

09

© 1992 г.

МЕЖДУТИПОВАЯ СВЯЗЬ И РЕЗОНАНСНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА АЗИМУТАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

З.Е.Еременко, Ю.Ф.Филиппов, С.Н.Харьковский

Приводятся результаты экспериментального исследования и теоретического моделирования эффектов взаимодействия азимутальных колебаний высшего порядка в диэлектрических резонаторах миллиметрового диапазона волн. Обнаружено, что резкие изменения резонансного отклика вблизи точки совпадения частот двух собственных колебаний резонатора определяются наличием распределенной неоднородности и возникновением междутиповых азимутальных колебаний. Показана динамика резонансной перестройки колебаний в зависимости от величины неоднородности. Обнаружены эффекты устранения междутиповой связи за счет самокомпенсации одной и взаимной компенсации двумя распределенными неоднородностями.

Введение

Резкие изменения электродинамических характеристик, наблюдаемые в различных резонансных структурах, часто являются следствием междутиповой связи колебаний [1–4]. Весьма важны ее исследования в дисковых диэлектрических резонаторах (ДДР) [5–7], азимутальные колебания которых обладают высокой добротностью в миллиметровом диапазоне волн, но имеют густой спектр резонансных частот [8]. В этом диапазоне можно избежать возникновения междутиповой связи колебаний ДДР из-за технологических неоднородностей, шероховатости поверхности и т.п. Особого внимания требуют устройства связи таких резонаторов с другими элементами.

В данной работе экспериментально и теоретически исследуются механизм возникновения и пути устранения междутиповой связи азимутальных колебаний высшего порядка в ДДР.

Экспериментальные исследования

ДДР из фторопласта-4 диаметром 106 мм и высотой 7.2 мм возбуждался путем распределенной связи его с прямоугольным диэлектрическим волноводом (ДВ) сечением $7.2 \times h$ мм² из фторопласта-4 (вставка на рис. 1).

Поляризация (EH или HE) задается соответствующей ориентацией ДВ относительно ДДР. Рассматриваемые особенности междутиповой связи одинаково проявляются для обеих поляризаций. EH колебания, в частности, образуют две близкие периодические последовательности резонансных откликов с различными периодами в диапазоне частот 36–45 Гц. Одна соответствует низшему типу колебаний EH_{n11} , вторая — высшему радиальному типу $EH_{n'21}$. Здесь n и n' — азимутальные индексы. Колебания с $n = 51$ и $n' = 46$ имеют практически точку

совпадения частот $f_0 \sim 37.666$ ГГц при малой связи ДВ с ДДР. Введение азимутальной неоднородности приводит к междутиповой связи этих колебаний. Такой неоднородностью может быть сам возбуждающий ДВ при изменении расстояния δ между ним и ДДР.

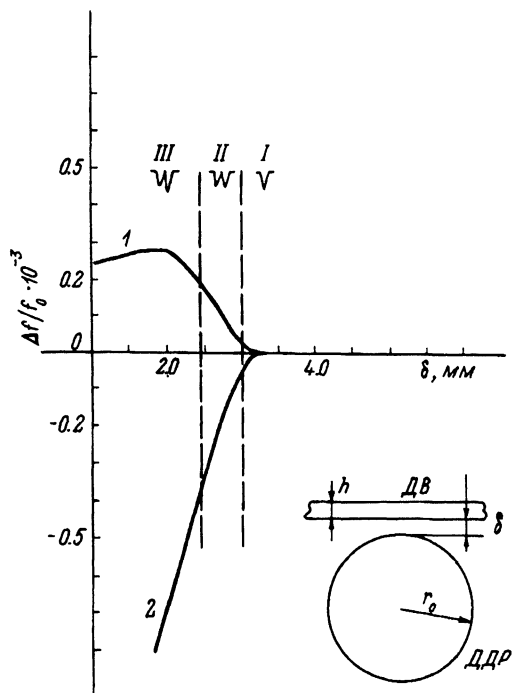


Рис. 1. Зависимость относительного изменения резонансных частот $(\Delta f)/f_0$ от расстояния δ между ДВ и ДДР.

1 - f^+ , 2 - f^- .

На рис. 1 показана зависимость относительного изменения резонансных частот $\Delta f/f_0$ ДДР, возбуждаемого ДВ с $h = 3.4$ мм, от δ . Как видно из приведенных на этом же рисунке осциллограмм резонансов, их характер существенно меняется. При $3 < \delta < 6$ мм (участок I) в ДДР возбуждаются на одной частоте f_0 два колебания равной амплитуды $EH_{51.1.1}$ и $EH_{46.2.1}$. Это подтверждает наблюдаемая методом возмущающего зонда интерференция полей на боковой поверхности ДДР. Результирующее колебание является устойчивым.

