

УДК 537.8:620.179:621.391:621.396

ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКЕ ОТРАЖЕНИЯ

Жерноклёва У. В., Андреев М. В., Салтыков Д. Ю.

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

кафедра прикладной и компьютерной радиофизики

E-mail: uliano4ka.ua@rambler.ru

Аннотация:

Жерноклёва У. В., Андреев М. В., Салтыков Д. Ю. Цифровые методы определения параметров диэлектрических резонаторов по характеристике отражения. Рассмотрены цифровые методы обработки характеристики отражения диэлектрического резонатора с целью определения его добротности. Для обработки характеристики отражения использовалась дробно-рациональная аппроксимация при помощи интерполяции цепными дробями. Показано преимущество предложенного подхода над классическими.

Общая постановка проблемы

В современной практике широко применяется измерение неэлектрических величин при помощи резонансных систем, обеспечивающих преобразование информативного параметра в область комплексных частот, особенно в тех случаях, где требуется повышенная точность, разрешающая способность, воспроизводимость, стабильность и независимость от внешних влияющих факторов [1,2]. Таким образом, одной из актуальных задач современной измерительной техники является определение параметров резонатора. При этом особое внимание уделяется повышению точности получаемых результатов.

Развитие современной цифровой техники позволяет интегрировать измерительные преобразователи с микропроцессорными вычислительными мощностями, в результате чего значительная часть измерительной процедуры реализуется в цифровой форме. Это дает возможность упростить измерительный комплекс для определения параметров резонатора, применяя простую процедуру первичного преобразования с использованием серийно выпускаемых измерительных приборов и реализовывая остальное преобразование за счет цифровой обработки.

Традиционным подходом при определении добротности резонатора по частотной характеристике отражения является использование методики описанной в книге Гинзтона [3], основанной на применении эквивалентных схем для моделирования характеристик резонатора. Метод основан на измерении коэффициента стоячей волны как функции частоты и определении коэффициента связи, который находится посредством исследования поведения узла стоячей волны при уходе от резонанса. Однако такой подход имеет ограниченные возможности и не во всех случаях может быть автоматически применен. Прежде всего, ограничения связаны с типом резонатора и с характером узла связи, используемого для возбуждения резонатора.

Подобный подход, основанный на определении уровня половинной мощности и ширины полосы пропускания на этом уровне, изложен и у Альтмана [4]. Более гибким (не привязанным к уровню половинной мощности и к эквивалентным параметрам эквивалентных схем) является подход, изложенный у Тишера [5]. Данные подходы нашли воплощение в серийно выпускаемых измерительных приборах, с помощью которых измеряют как добротность, так и другие параметры. Измерения добротности в этих условиях не автоматизированы, а погрешность измерений лежит в пределах 5-10 % [6].

Исследования

В работе рассматривается цифровой метод определения резонансной частоты и добротности резонатора по частотной характеристике отражения $R(f)$, полученной при помощи автоматизированного измерения панорамными измерителями, возможно, с невысокой точностью, как по абсолютному значению, так и по дискретной частоте отсчета. Данный подход был применен для исследования зависимости резонансных характеристик открытого диэлектрического резонатора от местонахождения узла связи.

Известно, что в полудисковом диэлектрическом резонаторе, расположенном на металлическом зеркале и работающем на колебаниях шепчущей галереи, при возбуждении его щелью связи в зеркале (рис. 1) степень связи, а значит и нагруженная добротность, определяется близостью узла связи к кривой, на которой располагаются максимумы резонансного типа колебаний [7]. Однако использование классических методов определения добротности [3-5] этих колебаний по экспериментально полученной характеристике отражения $R(f)$ вызывает значительные затруднения. Прежде всего, это связано с тем, что эквивалентная схема в виде параллельного контура, которая традиционно используется для упрощения моделирования резонансных характеристик, не вполне соответствует рассматриваемому типу резонаторов.

