

Н.Б. ГОРЕВ, О.О. ДРОБАХИН, П.И. ЗАБОЛОТНЫЙ, И.Ф. КОДЖЕСПИРОВА, Е.Н. ПРИВАЛОВ

ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ СВЧ-РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Проведены исследования резонансных свойств круглого цилиндрического и биконического СВЧ-резонаторов в зависимости от свойств диэлектрических жидкостей, проходящих по диэлектрической трубке, установленной вдоль их оси. Для ряда геометрических размеров кварцевой трубки, установленной в биконическом резонаторе и заполненной диэлектрической жидкостью, методом конечных элементов рассчитаны значения резонансных частот резонатора.

Проведено дослідження резонансних властивостей круглого циліндричного й біконічного СВЧ-резонаторів в залежності від властивостей діелектричних рідин, що проходять по діелектричній трубці, установленій уздовж їхньої осі. Для ряду геометричних розмірів кварцової трубки, установленій в біконічному резонаторі й заповненій діелектричною рідиною, методом кінцевих елементів розраховані значення резонансних частот резонатора.

The resonance properties of a circular cylindrical and a biconical microwave resonator have been studied depending on the dielectric properties of liquids flowing through a dielectric tube mounted in line with the resonator. For a number of geometrical dimensions of a quartz tube mounted in the biconical resonator and filled with dielectric liquid, the resonance frequencies of the resonator have been calculated by the finite-element method.

Введение. Существует широкий спектр органических жидких растворов, для которых технологический контроль их электрических параметров имеет существенное практическое значение. Эти жидкости можно условно разделить на две группы. Для жидких веществ первой группы характерно небольшое значение диэлектрической проницаемости [1, 2] и малое процентное содержание воды. К первой группе относятся углеводородсодержащие жидкости, например различные марки бензина. Одним из основных показателей, характеризующих качество бензина, является октановое число [1, 2], которое косвенно может быть определено из измеренного значения диэлектрической проницаемости. А зачастую низкое качество бензина приводит к преждевременному выходу из строя двигателя. Существующие портативные измерители октанового числа основаны на косвенной связи октанового числа с измеренной в низкочастотной области диэлектрической проницаемостью [1, 2], что не может обеспечить их однозначной зависимости. Следует отметить, что эта неоднозначность определяется тем, что не существует “чистых” марок бензина. В каждой из них обязательно присутствуют как органические, так и неорганические добавки, определяющие интегральное значение диэлектрической проницаемости, что, в конечном счете, влияет на погрешность определения октанового числа. Использование для этих целей диапазона сверхвысоких частот дает возможность частично компенсировать эту неоднозначность.

Ко второй группе можно отнести водные растворы органических веществ (глюкозы, крахмала и т.п.), для которых значение диэлектрической проницаемости сравнимо со значением диэлектрической проницаемости воды, т.е. порядка нескольких десятков [3, 4].

По ряду технологических показателей влагосодержание водных растворов органических веществ (в частности глюкозы или крахмального молочка) должно быть строго определенной величины. Отклонение от этого значения в одну сторону приводит к неоправданным энергозатратам на единицу произведенной продукции, а отклонению в другую – ведет к ухудшению потре-

© Н.Б. Горев, О.О. Дробахин, П.И. Заболотный, И.Ф. Коджеспирова, Е.Н. Привалов, 2009
Техн. механика. – 2009. – № 3.

бительских качеств конечного продукта.

Отмеченные обстоятельства свидетельствуют об актуальности разработки датчиков для оперативного контроля параметров указанных жидких веществ, особенно в поточном режиме.

Дополнительно отметим преимущество использования СВЧ-диапазона электромагнитных колебаний по сравнению с низкочастотной областью. Оно заключается в том, что в этом диапазоне добротность колебательных контуров (резонаторов) на несколько порядков выше, и это обеспечивает уменьшение погрешности измерения диэлектрической проницаемости. Кроме того, СВЧ-диапазон простирается на несколько десятков гигагерц, что позволяет реализовать несколько резонансных датчиков, работающих на разнесенных частотах. Использование явления дисперсии в таких многокомпонентных средах, как бензин, позволяет снизить погрешность определения октанового числа при одновременной работе нескольких резонансных датчиков, работающих на разнесенных частотах.

