ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 9, с. 1278–1282

УДК 621.396.67

ЭФФЕКТИВНАЯ ДОБРОТНОСТЬ МИНИАТЮРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ В ЭКРАНИРОВАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

© 2022 г. В. М. Геворкян[1], С. В. Вишняков[1], Ю. А. Казанцев[1], А. В. Шутов[1, *]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

*E-mail: ShutovAV@mpei.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.
После доработки 13.05.2022 г.
Принята к публикации 23.05.2022 г.

Электромагнитное поле диэлектрического резонатора рассматривается как сумма внутреннего поля, определяющего собственную добротность и внешнего поля, определяющего внешнюю добротность. Внешняя добротность, в свою очередь, зависит от потерь в стенках линии. Показано, что для значений собственной и внешней много больших единицы, эффективная собственная добротность может быть как больше, так и меньше собственной добротности, что подтверждено численным экспериментом.

DOI: 10.31857/S0367676522090083

ВВЕДЕНИЕ

Открытые диэлектрические резонаторы (ДР), изготовленные из современных керамических материалов, сочетающих высокую относительную диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon_r \approx 30$–40), малые потери ($\mathrm{tg}\delta \approx 10^{-4}$–$5 \cdot 10^{-5}$) и температурную стабильность параметров в широком диапазоне частот [1, 2] в последнее время представляют значительный интерес при создании различных активных и пассивных СВЧ устройств [3–7].

Основной характеристикой ДР является его добротность: отношение запасенной энергии к суммарным потерям (тепловым и радиационным). Обычно для снижения радиационных потерь ДР экранируют, что увеличивает вносимые тепловые потери. При этом возникает понятие эффективная добротность ДР $Q_{эф}$, которая зависит не только от тепловых потерь внутри ДР, но и от потерь в металлических стенках экранов, что затрудняет возможность ее априорной оценки. Задача прогнозирования добротности ДР в устройствах СВЧ осложняется недостаточной точностью определения $\mathrm{tg}\delta$ керамических материалов с высоким значением ε_r в диапазоне СВЧ. Например, в ГОСТ Р 8.623–2015 погрешность измерения $\mathrm{tg}\delta$ составляет $\left(10 + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{\mathrm{tg}\delta}\right)\%$, т.е. при указанных выше $\mathrm{tg}\delta = 10^{-4}$–$5 \cdot 10^{-5}$, величина собственной добротности ДР ($Q_0 = (\mathrm{tg}\delta)^{-1}$) определяется с погрешностью 40–70%, что усложняет численный анализ характеристик СВЧ устройств с применением ДР.

В работе проведен анализ свойств ДР на базе частотных характеристик линий передачи с ДР и рассмотрен алгоритм определения добротностей ДР, расположенных в экранированной линии передачи (волноводе) с неидеальными стенками. Анализ линии передачи с ДР, проведен традиционным методом на основе матриц рассеяния, допускающим как приближенные аналитические, так и численные подходы [8–11]. Особенностью развиваемого алгоритма расчета является учет влияния на добротность ДР помимо тепловых потерь в материале и в стенках линии передачи с конечной проводимостью, также запасенной энергии во внешних полях ДР.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР В СОГЛАСОВАННОМ ВОЛНОВОДЕ

В соответствии с [9] рассмотрим регулярную линию передачи (полый металлический волновод) с ДР и одним основным видом волны (рис. 1).

На рис. 1 поверхность S ограничивает объем V линии с ДР. Плоскости $z = z_1$ и $z = z_2$ выбираются на таком расстоянии от ДР ($z = z_0$), где можно пренебречь высшими нераспространяющимися видами волн, излучаемыми вторичными токами поляризации ДР. Тогда в плоскостях $z = z_1$ и $z = z_2$

будет только падающая $\left(\vec{E}^0, \vec{H}^0\right)$, отраженная $\left(\vec{E}^-, \vec{H}^-\right)$ и прошедшая $\left(\vec{E}^+, \vec{H}^+\right)$ волны.

В этой модели резонансным является весь рассматриваемый объем V линии с ДР. Запасенная энергия в объеме V определяется энергией внутри и вне ДР. Энергия вне ДР определяется в основном высшими нераспространяющимися видами волн. Мощность потерь в объеме V определяется потерями в диэлектрике ($\mathrm{tg}\delta$) и металлических стенках линии, т.е. проводимостью металла ($\sigma_м$).