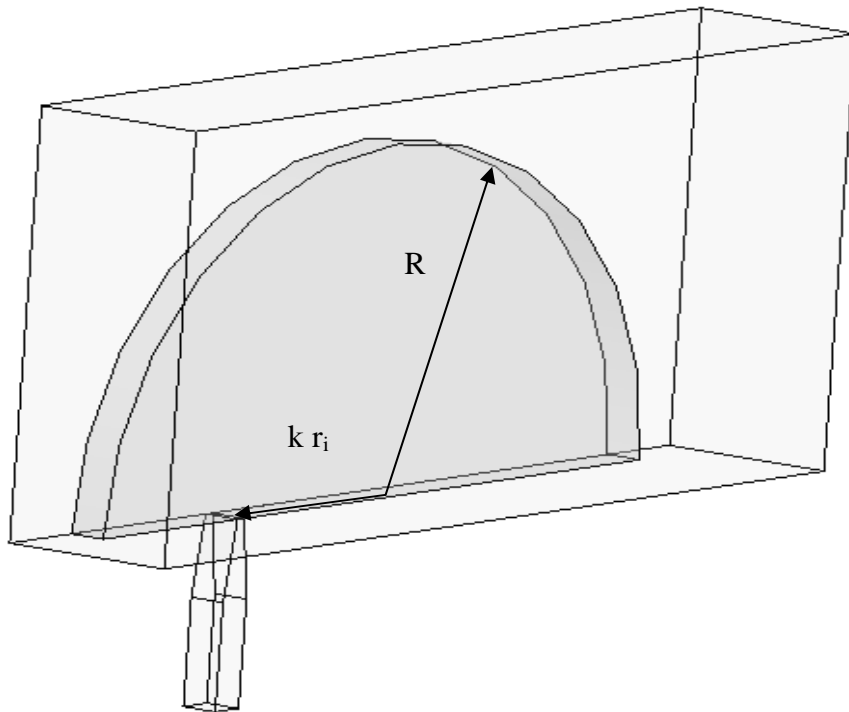
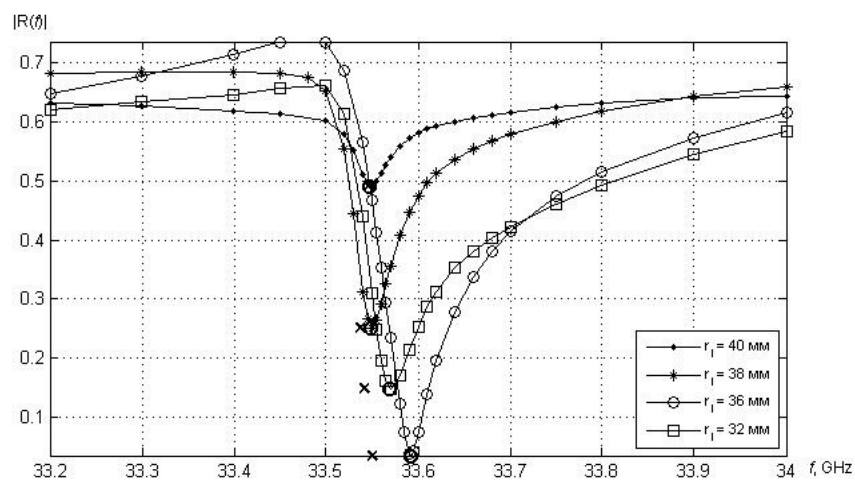


Рис. 1. Модель исследуемого диэлектрического резонатора.

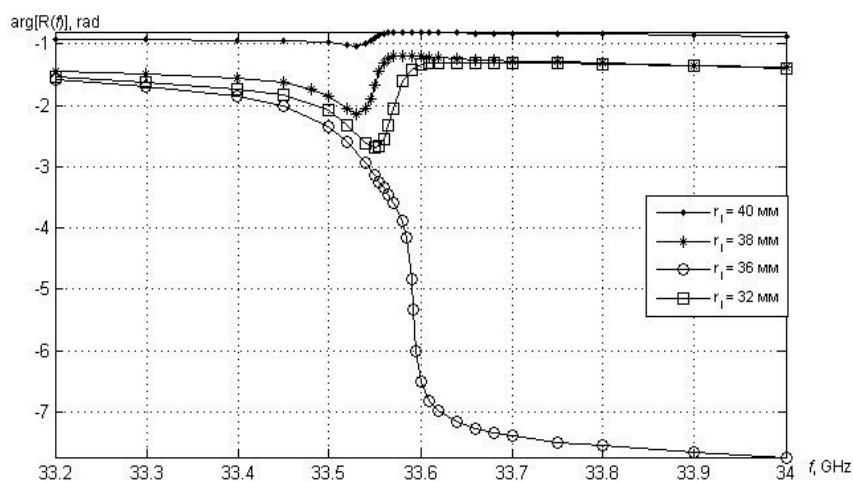
На рис. 2 представлены несколько типичных частотных характеристик коэффициента отражения $R(f)$ от полудискового диэлектрического резонатора, расположенного на металлическом зеркале и запитываемого через щель в зеркале, для нескольких значений радиального местоположения щели связи r_i . При изменении r_i степень связи с резонатором меняется, о чем можно судить по поведению фазо-частотной характеристики $\arg[R(f)]$ (рис. 2б). Для $r_i = 36$ мм наблюдается пересвязь, а для остальных – недосвязь с резонатором (в соответствии с классификацией из [4]).

