

**Список литературы.** 1. *Тришевский И. С.* Теоретические основы процессов профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с. 2. *Тришевский И.С.* Калибровка валов для производства гнутых профилей проката / под ред. И.С. Тришевского. – Киев: Техника, 1980. – 288 с. 3. *Тришевский И.С.* Производства гнутых профилей (оборудование и технология). – М.: Металлургия, 1982. – 384 с. 4. Применение гнутых профилей проката: справочник / И. С. Тришевский, Г. В. Донец, М. Е. Докторов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 421 с. 5. *Березовский С.Ф.* Производство гнутых профилей: С.Ф. Березовский, И.С. Тришевский. – М.: Металлургия, 1985. – 200 с. 6. Тришевский И.С. Гнутые профили проката: справочник / И.С. Тришевский, В. В. Лемпицкий, Н.М. Воронов и др. / под ред. И.С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 351 с. 7. *Унксов Е.П.* Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов, А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 364 с. 8. *Кроха В.А.* Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 158 с. 9. *Гун Г. Я.* Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с. 10. *Колмогоров В.Л.* Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с. 11. *Чиченев Н.М.* Методы исследования процессов обработки металлов давлением / Н.М. Чиченев, А.Б. Кудрин, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1977. – 287 с.

Поступила в редколлегию 14. 02.2014

УДК 006.015.5

**В. В. СЕБКО**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**В. Н. БАБЕНКО**, ассистент, НТУ «ХПИ»;  
**Е. Н. РЯБОВОЛ**, студент, НТУ «ХПИ».

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ КАМЕРЕ

Предложен алгоритм совместного измерительного контроля коэффициента затухания  $h_r$ , относительной магнитной проницаемости  $\mu_{rn}$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$  и температуры  $t$  стенки микроволновой камеры с помощью экранного вихретокового устройства. Предложен четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля относительной магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, температуры и коэффициента затухания однородного магнитного поля в стенке микроволновой камеры. Приведены основные соотношения, описывающие четырехпараметровый экранный метод.

**Ключевые слова:** микроволновая камера, алгоритм совместного измерительного контроля, вихретоковое устройство.

**Введение.** В настоящее время в таких отраслях промышленности как перерабатывающая и пищевая, изготовление строительных материалов, а также диэлектрических веществ и материалов, которые используются в машиностроении и приборостроении, широко используют микроволновые технологии (МТ) [1–4]. При этом одной из основных проблем современной промышленности Украины является обеспечение необходимого уровня качества выпускаемой продукции.

**Анализ последних исследований и литературы** показывает, что современные МТ охватывают такие важные технологические процессы как сушку и пастеризацию продовольственного сырья и пищевых продуктов, сушку пиломатериалов, а так же тепловую обработку конструкционных диэлектрических материалов [1–4]. При этом для повышения качества продукции недостаточно установить стандарты на конечные параметры готовой продукции, необходимо учитывать весь комплекс факторов, которые влияют на качество в целом [5]. Стабильное развитие перерабатывающей и пищевой промышленности непосредственно зависит от уровня технического оборудования при реализации методов микроволновой обработки.

МТ предусматривают: источник СВЧ энергии, технологическую рабочую камеру, а также систему автоматического регулирования параметров технологического процесса электромагнитной обработки диэлектрических веществ и материалов [1–4]. Сама по себе обработка представляет собой сложный тепловой процесс и поэтому базируется на теоретических положениях тепломассообмена [1, 2].

Следует отметить, что микроволновые технологии обработки веществ и материалов по сравнению с радиационными и конвективными технологиями обработки обладают высокой эффективностью и продуктивностью, что очень важно для повышения уровня качества продукции [1–4].

В работах [1, 2] рассмотрены методы обработки арахисового сырья на основании применения генераторов СВЧ, а также методы определения теплопроводности и температурных параметров, диэлектрической проницаемости орехов арахиса, проведен анализ органолептических показателей арахисового сырья при реализации МТ.

