



ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ С БОЛЬШИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕЗОНАТОРНЫМИ МЕТОДАМИ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

ПАНЧЕНКО А.Ю.

Рассматриваются возможности измерения параметров диэлектриков с большими коэффициентами поглощения при помощи резонаторных СВЧ-датчиков, использующих как основные, так и высшие моды.

Резонаторные СВЧ-датчики широко применяются в измерительной практике. В ряде случаев они дают наиболее полную информацию об объекте, а иногда являются единственно возможными [1]. Они позволяют измерять характеристики образцов и сред в диапазоне СВЧ, в котором можно получить наибольшую информацию об их составе и внутренней структуре. Основными параметрами, которые подлежат измерению, являются действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости образца. Определяют их путем пересчета измеренных значений сдвига резонансной частоты пустого и заполненного резонатора и величиной уменьшения его добротности. Такой способ пригоден для диэлектриков с малыми потерями. В противном случае необходимо использовать частичное заполнение внутреннего объема резонатора, что усложняет решение электродинамической задачи и требует предварительной обработки образца. Однако такой подход неприемлем в случае измерения параметров газообразных или жидких веществ. Использование дополнительных камер для ограничения объема измеряемого вещества может привести к значительным погрешностям, а необходимость размещения клапанов для его наполнения — к существенной деформации поля в нем.

В основе создания измерительных СВЧ-преобразователей лежат расчетные соотношения для полей в объемных резонаторах. Как правило, используют прямоугольные или круглые резонаторы. В случае прямоугольных резонаторов с однородным заполнением решение можно получить в виде тригонометрических функций для всех компонент поля, в случае круглых — для переменных, изменяющихся вдоль осевой линии. Представление в виде элементарных функций позволяет не только существенно ускорить решение задач с помощью численных методов на ЭВМ, но и значительно расширить круг задач, для которых можно получить либо аналитическое, либо численное решение.

Полный анализ поля в заполненном резонаторе весьма громоздкая задача, поэтому ограничимся рассмотрением поля вдоль одной из координат. На практике это соответствует задачам для тонких коаксиальных резонаторов или объемных резонаторов, которые работают на частотах, близких к критическим.

В зависимости от вида резонатора используются решения для электрических или магнитных составляющих поля. Но в обоих случаях анализ резонансных явлений в линейных областях с потерями сводится к решению уравнения

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \varepsilon \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial U}{\partial t} = f(x, t), \quad (1)$$

где ε и σ — параметры, определяющие действительную и мнимую части комплексного коэффициента распространения; $f(x, t)$ — интенсивность внешних источников.

При возмущении области источником гармонических колебаний решение представляет собой линейную комбинацию функций вида

$$U = u_0 e^{\pm \alpha x} \cos(\omega t \pm kx + \varphi_0), \quad (2)$$

здесь u_0 — начальная амплитуда волны; φ_0 — начальная фаза;

$$\alpha = \sqrt{\frac{\varepsilon^2 \omega^4 + \sigma^2 \omega^2 - \varepsilon \omega^2}{2}};$$

$$k = \sqrt{\frac{\varepsilon^2 \omega^4 + \sigma^2 \omega^2 + \varepsilon \omega^2}{2}}.$$

Обычно решение уравнения (1) представляется в форме интеграла от произведения функции источника на функцию Грина. Этот метод разработан достаточно полно [2,3], но требует представления решений в виде рядов собственных функций.

Для анализа линейных резонансных систем, которые возбуждаются элементами связи малых размеров, можно использовать приближение точечного источника. Это приближение позволяет получить достаточно удобные и точные соотношения как в случае резонаторов без потерь, так и в случае резонаторов, заполненных средой со значительными потерями. Необходимо также учитывать зависимость от времени реакции системы на воздействие точечного источника, поскольку при наличии потерь в системе будут существовать бегущие волны.

Составление линейных комбинаций из функций (2) необходимо проводить на основании конкретного вида граничных условий. Он задается типом резонансной системы и переменной, для которой составлено уравнение (1). Кроме того, должна быть учтена непрерывность поля в точке источника и величина скачка производных справа и слева от нее. По сути, эти условия соответствуют условиям, при которых составляется функция Грина, но представление решения в виде элементарных функций существенно уменьшает объем вычислений.