При $2.5 < \delta < 3$ мм (участок II) возникают два одинаковых симметричных резонанса с частотами $f^+ > f_0$ и $f^- < f_0$. Они появляются одновременно и в том случае, если условия возбуждения выполняются только для одного из взаимодействующих колебаний. Например, низший тип EH_{n11} в исследуемом случае практически не возбуждается ДВ с толщиной $h \leq 1.0$ мм, а вблизи f_0 наблюдаются два резонанса. Электродинамические характеристики системы на участке II являются неустойчивыми, здесь трудно идентифицировать структуры полей. При незначительном изменении параметров резонатора осуществляется переход к независимым колебаниям $EH_{51.1.1}$ и $EH_{46.2.1}$, а при незначительном изменении δ (величины неоднородности) — на участок I или III.

Введение дополнительной неоднородности может устранить (компенсировать) междутиповую связь [1]. В рассматриваемом случае приближение с диаметрально противоположной стороны ДДР второго идентичного ДВ восстанавливает независимые колебания на одной частоте ($\Delta f^\pm = 0$).

При $\delta < 2.5$ мм (участок III) частота f^- уменьшается, а f^+ практически не изменяется. Исследование структуры полей показывает, что на этом участке формируются два не связанных между собой, квазивырожденных колебания неоднородного ДДР. Каждое из них представляет собой пространственные биения

азимутальных колебаний однородного ДДР; за счет неоднородности они имеют разные частоты и их огибающие сдвинуты относительно друг друга вдоль азимутальной координаты на π . Распределение полей именно этих колебаний наблюдалось в [6].

Таким образом, вблизи точки совпадения частот двух азимутальных колебаний ДДР одной поляризации, но с различным распределением полей возникает междутиповая связь. Ее причиной является азимутальная неоднородность диэлектрической проницаемости ДДР у его боковой поверхности, формируемая под влиянием ДВ на участке связи. При малой неоднородности в резонаторе возбуждаются междутиповые колебания, характеристики которых резко изменяются при незначительном изменении его параметров. Они представляют особый интерес [4].

Теоретическая модель междутиповой связи азимутальных колебаний

Основные свойства междутиповой связи под влиянием азимутальной неоднородности можно рассмотреть на двумерной модели диэлектрического резонатора. Собственные частоты H колебаний ($H_r = H_\varphi = E_z = 0$) определяются решениями дисперсионного уравнения [8]:

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon g}} \frac{J'_n(x_p)}{J_n(x_p)} = \frac{H_n^{(1)'}(x_p^0)}{H_n^{(1)}(x_p^0)}, \quad (1)$$

а поля, удовлетворяющие условию ортогональности

$$\int [\epsilon(r) \mathbf{E}_p^* \mathbf{E}_{p'} + \mathbf{H}_p^* \mathbf{H}_{p'}] dv = 2N_p \delta_{pp'}, \quad (2)$$

описываются выражениями

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{c}{\epsilon(r)r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi}, \quad \frac{\partial E_\varphi}{\partial t} = -\frac{c}{\epsilon(r)} \frac{\partial H_z}{\partial r}, \quad (3)$$

$$H_z = A_p = e^{i\psi_p} \begin{cases} J_n(\sqrt{\epsilon g} k_p r), & r \leq r_0, \\ \frac{J_n(x_p)}{H_n^{(1)}(x_p^0)} H_n^{(1)}(k_p r), & r > r_0 \end{cases}. \quad (4)$$

Здесь штрих обозначает дифференцирование по аргументу, $J_n(x)$ и $H_n^{(1)}(x)$ — функции Бесселя и Ханкеля первого рода порядка n ; $k_p = \omega_p/c$, ω_p — собственная частота p -го колебания. Опуская аксиальный индекс ($l = 0$), под p подразумеваем двойной индекс n, m , $x_p = \sqrt{\epsilon g} x_p^0$, $x_p^0 = k_p r_0$, $N_p = \int_V |\mathbf{H}_p|^2 dv$ — норма p -го колебания, $\epsilon(r) = \epsilon_g$ при $r \leq r_0$, $\epsilon(r) = 1$ при $r > r_0$, $\Psi_p = n\varphi - \omega_p t$. Численным исследованием (1) определяем точки совпадения частот двух типов собственных колебаний резонатора. Например, резонатор с диаметром 106 мм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon_g = 2.03$ имеет одну и ту же частоту $f_0 = 35.555$ ГГц колебаний $H_{50.1.0}$ и $H_{45.2.0}$.