В научных работах [3, 4] рассмотрены методы повышения точности измерений параметров теплофизического состояния диэлектрических материалов в микроволновых промышленных технологиях. Исследованы некоторые параметры оптимизации рабочих режимов МТ, а также рассмотрены пути определения показателей качества диэлектрических материалов, указанных в государственных нормативных документах: температура, влажность, теплопроводность, температуропроводность и т.д. [3, 4]. При этом авторы работ [1–4] не учитывают влияния магнитного поля на результаты определения параметров диэлектрических материалов, используя в качестве датчиков мощных магнитных полей оптические датчики и считая, что энергия

СВЧ переходит в тепловую. Таким образом, остался без внимания контроль такого важного параметра МТ, как коэффициента затухания магнитного поля  $h_t$ , что снижало общую достоверность измерительного контроля параметров исследуемых диэлектрических образцов из-за возникновения дополнительной погрешности. В работе [5] предложено экранное устройство для контроля параметров плоских листов, которое включает в себя два накладных электромагнитных датчика, между которыми находится ферромагнитный лист, при этом перемещение в небольших пределах этого листа (между двумя датчиками) не влияет на результаты определения относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$ , поскольку удаление листа от одного датчика приводит к приближению к другому датчику [5]. Следовательно, результат измерительного контроля электромагнитных и физико-механических параметров не зависит от смещения листа, такое устройство является экранным, так как лист разделяет измерительную обмотку на одной поверхности листа, а намагничивающую на другой. В работе [6] рассмотрено экранное трубчатое устройство и четырехпараметровый экранный вихретоковый метод измерительного контроля параметров ферромагнитных труб. При этом радиальное смещение трубы не влияет на результаты измерений, поскольку трубчатое изделие удаляется на определенное расстояние от одной обмотки и настолько же приближается к другой – это свойство экранного датчика, труба является экраном, так как разделяет намагничивающую и измерительную обмотки (намагничивающая обмотка находится вне трубы, а измерительная внутри). В работах [7–10] была рассмотрена теория работы ТВП с плоскими немагнитными и ферромагнитными изделиями. Приведены схемы включения ТВП с плоскими изделиями и определены геометрические, электромагнитные и температурные параметры немагнитных и магнитных плоских изделий, однако вопросы экранных свойств плоских изделий практически остались без внимания. В то же время для определения оптимальных режимов работы МТ, необходимо знать коэффициенты затухания магнитного поля  $h$  в промышленных камерах для сушки продовольственного сырья (в процессе работы). Следует отметить, что если учитывать геометрические (толщину и ширину), а также электрические и магнитные параметры  $\mu_r$  и  $\sigma$  слабомагнитных пластин, из которых изготовлена камера, с помощью электромагнитного датчика (который находится внутри камеры) можно определить коэффициент затухания

магнитного поля  $h$  в стенке камеры. Следовательно  $h_t$  зависит от температуры микроволнового процесса, а также геометрических и электромагнитных параметров материала камеры. Для определения оптимальных режимов работы МТ, которые обеспечивают показатели качества подвергаемого тепловой обработке сырья указанные в нормативных документах, также необходимо знать коэффициент затухания  $h$  магнитного поля в микроволновой камере.

Таким образом, возникает важная научная и практическая проблема, которая состоит в создании теории работы вихретоковых устройств совместного измерительного контроля многих параметров материалов, изделий и конструкций, используемых для реализации микроволновых технологий.

**Целью исследования** является исследование многопараметрового вихретокового метода измерительного контроля относительной магнитной проницаемости  $\mu_{rt}$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$ , температуры  $t$ , коэффициента затухания  $h_t$  магнитного поля в стенке камеры. Поскольку, параметры  $\mu_{rt}$ ,  $\sigma_t$  и  $h_t$  являются термозависимыми (зависят от температуры микроволнового процесса), необходим совместный измерительный контроль электромагнитных и температурных параметров, что в свою очередь, позволяет установить оптимальные режимы работы микроволновых устройств и повысить достоверность контроля диэлектрических параметров обрабатываемых материалов и веществ за счет повышения инструментальной составляющей достоверности контроля. Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Привести основные соотношения описывающие исследуемый четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля параметров  $\mu_{rt}$ ,  $\sigma_t$ ,  $h_t$  и  $t$ .

2. Предложить алгоритм совместного измерительного контроля электромагнитных и температурных параметров с помощью экранного вихретокового устройства.

