

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АПЕРТУР РЕЗОНАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ ДИАГНОСТИКИ БИООБЪЕКТОВ

СЛИПЧЕНКО Н.И., ГОРДИЕНКО Ю.Е.,  
БОРОДКИНА А.Н.

Проводится анализ выходных информационных параметров резонаторных измерительных преобразователей с коаксиальной апертурой при условиях ближнеполевой микроскопии биологических проб. В результате численного эксперимента определены параметры преобразователей, которые позволяют получить оптимальные соотношения конструктивных элементов, что существенно уменьшает погрешности измерений.

### Введение

Современные достижения в новейших областях медицинской науки отрывают возможности использования электромагнитных полей для оперативной диагностики и лечения целого ряда патологий [1]. В частности, анализ систем регуляции клеток путем оценки функциональной активности мембранно-рецепторного комплекса по соотношению связанной и свободной воды в биологических пробах пациента позволяет выявить кардиологические патологии на ранних стадиях [2].

Наиболее удобной моделью для исследования молекулярных механизмов систем регуляции клеток являются эритроциты человека. Это обусловлено наличием в их мембранах адренорецепторов, функционально и структурно похожих на адренорецепторы клеток миокарда, сосудов и других органов [3]. Наиболее информативные методы определения соотношения связанной и свободной воды предполагают проведение измерений в частотном диапазоне релаксации молекул воды, т.е. вблизи частоты 10 ГГц. Измерение диэлектрической проницаемости биологических проб в этом диапазоне позволяет не только получить оперативную информацию о состоянии молекул воды, но и при направленном действии биорегуляторов выбрать наиболее эффективные пути лечения кардиопатологий и определить оптимальные дозы препаратов с учетом индивидуальных особенностей пациента [4]. Однако для проведения СВЧ измерений необходимо строго выдерживать размеры образца, его положение в измерительном устройстве. Поэтому недостатками данной методики является весьма болезненный этап получения биологических проб пациента необходимого объема.

Волноводные методы требуют образцов, размеры которых соизмеримы с длиной волны, поэтому предпочтительно использование резонаторных методов, как наиболее чувствительных к изменениям параметров исследуемого объекта. Это позволяет уменьшить объем проб при сохранении необходимой

точности измерений. По условиям эксплуатации наиболее удобными являются четвертьволновые резонаторные измерительные преобразователи (РИП), допускающие внешнее расположение образца. Но при изменении комплексного значения диэлектрической проницаемости образца  $\epsilon_a = \epsilon_a(1 - \text{tg}\delta)$  в широком диапазоне возникают области существенного снижения информативности измерений. Это обусловлено изменением крутизны значений функций связи между параметрами образца и выходными интегральными параметрами РИП – резонансной частотой  $f$  и добротностью  $Q$ . Уменьшить негативное воздействие этих факторов можно оптимальным выбором конструктивных параметров РИП.

### 1. Описание геометрической схемы РИП

Теория коаксиальных четвертьволновых РИП основана на использовании тензорных функций Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей [5,6]. Несмотря на сравнительную простоту конструкции, общее число параметров такого РИП и взаимосвязей между ними весьма велико. В настоящее время построены полные теоретические модели и исследован ряд характеристик таких РИП [7]. Поэтому в данном случае необходимо ориентироваться на специфические особенности поставленной задачи.

Выбранная конструкция РИП с коаксиальной измерительной апертурой (КИА) схематически показана на рис. 1.

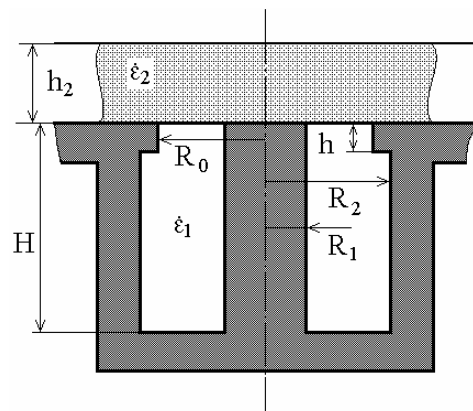


Рис. 1. Электродинамическая структура РИП

Оптимальным расположением клеточного материала пациента является размещение его в виде плоского слоя на коаксиальной измерительной апертуре РИП ( $h_2, \epsilon_2$ ).

