

**В.В. СЕБКО**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,

**В.Н. БАБЕНКО**, асс., НТУ «ХПИ»,

**Т.С. ТИХОМИРОВА**, канд. техн. наук, асс., НТУ «ХПИ»,

**К.А. ПЕТУХОВА**, магистр, НТУ «ХПИ»,

**А.К. МИНКОВА**, магистр, НТУ «ХПИ»

## **КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛИЧНОГО СЫРЬЯ В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ**

Исследован трехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля среднего диаметра  $d_{ср}$ , удельного электрического сопротивления  $\rho_t$  и температуры  $t$  образцов масличного сырья. Приведены основные соотношения, которые описывают данный метод измерительного контроля. Разработан алгоритм измерительных и расчетных процедур определения параметров образца масличного сырья на базе трансформаторного вихретокового преобразователя (ТВП). Приведена схема теплового ТВП которая позволяет имитировать нагрев пробы масличного сырья в процессе совместного измерительного контроля трех параметров образца.

**Ключевые слова:** микроволновая камера, вихретоковый метод, измерительный контроль, вихретоковое устройство, тепловой преобразователь, совместный контроль трех параметров.

**Введение.** Контроль качества образцов масличных культур является важной хозяйственной задачей на данном этапе. Использование масличного сырья в народном хозяйстве обусловлено высокими пищевыми достоинствами этого комплекса, а также относительно большим содержанием белка.

Значительную часть масличного сырья применяют или для приготовления различных пищевых продуктов, или непосредственно при производстве различных концентратов и пищевых масел [1, 2]. Поэтому в настоящее время, особое значение имеет разработка устройств и методов контроля показателей качества масличного сырья, которые указаны в нормативных документах и дают возможность установить уровень качества продукции.

**Анализ последних исследований и литературы** показывает, что важнейшими показателями технологического качества масличного сырья в соответствии с нормативными документами является содержание в них влаги – влажность [1, 2]. Поэтому основным видом промышленной обработки масличного сырья служит термическая обработка (высокотемпературная сушка и обжарка в специальных печах и в жарочных шкафах) [1 – 3]. В этом случае

© В.В. Себко, В.Н. Бабенко, Т.С. Тихомирова, К.А. Петухова, А.К. Минкова, 2015

поэтапно для получения качественного сырья используются диапазоны изменения температур от 20 °С до 160 °С в соответствии с государственными нормативными документами [1 – 3]. В свою очередь, от геометрических параметров (формы и размеров сырья) зависят размерные параметры машин и способы переработки сырья. Форма семян, характерная для масличной культуры, определяется тремя измерениями – длиной, шириной и толщиной. Если все три размера образца между собой близки или равны (шаровидная форма образца), геометрические параметры образцов сырья характеризуются одной размерной величиной – диаметром [1 – 3].

Таким образом, важной научно-практической проблемой является создание методов и устройств измерительного контроля геометрических и температурных параметров масличного сырья в процессе тепловой обработки.

Поскольку температура  $t$  коррелирует с электрическим параметром удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  (или удельной электрической проводимостью  $\sigma$ ), возникает необходимость в совместном трехпараметровом контроле геометрических, электрических и температурных параметров проб масличного сырья одним и тем же устройством измерительного контроля.

В настоящее время хорошо известны и постоянно развиваются методы и средства вихретокового контроля немагнитных сред и изделий [4 – 9]. Достоинствами методов вихретокового контроля являются высокая достоверность контроля, чувствительность и бесконтактность, сравнительная простота автоматизации процесса контроля, высокая надежность, однако применительно к контролю продуктов растительного происхождения эти методы практически не использовались.

**Целью работы** является создание трехпараметрового вихретокового метода измерительного контроля геометрических, электрических и температурных параметров образца масличного сырья на базе теплового трансформаторного вихретокового преобразователя ТВП при имитации процесса нагрева в диапазоне температур от 20 °С до 160 °С, который соответствует процессу тепловой обработки.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Привести соотношения, описывающие измерительный бесконтактный контроль среднего диаметра  $d_{cp}$  и температуры  $t$  пробы масличного сырья.
2. Рассмотреть алгоритм измерительных процедур определения параметров теплового ТВП (при имитации процесса нагрева) и параметров пробы масличного сырья.

