

PACS numbers: 07.50.Qx, 42.60.Da

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРА МЕЖДУ ОБРАЗЦОМ И КОАКСИАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ВО ВЛАГОМЕТРИИ СВЧ

*Д.А. Полетаев*

Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского,  
пр. Вернадского, 4, 95007, Симферополь, Украина  
E-mail: [dm1try@tnu.in.ua](mailto:dm1try@tnu.in.ua)

*Проведено численне моделювання коаксимального резонаторного измерительного преобразователя для влагометрии СВЧ с учётом влияния излучательных потерь. Получен явный вид аппроксимирующей функции. Осуществлена теоретическая градуировка датчика посредством аппроксимирующей функции.*

**Ключевые слова:** ВЛАГОМЕТРИЯ СВЧ, СВЧ ДИАГНОСТИКА, ЧЕТВЕРТЬ-ВОЛНОВЫЙ РЕЗОНАТОР, КОАКСИАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.

*(Получено 02.11.2009, в отредактированной форме – 16.11.2009).*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Влажность сырья существенно влияет на ход технологического процесса и требует обязательного контроля. В современных методах определения влагосодержания широко используются методы СВЧ диагностики [1]. Это связано с неразрушаемостью образца и возможностью проведения экспресс-измерений.

Физической основой методов СВЧ-влагометрии является зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь влагосодержащего материала от его молекулярной структуры, а также от содержания и типа связи воды [2]. Значение комплексной диэлектрической проницаемости воды зависит от частоты, максимум дисперсии приходится на диапазон 1-10 ГГц [3].

В указанном частотном диапазоне наибольшее распространение, благодаря возможности внешнего расположения объекта исследования на открытом торце резонатора, получили коаксимальные четвертьволновые датчики [4]. На их основе создан ряд приборов для безэлектродной СВЧ диагностики нанобъектов и новейших систем ближнеполевой СВЧ микроскопии [5]. При этом наиболее востребован резонаторный метод измерения, ввиду высокой чувствительности к малому изменению параметров материала. При этом практическое использование коаксимальных резонаторных измерительных преобразователей (КРИП) во влагометрии требует предварительной градуировки, для однозначного сопоставления информационных параметров датчика (добротности  $Q$  и частоты  $f$ ) параметрам материала (относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$  и тангенсом угла относительных диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta_2$ , через которые определяется влажность). Проведение

градуировки датчика по эталонным образцам имеет ряд недостатков [1]. Основной недостаток состоит в непостоянстве параметров эталонных образцов при изменении внешних условий и с течением времени. Теоретическая градуировка КРИП свободна от большинства недостатков. Однако, работы данного направления [4] базируются на упрощённых моделях резонаторных преобразователей и не учитывают потери, связанные с излучением из резонатора. Современные прямые численные методы позволяют существенно улучшить модель и повысить точность как в эксперименте, так и при численном моделировании.

Практические измерения неизбежно сопряжены с неплотностью прилегания торца КРИП к исследуемому образцу. Воздушный зазор влияет на информационные параметры резонаторного измерительного преобразователя и вносит погрешность в значение влажности материала. Целью работы является учет влияния зазора между торцом КРИП и исследуемым образцом, проведение теоретической градуировки датчика с учётом излучательных потерь, градуировка датчика посредством введения аппроксимирующей функции, которая упрощает теоретические расчеты.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общий вид КРИП приведён на рис. 1.

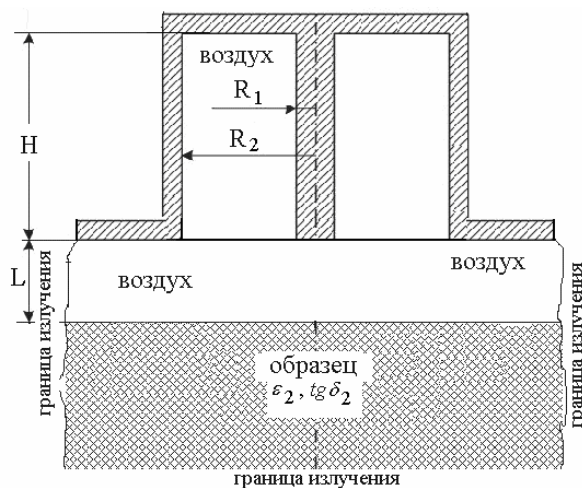


Рис. 1 – Модель КРИП

Для проведения практических измерений важно, чтобы материал оказывал как можно большее влияние на информационные параметры КРИП. При этом нагруженная добротность не должна быть меньше 100 [1]. Из теории коаксиальных линий передач [6] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов  $R_2/R_1 = 3...10$ . Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора также будет достигаться при данном отношении.