Опуская несложные, но весьма громоздкие выкладки, а также несущественные нюансы подготовки численных расчетов в среде Mathcad-2000, рассмотрим результаты, которые могут иметь практическое значение при конструировании измерительных СВЧ-преобразователей.

Резонансный преобразователь представляет собой непосредственно резонатор и некоторую измерительную цепь, определяющую его внешние параметры, переводя информацию, носителем которой первоначально являются СВЧ колебания, в диапазон частот, доступных для средств отображения и обработки. Реальные конструкции резонаторов позволяют иметь один или несколько элементов связи. В случае одного элемента измерительная цепь должна реагировать на изменение полного импеданса. Два и более элементов связи позволяют определить изменение проходных характеристик резонатора. Таким образом, для того, чтобы представить поведение отклика резонаторного измерителя на помещение в него исследуемого образца, необходимо проанализировать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики на отражение и на проход при различных положениях элементов связи, или, решая обратную задачу, поведение резонансной частоты и добротности.

В отличие от системы без потерь, в данном случае необходимо указывать момент фиксации распределения поля. Затухающие бегущие волны существенно меняют распределение поля, зафиксированное в различные моменты времени.

На рис.1 показано изменение U в зависимости от относительного изменения частоты $\Delta\omega_0 = \omega/\omega_0$, где ω_0 – значение резонансной частоты в отсутствие потерь в полуволновом резонаторе, в центр которого помещен источник единичной амплитуды. Резонатор заполняется средами с $\varepsilon=1$ и различными значениями потерь.

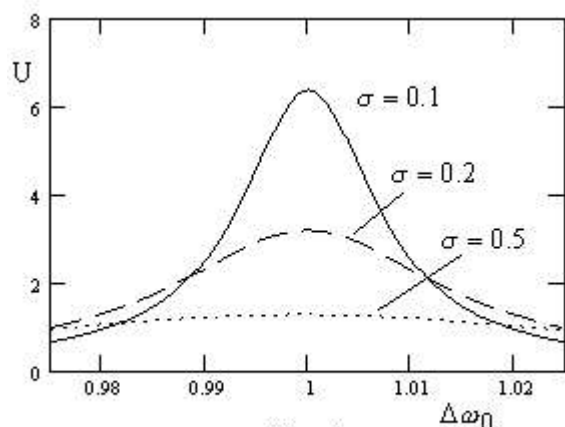


Рис. 1.

Распределение рассчитывалось для момента времени, сдвинутого на полпериода относительно фазы источника. Этот момент соответствует максимуму резонирующей волны. Значением $\sigma = 0.2$ практически можно ограничить использование амплитудных критериев для определения внешних параметров нагруженного резонатора. При больших потерях необходимо пользоваться фазовыми критериями. Но это не снижает практической ценности,

поскольку фазовые методы определения сдвига резонансной частоты более точные и удобные. Например, при построении измерителя по схеме автогенератора с включением резонатора в петлю обратной связи, или по схеме автодина с подключением резонатора в точках с отрицательным значением действительной части полного импеданса изменение частоты генерации происходит в основном вследствие сдвига фазы. Такие схемы часто используются как в образцовых, так и в рабочих средствах измерений. Фазовый сдвиг колебаний относительно фазы резонирующей волны для этого резонатора представлен на рис.2.

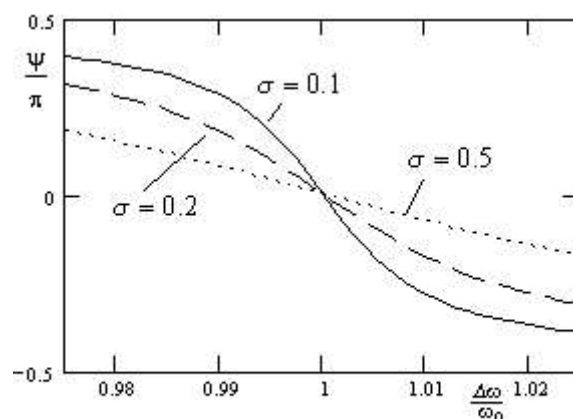


Рис. 2.

