

## **ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ И ПЛОСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Описаны общие принципы и конкретные методы реализации электродинамического метода измерения и контроля влагосодержания сыпучих (зерно) и плоских (бумага) диэлектрических материалов с помощью резонаторных датчиков микроволнового диапазона.

Среди множества современных методов измерения и контроля физических свойств диэлектрических материалов значительное место занимают электродинамические методы. Их достоинство состоит в том, что, во-первых, эти методы являются неразрушающими, во-вторых, они допускают простую аппаратную реализацию с непрерывной подачей новых образцов тестируемого материала, что очень важно в условиях современного производства.

Принцип работы электродинамических сенсорных систем основывается на том, что при внесении диэлектрического материала в электромагнитное поле параметры последнего меняются [1,2]. Например, при помещении диэлектрического слоя между источником и приемником электромагнитных волн в свободном пространстве изменяется амплитуда и фаза принятого сигнала, или при внесении диэлектрика в резонатор меняется резонансная частота и добротность собственных колебаний резонатора. Таким образом, по измерению параметров электромагнитного поля можно судить о физических параметрах диэлектрика, внесенного в это поле. Разумеется, речь идет о таких физических параметрах, которые влияют на комплексную диэлектрическую проницаемость диэлектрика. Это может быть концентрация различных компонент гетерогенного диэлектрического материала или его плотность, то есть параметры, по своей природе не являющиеся электродинамическими. Тем самым реализуется связь между плотностью, составом тестируемого материала и параметрами поля, в которое он помещен. Установление подобной связи физическими методами представляет собой довольно сложную задачу. На практике она обычно определяется эмпирически на предварительном этапе калибровки датчика с использованием тестовых образцов диэлектрического материала, физические свойства которых измерены с помощью других методов.

Данный принцип был реализован при создании систем измерения и контроля влажности различных сыпучих и плоских диэлектрических материалов. Почему именно влажности? То, что вода играет важнейшую роль в биологических системах, известно всем. Менее известно, что вода является важнейшим связующим и структурообразующим элементом в составе многих небиологических материалов. Невозможно получить абсолютно сухую бумагу, как не может существовать абсолютно сухое зерно. Поэтому контроль влагосодержания является совершенно необходимым этапом технологического контроля качества во многих современных системах производства, например, при производстве бумажных, тканых и строительных материалов, при переработке зерна и т.д.

Диэлектрическая проницаемость воды намного превышает диэлектрическую проницаемость большинства других веществ в радио и микроволновом диапазоне. Поэтому ее концентрация сильно влияет на результирующую диэлектрическую проницаемость гетерогенных материалов, в состав которых она входит, так что влагосодержание таких материалов посредством электродинамического метода может быть измерено с высокой точностью. Однако здесь имеется одна принципиальная трудность. Такое же значительное изменение проницаемости гетерогенного материала может быть вызвано и изменением его плотности, или толщины, что довольно сложно проконтролировать независимыми методами в условиях непрерывного технологического процесса. Это основная проблема современной электромагнитной влагометрии: как добиться одновре-

менного и точного измерения влажности и плотности материала в режиме on-line [2]. Проблема осложняется тем обстоятельством, что для каждого влагосодержащего вещества характерны свои особые закономерности влияния воды на его диэлектрические свойства, причем они по-разному проявляются в разных условиях [3]. В результате мы имеем ситуацию, когда методы, апробированные для плоских бумажных материалов, непригодны для строительных и других типов гетерогенных материалов, а приборы измерения влажности зерна в стационарных лабораторных условиях абсолютно неприменимы в условиях непрерывного движения зерна в потоке.

Новизна наших разработок состоит в том, что в них реализован принцип одновременного измерения влажности и плотности материала, либо посредством одного и того же электродинамического метода с измерением фазовых и амплитудных параметров поля, либо посредством параллельного применения радиоактивного датчика массы, вмонтированного в микроволновую измерительную систему. Этот принцип реализован при разработке датчиков влажности зерновых материалов в потоке [4]. Основным рабочим элементом датчика является объемный коаксиальный резонатор СВЧ, на внутренней цилиндрической поверхности которого вырезана поперечная кольцевая щель, заполненная прозрачным диэлектриком, через которую поле частично проникает из коаксиальной области в область цилиндрическую. Последняя представляет собой канал, через который проходит зерно. Таким образом осуществляется электромагнитная связь зернового материала в потоке с областью резонансного возбуждения поля, а по изменению резонансной частоты и амплитудного затухания свободных колебаний коаксиального резонатора оценивается влагосодержание проходящего зерна с адаптацией по его плотности.