Таким образом, необходимость проведения расчетов электродинамических параметров СВЧ-датчиков определяется тем, что при этом осуществляется предварительная оценка их рабочего частотного диапазона для исследуемых жидкостей с учетом требований по контролю технологических параметров.

Постановка и решение задачи. Классическим примером использования резонаторных датчиков для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей является круглый цилиндрический резонатор с аксиально расположенной диэлектрической трубкой, заполненной исследуемой жидкостью (рис.1а). В качестве рабочего типа колебаний используется азимутально-симметричное магнитное колебание H_{011} [5, 6], обеспечивающее наибольшую добротность. Кроме того, равенство нулю электрического поля на оси резонатора позволяет использовать образцы с большим диаметром по сравнению с другими типами колебаний. Аналогичным по своим свойствам является биконический резонатор с таким же расположением диэлектрической трубки (рис.1б).

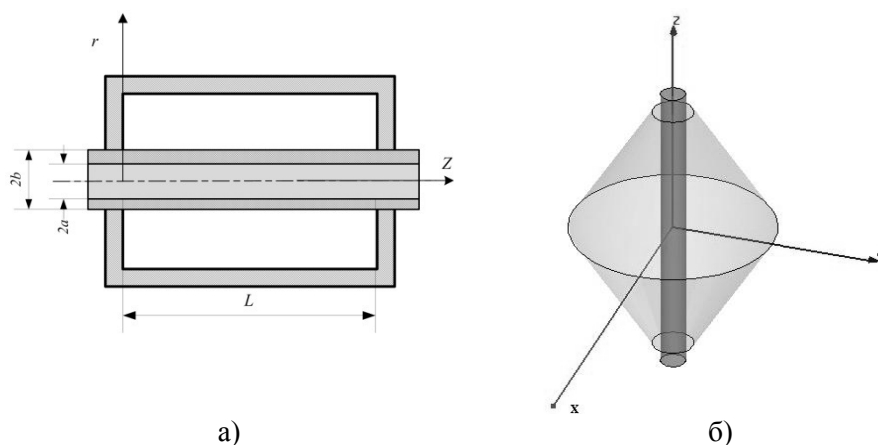


Рис. 1

Отличие биконического резонатора от круглого цилиндрического состоит в том, что у него сохраняется более высокое значение добротности при

отклонении от перпендикулярности к продольной оси плоскости оснований конусов. Еще одно преимущество – это разрежение спектра резонансных частот при удалении части металлической поверхности за плоскостью критического сечения [7]. Учитывая такие преимущества, в дальнейшем будем анализировать СВЧ-датчики на основе биконических резонаторов.

Из-за сложной геометрии и несовпадения граничных поверхностей с координатными поверхностями известных систем координат электродинамическая задача для биконического резонатора с аксиальной диэлектрической трубкой не имеет аналитического решения и поэтому может быть решена приближенным методом, например методом конечных элементов (МКЭ) [8].

Прежде чем переходить к анализу влияния электрических характеристик жидкости, заполняющей диэлектрическую трубку, на резонансные частоты биконического резонатора, необходимо убедиться в достоверности результатов, получаемых МКЭ.

Для этого рассмотрим тестовую задачу, которая имеет строгое решение. В нашем случае это задача определения резонансных параметров круглого цилиндрического резонатора с трехслойным аксиально-симметричным заполнением (рис. 1а).

В такой резонансной системе уравнение для расчета резонансных частот получается на основе классической схемы метода частичных областей (МЧО) [9]. Для этого геометрия рассматриваемой резонансной системы была разбита на части. Для каждой из выделенных областей известно решение волнового уравнения относительно электрического E и магнитного H полей в виде комбинаций цилиндрических и тригонометрических функций в цилиндрической системе координат.