Одномодовый режим коаксиальной линии сохраняется в диапазоне частот [6]:

$$f < c / [\pi(R_1 + R_2)],$$

где  $c$  – скорость света;  $R_1$  – радиус центральной жилы;  $R_2$  – внутренний радиус коаксиального волновода (рис. 1).

Резонансная частота идеального четвертьволнового резонатора находится из выражения:

$$f < c (2n - 1) / (4H),$$

где  $n$  – целое число. Исходя из данных теоретических предпосылок, были выбраны следующие геометрические размеры модели:  $H/\lambda = 2,75$ ;  $R_2/R_1 = 9$ ;  $R_2/\lambda = 0,1$ ;  $\lambda = 22$  см; материал стенок резонатора – идеальный металл (данное упрощение сделано для явного выделения влияния излучательных потерь).

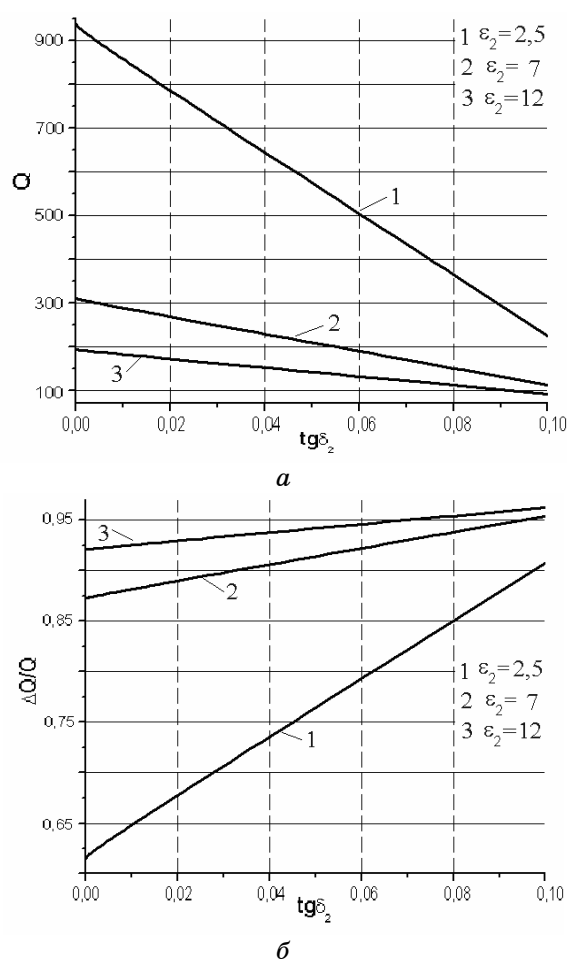
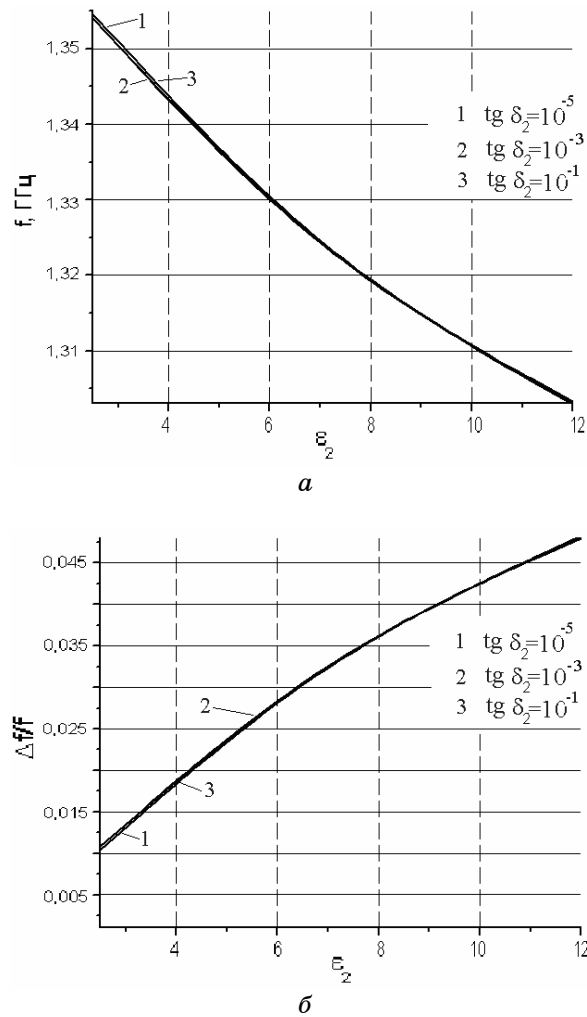