**Материалы исследований** предполагают совместный измерительный контроль электромагнитных и температурных параметров на базе экранного вихретокового устройства. Воспользовавшись результатами работ [5–10], в которых описан процесс проникновения однородного переменного магнитного поля в плоское проводящее изделие, запишем выражение для магнитного потока  $\Phi_{2t}$  и фазы  $\varphi_{2t}$  в плоском проводящем изделии [5–9]

$$\Phi_{2t} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot H_0 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{1 + e^{-2x_t} - 2e^{-x_t} \cdot \cos x}{x_t}} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_t = -\frac{1 - e^{-x_t} \cdot \cos x - e^{-x_t} \cdot \sin x}{1 - e^{-x_t} \cdot \cos x + e^{-x_t} \cdot \sin x} \quad (2)$$

где  $H_0$  – напряженность внешнего по отношению к пластине магнитного поля,  
 $S$  – площадь пластины,

$x_t$  – обобщенный параметр (характеризующий собой отношение толщины пластины  $d$  к классической глубине проникновения  $\delta$ ) [5-10].

Выражение для магнитного потока  $\Phi_0$ , который проходит внутри соленоидальной катушки имеет следующий вид:

$$\Phi_0 = \frac{2S_k \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot W_1}{e_k} \quad (3)$$

Формула для магнитной индукции в стенке прямоугольного параллелепипеда (который представляет собой СВЧ камера) с учетом [5–10] имеет следующий вид:

$$B_{2t} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot H_0 \cdot \sqrt{\frac{1 + e^{-2x_t} - 2e^{-x_t} \cdot \cos x}{x_t}} \quad (4)$$

При этом, магнитная индукция  $B_0$  определяется из выражения [5–9]

$$B_0 = 2\mu_0 \cdot H_0 \quad (5)$$

Как известно, коэффициент затухания магнитного поля  $h_t$  находят [5]

$$h_t = \frac{B_{2t}}{B_0} \quad (6)$$

Таким образом, с учетом формул (1–6) выражение для определения коэффициента затухания  $h_t$  внутри СВЧ камеры можно записать:

$$h_t = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{2} \cdot \mu_{rt} \cdot \sqrt{\frac{1 + e^{-2x_t} - 2e^{-x_t} \cdot \cos x}{x_t}} \right] \quad (7)$$

Определив обобщенный магнитный параметр  $x$  [5–10], находим по табличной зависимости  $k=f(x)$  параметр  $k$  [5–10], после чего определяем удельную электрическую проводимость  $\sigma_t$  в стенке камеры, измерив  $E_{2t}$  и  $E_0$  на основании известных схем включения, в итоге для  $\sigma_t$  имеем

$$\sigma_t = \frac{x_t^2 \cdot S \cdot E_0 \cdot K_t}{S_k \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \mu_0 \cdot E_{2t} \cdot f_t} \quad (8)$$

Температуру  $t$  определяем из выражения

$$t = \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \mu_0 \cdot E_{2t} \cdot f_t \cdot S_k}{\rho_1 \cdot x_t^2 \cdot E_0 \cdot S \cdot K_t} - 1 \right) + t_1 \quad (9)$$

Относительную магнитную проницаемость  $\mu_{rt}$  в стенке камеры определяем на основании известной зависимости [11]

$$\mu_{rt} = \mu_{r1} + \frac{\mu_{r1} \cdot \alpha}{1 + \alpha \cdot t_1} \cdot (t - t_1) \quad (10)$$

из выражения:

$$\mu_{rt} = \frac{E_{\Sigma t} \cdot \sin \varphi_0}{S \cdot [4,44 \cdot f_t \cdot W_2 \cdot \mu_0 \cdot H_0]} \quad (11)$$

Далее подставив (11) в формулу (7) находим  $h_t$ .

Как известно, методическая составляющая достоверности контроля  $D_M$  определяется, как [12]

$$D_M = \frac{N_1}{N} \quad (12)$$

где  $N$  – общее количество показателей, которые характеризуют техническое состояние объекта контроля;

$N_1$  – количество показателей, которые вошли в модель контроля.

Инструментальная составляющая достоверности контроля  $D_{ин}$  определяется вероятностью ошибок первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода определения параметров контроля [12]

$$D_{ин} = 1 - \alpha - \beta \quad (13)$$

Общая достоверность контроля  $D_{общ}$ , выражается произведением [12]

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{м}} \cdot D_{\text{и}}. \quad (14)$$

Как показывает анализ приведенных выше формул, определение большого числа параметров влияющих на объект контроля, повышает методическую составляющую достоверности контроля.

Снижение численных значений погрешностей измерения параметров, в свою очередь, повышает инструментальную составляющую достоверности контроля. Следует отметить, что общая достоверность контроля  $D_{\text{общ}}$  за счет приведенной методики измерительного контроля коэффициента затухания магнитного поля  $h_t$  в стенке микроволновой камеры повышается и составляет 0,956.