Наложение граничных условий для тангенциальных составляющих электрических и магнитных полей на поверхностях раздела слоев и металлической поверхности резонатора приводит к следующему уравнению для определения резонансной частоты:

$$\frac{\chi_1}{\chi_2} J_0(\chi_1 a) \left[\frac{\chi_1}{\chi_2} Z_1(\chi_3 b) \cdot Q_1(\chi_2 a) - Z_0(\chi_3 b) \cdot W_1(\chi_2 a) \right] + J_1(\chi_1 a) \left[Z_0(\chi_3 b) \cdot W_0(\chi_2 a) - \frac{\chi_2}{\chi_3} Z_1(\chi_3 b) \cdot Q_0(\chi_2 a) \right] = 0,$$

где

$$W_1(\chi_2 a) = J_1(\chi_2 a) N_1(\chi_2 b) - J_1(\chi_2 b) N_1(\chi_2 a),$$

$$W_0(\chi_2 a) = J_0(\chi_2 a) N_1(\chi_2 b) - J_1(\chi_2 b) N_0(\chi_2 a),$$

$$Q_1(\chi_2 a) = J_1(\chi_2 a) N_0(\chi_2 b) - J_0(\chi_2 b) N_1(\chi_2 a),$$

$$Q_0(\chi_2 a) = J_0(\chi_2 a) N_0(\chi_2 b) - J_0(\chi_2 b) N_0(\chi_2 a),$$

$$Z_1(\chi_3 b) = J_1(\chi_3 b) N_1(\chi_3 c) - J_1(\chi_3 c) N_1(\chi_3 b),$$

$$Z_0(\chi_3 b) = J_0(\chi_3 b) N_1(\chi_3 c) - J_1(\chi_3 c) N_0(\chi_3 b),$$

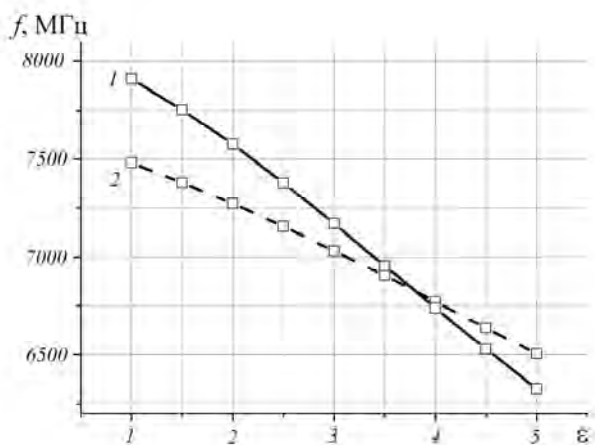
J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно; N_0, N_1 – функции Неймана нулевого и первого порядка соответственно;

$$\chi_1 = \sqrt{\varpi^2 \varepsilon_1 \mu_0 - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}; \quad \chi_2 = \sqrt{\varpi^2 \varepsilon_2 \mu_0 - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}; \quad \chi_3 = \sqrt{\varpi^2 \varepsilon_0 \mu_0 - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2};$$

ϵ_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость вещества в трубке; ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость трубки; a, b – внутренний и внешний радиусы трубки; c – радиус резонатора; L – длина резонатора; $\omega = 2\pi f, f$ – резонансная частота резонатора.

Результаты расчета резонансных частот круглого цилиндрического резонатора. На рис.2 представлены результаты расчета резонансных частот круглого цилиндрического резонатора диаметром $2 \cdot c = 50$ мм, длиной $L = 50$ мм с кварцевой трубкой диаметром 15 мм, заполненной жидкостью со свойствами, близкими к углеводородсодержащим жидкостям. Предполагалось, что значение диэлектрической проницаемости жидкости изменяется в диапазоне от 1 до 5, а тангенс угла диэлектрических потерь равен 0,0001.

Рассмотрены два случая, когда толщина диэлектрической трубки Δ равна нулю (кривая 1) и $\Delta = 1,2$ мм (кривая 2). Отметим, что для диэлектрической трубки с конечной толщиной кривизна перестройки частоты резонатора ниже, в также тот факт, что при совпадении значений диэлектрических проницаемостей трубки и вещества, ее заполняющего, кривые пересекаются. Расчеты, проведенные МКЭ, при тех же исходных данных дают очень близкие значения резонансных частот.

