

Особенности резонаторного измерительного преобразователя с запредельной частью и датчик влажности сыпучих материалов на его основе

Д. А. Полетаев*

*Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского,
физический факультет, кафедра радиофизики и электроники.
Украина, 95007, Симферополь, пр. Вернадского, 4*

(Статья поступила 19.09.2013; подписана в печать 25.09.2013)

В работе предложена численная модель коаксиального резонаторного измерительного преобразователя с запредельной частью для СВЧ влагометрии. Определена чувствительность резонаторного преобразователя для различных рабочих длин волн. Установлены важнейшие свойства резонаторного измерительного преобразователя указанного типа и предложен датчик влажности на его основе.

PACS: 07.07.Vx

УДК: 543.275.1

Ключевые слова: СВЧ, резонатор, резонаторный измерительный преобразователь, влагометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее привлекательных и перспективных методов исследования материалов, применимых как в микроэлектронной, так и в сельскохозяйственной промышленности, является метод СВЧ диагностики, являющийся современным направлением радиофизики, физики приборов, элементов и систем. В нем можно выделить отдельный круг задач, связанных с разработкой новых методов изучения физических свойств исследуемых образцов, а также аппаратных средств, использующих данные методы [1, 2].

Основным функциональным узлом СВЧ аппаратуры для диагностики материалов является датчик, который включает источник электромагнитных волн, измерительный преобразователь и устройства выделения информационных сигналов. Наибольшее распространение получили датчики на основе резонаторов [3]. При этом, для обеспечения бесконтактности проведения экспресс-измерений, электромагнитное поле резонатора зондирует образец через отверстие в одной из стенок. Такой резонаторный измерительный преобразователь (РИП) относится к апертурному типу [4].

Исследование физических свойств влагосодержащих сред представляет научный и практический интерес [1]. С научной точки зрения требуется объяснить и формализовать механизмы вхождения воды в структуру объекта и ее взаимодействие с частицами основного материала, а также влияние воды на физические и физико-химические свойства среды. С практической — необходимо располагать возможностями соотносить параметры технологических процессов для таких объектов с содержанием влаги в них [2]. Таким образом, требуется прецизионный, широкодиапазонный метод определения влагосодержания в таких средах.

В настоящее время наиболее перспективным методом влагометрии, является СВЧ метод [1]. В нем используется зависимость комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащей среды от процентного содержания воды, что хорошо подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями [4].

Из [1] известно, что электрофизические параметры вещества коррелируют с его влагосодержанием. Однозначная связь информационных сигналов РИП с электрофизическими параметрами влагосодержащего материала положена в основу СВЧ влагометрии.

Проникновение влаги в материал обусловлено его структурой и наличием воздушных пор, имеющих произвольную форму [1]. Материалы, в зависимости от размера частицы, можно разделить на две группы: грубодисперсные и мелкодисперсные.

Для грубодисперсных материалов, наиболее подходящим оказывается электродинамический подход при моделировании диэлектрической проницаемости влажного материала [1]. Физический смысл такого подхода, состоит в представлении влагосодержащей среды трехслойной системой: слой сухого вещества, слой воды и слой воздуха. При этом предполагается, что распространяющаяся в бесконечном образце влажного материала электромагнитная волна СВЧ имеет плоский фронт и волновой вектор, перпендикулярный плоскости слоев. Толщина каждого слоя определяет объемную концентрацию соответствующего компонента.

Основной особенностью мелкодисперсных сред является большое количество содержащейся в них связанной влаги. Всю воду, находящуюся в таком материале, можно разделить на три фазы: связанная вода, вода полисорбции, свободная вода. Эту точку зрения подтверждают результаты исследования влагосодержания с помощью ЯМР-спектроскопии [1]. По мере заполнения сорбционного объема появляется влага полисорбции и небольшое количество свободной воды. При дальнейшем увлажнении количество воды в образце растет только за счет свободной воды.

