

УДК 621.382.386

Б.Б. Працюк, Ю.В. Прокопенко, канд. техн. наук, Ю.М. Поплавко, д-р физ.-мат. наук

Коэффициент связи составного диэлектрического резонатора с прямоугольным волноводом

Исследована зависимость коэффициента связи составного диэлектрического резонатора (СДР) с прямоугольным волноводом от геометрических параметров резонатора и волновода, а также диэлектрической проницаемости материала. Представлены результаты расчета коэффициентов связи составного дискового резонатора с прямоугольным волноводом, полученные с помощью аппроксимации частотных характеристик элементов матрицы рассеяния, рассчитанных методом конечных элементов. Показана возможность повышения коэффициента связи СДР с прямоугольным волноводом более чем на 100% за счет введения диэлектрической неоднородности перпендикулярно линиям электрического поля диэлектрического резонатора (ДР), что приводит к уменьшению вносимых потерь в полосно-пропускающих фильтрах и увеличению затухания в полосно-заграждающих фильтрах.

Dependence of coupling coefficient between split dielectric resonator and rectangular waveguide on composed dielectric resonator and waveguide geometrical sizes and material permittivity was established. The coupling coefficient was estimated in terms of S parameter approximation calculated by finite element method. Improvement of dielectric resonator coupling with rectangular waveguide more than by 100% is proposed. Such effect was achieved by insertion of dielectric discontinuity perpendicular to DR's electrical field. It results in increasing of attenuation in band-stop filters and decreasing of insertion loss in band-pass filters.

Ключевые слова: диэлектрический резонатор, коэффициент связи, перестраиваемый фильтр.

Введение

Проектирование селективных систем на основе диэлектрических неоднородностей в прямоугольном волноводе связано с проблемой выбора параметров материала и расчета геометрических размеров отдельных компонент системы [1, 2]. Развитие коммуникационных технологий и появление новых стандартов связи привело к необходимости создания новых компонент, обеспечивающих возможность

управления резонансной частотой в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне.

Устройства СВЧ, построенные на основе ДР, используют вынужденные колебания. При этом их свойства обусловлены физическими явлениями непосредственно в ДР и особенностями, которые вызваны влиянием цепей СВЧ на колебания ДР. Наблюдаемые явления излучения, поглощения энергии, сдвига и расщепления резонансных частот ДР, асимметрия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) структур и направленной передачи энергии зависят от параметров ДР, используемых цепей СВЧ и их взаимного расположения.

Применение СДР позволяет значительно расширить функциональность фильтров на ДР [3]. Электромеханическое управление резонансной частотой сохраняет высокую добротность СДР и обеспечивает возможность работы в широком частотном диапазоне. В работах [4, 5] были предложены конструкции фильтров на основе СДР, обеспечивающих перестройку центральной частоты в узком диапазоне. Увеличение диапазона перестройки центральной частоты фильтров остается актуальной задачей. Для ее решения необходимо провести анализ влияния геометрических и электрофизических параметров СДР на АЧХ фильтра.

Одним из важнейших параметров, описывающих характеристики фильтра является коэффициент связи ДР с линией передачи. С его помощью рассчитываются АЧХ фильтра и оценивается величина вносимых потерь в области рабочих частот полосно-пропускающего фильтра, и глубина ослабления полосно-заграждающего фильтра. В работе [1] приведены зависимости коэффициента связи от параметров ДР и представлены соотношения, позволяющие рассчитать АЧХ фильтра. Коэффициент связи СДР с линиями передачи ранее не исследовался. В данной работе предложена методика расчета коэффициента связи СДР с прямоугольным волноводом и проведен анализ его зависимости от параметров СДР и волновода.

1. Методика расчета коэффициента связи СДР с линией передачи

Для описания закономерностей отражения, прохождения и поглощения энергии в линии пе-

редачи с диэлектрическими неоднородностями вводят понятие коэффициента связи [1]:

$$K = \frac{P_{rad}}{P_t} = \frac{Q_e}{Q_0} \quad (1)$$

где Q_e – внешняя добротность; Q_0 – собственная добротность; P_{rad} – мощность излучения резонатора; P_t – рассеиваемая мощность;

Для нахождения значений коэффициентов связи применяются различные методы, включая энергетические, полевые, интегральных уравнений [1].