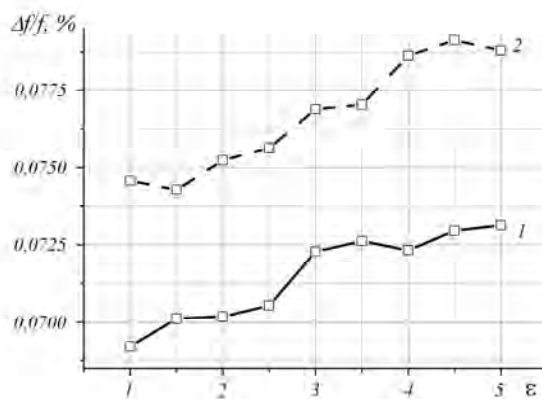


1 – $\Delta = 0$; 2 – кварцевая трубка с $\Delta = 1,2$ мм

Рис. 2

Это подтверждают зависимости относительного отклонения значений резонансных частот круглого цилиндрического резонатора, полученные МЧО и МКЭ, которые представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, относительные отклонения значений резонансных частот, полученные сравниваемыми методами, не превышают 0,08%, что свидетельствует о хорошем совпадении сравниваемых результатов. Такие результаты являются основанием для утверждения, что применение МКЭ можно распространить и для исследования резонансных свойств биконического резонатора.



1 – $\Delta = 0$; 2 – кварцевая трубка с $\Delta = 1,2$ мм

Рис. 3

Результаты расчетов для биконического резонатора с углеводородсодержащим жидкостями. На рис. 4 – 6 приводятся результаты расчета МКЭ резонансных частот биконического резонатора с кварцевой трубкой с толщиной стенки 1,2 мм для значений ее внешнего диаметра 7 мм (рис. 4), 10 мм (рис. 5) и 15 мм (рис. 6), в зависимости от значений диэлектрической проницаемости заполняющего ее жидкого вещества. Диаметр резонатора оснований биконического резонатора принимался равным 50 мм, а угол его конусов при вершине составлял 30° . Так же как и в случае круглого цилиндрического резонатора, принималось, что свойства заполняющей трубку жидкости близки к свойствам углеводородсодержащих жидкостей с тангенсом угла диэлектрических потерь, равным 0,0001.

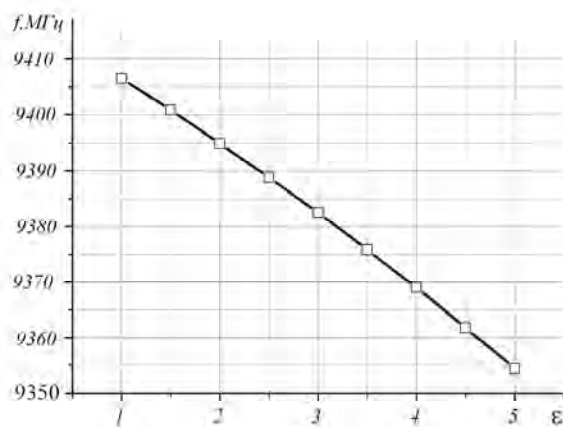


Рис. 4

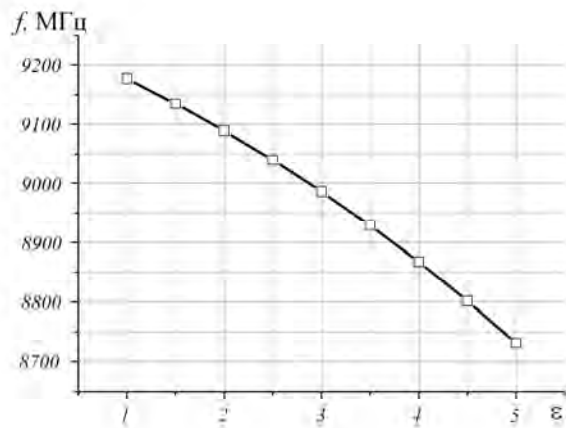


Рис. 5

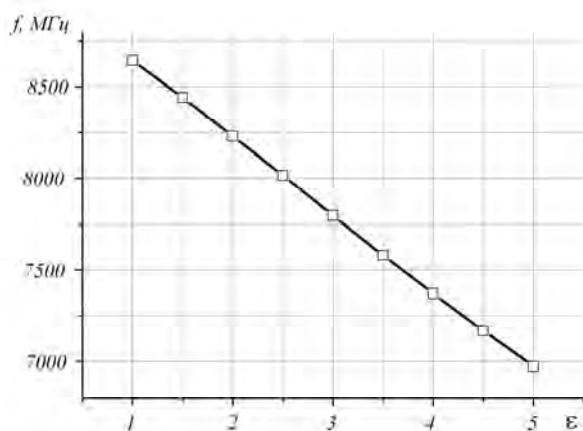


Рис. 6

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением диаметра диэлектрической трубки при неизменной толщине ее стенки, крутизна перестройки резонансной частоты существенно возрастает, а ее абсолютные значения смещаются в область более низких частот по сравнению со случаем незаполненной трубки.