Преимущества данной конструкции состоят в том, что при резонансном согласовании апертуры ( $R_0, h$ ) и основной камеры резонатора ( $R_1, R_2, H$ ) можно существенно увеличить чувствительность датчика. Кроме того, данная конструкция допускает теоретическую калибровку.

### 2. Условия задачи численного моделирования

Влагосодержание в биообъектах характеризуется диапазоном изменений  $\epsilon$  в пределах от 3 до 10 и  $\text{tg}\delta$  в пределах от 0,01 до 0,4. Таким образом, численное

моделирование работы РИП целесообразно проводить в данном диапазоне.

Расчетные зависимости изменений выходных параметров РИП получены путем численного решения электродинамической задачи с помощью методики, описанной в [7]. Для расчетов взята модель, у которой исходные параметры выбраны с учетом результатов предшествующих работ [8]. Исходные параметры РИП с КИА следующие:  $H/\lambda = 1,25$ ;  $R_2/\lambda = 0,17$ ;  $h_2/\lambda = 0,14$ ;  $h/H = 0,01$ ;  $\lambda = 3$  см;  $\epsilon_1 = 1$ ; проводимость стенок резонаторной камеры выбрана равной  $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$  Сим/м. Детальные расчеты показали, что выбранные соотношения размеров обеспечивают максимальную чувствительность данной конструкции РИП с коаксиальной измерительной апертурой.

Дальнейшее уточнение размеров РИП касается определения оптимальных радиусов его частей, то же относится и к КИА.

### 3. Результаты численного моделирования

Вначале рассмотрим влияние КИА на добротность системы. Возможное изменение радиуса апертуры  $R_0/R_2$  при расчетах взято в пределах 0,29 до 1. Относительное изменение добротности рассчитывалось исходя из добротности системы, нагруженной на образец с параметрами  $\epsilon_2 = 3$ ;  $\text{tg}\delta_2 = 0,01$ . При этом исходной считалась система, нагруженная на свободное пространство. Такое представление позволяет наглядно показать весь диапазон изменения информационных параметров.

Зависимости добротности и ее относительного изменения приведены на рис. 2, а-г.

Резонансная частота  $f$  в большей степени определяется реальной частью диэлектрической проницаемости образца. Результаты расчета ее поведения и изменения  $\Delta f$  при аналогичных условиях в зависимости от отношения радиусов апертуры  $R_0/R_2$  представлены на рис. 3, а-г.

Как видно из графиков (см. рис. 2 и 3), размер апертуры существенно влияет на информационные параметры РИП с КИА. Выбор оптимального размера измерительной апертуры производился в соответствии со следующими принципами. Известно, что для проведения достоверных измерений добротность нагруженного резонатора должна быть как можно больше. Однако для уменьшения требуемых размеров исследуемого образца и, соответственно, уменьшения объема биологических проб пациента наиболее важно добиться высокого значения отношения  $\Delta Q/Q$  РИП при измерении  $\text{tg}\delta$ . При этом необходимо сохранить высокое значение отношения  $\Delta f/f$  при изменении  $\epsilon$ .