Данный рисунок демонстрирует, что рассматриваемые резонансные кривые являются асимметричными относительно резонансной частоты и при значительной расстройке не

выходят на единичный уровень коэффициента отражения, как это должно быть для эквивалентной схемы в виде параллельного контура. В силу этого уровень половинной мощности, который определяет полосу пропускания и используется для вычисления добротности, может лежать выше имеющейся экспериментальной частотной характеристике и нигде ее не пересекать, что не позволяет вычислять добротность классическими подходами. Даже если он будет давать точки пересечения с экспериментальной кривой, то они могут находиться в той ее части, которая сильно отличается от классического вида резонансной кривой, что будет приводить к оценкам добротности с очень большой погрешностью.



а



б

Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения полудискового диэлектрического резонатора от частоты для разных местоположений узла связи (а – модуль коэффициента отражения, б – фаза коэффициента отражения)

Поэтому в работе рассматривался цифровой подход для определения добротности по оценкам значений комплексных собственных частот, полученным в результате применения дробно-рациональной аппроксимации экспериментальных характеристик отражения. Известно, что частотная характеристика резонатора может быть представлена дробно-рациональной моделью [4,8]:

$$R_M(f) = g \prod_{m=1}^M (f - f_m^z) / \prod_{m=1}^M (f - f_m^p) = \sum_{m=0}^M a_m f^m / \sum_{m=0}^M b_m f^m, \quad (1)$$

где $g = a_M/b_M$, M – порядок модели. Ее параметрами являются векторы нулей $\bar{\mathbf{z}} = \{f_1^z, f_2^z, \dots, f_M^z\}$ и полюсов $\bar{\mathbf{p}} = \{f_1^p, f_2^p, \dots, f_M^p\}$, которые позволяют определить параметры резонатора, а также коэффициенты полиномов числителя $\bar{\mathbf{a}}$ и знаменателя $\bar{\mathbf{b}}$.

Таким образом, параметры резонатора определяются нулями и полюсами модели (1), и необходим робастный метод получения их оценок. Для этого использовалась дробно-рациональная аппроксимация на основе интерполяции цепными дробями [9]:

$$R(f, \bar{\mathbf{f}}^L) = r_1 + \frac{f - \tilde{f}_1}{r_2} + \frac{f - \tilde{f}_2}{r_3} + \dots + \frac{f - \tilde{f}_{L-1}}{r_L}, \quad (2)$$

где $\bar{\mathbf{f}}^L = \{\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \dots, \tilde{f}_L\} \subset \bar{\mathbf{f}}$ – опорные точки, $L = 2M + 1$ – порядок цепной дроби. Параметры цепной дроби $\bar{\mathbf{r}}^L = \{r_1, r_2, \dots, r_L\}$ определяются через значения функции $\bar{\mathbf{R}}^L = \{R(\tilde{f}_1), \dots, R(\tilde{f}_L)\}$ в опорных точках $\bar{\mathbf{f}}^L$

$$r_k = \frac{\tilde{f}_k - \tilde{f}_{k-1}}{\frac{\dots}{\frac{\tilde{f}_k - \tilde{f}_1}{R(\tilde{f}_k) - r_1} - r_2} - \dots}}, \quad k = 1, 2, \dots, L. \quad (3)$$

По параметрам цепной дроби при помощи итерационной процедуры вычислялись коэффициенты полиномов $\bar{\mathbf{a}}$ и $\bar{\mathbf{b}}$, а по ним – параметры модели в виде векторов нулей $\bar{\mathbf{z}}$ и полюсов $\bar{\mathbf{p}}$. Полученные оценки значений полюсов частотной характеристики позволяют определить резонансную частоту, а также добротность резонатора при помощи выражения [8]:

$$Q_m = 0.5 \operatorname{Re}(f_m^p) / \operatorname{Im}(f_m^p), \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

Данный подход был применен для обработки характеристик отражения полудискового диэлектрического резонатора. На рис. 3 представлена зависимость полученных оценок нагруженной добротности в зависимости от радиального местоположения узла связи.