На основе такого датчика разработана система автоматизированного контроля влажности и доувлажнения зерна в потоке [4, 5]. Последняя процедура совершенно необходима для получения качественной пищевой продукции. Дело в том, что для безопасного хранения зерна оптимальными являются сравнительно низкие значения влагосодержания, менее 12 %, однако для технологических процессов его переработки и размола необходимо повышать его влагосодержание до 15-16 %. Только тогда происходит полное удаление эпидермиса (оболочки зерен) и после размола получается мука высокого качества.

Указанные принципы электромагнитного метода были реализованы также при разработке датчиков влажности плоских бумажных материалов [6]. Рабочий элемент датчика – это объемный цилиндрический резонатор СВЧ, посередине оси которого прорезана поперечная кольцевая щель. Через нее пропускается бумажное полотно; таким путем реализуется принцип воздействия диэлектрического материала на резонаторное поле в непрерывном режиме подачи новых образцов материала. Чтобы осуществлять контроль влагосодержания по всей ширине полотна бумагоделательной машины, которое достигает нескольких метров, в первых образцах измерительных систем использовался целый набор нескольких идентичных датчиков, которые крепились на общей механической основе. Сейчас системы контроля качества бумажного полотна производятся с одним резонаторным датчиком, который работает по принципу сканирования всей ширины бумажного материала.

На основе микроволнового датчика разработана и создана автоматизированная система контроля качества и управления основными технологическими процессами производства бумажных материалов. Она включает в себя датчики контроля концентрации целлюлозно-водной пульпы, подаваемой в напорный ящик, автоматизированную систему управления заслонками этого ящика при подаче бумажной массы из него на сетку бумагоделательной машины, собственно измеритель влажности бумажного полотна на выходе бумагоделательной машины и программный комплекс управления всей этой системой, которая характеризуется большим транспортным временем запаздывания.

#### Список литературы

1. Kraszewski A. W., Nelson S. Resonant cavity perturbation – some new applications of an old measuring technique. – Journ. Micr. Power Electrom. Energy. – 1996. – V. 31. No 3. – Pp. 178 – 187.
2. Kraszewski A. W. Recent developments in electromagnetic aquametry. – Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Edited by Klaus Kupfer. – Berlin, Springer, 2005. – Pp. 1 – 14.
3. Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Temperature dependence of dielectric permittivity of bound water in grain at microwave frequencies. – "Aquametry 2010. Proceedings of the First European Conference on Moisture Measurement in Weimar, Germany, October 5-7, 2010." Edited by Klaus Kupfer. Weimar, MFPA. – 2010. – P. 312 – 317.
4. Titovitsky J.A., Belyachits A.Ch., Kourilo N.I., Purovsky M.O. Local automated system for moisture measurement and moistening in flow. – "Aquametry 2010. Proceedings of the First European Conference on Moisture Measurement in Weimar, Germany, October 5-7, 2010." Edited by Klaus Kupfer. Weimar, MFPA. – 2010. – P. 307 - 311.
5. Белячиц А.Ч., Курило Н.И., Сметанко А.Л., Титовицкий И.А., Пуровский М.О. Автоматизированная система увлажнения зерна в потоке. – Материалы 4-й Международной научно-технич. конф. «Приборостроение – 2011». – Минск, БНТУ, 2011. – С. 29 – 30.
6. 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.

The general principles and specific techniques of electromagnetic method in application to moisture measuring and testing of loose (bulk grain) and plane (paper) dielectric materials by means of microwave resonator sensors are described.

*Титовицкий И.А.*, зав. лабораторией НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, к.т.н., Минск, Беларусь, e-mail: [titovitsky@bsu.by](mailto:titovitsky@bsu.by)