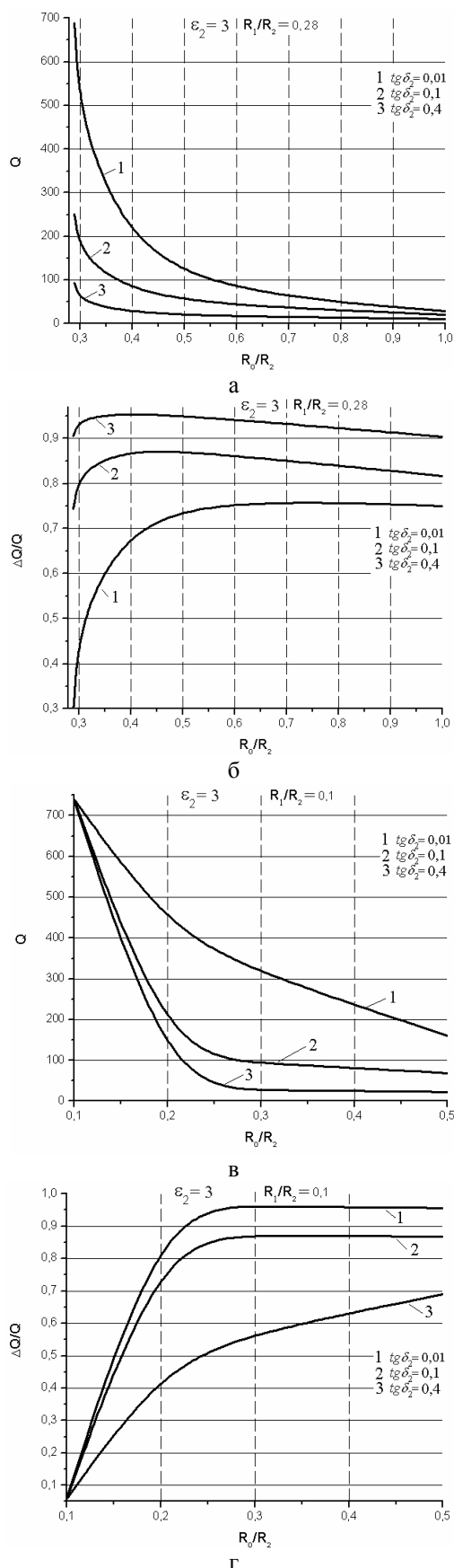


Рис. 2. Зависимость  $Q$  (а),  $\Delta Q/Q$  (б) от величины апертуры и параметров образца