Рис. 2 – Зависимость добротности и изменения добротности КРИП от параметров образца

Для теоретического исследования КРИП необходимо из решения уравнений Максвелла найти распределение электромагнитного поля в резонаторе и объекте. При решении уравнений Максвелла использовался прямой численный метод конечных элементов [7]. При этом осуществлялся учёт излучательных потерь.

Электрофизические параметры влагосодержащих образцов (например, зерно) изменяются в широком диапазоне:  $\varepsilon_2$  от 2,5 до 12,  $\text{tg } \delta_2$  от  $10^{-5}$  до 0,1 [1]. В рамках данных значений будет проводиться дальнейший анализ.

В результате численных исследований, получены зависимости добротности и изменения добротности (рис. 2), относительно КРИП, нагруженного на свободное пространство, от параметров материала, при величине зазора между торцом КРИП и материалом  $L = 0$ .



**Рис. 3** – Зависимость резонансной частоты и изменения резонансной частоты КРИП от параметров образца

Зависимости добротности  $Q$  и относительного изменения добротности  $\Delta Q/Q$  от  $\operatorname{tg} \delta_2$  (рис.2) носят линейных характер. Необходимо отметить малое значение добротности КРИП, вследствие значительных потерь на излучение (рис.2,а).

На рис.3 приведены зависимости резонансной частоты и изменения резонансной частоты, относительно частоты КРИП, нагруженного на свободное пространство, от параметров материала, при величине зазора между торцом КРИП и материалом  $L = 0$ . Как видно из рис.3, резонансная частота КРИП определяется преимущественно относительной диэлектрической проницаемостью образца.

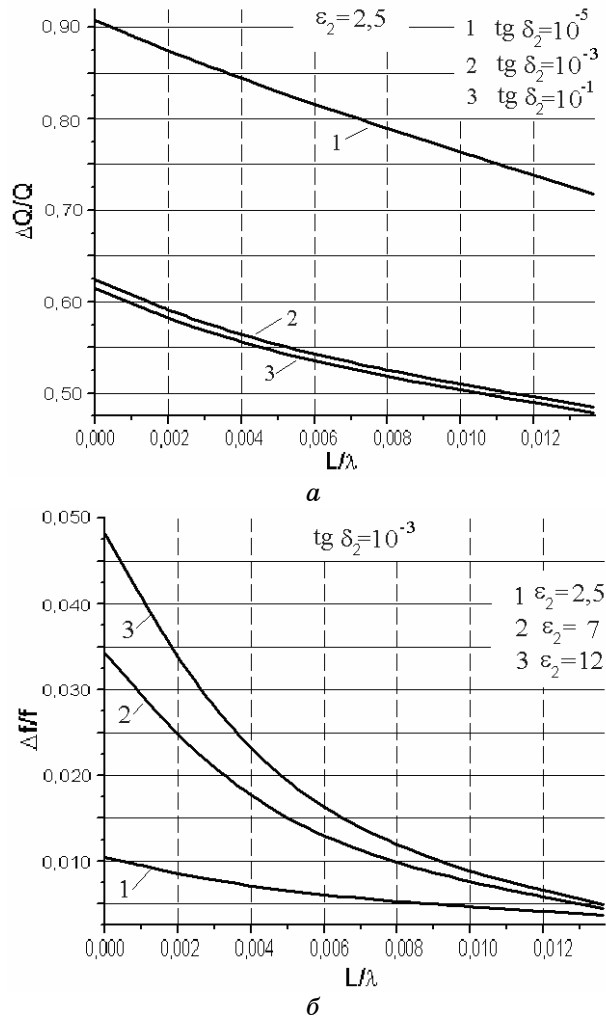
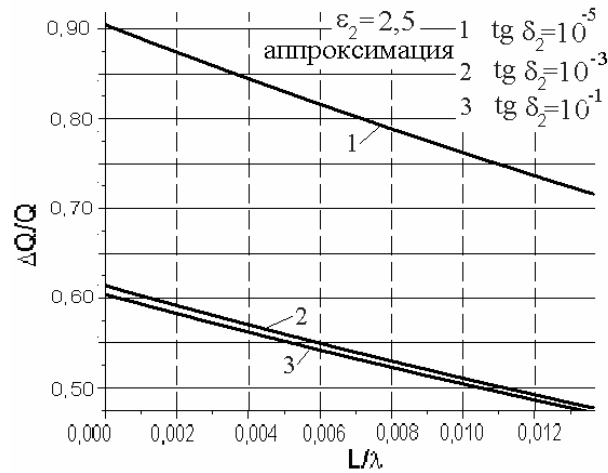