При использовании условия баланса мощностей для отрезка согласованной линии передачи в одноволновом режиме соотношения коэффициентов отражения S_{11} и прохождения S_{21} для любого типа колебаний резонатора при его сосредоточенной связи с линией описываются выражениями [1]:

$$S_{11} = \frac{K}{1+K+j\xi}, S_{21} = \frac{1+j\xi}{1+K+j\xi}; \quad (2)$$

где $\xi = Q_0 \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right)$ – обобщенная расстройка резонатора, f_r – резонансная частота ДР, f – частота.

В работе [6] для дискового резонатора, в котором возбужден H_{018} – тип колебаний, получены более точные соотношения за счет учета нерезонансной связи ДР с прямоугольным волноводом. Коэффициенты прохождения и отражения, при наличии связи только по поперечной составляющей, находятся из соотношений:

$$S_{11} = \frac{K + \xi K_n - jK_n}{1 + K + \xi K_n + j(\xi - K_n)}, \quad (3)$$

$$S_{21} = \frac{1 + j\xi}{1 + K + \xi K_n + j(\xi - K_n)}$$

где K_n – коэффициент нерезонансной связи ДР с линией передачи.

В работе [1] коэффициенты связи, входящие в соотношения (3), рассчитываются в дипольном приближении резонатора [7]. При таком приближении ДР представляется магнитным диполем, взаимодействующим с собственным полем волновода. Трудности расчета дипольного момента связаны со сложностью вычислений интегралов полей по объему резонатора. Строгое аналитическое решение возможно только для сферического резонатора. Для резонаторов другой формы аналитические решения получа-

ют только при использовании приближенных моделей.

Расчет коэффициента связи СДР усложняется из-за более сложной геометрической формы, что делает невозможным нахождение решения в чисто аналитическом виде. Поэтому электродинамическая задача для СДР, расположенного в прямоугольном волноводе (рис.1), решена методом конечных элементов. Рассчитанные частотные зависимости элементов матрицы рассеяния значения были аппроксимированы формулой (3). В качестве параметров аппроксимации использовались переменные Q_0, K, K_n, f_r .

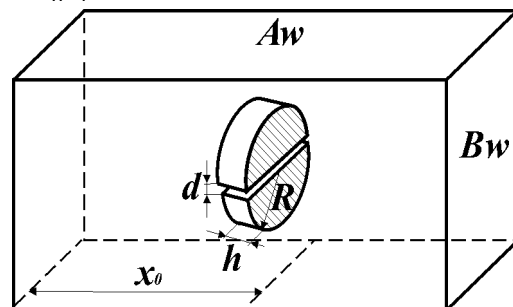


Рис. 1. Диэлектрический резонатор в прямоугольном волноводе

Предложенная методика была апробирована для цельных ДР, для которых известны приближенные аналитические решения [1]. Сравнение зависимостей коэффициента связи от положения ДР в прямоугольном волноводе, рассчитанных по аналитической формуле, приведенной в [1], и полученных с помощью предлагаемого подхода, приведены на рис. 2. Следует отметить, что значения, рассчитанные по аналитической формуле в [1] получены для приближенной модели ДР и имеют систематическую погрешность. Поэтому, результаты на рис. 2 отличаются количественно, но имеют одинаковые тенденции.

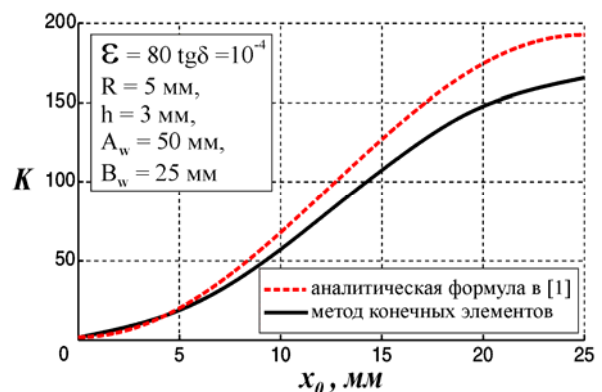


Рис. 2. Зависимость нормированного коэффициента связи от положения ДР в волноводе