Следует также отметить, что практически для всех рассмотренных геометрических размеров диэлектрической трубки зависимость резонансной частоты от диэлектрической проницаемости близка к линейной. Это позволило получить простые и удобные для практического применения аппроксимирующие выражения зависимости диэлектрической проницаемости исследуемого вещества от относительного изменения резонансной частоты биконического резонатора с кварцевой трубкой фиксированных размеров.

При получении этих зависимостей в качестве первоначального значения резонансной частоты бралась частота биконического резонатора с незаполненной трубкой. Ниже представлены полученные аппроксимирующие многочлены для некоторых размеров кварцевой трубки.

Для диэлектрической трубки с внешним диаметром 7 мм:

$$\varepsilon = 1,093 + 717,800 \cdot \frac{\Delta f}{f}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1,002 + 831,666 \cdot \frac{\Delta f}{f} - 20602,133 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2. \quad (2)$$

Для диэлектрической трубки с внешним диаметром 10 мм:

$$\varepsilon = 1,019 + 105,021 \cdot \frac{\Delta f}{f} - 480,374 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2, \quad (3)$$

$$\varepsilon = 1,001 + 111,173 \cdot \frac{\Delta f}{f} - 819,510 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + 4677,494 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^3. \quad (4)$$

Для диэлектрической трубки с внешним диаметром 15 мм:

$$\varepsilon = 1,023 + 19,959 \cdot \frac{\Delta f}{f} + 2,780 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2, \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1,001 + 21,949 \cdot \frac{\Delta f}{f} - 24,552 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + 94,366 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^3, \quad (6)$$

где f – резонансная частота биконического резонатора с незаполненной диэлектрической трубкой; f_d – резонансная частота биконического резонатора с диэлектрической трубкой, заполненной веществом с диэлектрической проницаемостью ε ; $\Delta f = f_d - f$.

На рис. 7 – 9 представлены результаты расчета относительной погрешности определения диэлектрической проницаемости вещества с помощью приведенных многочленов. Из этих результатов следует, что применение аппроксимации полиномом третьей степени обеспечивает погрешность расчета не более нескольких десятых процента, что является достаточным для практического применения.

