗ поршня отличаются и от расчетных, и от контрольных. Отличия расчетных величин от контрольных измерений в миллиметровом диапазоне могут быть обусловлены неточностью выбранного для расчета значения тангенса угла потерь ($tg\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$), а также большей экспериментальной погрешностью определения добротности.

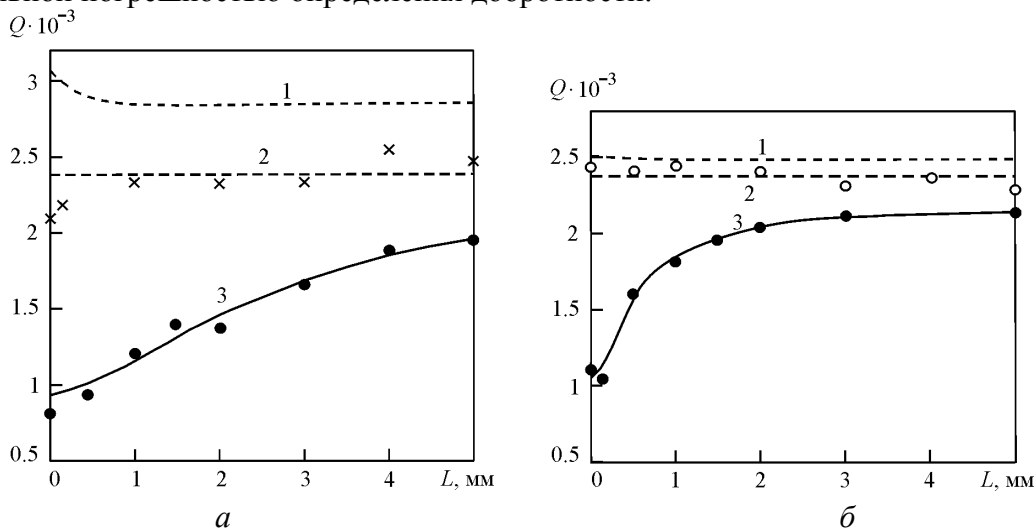


Рис. 4

Выводы

Волноводно-диэлектрические резонаторы с КЗ поршнем могут быть рассчитаны и построены в сантиметровом и миллиметровом диапазонах по методике, изложенной в [3]. Для плавной механической перестройки резонансной частоты может быть использован КЗ поршень, помещенный в один из участков запердельного волновода. При этом нужно учитывать, что зависимости резонансных частот от положения КЗ поршня изменяются в соответствии с расчетными, тогда как экспериментальные зависимости добротностей в случае подвижного КЗ поршня оказываются ниже расчетных, причем тем больше, чем ближе КЗ поршень находится к диэлектрику. Для повышения добротности колебания H_{111} в ВДР, перестраиваемом КЗ поршнем, необходимо более точное изготовление составных частей резонатора.

Представляется перспективным также поиск новых конструктивных решений, исключая или ослабляющих влияние зазора между КЗ поршнем и стенкой запердельного волновода на добротность выбранного колебания, особенно в миллиметровом диапазоне.

Список литературы: 1. *Диэлектрические резонаторы* / Под ред. М.Е. Ильченко. – М. : Радио и связь, 1989. – 328 с. 2. *Катилевич, Б.Ю., Трубахин, Е.Р.* Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с. 3. *Белоус, Р.И., Макеев, Ю.Г., Моторненко, А.П., Моторненко, Л.П.* Расчет и экспериментальное исследование волноводно-диэлектрического резонатора // *Радиотехника* / Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2003. – Вып. 131. – С. 139-144. 4. *Белоус, Р.И., Мартынюк, С.П., Моторненко, А.П., Скуратовский, И.Г.* Волноводно-диэлектрический резонатор миллиметрового диапазона // *Радиофизика и электроника* / Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2010. – Т. 11(15). – №4. – С. 74–77. 5. *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.

*Институт радиофизики и электроники
им. А.Я. Усикова*

Поступила в редколлегию 14.02.2012