2. Влияние параметров СДР на коэффициент связи

Коэффициент связи является функцией от множества параметров, таких как собственная добротность, диэлектрическая проницаемость материала, геометрические размеры ДР и волновода. Из анализа полученных зависимостей для СДР следует, что коэффициент связи для СДР зависит от тех же параметров, что и цельный ДР. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента связи от радиуса, толщины ДР и ширины волновода, рассчитанного с помощью предложенной методики. Видно, что при уменьшении ширины волновода происходит уменьшение коэффициента связи, а при приближении резонансной частоты ДР к значению критической частоты прямоугольного волновода наблюдается существенное уменьшение коэффициента связи. Этот экстремум также описывается в [1].

Выбор геометрических размеров и параметров материала СДР влияет как на значение резонансной частоты, так и на значение коэффициента связи резонатора с прямоугольным волноводом. Увеличению радиуса и толщины ДР увеличивает его связь с волноводом. Выбор материала ДР с меньшим значением диэлектрической проницаемости также приводит к увеличению связи резонатора с волноводом. Эти тенденции совпадают с результатами, полученными для цельных резонаторов.

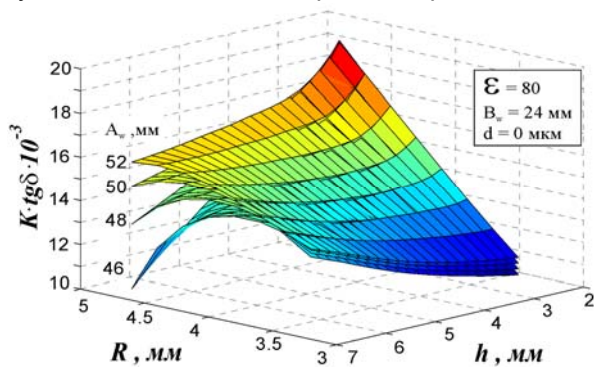


Рис. 3. Зависимость нормированного коэффициента связи от размеров ДР и широкой стенки волновода

Изменения тангенса диэлектрических потерь материала резонатора приводит к прямо пропорциональному изменению коэффициента связи. Поэтому удобно пользоваться нормированными зависимостями коэффициента связи, умноженного на тангенс диэлектрических потерь материала.

Зависимость коэффициента связи СДР от взаимного расстояния между частями ДР (рис.4) имеет возрастающий участок с явно выражен-

ным экстремумом. При этом значения коэффициента связи СДР, в широком диапазоне изменения расстояния между частями резонатора, оказываются больше, чем для цельных ДР. Следовательно, наличие воздушного зазора между составными частями СДР приводит к увеличению коэффициента связи резонатора с линией передачи.

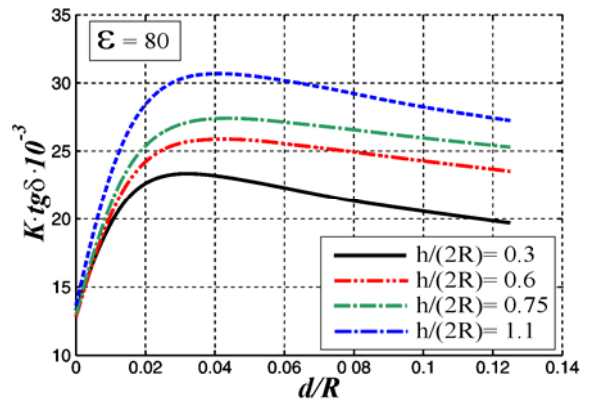


Рис. 4. Зависимость коэффициента связи от размеров СДР и расстояния между его частями

На рис. 5 показана зависимость коэффициента связи от размеров резонатора и величины воздушного зазора между частями СДР. Для любого соотношения толщины к радиусу СДР наблюдается увеличение коэффициента связи при увеличении воздушного зазора.

