

## **ОДНОСТОРОННИЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ДАТЧИК ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУОТКРЫТОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА**

Предлагается метод одновременного определения нескольких физических параметров гетерогенных диэлектрических материалов (концентрации компонент, плотности и смещения) с помощью одностороннего датчика, сконструированного на основе полуоткрытого диэлектрического резонатора.

Совершенствование современных систем управления технологическими процессами выдвигает повышенные требования к одному из ключевых элементов таких систем – датчику физических параметров тестируемых материалов. С точки зрения уменьшения материалоемкости и технологической гибкости применения оптимальными являются односторонние электромагнитные датчики, т.е. такие измерительные системы, все элементы которых располагаются по одну сторону от тестируемого объекта. Второе требование к датчикам – снижение потерь электромагнитной энергии на излучение в окружающее пространство. При этом желательно, чтобы достигалась высокая точность измерения, сравнимая с точностью, достижимой датчиками на основе закрытых объемных резонаторов. В данном сообщении излагается и обосновывается идея компактного микроволнового датчика, удовлетворяющего всем трем указанным требованиям, применительно к конкретной проблеме измерения влажности и плотности бумажного полотна.

Рассмотрим общие соображения о возможности конструктивного исполнения такого датчика. До сих пор наиболее высокая точность измерения физических параметров диэлектрических материалов достигается с помощью микроволновых датчиков резонаторного типа [1,2]. Но в отличие от прежних конструкций новый датчик не должен содержать щелевых элементов, через которые электромагнитная энергия может эффективно вытекать в окружающее пространство. Поле должно затухать при удалении от датчика. Однако внутри самого резонатора поле может возбуждаться только как распространяющееся, в виде бегущих мод, а не как затухающее. Выход из этого противоречия состоит в том, чтобы заполнить внутренность резонатора диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью, на поверхности которого поле резонаторных мод испытывало бы полное внутреннее отражение. При этом необходимо, чтобы возбуждаемые внутри диэлектрического резонатора моды свободных колебаний экспоненциально затухали в воздухе и, по возможности, внутри тестируемого диэлектрического материала. Если поместить данный материал вблизи такого резонатора, то затухающее поле будет проникать в него и отражаться от его поверхности, в результате параметры резонансного поля в целом будут меняться, как меняются они в обычных датчиках резонаторного типа. Можно подобрать параметры резонатора таким образом, чтобы на расстояниях порядка 1-2 см затухание не было слишком сильным. Тогда воздействие тестируемого материала на параметры резонаторного поля окажется достаточно эффективным, чтобы достигать высокой точности измерения. Поскольку поле оказывается затухающим во всех направлениях от резонатора, то не нужны никакие дополнительные возвращающие или отражающие элементы, которые препятствовали бы утеканию электромагнитной энергии в окружающее пространство. Если при этом резонатор служит не только генератором поля, но и чувствительным сенсором его параметров, то такой резонатор может использоваться как односторонний датчик физических параметров диэлектрических материалов.

В качестве возможного варианта реализации одностороннего датчика предлагается диск, изготовленный из прозрачного материала с высокой диэлектрической проницаемостью, покрытый тонкой проводящей оболочкой со стороны цилиндрической

поверхности и с одной из плоских сторон. Другая плоская сторона диска является рабочей и служит для излучения и приема электромагнитных колебаний в окружающее пространство. Со стороны боковой цилиндрической поверхности диска в нем прорезаны радиальные отверстия, куда вставляются штыри, служащие для возбуждения резонансных колебаний и регистрации параметров поля. Если поднести к плоской рабочей стороне тестируемый диэлектрический материал, то параметры резонансного поля изменятся в соответствии с величиной диэлектрической проницаемости данного материала и его потерь.

Обычно подобные датчики используются для измерения концентрации какой-либо физической компоненты гетерогенного диэлектрического материала, например, влагосодержания, которое сильно влияет на его результирующую диэлектрическую проницаемость. И по измерению последней вычисляется искомая концентрация с использованием результатов предварительной калибровки датчика, которая проводится для образцов с заранее известными значениями концентрации искомой физической компоненты материала. Однако основная проблема измерения концентрации вообще и влагосодержания в частности состоит в том, что, помимо концентрации, на величину результирующей диэлектрической проницаемости материала аналогичным образом влияют и другие физические параметры, а именно плотность, или толщина тестируемого диэлектрика [3]. А для одностороннего датчика добавляется еще один параметр: расстояние до тестируемого диэлектрика. Для двухсторонних датчиков резонаторного типа расстояние не влияет существенно на результаты диэлектрических измерений [2], потому что поле дважды проходит через диэлектрик в противоположных направлениях вследствие отражения от второй половины датчика, и в результате набег фазы поля из-за смещения диэлектрика в одном направлении частично компенсируется набегом в противоположном направлении. Но для одностороннего датчика такая компенсация не имеет места. У него поле экспоненциально затухает при удалении от резонатора, и величина этого удаления существенно влияет на величину воздействия, которое оказывает тестируемый диэлектрик на параметры резонаторного поля.