На рис.3 показано относительное изменение резонансной частоты полуволнового резонатора при перемещении элемента связи вдоль оси. Расстояние ξ откладывается в отношении к длине волны.

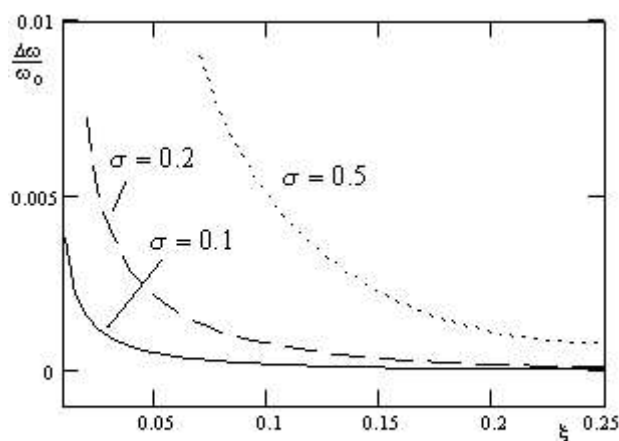


Рис. 3.

Потери в резонаторе приводят к росту резонансной частоты. Их можно интерпретировать действием токов проводимости, поэтому наличие потерь в объеме нужно представить как приближение границ к центру. Существенное возрастание резонансной частоты при перемещении элемента связи к границе вызвано увеличением вклада бегущей волны и уменьшением вклада резонирующей.

На рис.4 показаны зависимости резонансной частоты для полуволнового резонатора с двумя элементами связи, один из которых размещен в центре.

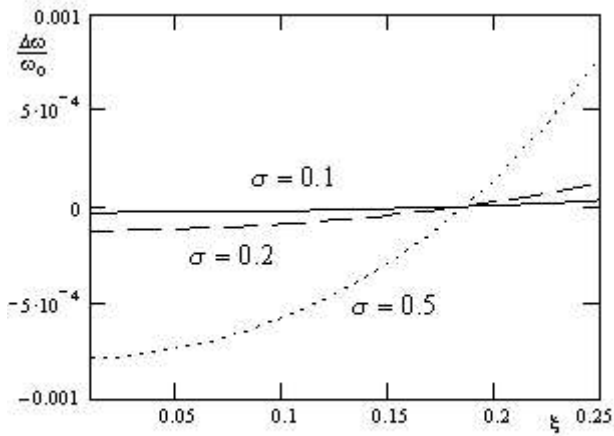


Рис. 4.

В этом случае изменение частоты меньше и она уменьшается при движении элемента связи к границе, что объясняется перераспределением вкладов резонирующей и бегущей волн.

На рис. 5 представлен отклик резонатора, у которого вдоль оси укладывается одна волна и который имеет один элемент связи.

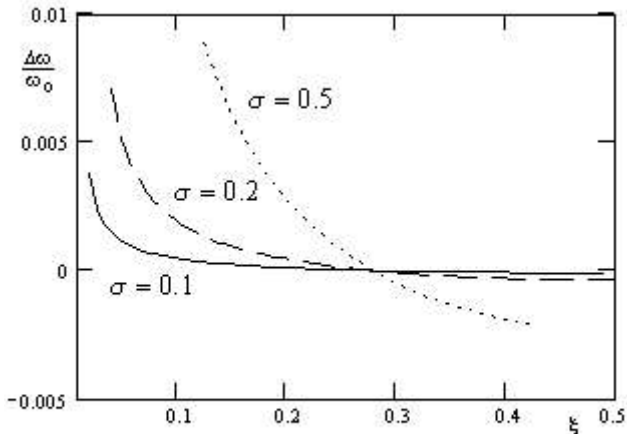


Рис. 5.