### **Выводы.**

1. В рамках исследования важной научной и практической проблемы, которая состоит в создании теории работы вихретоковых устройств совместного измерительного контроля многих параметров материалов, изделий и конструкций, используемых для реализации микроволновых технологий, предложен четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля относительной магнитной проницаемости  $\mu_{r_t}$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$ , температуры  $t$  и коэффициента затухания  $h_t$  однородного магнитного поля в стенке микроволновой камеры.

2. Приведены основные соотношения, описывающие данный четырехпараметровый экраный метод. Предложен алгоритм совместного измерительного контроля коэффициента затухания  $h_t$ , а также электромагнитных и температурных параметров с помощью экранного вихретокового устройства. Получено численное значение общей достоверности контроля параметров диэлектрических материалов, при этом значение  $D_{\text{общ}}$  повышается, за счет приведенной методики измерительного контроля коэффициента затухания магнитного поля  $h_t$  в стенке микроволновой камеры, и составляет 0,956.

3. Научной новизной работы является повышение общей достоверности контроля за счет измерительного контроля коэффициента затухания магнитного поля  $h_t$  в стенке микроволновой камеры.

4. Практическое значение работы состоит в том, что полученные выражения для определения коэффициента затухания магнитного поля  $h_t$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$ , температуры  $t$  и относительной

магнитной проницаемости  $\mu_r$ , позволяют исследовать оптимальные режимы работы микроволновых устройств и тем самым повысить качество обработки диэлектрических материалов при реализации микроволновых технологий.

5. Перспективным направлением исследований является создание автоматизированных систем управления и контроля температурных параметров при реализации микроволновых технологий, на базе первичных тепловых вихретоковых преобразователей.

Список литературы: 1. Кудрявцев В.Н. Усовершенствование микроволновой технологической камеры / Заплетников И.Н., Кудрявцев В.Н. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. Сб. науч. Тр. – Донецк: ДонНТУ, 2004. Вып. 26.-С. 136-144. 2. Заплетников И.Н., Кудрявцев В.Н. О результатах воздействия электромагнитного поля на процесс сушки орехового сырья // Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування та торгівлі: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 65-річчю з дня народження доктора техн. наук, проф., члена-кореспондента ВАСГНГІЛ *Беляева М.І.* / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2003. С. 243-245. 3. Юрчик Г.В., Водотовка В.І. Інформаційно-вимірвальна система мікрохвильового технологічного процесу: канал вимірювання швидкості повітряного потоку / Г.В. Юрчик, В.І. Водотовка // Вісник національного університету «Львівська політехніка».- 2002.-№468.-С. 10-18. 4. Юрчик Г.В. Підвищення точності вимірювання при контролі енергетичних і теплофізичних параметрів мікрохвильових технологій: Монографія. / Юрчик Г.В.- Львів: Тріада плюс, 2008.-176 с. 5. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с. 6. Себко В.В. Экранное трубчатое многопараметровое вихретоковое устройство // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – Вып. 39. – С. 18-29. 7. Себко В.П., Кириченко Р.И. Определение пределов измерений сигналов электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2000. – Вип. 12. – С. 403-406. 8. Себко В.П., Кириченко Р.И. К теории работы трансформаторного электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием // Технічна електродинаміка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАНУ. – 2000. – Тем. випуск, Ч. 1. – С. 93–98. 9. Себко В.П., Глоба С.Н. Определение критических значений частот магнитного поля и толщин плоских изделий. – Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. -Вып. 24. - С. 21-25. 10. Себко В.В. Трансформаторный вихретоковый датчик с пластиной, зондируемой полемкратных частот // Український метрологічний журнал. -Харків. – 2007. – Вип. 2. – С. 26-29. 11. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. -Л.:Энергоатомиздат,1987. – 320 с. 12. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. –К.: Техніка, 1981. – 150 с.

Надійшла до редакції 17.12.2013

УДК 621.981.06

**В. Т. СИКУЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук, доц., проф., НАУ «ХАИ», Харьков

### **ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПАНЕЛЕЙ С ПРОДОЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ МЕСТНОЙ ГИБКОЙ С ПОСАДКОЙ (РАЗВОДКОЙ)**

Приведено описание нового процесса получения панелей сложных форм местным деформированием с использованием оригинального устройства, в котором реализуется местный изгиб ребра с совместной деформацией посадки и разводки. На примере получения панелей двойной кривизны