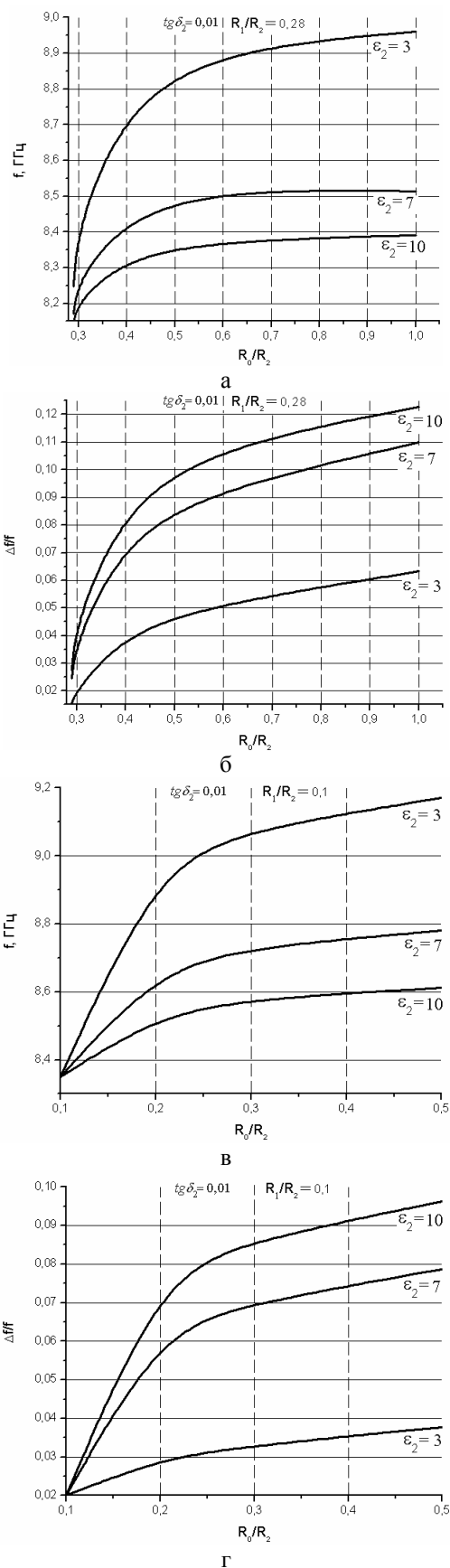


Рис. 3. Зависимость  $f$  (а) и  $\Delta f/f$  (б) от величины апертуры и параметров образца

В [7,8] показано, что эти противоречивые требования можно в наибольшей степени удовлетворить, выбирая  $R_1/R_2 = 0,28$ , а величина  $h/H$  должна быть минимальной. Поэтому дальнейшее моделирование будет проводиться для КИА с  $R_0/R_2 = 0,3$ ,  $h/H = 0.01$ .

Зависимости добротности и ее изменения от электрофизических параметров образца приведены на рис. 4, а, б.

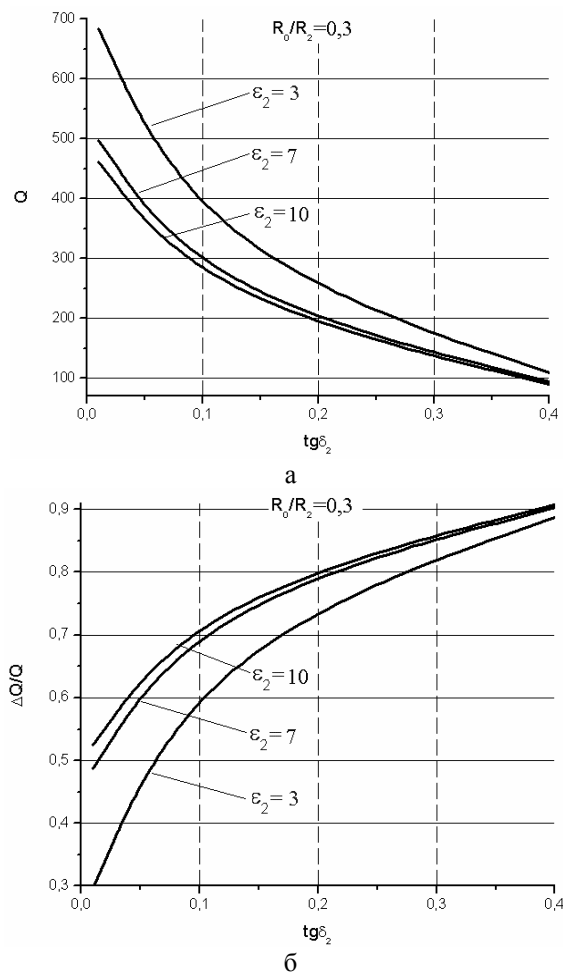


Рис. 4. Зависимость  $Q$  (а) и  $\Delta Q/Q$  (б) от параметров образца

Представленные на рис. 4 зависимости показывают, что при увеличении значений относительной диэлектрической проницаемости образца увеличивается добротность системы. Это является следствием экранирования открытого конца апертуры диэлектрическим материалом. Тем не менее, увеличение потерь, несмотря на уменьшение глубины проникновения поля в образец приводит к существенному уменьшению добротности и соответственно чувствительности датчика. Но соотношения приращения параметров к их первоначальной величине по-прежнему остается высоким, что указывает на возможность поддержания информативных свойств сенсора на высоком уровне.