В случае высокой добротности миниатюрных ДР ($\mathrm{tg}\delta \ll 1$, $\varepsilon_r \gg 1$), пренебрегая "нерезонансным" возмущением ДР линии передачи, коэффициент отражения вблизи резонансной частоты ДР ($\omega \approx \omega_р$) для основного вида волны в плоскости $z = z_0$ согласно [9]:

$$\underline{S}_{11}(j\omega) = \frac{\underline{E}^-}{\underline{E}^0} = \frac{\beta}{1+\beta}\underline{к}(j\omega)e^{-j\Psi}, \qquad (1)$$

где Ψ – фазовый коэффициент, определяемый ориентацией и положением ДР; $\beta = P_и/P_т$ – коэффициент связи линии передачи с ДР по основному виду волны; $P_и$ – излучаемая мощность из объема V на резонансной частоте $\omega_р$; $P_т$ – мощность тепловых потерь в ДР и в металлических стенках линии передачи на резонансной частоте $\omega_р$.

Частотный коэффициент $\underline{к}(j\omega)$ в (1) при $\omega \approx \omega_р$ записывается в виде

$$\underline{к}(j\omega) = \left[1 + j\frac{Q_{эф}}{1+\beta}\left(\frac{\omega^2 - \omega_р^2}{\omega_р^2}\right)\right]^{-1}, \qquad (2)$$

где $Q_{эф} = \omega_р W_з / P_т$ – эффективная добротность ДР (добротность объема V с ДР), $W_з$ – запасенная энергия электромагнитного поля в объеме V.

Эффективная добротность $Q_{эф}$ в соответствии с (1) и (2) может быть определена по частотной характеристике $S_{11}(\omega) = \left|\underline{S}_{11}(j\omega)\right|$ как $Q_{эф} = \omega_р(1+\beta)/\Delta\omega$, где $\Delta\omega$ – ширина резонансной кривой $S_{11}(\omega)$ по уровню половинной мощности; β определяется из (1) при $\omega = \omega_р$.

Проанализируем выражение для $Q_{эф}$ с точки зрения разделения электромагнитного поля ДР на внешнее и внутреннее. Разобьем весь объем V на внутренний объем ДР $V_{вн}$ и объем снаружи $V_{нар}$, тогда

$$Q_{эф} = \frac{\omega_р W_з}{P_т} = \frac{\omega_р\left(W_{з,вн} + W_{з,нар}\right)}{P_{т,вн} + P_{т,нар}} = \frac{\omega_р W_{з,вн}}{P_{т,вн}}\left[\frac{1 + \dfrac{W_{з,нар}}{W_{з,вн}}}{1 + \dfrac{P_{т,нар}}{P_{т,вн}}}\right] = Q_0\left(\frac{1 + K_W}{1 + \dfrac{Q_0}{Q_e}K_W}\right), \qquad (3)$$

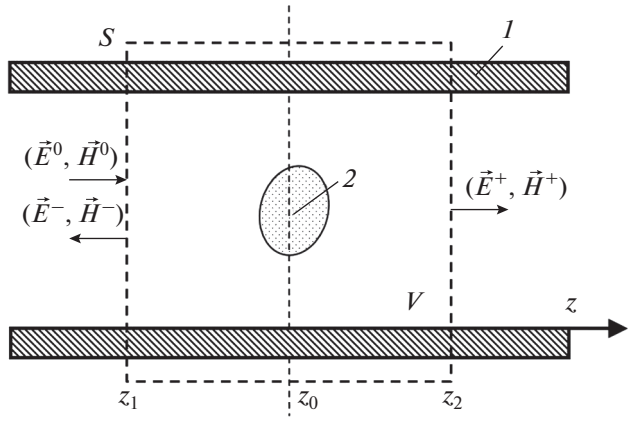

Рис. 1. Модель регулярной линии передачи с ДР. *1* – волновод; *2* – диэлектрический резонатор.

где $W_{з,\,вн}$ и $P_{т,\,вн}$ – запасенная энергия и мощность тепловых потерь в ДР; $W_{з,\,нар}$ и $P_{т,\,нар}$ – запасенная энергия снаружи ДР и мощность потерь в стенках линии; $Q_0 = \omega_р W_{з,\,вн}/P_{т,\,вн} = 1/\mathrm{tg}\delta$ – собственная (внутренняя) добротность ДР; $Q_e = \omega_р W_{з,\,нар}/P_{т,\,нар}$ – внешняя добротность ДР; $K_W = W_{з,\,нар}/W_{з,\,вн}$.

При высокой добротности ДР ($Q_0 \gg 1$) и малых потерях в стенках линии передачи ($Q_e \gg 1$) структура полей в объеме V вблизи резонансной частоты ($\omega \approx \omega_р$) не зависит от Q_0, отсюда K_W и Q_e также не зависят от Q_0. Зависимость $Q_{эф}$ от Q_0 согласно (3) имеет вид, показанный на рис. 2. Согласно рис. 2 в случае $Q_0 > Q_е$ получим $Q_{эф} < Q_0$, при $Q_0 < Q_е$ получим $Q_{эф} > Q_0$ и в особом случае $Q_0 = Q_е = Q_{эф}$.