Рис. 4 – Зависимости изменения добротности и частоты от величины зазора и параметров образца

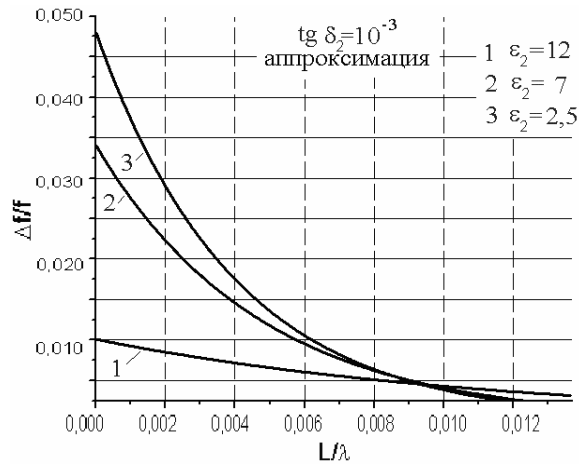
Градуировочные кривые (рис. 2, 3) позволяют сопоставлять электрофизические параметры образца с информационными параметрами КРИП.

Зазор между торцом резонатора и образцом существенно изменяет информационные параметры КРИП. На рис. 4 приведены зависимости относительного изменения добротности и частоты КРИП от величины зазора  $x = L/\lambda$ , при различных параметрах образца.

Как видно из графика на рис.4 а, величина  $\Delta Q/Q$ , в основном, определяется тангенсом угла относительных диэлектрических потерь образца. Зависимости на рис. 4, б отражают малое изменение резонансной частоты КРИП для выбранного диапазона изменения  $\varepsilon_2$ .



а



б

Рис. 5 – Аппроксимированные зависимости  $\Delta Q/Q$  и  $\Delta f/f$  от величины зазора и параметров образца

Для практического использования градуировочных кривых на рис.4 можно аппроксимировать экспоненциальными функциями, вида:

$$F(x) = ae^{bx},$$

где  $a, b$  – постоянные, которые находятся по двум точкам зависимостей, полученных из решения уравнений Максвелла (рис. 4а, б).

Аппроксимированные зависимости изменения добротности и частоты от величины зазора и параметров образца приведены на рис.5. Для кривых на рис. 5, а  $a_1 = 0,9; b_1 = -17,13; a_1 = 0,61; b_1 = -18,38; a_1 = 0,6; b_1 = -18,05$ , по порядку кривых сверху вниз, соответственно. Для кривых на рис.5,б, аналогично  $a_1 = 0,05; b_1 = -252,08; a_1 = 0,03; b_1 = -212; a_1 = 0,01; b_1 = -85,23$ .