В работах [4 – 8] были введены безразмерный параметр  $N$  – удельная нормированная вносимая ЭДС и фазовый угол сдвига  $\varphi_{\text{вн}}$  ТВП с немагнитным цилиндрическим изделием, выражения для определения этих информативных параметров с учетом нагрева имеют следующий вид:

$$N_t = \frac{E_{\text{вн}}}{4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot a^2} \quad (1)$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{вн}} = \frac{E_2 \cdot \sin \varphi}{E_{20} - E_2 \cdot \cos \varphi} \quad (2)$$

В работе [9] был введен параметр  $N_{xt}$ , который выражает собой удельную нормированную ЭДС, обусловленную прохождением магнитного потока через квадратную единичную площадку со стороной равной глубине проникновения магнитного поля  $\delta$ .

$$N_{xt} = \frac{E_{\text{вн}} \cdot x_t^2}{4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot a^2} \quad (3)$$

При этом диаметр образца можно выразить через известные и измеряемые параметры и в дальнейшем осуществлять бесконтактный измерительный контроль удельного электрического сопротивления  $\rho_t$ , а по нему найти температуру контролируемой пробы масличного сырья  $t$ . Как правило, существующие методы контроля немагнитных изделий и сред позволяют осуществлять измерительный контроль физико-механических параметров в узком диапазоне изменения обобщенного магнитного параметра  $x$  [4 – 7]. Если же использовать фиксированную частоту  $f$ , измеренную с учетом нагрева образцов, и определить термозависимый параметр  $x_t$ , взятый из исследуемого диапазона, можно получить рациональные режимы работы теплового вихретокового устройства [8, 9]. Поэтому сначала необходимо привести соотношения, устанавливающие функциональную связь между параметрами образца и компонентами сигналов теплового преобразователя.

Следовательно, зная удельное электрическое сопротивление  $\rho_l$  при начальной температуре и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  контролируемых проб, а также измерив ЭДС,  $E_{\text{вн}}$  и  $E_o$ , и угол  $\varphi_{\text{вн}}$  (между этими ЭДС) на основании известных схем включения, предусматривающих нагрев

соответствующей пробы в процессе контроля [4 – 7] можно найти совместно или отдельно геометрические, электрические и температурные параметры образца масляного сырья, воспользовавшись системой уравнений:

$$\begin{cases} N_t = f(d_t) \\ N_{xt} = f(\rho_t) \\ \frac{\rho_t}{\rho_1} - 1 = \frac{\alpha}{1 + \alpha \cdot t_1} (t - t_1) \end{cases} \quad (4)$$

На рисунке 1 приведена схема теплового ТВП с образцом масляного сырья.