*E-mail: dmitry@tntu.in.ua

Однако, строгая теория СВЧ диэлектрической проницаемости существует только для влагосодержащих газов и жидкостей [1]. Твердокомпонентные среды являются более сложными по своей макроструктуре и характеру вхождения в них воды. Для них градуировку РИП для влагометрии, как правило, осуществляют по классическому гравиметрическому методу [4].

В датчиках СВЧ влагометрии широко применяются коаксиальные резонаторные измерительные преобразователи (КРИП) [3], ввиду возможности внешнего расположения объекта исследования и возможности регулировки чувствительности измерительного преобразователя путем выбора измерительной апертуры, а также их экспрессности и воспроизводимости.

В настоящее время широкое применение нашли датчики на основе коаксиальных резонаторных измерительных преобразователей (КРИП) [2]. Преимущества использования четвертьволновых коаксиальных резонаторов очевидны: возможность внешнего расположения объекта исследования, регулировка чувствительности измерительного преобразователя путем выбора апертуры.

Конструкция датчика на основе КРИП с запредельной частью (рис. 1) позволяет уменьшить излучательные потери электромагнитной энергии, что позволяет увеличить нагруженную добротность. Положительной чертой данного измерительного преобразователя также является отсутствие паразитного влияния воздушного зазора между торцом резонатора и образцом на информационные сигналы КРИП.

Рабочая частота КРИП определяется максимумом дисперсии воды [3], а также размером отдельного зерна материала (грубо- и мелкодисперсные).

Целью работы является изучение электродинамических характеристик КРИП при изменении длины запредельной части, заполненной исследуемым материалом, и частоты.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Общий вид КРИП с запредельной частью приведен на рис. 1. КРИП включает коаксиальный резонатор высотой H и запредельную часть общей длиной h_z ; h — длина запредельной части, содержащая исследуемую пробу с электрофизическими параметрами ε , $\text{tg } \delta$ — относительной диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь, соответственно. Для исключения проникновения исследуемого материала в коаксиальный резонатор, последний отделен от запредельной части разделительной вставкой высотой h_V с электрофизическими параметрами: $\varepsilon_V = 2$; $\text{tg } \delta_V = 0.001$.

Одномодовый режим Т-волны коаксиальной линии обеспечивается на частотах [5]:

$$f < c/\pi(R_1 + R_2), \quad (1)$$

где R_1, R_2 — внутренний радиус и радиус центрального проводника коаксиальной линии, соответственно.

Резонансная частота четвертьволнового резонатора определяется формулой [5]:

$$f_0 = c(2n - 1)/((H - h_V) + 4h_V\sqrt{\varepsilon_V}), \quad (2)$$

где c — скорость света.

Низший тип волны круглого волновода — Н₁₁. Критическая длина волны данного типа равна [5]:

$$\lambda_{H11} = 3.14\sqrt{\varepsilon}R_2, \quad (3)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего круглый волновод.

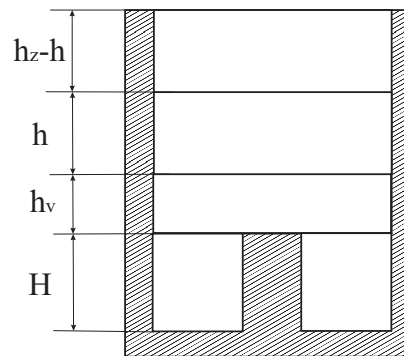


Рис. 1: Резонаторный измерительный преобразователь с запредельной частью

Для обеспечения запредельного режима работы круглого волновода по (3) и степени дисперсности материала были выбраны следующие геометрические размеры модели:

1. $R_2/\lambda = 0.07$; $R_1/R_2 = 0.28$; $H/\lambda = 2.75$; $h_V = 1$ мм; $\lambda = 22$ см — для грубо- и мелкодисперсных материалов;
2. $R_2/\lambda = 0.07$; $R_1/R_2 = 0.28$; $H/\lambda = 2.75$; $h_V = 1$ мм; $\lambda = 3$ см — только для мелкодисперсных материалов.