Влияние малой неоднородности $\Delta\epsilon(2, \varphi)$ на электродинамические характеристики резонатора исследуем при помощи интегрального соотношения

$$(\omega - \omega_p) \int_V [\epsilon(r) \mathbf{E}_p^* \mathbf{E}_p + \mathbf{H}_p^* \mathbf{H}_p] = \omega \int_V \Delta\epsilon(r, \varphi) \mathbf{E}_p^* \mathbf{E}_p dv. \quad (5)$$

Здесь ω_p , \mathbf{E}_p , \mathbf{H}_p и ω , \mathbf{E} , \mathbf{H} — частоты, поля однородного и неоднородного резонаторов соответственно. Пренебрегая влиянием волн излучения, представим \mathbf{E} и \mathbf{H} в виде суперпозиции мод однородного резонатора

$$\mathbf{H} = \sum_{q=0}^{\infty} \alpha_q \mathbf{H}_q, \quad \mathbf{E} = \sum_{q=0}^{\infty} \alpha_q \mathbf{E}_q. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), используя условие ортогональности (2), получаем относительно α_q бесконечную систему алгебраических уравнений вида

$$\sum_{q=0}^{\infty} [(\omega - \omega_p) \delta_{pq} - \omega \Lambda_{pq}] \alpha_q = 0, \quad (7)$$

$$\Lambda_{pq} = \frac{1}{N_p} \int_V \Delta \epsilon(r, \varphi) \mathbf{E}_p^* \mathbf{E}_p dv, \quad (8)$$

где Λ_{pq} — коэффициент связи, описывающий влияние неоднородности на частоты резонатора и взаимодействие различных типов колебаний.

Условием существования нетривиальных решений системы (7) является обращение в нуль определителя матрицы $D = \det \|D\| = 0$, где D — бесконечная матрица вида

$$\hat{D} = (\omega - \omega_p) \delta_{pq} - \omega \Lambda_{pq}. \quad (9)$$

Из (7) замечаем, что неоднородность диэлектрической проницаемости приводит к появлению взаимодействия между различными типами колебаний и к изменению резонансных частот однородного резонатора. При малых неоднородностях и при совпадении частот двух собственных колебаний без учета вклада других типов колебаний ($\sim \Delta \epsilon^2$) имеем

$$\Delta \omega^{\pm} = \pm \frac{\omega}{2} \sqrt{\Lambda_{pp'} \Lambda_{p'p}}. \quad (10)$$

Для поверхностной неоднородности типа

$$\Delta \epsilon = \begin{cases} \Delta \epsilon_0 \frac{1}{r} \cdot \delta(r - r_0), & 0 \leq \varphi \leq \varphi_0, \\ 0, & \varphi_0 < \varphi < 2\pi, \end{cases} \quad (11)$$

где φ_0 — угол раскрыва, из (8) получаем $\Lambda_{pp'} \sim \sin(\Delta n \varphi_0)$ ($\Delta n = (n - n') / 2$). Междутиповая связь отсутствует ($\Delta \omega = 0$) при $\varphi_0 = 4\pi \Delta n$. Это эффект самокомпенсации неоднородности, специфический для распределенных систем.

При введении второй аналогичной распределенной неоднородности, отстоящей от первой на угол Ψ_0 , имеем

$$\Lambda_{nn'} \sim \frac{1}{2\Delta n} \sin(\Delta n \varphi_0) \cos(\Delta n \varphi_0) \cdot e^{i\Delta n(\varphi_0 + \psi_0)}. \quad (12)$$

Из вида $\Lambda_{nn'}$ замечаем, что для колебаний с нечетной разностью азимутальных индексов при введении двух диаметрально расположенных подобных неоднородностей ($\Psi_0 = \pi$) возникает компенсация связи колебаний. Как отмечалось выше, это наблюдалось в эксперименте с двумя ДВ.

Используя выражения (2), (6), (7), можно показать, что на частоте f_0 H_z компонента возникающих гибридных колебаний вблизи боковой поверхности резонатора определяется выражением

$$H_z^{\pm} \sim \left[\begin{cases} \cos(\Delta n \varphi) \\ i \sin(\Delta n \varphi) \end{cases} \right] \pm \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\Lambda_{pp'}}{\Lambda_{p'p}}} - 1 \right) e^{i\Delta n \varphi} \cdot e^{i\frac{n+n'}{2}\varphi} e^{i(\omega + \Delta \omega^{\pm})t}. \quad (13)$$

Различие в $\Lambda_{pp'}$ и $\Lambda_{p'p}$ обязано неодинаковому распределению полей для p и p' колебаний в объеме ДДР. Подбором параметров возбуждающего волновода можно добиться того, что $\Lambda_{pp'} = \Lambda_{p'p}$, это и было достигнуто в эксперименте. В этом случае

$$H_z^+ \sim \cos(\Delta n \varphi) \cdot e^{i \frac{n+n'}{2} \varphi},$$

$$H_z^- \sim \sin(\Delta n \varphi) \cdot e^{i(\frac{n+n'}{2} \varphi + \frac{\pi}{2})}, \quad (14)$$

т.е. азимутальные волны, образующие расщепленные колебания, имеют одинаковые замедления, но сдвинуты по фазе на 90° относительно друг друга, а огибающие их противофазны.