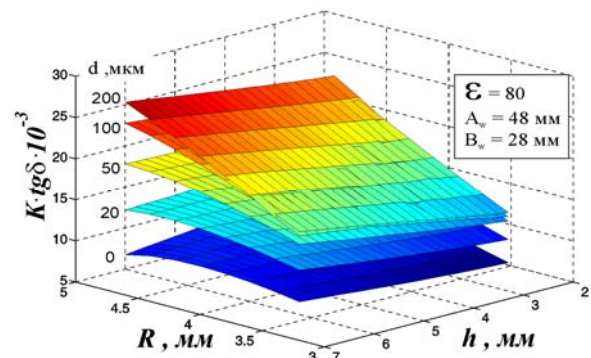


Рис. 5. Зависимость коэффициента связи от размеров СДР и расстояния между его частями

Конструирование фильтров на ДР тесно связано с задачей расчета коэффициентов связи между элементами фильтра. Используя формулу (3) можно оценить характеристики фильтра исходя из известных коэффициентов связи и собственной добротности ДР. Из нее видно, что с ростом коэффициента связи уменьшается коэффициент прохождения на резонансной частоте, что повышает избирательную способность полосно-заграждающего фильтра. Для полосно-пропускающих фильтров увеличение связи резонатора с линией переда-

чи приводит к уменьшению потерь в полосе пропускания.

Вместо воздушного зазора между составными частями резонатора могут быть использованы диэлектрики с низким значением относительной диэлектрической проницаемости. Использование таких композитных СДР с диэлектрическими неоднородностями позволяет повысить коэффициент связи резонатора с волноводом и улучшить амплитудно-частотные характеристики фильтра. Такие многослойные СДР могут также использоваться для термостабилизации резонансной частоты, с помощью подбора материалов с различными температурными коэффициентами частоты. Следовательно, использование композитных СДР позволяет конструировать термостабильные фильтры с улучшенными амплитудно-частотными характеристиками.

Следует отметить, что коэффициент связи ДР с прямоугольным волноводом можно увеличить за счет уменьшения относительной диэлектрической проницаемости материала. Однако, это приводит к увеличению геометрических размеров резонатора. Использование композитных СДР позволяет увеличивать коэффициент связи практически без изменения геометрических размеров резонатора.

Выводы

В статье представлены результаты расчета коэффициентов связи дискового СДР с прямоугольным волноводом с помощью аппроксимации частотных зависимостей элементов матрицы рассеяния, полученных методом конечных элементов. Рассчитаны зависимости коэффициента связи от параметров прямоугольного волновода и СДР. Показано, что изменение взаимного расстояния между частями СДР увеличивает связь СДР с линией передачи более чем на 100%. Увеличение коэффициента связи

приводит к уменьшению потерь в полосе пропускания полосно-пропускающего фильтра и к увеличению уровня затухания полосно-заграждающего фильтра в полосе заграждения. Таким образом, СДР могут применяться для улучшения амплитудно-частотных характеристик фильтра без существенного изменения его геометрических параметров.

Литература

1. Ильченко М.Е., Взятыхшев В.Ф., Гассанов Л.Г., Безбородов Ю.М. Диэлектрические резонаторы. под. ред. М. Е. Ильченко – Москва: Радио и связь, 1989
2. Безбородов, Ю.М. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах / Ю. М. Безбородов, Т.Н. Нарытник, В.Б. Федоров. – К.:Тэхника, 1989. – 184с. – ISBN 5-335-00324-3
3. Poplavko Yu.M., Prokopenko Yu.V., Molchanov V.I., Dogan A. Frequency-tunable microwave dielectric resonator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, June 2001, Vol. 48, N 6, pp. 1020 -1027.
4. B. Pratsiuk, Y. Prokopenko, Y. Poplavko "Tunable sphere and cubic dielectric resonators" // Microwave, Radar and Wireless Communications, 2008. MIKON 2008, vol. 2, pp. 549–552.
5. B. Pratsiuk, D. Tkachov, Y. Prokopenko, Y. Poplavko Tunable dielectric resonator: design and parameters // Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2010). –2010–ч.2–С.655-656.
6. Ильченко М.Е. Частотные характеристики волновода с диэлектрическим резонатором//Изв. Вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. –1987. –Т. 30, №1. – С. 82–83.
7. Cohn S.B. Microwave Bandpass Filters Containig High-Q Dielectric Resonators // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-16, no. 4, pp. 218–227, April 1968