Значения добротности получены из прямого численного решения волнового уравнения, с учетом тепловых потерь в стенках резонатора (проводимость металла $\sigma = 58 \times 10^6$ См/м) методом конечных элементов.

Зависимость добротности от h_z (рис. 2) получена при воздушном заполнении запредельной части, нагруженной на свободное пространство.

Чувствительность определялась исходя из изменения добротности $\Delta Q/Q = (Q_1 - Q_2)/Q_1$ для двух образцов: 1) $\varepsilon = 7$; $\text{tg } \delta = 0.01$ и 2) $\varepsilon = 7$; $\text{tg } \delta = 0.012$. Указанное численное значение относительной диэлектрической проницаемости имеет пшеница с высоким влагосодержанием [1]. Значение $\text{tg } \delta = 0.01$ и отклонение на 20% приняты для оценки чувствительности РИП к малым изменениям тангенса угла диэлек-

трических потерь. Графики зависимости добротности и чувствительности от длины запредельной части приведены на рис. 3.

Как видно из графика на рис. 2, изменение добротности резонаторного преобразователя практически прекращается при $h_z/\lambda \geq 0.6$ для всех указанных длин волн. Таким образом, с учетом диэлектрического заполнения, длина запредельной части не должна быть меньше 0.6λ .

Как видно из графиков на рис. 3 и рис. 4, КРИП с запредельной частью обладает высокой добротностью и чувствительностью к изменению параметров материала. На рис. 3 видно, что добротность резонаторного преобразователя определяется только параметрами пробы и практически не зависит от длины запредельной части h , заполненной исследуемым материалом, при изменении последней от 0.05 λ до 0.6 λ . Этот факт позволяет упростить проведение практических измерений с применением описанного КРИП.

Наибольшая чувствительность достигается при большей длине волны (рис. 4). Физически это интерпретируется тем, что СВЧ поле с меньшей длиной волны глубже проникает в запредельный волновод. Таким образом, для повышения точности измерения параметров мелкодисперсных диэлектриков, следует проводить измерение на большей длине волны.

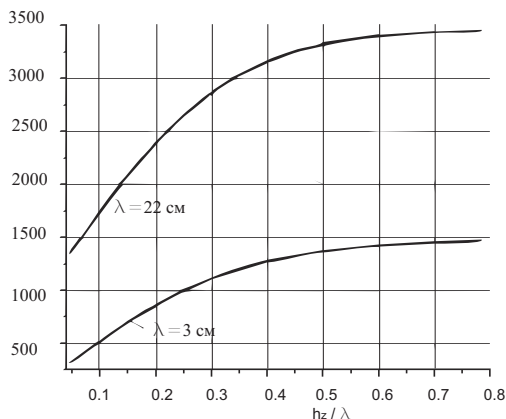


Рис. 2: Зависимость добротности КРИП от длины запредельной части резонатора

2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Результаты работы положены в основу патента Украины на полезную модель устройства для измерения влажности [6]. Ключевой особенностью датчика является компенсация влияния плотности сыпучего материала на показания величины влагосодержания.

Разработанный датчик влажности (рис. 5) содержит генератор качающейся частоты (ГКЧ) 1, КРИП 2

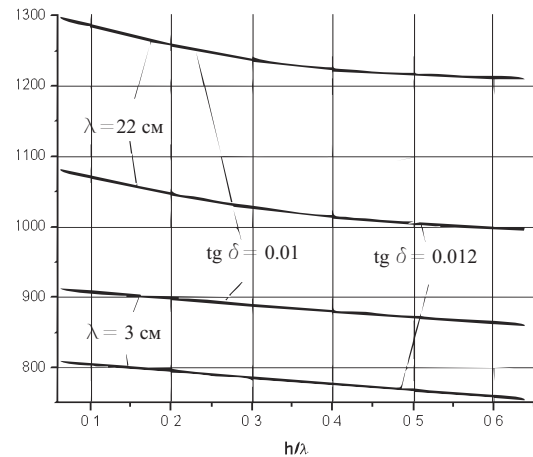


Рис. 3: Зависимость добротности КРИП от длины запредельной части резонатора, заполненной исследуемым материалом

