

УДК 621.317.39

МЕТОД СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ПЛОТНОСТИ БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕМНЫХ СВЧ РЕЗОНАТОРОВ

Сердюк В.М., Титовицкий И.А.

Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь

Основные характеристики бумажных материалов – это их влажность и поверхностная плотность, т. е. масса единицы площади. Они в значительной степени определяют качество таких материалов, а потому на всех технологических этапах бумажного производства контролю данных характеристик уделяется большое внимание. Для измерения влажности и плотности бумаги используются различные методы, но в условиях непрерывного технологического процесса вне конкуренции оказываются электромагнитные датчики влажности, которые используют явление изменения параметров проникающих электромагнитных полей при прохождении диэлектрического материала [1]. Такие датчики характеризуются высокой точностью измерений, стабильностью работы при разных температурах, а также возможностью работы в непрерывном режиме постоянного движения тестируемого бумажного полотна, что очень важно для производства. Среди подобных датчиков наибольшее распространение получили датчики резонаторного типа. В них для определения влажности плоского бумажного листа используется изменение резонансной частоты и добротности (коэффициента затухания) резонансных колебаний, которые наблюдаются при внесении тестируемого диэлектрического материала внутрь резонатора [2]. И хотя для этого приходится дополнительно прорезать щели в корпусе резонатора, превращая закрытый резонатор в частично открытый, все равно основная часть резонансного поля остается сосредоточенной внутри его объема, а потому резонаторные датчики характеризуются очень малыми потерями на излучение во внешнее пространство и очень малым влиянием внешних помех на процесс измерения.

Основная проблема применения резонаторных датчиков заключается в следующем. Наряду с влажностью тестируемых материалов, и не только бумажных, неизвестной величиной обычно является также их плотность, которая оказывает подобное воздействие на электромагнитные параметры проходящего излучения, и разделить влияние этих двух параметров, влажности и плотности, аппаратными методами никак не удастся [3]. Отсюда возникает идея осуществить такое разделение вкладов каждого из них уже на этапе математической обработки калибровочных данных путем применения специальных программных методов. В данном сообщении предлагается новый метод математической обработки измеренных значений частоты и амплитудного затухания электромагнитных полей для совмест-

ного определения влажности и плотности бумажного листа посредством объемных цилиндрических СВЧ резонаторов.

Для определения влажности и плотности материала по измерениям резонансной частоты и добротности необходимо знать функциональную зависимость между этими параметрами. Она определяется на этапе калибровки, когда для измерений параметров поля используются тестовые образцы материала с заранее известной влажностью и плотностью, которые устанавливаются независимо весовыми методами. Таким путем определяется табличная зависимость резонансной частоты и коэффициента затухания от искомых параметров материала. Ее необходимо экстраполировать на весь интервал возможных значений исходных и измеряемых параметров, т. е. построить полноценные функциональные зависимости параметров поля от параметров материала, которые ниже называются калибровочными. Такие функции строятся либо в виде локально-кусочных сплайн-аппроксимаций, каждая из которых привязана к отдельным значениям калибровочной таблицы, либо в виде глобального полинома, который аппроксимирует калибровочные функции сразу по всему интервалу. Коэффициенты данного полинома, как и коэффициенты локальных сплайн-аппроксимаций, определяются на основе метода наименьших квадратов по данным калибровочной таблицы.

Но конечной целью рабочих измерений является определение именно параметров материала по измерениям параметров поля. То есть необходимо установить обратную функцию по отношению к прямой калибровочной функции, которая давала зависимость параметров поля от параметров материала. Установление такой функции является довольно сложной задачей, поскольку исходные калибровочные функции являются существенно нелинейными, как для объемных резонаторов, так и для большинства других приборов измерения параметров разных материалов. Таким образом, для определения влажности и плотности приходится решать систему двух нелинейных уравнений, составленных на основе калибровочных функций. Более того, у СВЧ резонаторов две таких функции для резонансной частоты и добротности зависят от влажности и плотности очень похожим образом, так что данная система оказывается еще и плохо обусловленной, т. е. попытки непосредственного ее решения стандартными численными методами не дают адекватного решения.

До сих пор во всем мире эту трудность обходили путем применения дополнительных приборов независимого измерения массы, чаще с помощью радиационных плотномеров. Их принцип работы основан на ослаблении радиоактивного бета-излучения при прохождении слоя вещества. А если плотность бумаги известна, то одно из калибровочных уравнений СВЧ резонатора относительно влажности уже решается без особого труда. Таким образом, для определения влажности и плотности бумажных материалов приходится применять сразу два независимых датчика – радиационный плотномер и СВЧ влагомер, что существенно усложняет и аппаратную реализацию, и сертификацию измерительной системы.

Но есть и другой путь: попытаться преобразовать систему плохо обусловленных уравнений таким образом, чтобы она допускала устойчивое решение сразу для двух неизвестных величин, влажности и плотности. Оказалось, что подобное преобразование построить можно. Нужно только усилить различия между двумя калибровочными функциями влажности и плотности, чтобы их зависимости от этих параметров материала существенно различались между собой. Для этого применялись тождественные линейные и нелинейные преобразования исходных калибровочных функций с участием коэффициентов их полиномиальной аппроксимации по двум аргументам; это параметры, также определяемые на этапе калибровки. Таким путем удалось преобразовать данные функции в новые, первая из которых почти не зависит от плотности, а вторая зависит от нее практически линейно. В результате получились уравнения, которые допускают устойчивые адекватные решения.

Для оценки точности предлагаемого метода проводилась апробация предлагаемого метода определения влажности и плотности бумажных материалов на основе математического моделирования процессов калибровки и измерений с применением цилиндрических резонаторов СВЧ. Для этого использовались теоретические модели [4] и данные по комплексной диэлектрической проницаемости бумаги в зависимости от влажности [5], а вариации ее поверхностной плотности моделировались изменениями ее толщины. Результаты проведенных вычислений показали, что уже в первом приближении абсолют-

ная погрешность определения влажности, выражаемой в процентах, составляет менее 0,1, и относительная погрешность определения плотности не превышает этой же величины, что вполне приемлемо для практических применений. Указанные значения погрешностей определения влажности и плотности могут быть снижены более чем на порядок путем дополнительного применения уточняющего алгоритма.

Таким образом, в данной работе показана возможность совместного определения влажности и плотности бумажных материалов с помощью измерений резонансной частоты и затухания резонансных колебаний цилиндрических резонаторных СВЧ датчиков. Предлагаемый метод такого определения дает достаточно высокую точность получения искомых параметров тестируемых материалов, а его внедрение позволит существенно упростить и удешевить конструкцию промышленных датчиков влажности и плотности.

Литература

1. Nyfors E., Vainikainen P/ Industrial microwave sensors. – Norwood: Artech Hous, 1989. – 352 p.
2. Беляиц А.Ч., Титовицкий И.А., Сердюк В.М. Электродинамический метод измерения влажности и плотности бумажного полотна в процессе производства. – Приборостроение–2014. Материалы 7-й Международной научно-технич. конф. 19–21 ноября 2014 года, Минск, Беларусь. – Минск : БНТУ. – 2014. – С. 252–254.
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. – P. 135–168.
4. 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.
5. Kukharchik P.D., Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Effect of continuous modification of dielectric order in paper. – Proceedings of the 7th 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.