Измерение добротности ДР в согласованном волноводе связано со сложностью учета "нерезонансного" возмущения" [8, 12]. Нерезонансное возмущение приводит к отличию реальных частотных характеристик измерительного тракта с ДР от классических резонансных кривых. Малое возмущение может быть приближенно учтено, но это требует дополнительной математической обработки результатов измерений.

Нерезонансное возмущение можно существенно уменьшить, располагая ДР в короткозамкнутом волноводе, например, в минимуме электрического поля стоячей волны.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР В КОРОТКОЗАМКНУТОМ ВОЛНОВОДЕ

Поместим ДР в короткозамкнутый волновод. Расстояние от ДР до короткозамкнутой стенки выберем кратным половине длины волны в волноводе, тем самым ДР будет находится в узле электрического поля, что минимизирует нерезонансное возмущение ДР волновода.

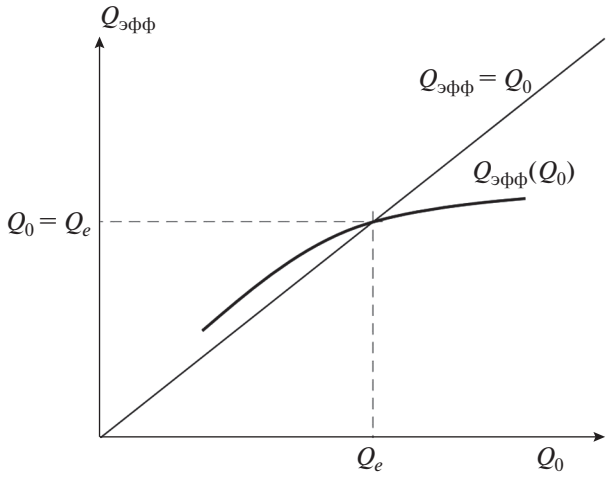

Рис. 2. Зависимость $Q_{эф}(Q_0)$ при условии $Q_0 \gg 1$ и $Q_e \gg 1$.

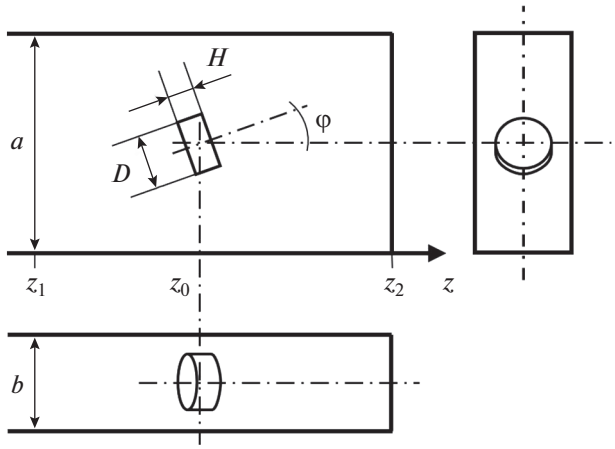

Рис. 3. ДР в короткозамкнутом волноводе. Расчетная модель.

Резонансный объем V в этом случае включает в себя весь отрезок волновода от короткозамкнутой стенки ($z = z_2$) до некоторого сечения ($z = z_1$), где можно пренебречь нераспространяющимися видами волн волновода, возбуждаемыми токами поляризации ДР.

Коэффициент отражения по основному виду волны [8]:

$$\underline{S}_{11}(j\omega) = \left[1 - \frac{2\beta}{1+\beta}\underline{\kappa}(j\omega)\right]e^{-j\Psi}, \quad (4)$$

где β определено по (1), $\underline{\kappa}(j\omega)$ по (2). Выводы (3) для $Q_{эф}$ верны и в этом случае.

При $\omega = \omega_р$

$$S_{11р} = \frac{|1-\beta|}{|1+\beta|}, \quad (5)$$

$\beta = \dfrac{1 - S_{11р}}{1 + S_{11р}}$ при $\beta < 1$; $\beta = \dfrac{1 + S_{11р}}{1 - S_{11р}}$, при $\beta > 1$; $\beta = 1$, при $S_{11р} = 0$.

Коэффициент отражения по уровню половинной мощности из (4)

$$S_{11}^{(0.5)} = \sqrt{\frac{1 - S_{11р}^2}{2}} = \frac{\sqrt{1+\beta^2}}{1+\beta}. \quad (6)$$

Эффективная добротность $Q_{эф}$ определяется формулой

$$Q_{эф} = \frac{\omega_р}{\Delta\omega}(1+\beta). \quad (7)$$

Численный эксперимент проводился в среде СВЧ моделирования CST Studio Suite (Student Edition). Дисковый ДР с $H_{01\delta}$ видом колебания располагался в прямоугольном короткозамкнутом волноводе, как показано на рис. 3.