Сравнивая кривые на рис. 4 и 5, видно, что значения аппроксимирующей функции практически полностью совпадают со значениями численного расчёта. Подобного рода аппроксимации можно использовать при практическом использовании датчиков данного типа во влагометрии.

При размере зазора  $L/\lambda > 0,006$ , аппроксимированные значения изменения частоты (рис.4,б) отличаются от данных, полученных в результате численного моделирования на 33 %. Это говорит о необходимости построения другой аппроксимирующей функции в данном диапазоне величин зазора.

Следует отметить, что вблизи резонансной частоты КРИП, при малых изменениях  $\varepsilon_2$  материала, ввиду малого значения  $\Delta f / f$ , целесообразно использовать только одну градуировочную зависимость изменения добротности от параметров материала.

### 3. ВЫВОДЫ

В ходе работы получены семейства градуировочных кривых резонаторного измерительного преобразователя для определения влагосодержания. Кроме того, установлен явный вид аппроксимирующей градуировочной функции для КРИП.

Полученные зависимости позволяют сопоставить информационные параметры датчика с электрофизическими параметрами образца, а, следовательно, и с его влагосодержанием.

Автор выражает благодарность и признательность доктору физико-математических наук, заведующему кафедрой МЕРУ ХНУРЭ Гордиенко Ю.Е. за выбор темы исследования и ценные замечания.

#### THE ACCOUNT OF BACKLASH'S INFLUENCE BETWEEN THE SAMPLE AND COAXIAL RESONATOR MEASURING CONVERTER IN MICROWAVE AQUAMETRY

*D.O. Poletaev*

Tavrida National V.I.Vernadsky University,  
4, Academician Vernadsky Ave, 95007, Simferopol, Ukraine  
E-mail: [dm1try@tnu.in.ua](mailto:dm1try@tnu.in.ua)

*Numerical modeling of a coaxial resonator measuring converter for microwave aquametry with taking into account a radiating losses is realized. An approximating*

*function is obtained. Theoretical graduation of the gauge using approximating function is carried out.*

**Keywords:** MICROWAVE AQUAMETRY, MICROWAVE DIAGNOSTICS, THE QUARTER WAVE RESONATOR, COAXIAL RESONATOR MEASURING CONVERTER.

**ВПЛИВ ЗАЗОРУ МІЖ ЗРАЗКОМ І КОАКСІАЛЬНИМ ВИМІРЮВАЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ РЕЗОНАТОРА У ВЛАГОМЕТРІЇ НВЧ**

**Д.О. Полетаєв**

Таврійський національний університет ім. В.І.Вернадського,  
пр. Вернадського, 4, 95007, Сімферополь, Україна  
E-mail: [dm1try@tnu.in.ua](mailto:dm1try@tnu.in.ua)

*Проведено чисельне моделювання коаксіального резонаторного вимірювального перетворювача для вологометрії НВЧ з урахуванням впливу випромінювальних втрат. Був отриманий явний вид апроксимуючої функції. Здійснено теоретичне градування датчика за допомогою апроксимуючої функції.*

**Ключові слова:** ВЛАГОМЕТРІЯ НВЧ, НВЧ ДІАГНОСТИКА, ЧВЕРТЬ-ХВИЛЬОВИЙ РЕЗОНАТОР, КОАКСІАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ РЕЗОНАТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. В.В. Лисовский, *Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов* (Минск: УОБГАТУ: 2005).
2. V.V. Starostenko, E.P. Taran, D.A. Poletaev, *17th International Crimean Conference - Microwave and Telecommunication Technology, CRIMICO*, art. no. 4368895, 667 (2007).
3. О.А. Баранник, Ю.В. Прокопенко, М.Т. Черпак, *Доп. НАН України №11*, 68 (2005).
4. Ю.Е. Гордиенко, В.В. Петров, Ф.М. Хаммуд, *Радиотехника №140*, 156 (2005).
5. L.F. Chen, S.K. Ong, S.P. Neo, *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization* (Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd: 2004).
6. А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын *Электродинамика и распространение радиоволн* (Минск: Бестпринт: 2004).
7. Г.И. Марчук, В.И. Агошков *Введение в проекционно-сеточные методы* (М.: Наука: 1981).