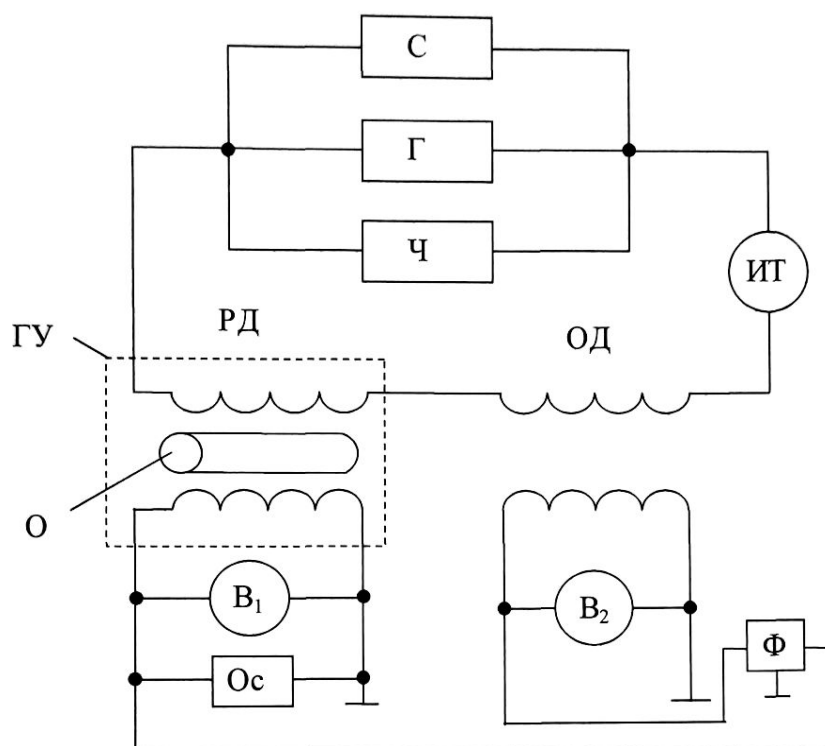


Рис. 1 – Схема ТВП для измерительного трехпараметрового контроля образца масляного сырья

Схема включает в себя: тепловой ТВП, имеющий две обмотки (намагничивающую и измерительную), Г – источник переменного тока, Ч – измеритель частоты намагничивающего тока  $I$ , Ос – осциллограф, ИТ – измеритель намагничивающего тока, два вольтметра,  $V_1$  и  $V_2$ , С – самописец, рабочий датчик РД и опорный датчик – ОД. Схема для имитации процесса нагрева

предусматривает греющее устройство – ГУ, внутри которого располагаются контролируемые образцы сырья. В схему также входит измеритель сдвига фаз –  $\Phi$  и самописец  $C$  со стробоскопическим устройством.

Таким образом, на высоких частотах (порядка 1,2 МГц) мы ориентируемся на средние значения параметров  $N_{cpt}$  и  $N_{xt,cp}$ , а также фазовых углов  $\varphi_{внтcp}$  и, пользуясь зависимостью  $N_t=f(\varphi_{внт})$  при измеренном значении фазового угла, находим параметр  $N_t$ , далее для повышения точности измерений находим  $N_{cpt}$ ,  $B_o$  – магнитная индукция теплового ТВП, после чего определяем средний диаметр контролируемой пробы по формуле:

$$d_{cp} = d_n \sqrt{\frac{E_{внт.cp}}{4,44N_{cpt} \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \pi \cdot a_n^2 \cdot B_o}} \quad (5)$$

Далее, пользуясь зависимостью  $N_{xt}=f(\varphi_{внт})$ , находим удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$  и температуру  $t$  контролируемых проб.

$$\rho_t = \frac{2\pi \cdot f_t \cdot \mu_0 \cdot a_n^2}{\eta \cdot x_t^2} \quad (6)$$

$$t = \left( \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \right) \cdot \left( \frac{2\pi \cdot f_t \cdot \mu_0 \cdot a_n^2}{\rho_1 \cdot x_t^2 \cdot \eta} - 1 \right) + t_1 \quad (7)$$

Следует отметить, что для отдельного контроля информативных параметров при высоких частотах показания измерительных приборов практически не зависят от геометрических параметров пробы, которую размещают по большой оси соленоида пинцетом в один слой (семена или орехи, так чтобы, например, семь орехов касались друг друга). Поэтому, пользуясь зависимостью  $N_t=f(\varphi_{внт})$ , мы сразу можем определить температуру образцов в процессе тепловой промышленной обработки.

$$t = \left( \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \right) \cdot \left( \frac{E_{внт}}{E_0 \cdot N_{xt} \cdot \rho_1} - 1 \right) + t_1 \quad (8)$$

Таким образом, при определении температуры  $t$  важного технологического процесса – тепловой обработки масличного сырья, воспользовавшись универсальной функцией преобразования  $N_{xt}=f(\varphi_{внт})$  и измерив термозависи-

мые параметры теплового ТВП  $E_{внт}$  и  $\varphi_{внт}$  можно определить температуру  $t$  по формуле (8), выполнив отстройку от среднего диаметра  $d_{cp}$  пробы контролируемого сырья.