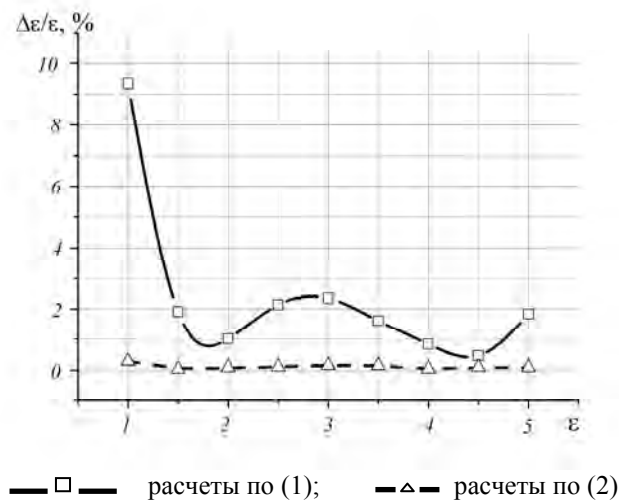


Рис. 7

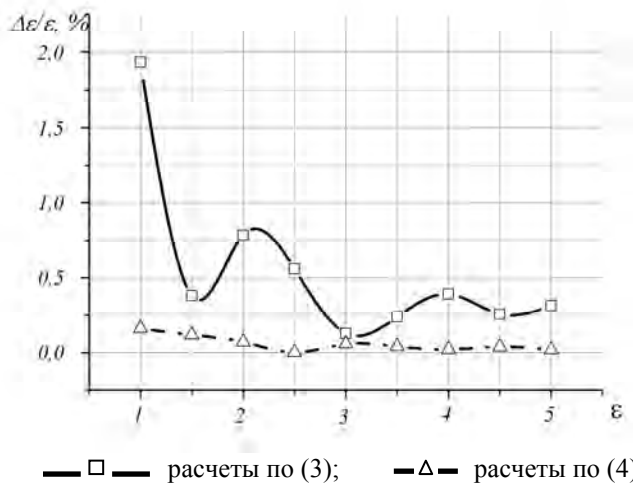


Рис. 8

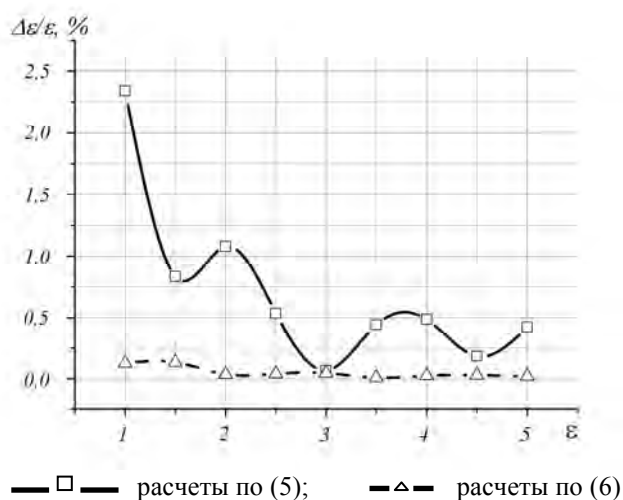


Рис. 9

Результаты расчетов для биконического резонатора с водными растворами. Как уже отмечалось выше, особенностью измерений электрических параметров водных растворов (в частности глюкозы или крахмала) является то, что в них содержится большой процент воды от 50% до 90%, что ведет к большим значениям эффективной диэлектрической проницаемости раствора. Кроме того, из-за больших диэлектрических потерь воды в СВЧ-диапазоне добротность резонатора может оказаться недостаточной для проведения необходимых измерений. Поэтому особенности проектирования СВЧ-датчиков для измерения параметров таких растворов требуют отдельного рассмотрения.

Известно, что сохранение приемлемых значений добротности измерительного резонатора может быть достигнуто за счет уменьшения диаметра диэлектрической трубки. Для оценки возможности применения резонаторного метода измерения электрических параметров материалов с большими потерями был рассмотрен биконический резонатор с диэлектрической трубкой малого (1 – 1,5 мм) диаметра, заполненной водой с известными диэлектриче-

скими свойствами. При этом предполагалось, что толщина стенок диэлектрической трубки и ее диэлектрическая проницаемость настолько малы, что их влиянием на резонансную частоту можно пренебречь.

На рис. 10, 11 представлены результаты расчетов зависимости резонансной частоты и собственной добротности медного биконического резонатора с трубкой, заполненной водой ($\epsilon = 61,5$; $\text{tg}\delta = 0,51$), от диаметра диэлектрической трубки.

Из представленных материалов видно, что зависимость резонансной частоты биконического резонатора от рассматриваемых значений диаметра незначительна (рис.11), а собственная добротность резко уменьшается по сравнению с пустым резонатором (добротность пустого резонатора порядка 30 тысяч), но все же остается достаточно высокой, чтобы проявлялись его резонансные свойства.