Увеличение длины резонатора приводит к изменениям характера отклика. Если элемент связи расположен вблизи центра, распределенный отклик поглощающего объема приходит в противофазе с сигналом источника, что уменьшает резонансную частоту. При перемещении элемента связи к границам резонатора поведение резонансной частоты аналогично ее поведению в полуволновом резонаторе. Можно заметить, что при $\xi \approx 0.27$ влияние потерь на сдвиг резонансной частоты минимально. Поэтому, если необходимо исключить влияние потерь, например, для прецизионного измерения действительной части диэлектрической проницаемости, то элемент связи нужно размещать в этой точке.

На рис. 6 представлен отклик резонатора такой же длины, но с двумя элементами связи, один из которых неподвижно расположен в пучности поля резонирующей волны.

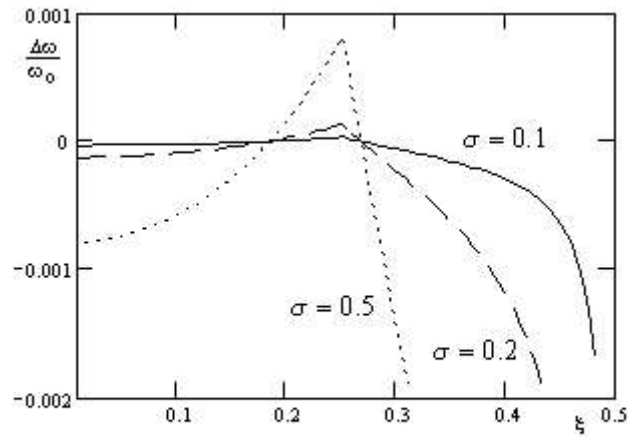


Рис. 6.

На этом рисунке проявляется различие в поведении отклика при расположении источника вблизи границы и в центре. Наивысшей чувствительности можно достичь, расположив второй элемент связи в центре резонатора, но при этом существенно снизится амплитуда возбуждения.

В резонаторе, в котором укладывается полторы длины волны и который возбуждается одним элементом связи, проявляется значительное изменение резонансной частоты при $\xi = 0.5$ (рис. 7). Однако в этом случае, так же как и в предыдущем, амплитуда резонирующей волны будет мала.

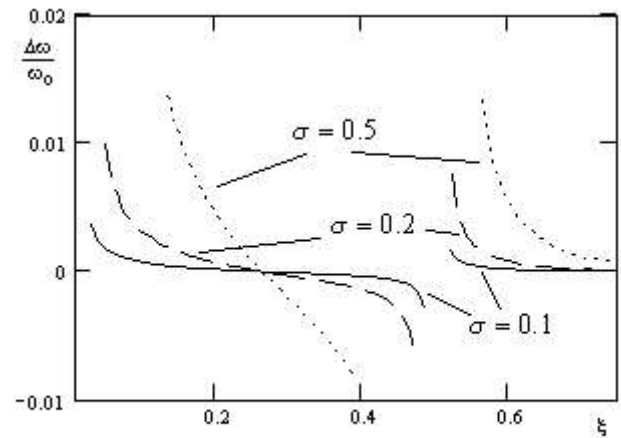


Рис. 7.

Можно отметить, что с увеличением длины резонатора увеличивается чувствительность преобразователя, особенно при перемещении элемента связи к границе. Таким образом, длинные резонаторы имеют преимущество по чувствительности, но достигается это существенным снижением модуля коэффициента отражения или коэффициента передачи.

Особенно заметно проявляется увеличение чувствительности в резонаторе с двумя элементами связи, один из которых также расположен в пучности резонирующей волны. При расположении элемента связи вблизи центра резонатора значительно возрастает чувствительность и величина отклика.

Расположение неподвижного элемента связи в центре резонатора (рис. 8) приводит к изменению знака отклика, а амплитуда его сохраняется.

