

Рисунок 4 – Зависимость температуры чувствительного слоя мембранного сенсора от приложенного напряжения

Совпадение экспериментальной и теоретической ВАХ (рис.3) обусловлено правильным выбором модели материала нагревателя и чувствительного слоя. Также из моделирования видно, что область нагрева локализована только в районе чувствительного слоя, остальная часть сенсора имеет температуру в 2 раза ниже, чем в области чувствительного слоя (рис. 5).

С помощью моделирования методом конечных элементов был исследован нагрев сенсора при разных значениях приложенного напряжения. Согласно результатам моделирования питающее напряжение в диапазоне от 1 до 1,5 В является оптимальным, потому что обеспечивает требуемый нагрев чувствительного элемента. В ходе дальнейших исследований планируется выяснить влияние пористости подложки на прогрев чувствительного элемента, зависимость потребляемой мощности сенсора от пористости, а также определить термомеханические деформации и напряжения в мембране сенсора, которые возникают вследствие его нагрева.

УДК 621.317.39

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ПЛОТНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Беячиц А. Ч.¹, Титовицкий И. А.¹, Сердюк В. М.¹

¹Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь

В процессе производства бумажных материалов большое внимание уделяется контролю их влажности и плотности на всех технологических этапах. Эти две характеристики решающим образом влияют на качество производимой продукции, поэтому проблема повышения качества для целлюлозно-бумажной промышленности в значительной степени сводится к внедрению эффективных систем контроля влажности и плотности бумаги. Основой таких систем служат датчики измерения данных параметров производимого материала, которые должны обладать высокой точностью измерений, стабильностью работы при разных температурах, а также возмож-

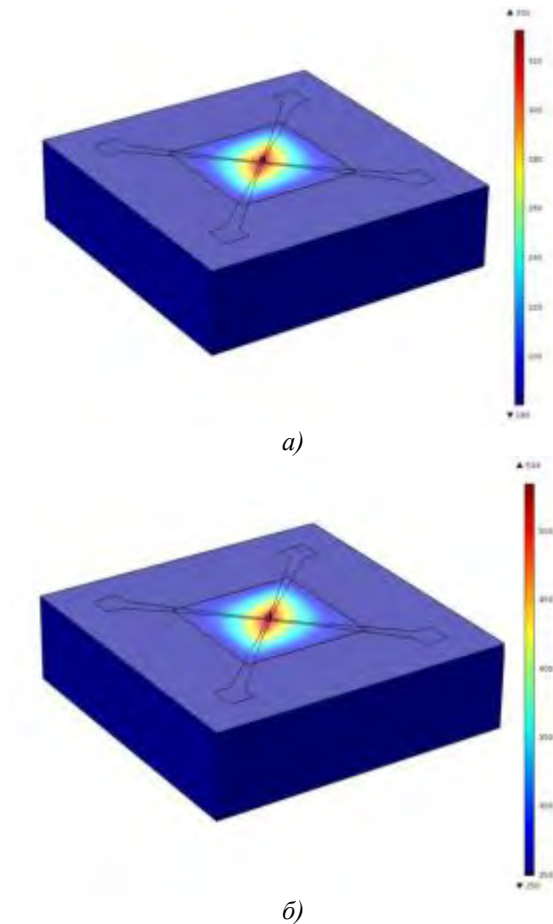


Рисунок 5 – Область нагрева сенсора при питающем напряжении 1 В (а) и 1,5 В (б)

ностью работы в непрерывном режиме постоянного движения тестируемого бумажного полотна. В наибольшей степени подобным требованиям удовлетворяют электродинамические датчики влажности и плотности. Они используют явление изменения параметров электромагнитного поля при внесении в него диэлектрического материала. Это изменение может проявляться в виде изменения коэффициента прохождения среды, либо в виде изменения частоты электромагнитных колебаний, если в качестве измерительного прибора выступает резонатор. В настоящей работе излагаются основные проблемы, связанные с разработкой и применением

электродинамических датчиков влажности резонаторного типа в реальных производственных условиях, и возможные пути их разрешения.

Принцип работы таких датчиков сводится к измерению резонансной частоты резонатора, которая зависит от комплексной диэлектрической проницаемости материала, контактирующего с резонансным полем [1]. Само это поле сосредоточено главным образом внутри объемного резонатора, а наружу оно может проникать только через щели, которые прорезаются в резонаторе для обеспечения непрерывной подачи бумажного полотна поперек резонатора [2]. По этой причине резонаторные методы измерения влажности характеризуются низкими потерями электромагнитной энергии, бесполезно излучаемой в окружающее пространство. К другим достоинствам резонаторных датчиков можно отнести следующие. Во-первых, они используют электромагнитное излучение с длиной волны несколько сантиметров и более, что намного превышает характерные размеры неоднородностей строения таких материалов, как бумага, ткань, зерно, цемент и т.д. В результате резонансное поле не реагирует на такие неоднородности и чувствует только усредненные диэлектрические параметры исследуемого материала. Это позволяет создавать универсальные микроволновые резонаторные датчики, способные без существенной перенастройки работать с широким набором самых разнообразных материалов. Во-вторых, в СВЧ-диапазоне величина диэлектрической проницаемости воды не менее чем в 20 раз превышает величину диэлектрической проницаемости подавляющего большинства других веществ. Поэтому малое изменение ее количества внутри влагосодержащего материала приводит к заметному изменению его результирующей диэлектрической проницаемости. В результате резонаторный метод позволяет достичь очень высокой точности измерения влагосодержания, вплоть до сотых и тысячных долей процента.