Чтобы преодолеть указанные трудности, обычно используются два подхода. Первый сводится к измерению комплексного волнового числа  $k$  свободных колебаний отдельной моды резонатора, вещественная часть которого характеризует резонансную частоту  $f$ , а отрицательная мнимая часть – добротность  $Q$  [1,3]:

$$f = c \operatorname{Re} k / 2\pi; \quad Q = \operatorname{Re} k / (2 |\operatorname{Im} k|)$$

Второй подход предполагает одновременное измерение только резонансных частот, но одновременно для двух различающихся мод резонатора [4]. Предлагается совместить оба эти подхода, измеряя резонансные частоты и добротности сразу двух различных мод. Располагая четырьмя измеренными параметрами и соответствующими результатами калибровки, можно решить уравнения относительно неизвестных параметров тестируемого диэлектрика: искомой концентрации нужной компоненты, плотности и величины смещения диэлектрика от резонатора.

Предлагаемая методика апробировалась методом теоретического моделирования на примере задачи определения влагосодержания бумажного листа с помощью одностороннего датчика резонаторного типа. В качестве исходных данных брались значения комплексной диэлектрической проницаемости бумаги при различных значениях ее влажности, приведенные в работе [5]. Предполагалось, что тонкий бумажный слой различной толщины (плотности) и различной влажности помещается на разных расстояниях от резонатора, и рассчитывались значения резонансной частоты и добротности двух близких колебаний полуоткрытого диэлектрического резонатора. Затем по разработанной методике решалась обратная задача определения влажности, плотности и смещения бумажного слоя по вычисленным ранее значениям параметров резонаторного поля двух мод возбуждения. Результаты решения обратной задачи сравнивались с

исходными физическими параметрами бумаги. По сути дела, такое моделирование соответствует реальному измерению, только здесь в качестве калибровочных и измеряемых данных использовались результаты вычислений.

Таким путем удалось установить, что предложенная методика измерения влагосодержания бумаги позволяет определять концентрацию влаги с абсолютной погрешностью менее 0,01 %, а плотности – с относительной погрешностью менее 0,01 в широком диапазоне изменения влагосодержания бумаги от 4 до 16 %, и лишь при 2 %-ной влажности и менее эта погрешность возрастает до 0,2 % и 0,04 соответственно. Еще более впечатляющий результат получается для смещения, относительная погрешность для которого оказывается менее 0,001. Отсюда следует, что диэлектрический резонатор может служить также в качестве высокочувствительного датчика смещения плоских поглощающих диэлектрических материалов, измеряя эту величину с точностью до десятка микрон и выше. Учитывая то обстоятельство, что в качестве калибровочных данных при моделировании использовались точные теоретические результаты, следует предполагать, что в реальных ситуациях точность измерения влажности, плотности и смещения будет определяться точностью калибровки.

Следовательно, результаты моделирования показывают, что полукрытый диэлектрический резонатор может служить эффективным односторонним датчиком физических параметров диэлектрических материалов: помимо высокой точности измерения сразу нескольких таких параметров тестируемого диэлектрика (концентрация компонент, плотность, смещение) он характеризуется малыми потерями на излучение.

#### Список литературы

1. Nyfors E., Vainikainen P. Industrial microwave sensors. – Norwood, Artech Hous, 1989. – 352 pp.
2. Kukharchik P.D., Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Diffraction of hybrid modes in a cylindrical cavity resonator by a transverse circular slot with a plane anisotropic dielectric layer. – Progress In Electromagnetics Research B. – 2008. – Vol. 3. – P. 73–94.
3. Kupfer K. Methods of density-independent moisture measurements. – Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Edited by Klaus Kupfer. – Berlin, Springer, 2005. – Pp. 135–168.
4. Okamura S., Zhang Y. New method for moisture content measurement using phase shift at two microwave frequencies. – Journ. Micr. Power Electrom. Energy. – 2000. V. 35. No 3. – Pp. 175–178.
5. Kukharchik P.D., Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Effect of continuous modification of dielectric order in paper. – Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Ed. by S.Okamura, N.Sobue, S.Yagihara and Y.Zhang. – Hamamatsu, ISEMA, 2007. – P. 47–54.

We propose the method of determining at once of several physical parameters for heterogeneous dielectric materials (concentration of a component, density and displacement) using a one-sided sensor, which is designed on the basis of a half-open dielectric cavity.

*Сердюк В.М.*, в.н.с. НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, к.ф.-м.н., Минск, Беларусь, e-mail: serdyukvm@bsu.by