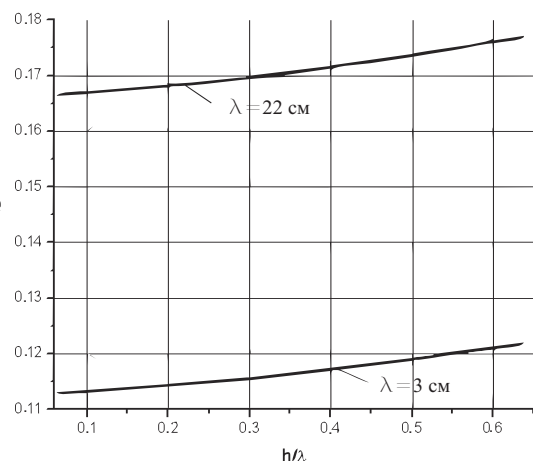


Рис. 4: Зависимость чувствительности КРИП от длины запредельной части резонатора, заполненной исследуемым материалом

(состоящий из вставки 4, исследуемого материала 5, уплотняющей вставки 6 и пружины 7), петлю возбуждения 3, петлю детектора 8, детектор 9, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 10, микропроцессор 11 и индикатор 12.

Электромагнитное поле КРИП взаимодействует с исследуемой пробой материала. Электрофизические параметры изменяют информационные сигналы резонаторного преобразователя. Микропроцессор, подавая сигнал на ГКЧ, качает частоту в диапазоне частот, определяемом размерами КРИП и выбранным частотным диапазоном. СВЧ энергия от ГКЧ посредством петли возбуждения возбуждает КРИП. Часть энергии поступает на детектор. С детектора, сигнал поступает на АЦП. АЦП передает значение сигнала в микропроцессор. Микропроцессор проводит расчет информационных сигналов КРИП и передает их для дальнейшей обработки внешним устройствам.