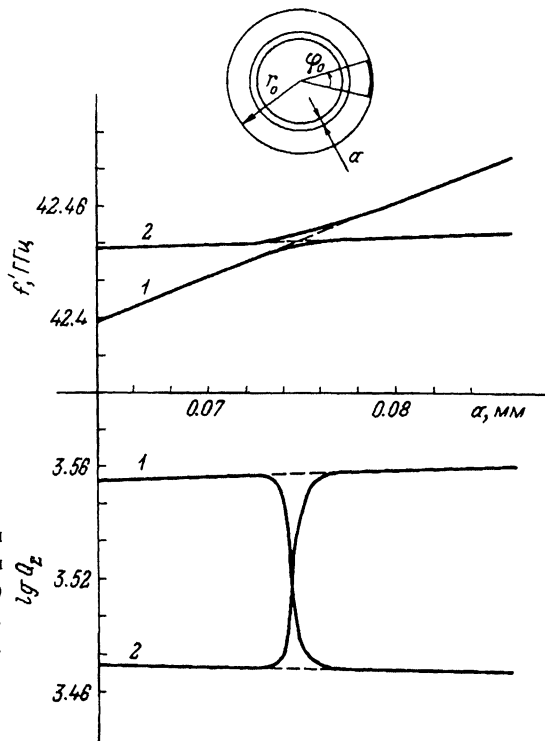


Рис. 2. Зависимость действительной части резонансной частоты f' и добротности Q_z (с учетом диэлектрических потерь) от ширины кольцевой щели α в резонаторе. 1 — для колебания $H_{60.1.0}$, 2 — $H_{55.2.0}$.

Предложенная теоретическая модель может эффективно применяться при перестройке резонатора путем изменения одного из его неспектральных параметров при постоянной неоднородности. Так, при изменении ширины узкой кольцевой щели (вставка на рис. 2) происходит перестройка резонансных частот колебаний резонатора. Проведя теоретическое моделирование этой структуры, можно получить аналогичные выражения для спектральных характеристик вблизи точки совпадения частот. Численное исследование их представлено на рис. 2. Замечаем, что вблизи точки совпадения частот вырожденных колебаний $H_{55.2.0}$ и $H_{60.1.0}$ в неоднородном резонаторе происходит расщепление азимутальных колебаний с обменом их типов вдоль каждой спектральной кривой. Радиационные добротности сравниваются, а перестроечные кривые имеют вид графиков Вина.

Выводы

Проведенный выше качественный анализ показывает, что в ДДР под влиянием распределенной неоднородности происходит перестройка электродинамических характеристик двух азимутальных колебаний с совпадающими частотами. В зависимости от величины неоднородности динамика преобразований колебаний

проходит через следующие этапы: 1) возбуждение независимых колебаний однородного ДДР, 2) их междутиповой связи, 3) возбуждение колебаний неоднородного ДДР. Таким образом, между типовые колебания являются переходными (критическими) между резонансными колебаниями однородного и неоднородного ДДР. Структура полей этих колебаний резко изменяется при незначительном изменении параметров системы. В частном случае одинакового распределения полей в области неоднородности двух взаимодействующих колебаний можно выделить их определенную структуру: компоненты полей, образующие между типовые колебания, промодулированы ортогональными огибающими вдоль азимутальной координаты. Между типовые колебания могут проявиться в виде неустойчивых амплитудно-частотных характеристик устройств, гистерезисных явлений и изменения спектра колебаний в активных устройствах с ДДР подобно наблюдаемому в [7]. Устранить неустойчивые между типовые колебания можно при определенной протяженности неоднородности вдоль азимутальной координаты (эффект самокомпенсации) или введением второй неоднородности, идентичной первой (эффект компенсации).

Список литературы

- [1] Штейншлейгер В.Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 114 с.
- [2] Богомолов Г.Д., Маненков А.Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. № 5. С. 748–753.
- [3] Артеменко С.Н., Каминский В.Л. // ЖТФ. 1989. Т. 63. Вып. 11. С. 161–164.
- [4] Шестопалов В.П. // ДАН СССР. 1988. Т. 303. № 5. С. 1131–1134.
- [5] Раевский Г.П., Взятыхшев В.Ф. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 10. С. 66–68.
- [6] Кириченко А.Я., Харьковский С.Н. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 6. С. 12–16.
- [7] Харьковский С.Н. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 11. С. 90–94.
- [8] Ильченко М.Е., Взятыхшев В.Ф., Гасанов Л.Г. и др. Диэлектрические резонаторы. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.

Институт радиофизики и электроники

Харьков

Поступило в Редакцию

8 апреля 1991 г.