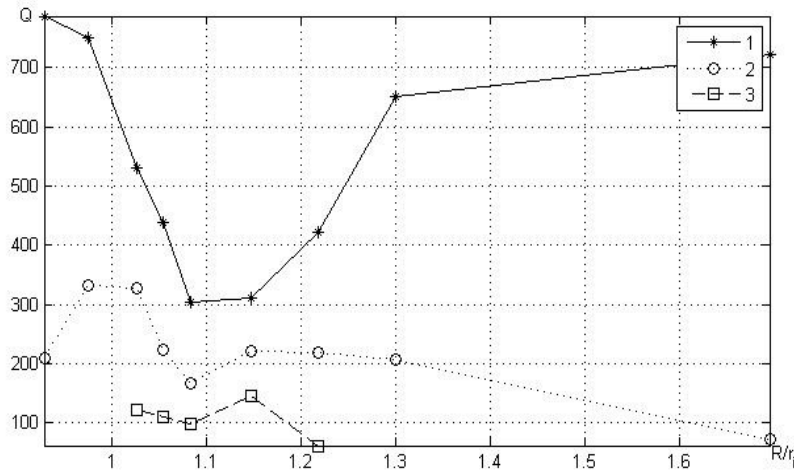


Рис. 3. График зависимости нагруженной добротности полудискового диэлектрического резонатора от радиального местоположения щели связи r_i

Кривая 1 – это оценки добротности, полученные с помощью рассмотренного выше подхода, кривая 2 – получена на основе подхода, рассмотренного в [5], кривая 3 – по методу из Гинзтона [3]. Видно, что методика из Гинзтона, предполагающая определения уровня

половинной мощности, дает намного заниженные оценки, причем не для всех имеющихся частотных характеристик удалось ее использовать. Отказ от использования уровня половинной мощности по [5] позволяет получить оценки для всех характеристик, но они все равно оказались явно заниженными. Наиболее точно дает оценки нагруженной добротности рассмотренный подход, причем полученная кривая этих значений имеет четко выраженный минимум в области сильной связи, чего не наблюдается при использовании других подходов.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали преимущество предложенного цифрового метода определения параметров резонатора над традиционно применяемыми, особенно для открытых резонаторов.

При помощи данного подхода были исследованы частотные характеристики отражения полудискового диэлектрического резонатора для разных местоположений узла связи. Было показано, что данный подход позволяет достаточно точно определять значения добротности этих резонаторов, в то время как классические подходы оказались не в состоянии дать достоверные оценки.

Было проведено сравнение предложенного цифрового метода определения добротности с широко используемыми на практике экспериментальными методами Гинзтона и Тишера. Данное сравнение показало несоответствие традиционно используемой эквивалентной замены резонаторов параллельными и последовательными контурами, особенно когда это делается для открытых резонаторов.

Предложенный подход может быть легко реализован в рамках измерительно-вычислительного комплекса, построенного на основе стандартного панорамного измерителя, для автоматизации процедуры измерений резонансных частот и добротностей резонаторов.

Литература

1. Туричин, А.М. Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др. - Л., 1975.- 576 с.
2. Викторов, В. А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов [Текст]/ В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. - М., 1989. - 208 с.
3. Гинзтон, Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах [Текст] /Э. Л. Гинзтон. - Москва: Издательство иностранной литературы, 1960. - 620 с.
4. Альтман, Дж. Л. Устройства сверх высоких частот [Текст]/ Дж. Л. Альтман. - Москва, 1968.-360с.
5. Тишер, Ф.Техника измерений на сверх высоких частотах [Текст]/Ф. Тишер. – Москва, 1963. – 236 с.
6. Валитов, Р. А. Измерение на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника [Текст]/ Под ред. Р. А. Валитова, Б. И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
7. Когут А. Е. О возбуждении колебаний шепчущей галереи в полудисковом диэлектрическом резонаторе щелью связи в зеркале / А. Е. Когут, О. А. Матяш // Известие вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 49, № 2. – С. 10-16.
8. Григорьев, А. Д. Электродинамика и техника СВЧ.[Текст]/А. Д. Григорьев. - М., 1990. - 335 с.
9. Андреев, М. В. Определение комплексных собственных частот резонаторов при помощи дробно-рациональной аппроксимации цепными дробями.[Текст]/М. В. Андреев, В.Ф. Борулько, О.О. Дробахин, Д.Ю. Салтыков //Вестник Днепропетровского университета. 2007. вып. 14, №12/1