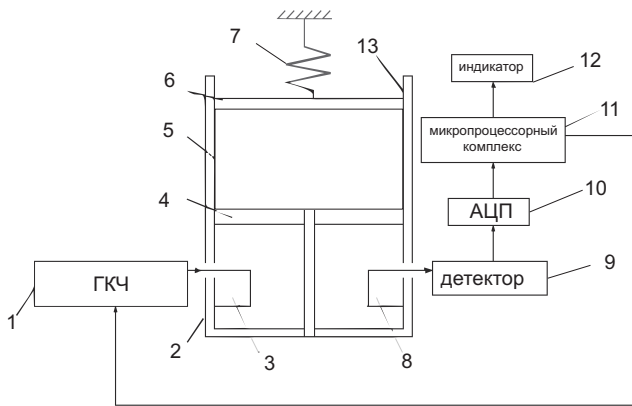


Рис. 5: Блок-схема датчика влажности

Исследуемая проба материала, в качестве которого может выступать мука, зерно, крупы, сахар и др., помещается в запредельную часть и закрывается уплотняющей вставкой сверху. Уплотняющая пружина, действуя с постоянной силой, не зависящей от длины растяжения пружины, передает усилие через тефлоновую уплотняющую вставку и уплотняет исследуемую пробу материала. Это позволяет нормировать плотность исследуемой пробы материала. Размеры запредельной части выбраны таким образом, что ее запредельность обеспечивается во всем диапазоне частот генератора качающейся частоты для электрофизических параметров всех возможных исследуемых проб материала. Электрофизические параметры исследуемой пробы материала изменяют постоянную распространения запредельной части, изменяя добротность и резонансную частоту коаксиального резонатора. При этом добротность и резонансная частота коаксиального резонатора и их изменения относительно добротности и частоты коаксиального резонатора с незаполненной пробой материала запредельной частью определяются электрофизическими параметрами исследуемой пробы материала. Кроме того, величина добротности и ее изменение не зависят от степени заполнения запредельной части исследуемой пробой материала при длине заполненной части больше 0.6λ , как показано выше. Это происходит ввиду того, что увеличение степени заполнения запредельной части увеличивает постоянную распространения запредельной части, одновременно увеличивая и диэлектрические потери в запредельной части. Микропроцессор, управляя генератором качающейся частоты,

снимает сигнал с детектора через АЦП и определяет значения добротности и резонансной частоты и их изменения для коаксиального резонатора при заполнении запредельной части исследуемой пробой материала. Значения добротности, частоты и их изменения однозначно связаны со значением влагосодержания в конкретном материале. Градуировочные значения влагосодержания с соответствующими им значениями добротности, частоты и их изменения для коаксиального резонатора описанной конструкции хранятся в памяти микропроцессорной системы. На основании них, а также полученных значений добротности, резонансной частоты и их изменения для коаксиального резонатора микропроцессорная система вычисляет текущее значение влажности выбранного материала и выдает это значение на индикатор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено теоретическое исследование основных электродинамических характеристик КРИП с запредельной частью и установлено, что добротность резонаторного преобразователя определяется только параметрами пробы при длине запредельной части более 0.6λ . Теоретические исследования позволяют обоснованно проектировать датчики на основе КРИП для определения влагосодержания в сыпучих материалах разной дисперсности.

На основании теоретических результатов работы разработан датчик влажности, позволяющий компенсировать влияние плотности материала на величину показаний. В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований предложенного датчика на основе резонаторного измерительного преобразователя с запредельной частью.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору Ю.Е. Гордиенко за постановку задачи и научное руководство, а также профессору В.В. Старостенко за научную дискуссию.

Работа выполнена за счет гранта Автономной Республики Крым молодым ученым Крыма (грант от 1 января 2013 года).

- [1] Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. (Мн.: УОБГАТУ, 2005).
- [2] Kraszewski A. Subsurface sensing technologies and applications. **2**, N4. P. 347. (2001).
- [3] Гордиенко Ю. Е., Петров В. В., Полетаев Д. А. Радио-

техника. № 154. С. 61. (2008).

- [4] Chen L., Ong C., Neo C.. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization. (John Wiley & Sons. Southern Gate, 2004).
- [5] Кураев А. А., Попкова Т. Л., Синицын А. К. Электродинамика и распространение радиоволн. (Мн. Бест-

принт, 2004).

[6] Гордиенко Ю.Е., Полетаев Д.А., Шадрин А.А.
Пат. 67312. Украина, МПК7 G01N 22/04. Устройство

для измерения влажности / заявл. 09.08.2011; опубл.
10.02.2012, Бюл. № 3.

Characteristics of the resonant measuring converter with below-cutoff part and moisture sensor

D. A. Polietaiev

*Department of Radiophysics and Electronics, Faculty of Physics, V. I. Vernadsky Taurida national university
Vernadsky avenue 4, Simferopol, 95007, Ukraine
E-mail: dm1try@tnu.in.ua*

In work the numerical model of the coaxial resonator with below-cutoff part for microwave moisture metering was suggested. Determined its sensitivity for different operating wavelengths. Established the most important properties of the resonator with below-cutoff part and proposed moisture sensor based on it.

PACS: 07.07.Vx

Keywords: microwave, resonator, resonator measurement converter, aquametry.

Received 19.09.2013

Сведения об авторе

Полетаев Дмитрий Александрович — канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники, тел.: +38 (0652) 608-260, e-mail: dm1try@tnu.in.ua.