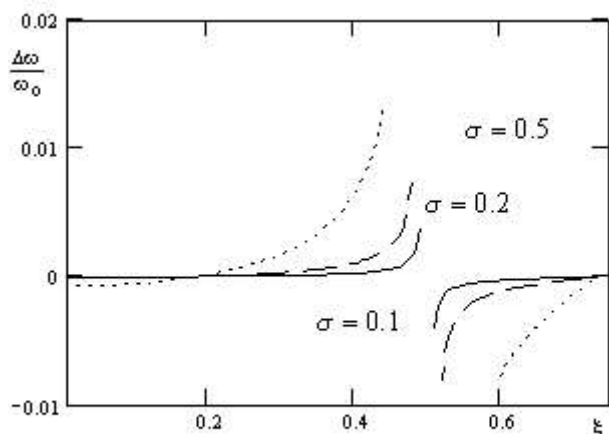


Рис. 8

Дальнейшее увеличение длины резонатора усиливает действие всех представленных выше механизмов.

Практический интерес могут представлять фазочастотные характеристики для резонаторов с большим числом полуволн с двумя элементами связи, расположенными в пучностях поля.

Вследствие перераспределения вкладов резонирующей и бегущих волн вблизи резонансной частоты получены почти линейные зависимости сдвига фаз, наклон которых определяется величиной потерь. Увеличение длины резонатора и величины потерь

приводит к пропорциональному росту коэффициента ослабления. Для $\sigma = 0.5$ ослабление составляет 40 дБ для синфазной волны и около 0 дБ для резонирующей. Однако при увеличении $\sigma > 20$ рост коэффициента ослабления составляет примерно 30 дБ на октаву.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что заполненные резонаторы могут представлять интерес для измерения параметров сред с большими потерями. Но для принятия решения об эффективности применения конкретной конструкции резонатора необходима экспериментальная проверка.

Литература: 1. Данилов Г.Н., Детинко М.В., Медведев Ю.В., Свирыкина А.Д. СВЧ резонаторный метод измерения удельного сопротивления и толщины эпитаксиальных пленок // Электрон. техника. Сер. Электрон. СВЧ. 1982. Вып. 6(342). С.16-19. 2. Панченко Б.А. Тензорные функции Грина для уравнений Максвелла в цилиндрических областях // Радиотехника. 1970, №15. С. 82-91. 3. Chen-To Tai. Dyadic Green's functions for a coaxial line // IEEE Transactions on antennas and propagation / 1983. Vol. AP-31, N2. P. 355-358.

Поступила в редколлегию 30.10.2001

Рецензент: д-р физ.-мат. наук Довбня А.Н.

Панченко Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: радиопизика, микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61736, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 409-362.

УДК 517.522

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ, ОПИСЫВАЕМОЙ СИСТЕМОЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

ЖЕЛЕЗНЯКОВА Э.Ю.

Исследуется устойчивость в среднем и среднеквадратическом модовых колебаниях в резонаторе, заполненном статистически нестационарной средой с учетом конечной проводимости. Получены точные эволюционные уравнения для моментов первого и второго порядка m -й моды, которые проанализированы с помощью критерия Льенара — Шипара.

Наиболее общий подход вероятностного анализа стохастических дифференциальных уравнений состоит в нахождении плотностей распределения вероятности (ПРВ) решения. Этот подход реализуется при помощи уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова для ПРВ, если решение соответствующего дифференциального уравнения является марковским процессом или компонентой марков-

ского вектора. Однако для дифференциальных уравнений порядка не ниже 3 этот подход наталкивается на существенные аналитические и технические трудности [1-3].

Один из подходов связан с получением уравнений для моментов различного порядка решений с учетом стохастического дифференциального уравнения. Здесь существуют как точные, так и приближенные методы, так как соответствующая система для моментов чаще всего оказывается незамкнутой. Однако если сузить класс случайных коэффициентов, то возможно получить замкнутую систему для моментов различных порядков [4-7].

В данной работе рассматриваются конечнозначные марковские процессы, и если они выбраны в качестве соответствующих коэффициентов, то для моментов различных порядков можно получить замкнутые уравнения. Мы ограничились нахождением уравнений для моментов первого и второго порядков для одной модельной задачи, что позволяет, в частности, исследовать на устойчивость системы в среднем или в среднеквадратическом. Статью можно рассматривать как продолжение исследований, начатых в работе [8].

В теории распространения электромагнитных волн в нестационарных средах, в том случае, когда диэлектрическая проницаемость ε зависит от вре-