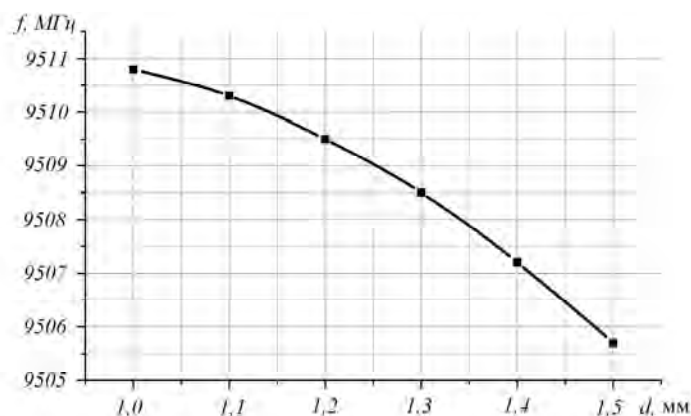


Рис. 10

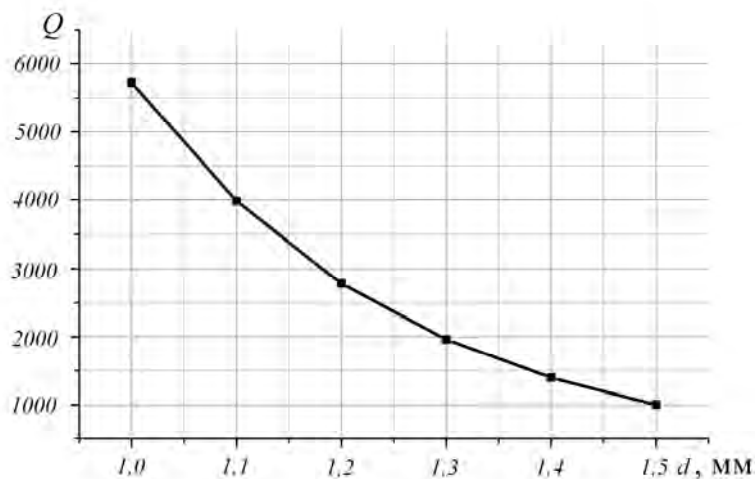


Рис. 11

Выводы. На примере тестовой задачи показано, что применение метода конечных элементов для расчета резонансных частот круглого цилиндриче-

ского резонатора с диэлектрической трубкой, заполненной жидкостью, обеспечивает относительное отклонение от результатов, полученных методом частичных областей, не более 0,08%.

Для ряда геометрических размеров кварцевой трубки, установленной в биконическом резонаторе и заполненной диэлектрической жидкостью, методом конечных элементов были рассчитаны значения резонансных частот резонатора и определены аппроксимирующие многочлены, обеспечивающие погрешность определения диэлектрической проницаемости не более нескольких десятых процента.

Установлено, что практически для всех рассмотренных геометрических размеров диэлектрической трубки зависимость резонансной частоты биконического резонатора от диэлектрической проницаемости заполняющей трубку жидкости близка к линейной.

Для веществ с большими диэлектрическими потерями показано, что выбором диаметра диэлектрической трубки можно добиться сохранения добротности измерительного резонатора не ниже 1000, что обеспечивает проведение измерений в СВЧ-диапазоне электрических параметров веществ с большими диэлектрическими потерями.

1. *Суслин М. А.* Микроволновый контроль авиационных ГСМ с использованием радиотехнических методов расчета цепей с распределенными параметрами / *М. А. Суслин.* – М.: Машиностроение, 2006. – 120 с.
2. *Белов Е. Н.* Методы оценки качества неэтилированных бензинов / *Е. Н. Белов, В. И. Луценко, В. А. Кабанов, С. И. Хоменко* // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 9-я международная конференция, сентябрь, 1999 г., Севастополь : материалы конференции. – Севастополь : Вебер, 1999. – С. 406 – 407.
3. *Мериакри В. В.* Диэлектрические свойства растворов глюкозы в миллиметровом диапазоне волн и проблема контроля ее содержания в крови / *В. В. Мериакри, Е. Е. Чигряй, И. П. Никитин, М. П. Пархоменко, Л. И. Пангонис, Д. К. Ким, Ж. Х. Вон* // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 15-я международная Крымская конференция, сентябрь, 2005 г., Севастополь : материалы конференции, – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 853 – 855.
4. *Кореновская О. Л.* Анализатор концентрации жидких растворов / *О. Л. Кореновская, В. Ф. Манойлов, Е. М. Ройтман* // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 12-я международная конференция, сентябрь, 2007 г., Севастополь : материалы конференции. – Севастополь : Вебер, 2007. – С. 801 – 802.
5. *Викторов В. А.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / *В. А. Викторов, Е. В. Лункин, А. С. Совлуков.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
6. *Дробахин О.О.* Датчики перемещений на основе круглых цилиндрических СВЧ-резонаторов / *О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Е. Н. Привалов* // Техника и приборы СВЧ. – 2008. – № 2. – С. 24 – 29.
7. *Пилипенко О. В.* Стабильный СВЧ-генератор для радиоволновых измерителей параметров вибрации / *О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, Л. Г. Запольский, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 13-я международная конференция, сентябрь, 2003 г., Севастополь : материалы конференции. – Севастополь : Вебер, 2003. – С. 716 – 717.
8. *Сильвестер П.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / *П. Сильвестер, Р. Феррари.* – М.: Мир, 1986. – 229 с.
9. *Григорьев А. Д.* Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования / *А. Д. Григорьев, В. Б. Янкевич.* – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 12.03.09,
в окончательном варианте 19.06.09