#### Выводы

Результаты, представленные в данной работе и ранее в работах [7,8], показывают, что методы СВЧ диэлектрических измерений имеют ряд преимуществ по сравнению с другими методами и могут быть успешно применены в клинической практике. Преиму-

щества этих методов обусловлены следующими факторами. Во-первых, СВЧ методы позволяют осуществлять бесконтактное определение характеристик исследуемых объектов. Во-вторых, СВЧ методы позволяют одновременно, в процессе измерения воздействовать на исследуемый образец, что существенно увеличивает объем получаемой информации. Последнее особенно важно при выборе эффективного способа лечения кардиопатологии путем определения оптимальных доз препаратов с учетом индивидуальных особенностей пациента.

Выбор в качестве СВЧ сенсора четвертьволновых РИП обеспечит минимальный объем проб, что уменьшает стрессовую нагрузку пациентов. Но при значительном диапазоне изменений параметров исследуемых объектов требуются дополнительные меры для уменьшения погрешности измерений. Проведенный в работе анализ информативных параметров позволил выделить наиболее взаимозависимые из них.

В данной работе решена задача определения оптимального соотношения радиусов основной камеры РИП и радиуса КИА. Полученные зависимости информационных параметров РИП КИА позволяют минимизировать погрешность измерений электрофизических параметров биообъектов и однозначно сопоставить их с содержанием свободной воды.

Однако было бы ошибочным считать, что полученные результаты смогут полностью удовлетворить все практические потребности. В качестве путей дальнейшего совершенствования модели РИП можно выделить следующие. Потребуется оптимизация параметров системы с учетом того, что специфика измерений параметров биологических проб приведет к усложнению модели. В частности, может потребоваться учет влияния защитного слоя между экраном с КИА и образцом. Это может быть, например, доннышко кюветы с пробой. Кроме того, условия поточных клинических исследований могут потребовать учета дополнительного воздушного зазора между дном кюветы и плоскостью КИА. Поэтому для улучшения информационных возможностей метода потребуются дальнейшие исследования влияния зазоров и толщины биологических образцов.

Остальные факторы, определяющие общую погрешность, можно исключить необходимым качеством изготовления конструкции датчика.

**Литература:** 1. Щеголева Т.Ю. Исследование биологических объектов в миллиметровом диапазоне радиоволн / Т.Ю. Щеголева // К.: Наукова думка. 1996. 182 с. 2. Введение в биомембранологию / Под ред. А.А. Болдырева. М.: МГУ, 1990. 208с. 3. Авакян О.М. Фармакологическая регуляция функции адренорецепторов / О.М. Авакян // М.: Медицина, 1988. 256 с. 4. Стрюк Р.И. Адренореактивность и сердечно-сосудистая система / Р.И. Стрюк, И.Г. Длусская // М.: Медицина, 2003. 160с. 5. Панченко Б.А. Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей / Б.А. Панченко // Радиотехника. 1970. Вып. 15. С. 82–91. 6. Tai C.T. Dyadic Green's functions for a coaxial line / С. Т. Tai // IEEE Trans. of Antennas and Propagation. 1983. Vol. 48, N 2. P. 355–358. 7. Гордиенко Ю.Е. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов / Ю.Е. Гордиенко, В.В. Петров, Д.А. Полетаев // Радиотехника. 2008. № 154. С. 61 – 66. 8. Слипченко Н.И. Сравнение результатов численного моделирования систем помещения образцов в СВЧ резонаторных датчиках с коаксиальной измерительной апертурой / Н.И. Слипченко, А.Н. Бородкина // Радиотехника. 2013. № 175. С. 89 – 96.

Поступила в редколлегию 11.03.2014

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Панченко А.Ю.

**Слипченко Николай Иванович**, д-р физ.-мат. наук, проф., проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: микроволновая микроскопия, микро- и оптоэлектроника, СВЧ-гигрометрия, приборостроение. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021-013.

**Гордиенко Юрий Емельянович**, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов и объектов, микроэлектронные датчики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

**Бородкина Анна Николаевна**, аспирантка каф. микроэлектронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: биофизика, радиофизика, СВЧ методы измерений, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021-362.