Высокая чувствительность резонаторных датчиков имеет и свою негативную сторону, обусловленную заметной нестабильностью их показаний при изменении внешних условий, таких как температура окружающей среды, запыленность, влажность воздуха и т.д. Поэтому для обеспечения стабильных режимов работы резонаторных приборов измерения влажности в промышленных условиях используется двухмодовый режим возбуждения волн в резонаторе. Его суть заключается в том, что в одном и том же резонаторе возбуждаются два типа колебаний, один из которых взаимодействует с исследуемым материалом, а другой нет. Например, для прибора измерения влажности листовых материалов первый тип – это мода цилиндрического резона-

тора, имеющая пучность электрического поля на такой высоте, где прорезана кольцевая щель и проходит листовая диэлектрик, а другой, не взаимодействующий тип колебаний представлен модой, имеющей узел электрического поля в данном месте. При изменении температуры окружающей среды происходит одновременный сдвиг резонансных частот для каждой из этих двух мод, что позволяет свести к минимуму влияния температуры на точность проводимых измерений.

Самой серьезной проблемой электродинамического метода измерения влажности различных материалов является необходимость определения еще одного параметра тестируемого материала – плотности [3]. Речь идет о собственно объемной плотности, и о поверхностной плотности, обусловленной вариациями толщины плоского материала; именно этот параметр бумажного полотна влияет на его качество. Дело в том, что изменения влагосодержания и плотности в равной мере влияют на изменение диэлектрической проницаемости вещества, а потому разделить их вклады в изменение резонансной частоты датчика представляется затруднительным. Исходя из простой логики, для измерения двух параметров материала – влажности и плотности – одного измеряемого параметра – резонансной частоты – недостаточно, надо измерять еще один параметр, например, добротность колебаний в резонаторе, которая определяет степень их затухания. Проблема в том, что до недавнего времени добротность измерялась с очень невысокой точностью, на три-четыре порядка меньшей, чем резонансная частота. Со временем были предложены несколько способов решения данной проблемы. Первый способ сводится к непосредственному измерению плотности материала независимым методом, например, с помощью его радиационного просвечивания [4]. Второй вариант предполагал применение не одной рабочей резонансной частоты, а двух таких частот, которые несколько отличаются друг от друга, для двух различных мод резонатора, которые возбуждаются одновременно [5]. Вода обладает достаточно сильной частотной дисперсией, и вследствие этого одно и то же изменение влагосодержания по-разному влияет на соответствующие изменения частот этих двух мод. Таким образом, зная зависимость резонансной частоты колебаний от влажности тестируемого материала, которая обычно устанавливается в результате тщательной калибровки, можно составить систему двух независимых уравнений с двумя неизвестными параметрами и определить искомые значения влажности и плотности.

Наконец, еще один способ преодоления основной проблемы влагометрии, и, вероятно, самый перспективный, наметился в результате

улучшения методики измерения добротности резонаторных колебаний, что связано с быстрым развитием электроники в последнее время, и разработки более совершенных алгоритмических методов обработки результатов измерений. В результате применения таких методов удается повысить точность измерения добротности на два-три порядка, а этого оказывается достаточно для достижения приемлемой точности определения влажности и плотности в реальных производственных условиях.

Следует упомянуть еще одну актуальную для производства проблему, связанную уже не с датчиками как таковыми, а с технологией их применения. Ширина тестируемого бумажного полотна бумагоделательной машины довольно велика (несколько метров), а размеры датчика малы. Поэтому приходится периодически смещать датчик поперек полотна, чтобы он сканировал его поверхность. Но полотно тоже постоянно движется в продольном направлении, так что появляются большие зоны его поверхности, не подверженные измерениям. Проблема состоит в том, как в результате такого зигзагообразного движения датчика по поверхности бумажного полотна получить более-менее достоверную картину пространственного распределения влажности и плотности. Для этого приходится разрабатывать специальные программно-алгоритмические методы обработки измеряемых данных, которые дают вероятностное распределение на основе рассчитанной погрешности и истории измерений.

УДК. 62-238.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Бержанин Д.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Жесткая конкуренция на рынке предъявляет все более высокие требования к срокам разработки и поставки готовых изделий. В этих условиях моделирование на ранних этапах проектирования позволяет значительно сократить сроки освоения изделия.

Одним из важнейших показателей надежности устройства, закладываемого на этапе проектирования, является виброустойчивость в заданных частотах. Обычно заранее известно в каком частотном диапазоне устройство должно быть работоспособно. Поэтому на этапе проектирования необходим анализ свободных механических колебаний, который проводится с целью определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкции. Расчет свободных механических колебаний проводится без учета динамических нагрузок, но является первым и обяза-

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. – P. 135–168.
4. Ермакович О.Л., Курило Н.И., Лисовский Г.А., Титовицкий И.А. Снижение позиционной чувствительности радиоизотопного плотнoмера к положению листового материала в измерительном зазоре // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: Материалы междунар. научн.-практ. конф. /Редкол.: Хрусталеv Б.М. (гл. ред.). – Минск: Бизнесофсет, 2013. – С. 77–78.
5. Okamura S., Zhang Y. New method for moisture content measurement using phase shift at two microwave frequencies // Journ. Micr. Power Electrom. Energy. – 2000. – Vol. 35. No 3. – P. 175–178.

тельным шагом при решении более сложных динамических задач.

В качестве системы, позволяющей применить метод конечных элементов для поиска и анализа значений собственных частот и форм волн, выбран пакет ANSYS. Методика анализа колебаний включает: создание геометрической модели, задание свойств материалов и граничных условий, настройка опций расчета, выбор варианта закрепления конструкции (при необходимости), просмотр и анализ результатов.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний является частным случаем общего уравнения движения [1]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0, \quad (1)$$

где М – масса, К – коэффициент упругости.