Таблица 1. Результаты численного моделирования при $(z_2 - z_0) = \lambda_в/2$

Q_0	5000	7500	10000	12500	15000	17500	20000	Q_e	K_W
$Q_{эфф}$ модель	5614	8106	10415	12563	14564	16434	18185	12857	0.219
$Q_{эфф}$ по (3)	5616	8109	10419	12563	14564	16434	18185		

Таблица 2. Результаты численного моделирования при $(z_2 - z_0) = \lambda_в$

Q_0	5000	7500	10000	12500	15000	17500	20000	Q_e	K_W
$Q_{эфф}$ модель	5703	8173	10430	12500	14404	16164	17795	12500	0.260
$Q_{эфф}$ по (3)	5706	8175	10431	12500	14406	16166	17797		

Сечение волновода $a \times b = 28.5 \times 12.6$ мм, материал стенок – медь ($\sigma_м = 6 \cdot 10^7$ См $\cdot$ м$^{-1}$). Параметры дискового ДР: диаметр $D = 4.9$ мм, высота $H = 2.4$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость материала $\varepsilon_r = 40$, резонансная частота $f_0 = 10$ ГГц. Угол поворота ДР $\varphi = 7°$.

Результаты численного эксперимента при изменении Q_0 для двух различных расстояний $\lambda_в/2$ и $\lambda_в$ от ДР ($z = z_0$) до короткозамкнутой стенки ($z = z_2$) приведены в табл. 1 и 2.

Численное моделирование задачи подтверждает возможность разбиения поля ДР на внешнее и внутреннее, а также достоверность формулы (3) для $Q_{эф}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытые ДР формируют колебательные системы современных СВЧ устройств. Основной характеристикой ДР является добротность. Она зависит не только от тангенса угла диэлектрических потерь, но и от вносимых потерь в окружающих конструкциях и энергии, запасенной во внешних полях объемов с ДР. Причем, на практике разработчиков СВЧ устройств чаще всего интересуют свойства ДР в экранированных объемах и линиях, ограничивающих потери на излучение. Поэтому представленный в работе анализ влияния на добротность ДР экранов, проведенный на примере волноводных линий, представляет практический интерес.

Результаты численного эксперимента указывают на высокую достоверность рассмотренного алгоритма расчета добротности ДР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рыбкин В.Н., Фомина Г.В., Коломин В.М.* // Электрон. и микроэлектрон. СВЧ. 2017. Т. 1. С. 17.
2. *Ненашева Е.А.* // Электрон. пром. 2014. № 2. С. 84.
3. *Геворкян В.М., Кочемасов В.Н.* // Электроника: наука, технол., бизнес. Ч. 1. 2016. № 4. С. 62.
4. *Геворкян В.М., Кочемасов В.Н.* // Электроника: наука, технол., бизнес. Ч. 2. 2016. № 5. С. 76.
5. *Геворкян В., Кочемасов В., Шадский В.* // Электроника: наука, технол., бизнес. Ч. 1. 2020. № 2. С. 114.
6. *Геворкян В., Кочемасов В., Шадский В.* // Электроника: наука, технол., бизнес. Ч. 2. 2020. № 4. С. 102.
7. *Геворкян В., Кочемасов В., Шадский В.* // Электроника: наука, технол., бизнес. Ч. 3. 2020. № 5. С. 112.
8. *Алексейчик Л.В., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А. и др.* // Радиотехн. и электрон. 1977. Т. 22. № 3. С. 512.
9. *Алексейчик Л.В., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А. и др.* // Электрон. техн. СВЧ техн. 1979. № 8. С. 15.
10. *Ильченко М.Е., Взятышев В.Ф., Гассанов Л.Г. и др.* Диэлектрические резонаторы. М.: Радио и связь, 1989. 327 с.
11. *Вишняков С., Геворкян В., Казанцев Ю.* // Электроника: наука, технол., бизнес. 2009. № 2. С. 52.
12. *Егоров В.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 8. С. 493.

Effective Q-factor of miniature dielectric resonators in shielded transmission lines

V. M. Gevorkyan[a], S. V. Vishnyakov[a], Yu. A. Kazantsev[a], A. V. Shutov[a, *]

[a] *National Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia*

**e-mail: ShutovAV@mpei.ru*

The electromagnetic field of a dielectric resonator is considered as the sum of the internal field, which determines its own quality factor, and the external field, which determines the external quality factor. The external quality factor, in turn, depends on the losses in the line walls. It is shown that for own quality factor and external quality factor which are much more than 1 the effective intrinsic quality factor can be either greater or less than own quality factor, which is confirmed by a numerical experiment.