### **Выводы.**

В настоящей статье, в рамках решения важнейшей научно-практической проблемы, которая состоит в создании методов и устройств измерительного контроля геометрических и температурных параметров масличного сырья, в процессе тепловой обработки, создан трехпараметровый бесконтактный вихретоковый метод измерительного контроля геометрических, электрических и температурных параметров масличного сырья на базе теплового ТВП при имитации нагрева до диапазона температур соответствующего тепловой промышленной обработки (например, высокотемпературной сушки и обжарки).

Приведены основные соотношения, описывающие данный метод, которые позволяют контролировать параметры  $d_{cp}$ ,  $\rho_t$ ,  $t$  как совместно, так и раздельно. Рассмотрены алгоритмы измерительных процедур определения сигналов преобразователя и параметров контролируемых проб масличного сырья.

**Список литературы:** 1. *Лыков А.В.* Теория сушки / *А.В. Лыков.* – М.: Энергия, 1968. – 472 с. 2. *Ковашевич И.П.* Ферромагнитный цилиндр в проходном вихретоковом преобразователе. Численное решение обратной задачи / *И.П. Ковашевич* // Дефектоскопия. – 1984. – № 9. – С. 8 – 12. 3. *Юрчик Г.В.* Підвищення точності вимірювання при контролі енергетичних і теплофізичних параметрів мікрохвильових технологій / *Г.В. Юрчик.* – Львів: Тріада плюс, 2008. – 176 с. 4. *Клюев В.В.* Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / *В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев.* – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с. 5. *Себко В.П.* Совместное определение радиуса и удельной электрической проводимости изделий дифференциальным электромагнитным методом / *В.П. Себко* // Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования: Междунар. науч.-техн. конф., 13-15 окт. 1998 г.: сборник стат. – Х., 1998. – 134 – 137 с. 6. *Янг Ду Хуан.* Дифференциальный трансформаторный электромагнитный преобразователь для контроля магнитных и электрических параметров изделий / *Ду Хуан Янг* / Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 37. – С. 61 – 63. 7. *Себко В.В.* Погрешности совместного измерения диаметра, удельного электрического сопротивления и температуры изделия в продольном магнитном поле / *В.В. Себко* // Вісник Східно-українського національного університету ім. В. Даля. – 2002. – № 8. – С. 224 – 228. 8. *Себко В.В.* Вихретоковий контроль геометричних, електричних і температурних параметрів немагнітних циліндричних изделий / *В.В. Себко* // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2006. – № 4. – С. 85 – 89. 9. *Багмет О.Л.* Расчет характеристик электромагнитного преобразователя температуры / [*О.Л. Багмет, И.В. Машнева, В.В. Себко, И.И. Москаленко*] // Измерительная техника. – 1997. – № 1. – С. 57 – 60.

**References:** 1. *Lykov A.V. Teorija sushki (Theory of Drying) / A.V. Lykov. – Moscow: Energyja, 1968. – 472 p. (in Russian).* 2. *Kovashevich I.P. Ferromagnitnyiy tselindr v prohodnom vihretokovom preobrazovatele. Chislennoe reshenie obratnoj zadachi (Ferromagnetic cylinder in the through eddy current probes. Numerical solution of the inverse problem) / I.P. Kovashevich // Defektoskopiya. –1984. – № 9. – P 8 – 12. (in Russian).* 3. *Iurchyk G.V. Pidvyschennia tochnosti vymiriunnia pri kontroli energetychnyh i teplofizychnyh parametriv mikrokhvylovoyh tekhnologiy (Increased measurement accuracy in controlling energy and thermal parameters of microwave technology) / G.V. Iurchyk. – Lviv: Triada plus, 2008. – 176 p. (in Ukrainian).* 4. *Kliuev V.V. Nerazrushaiuschiy kontrol i diagnostika (Nondestructive testing and diagnostics) / V.V. Kliuev, F.R. Sosnin, A.V. Kovalev. – Moskov: Mashinostroenie, 2005. – 656 p. (in Russian).* 5. *Sebko V.P. Sovmestnoe opredelenie radiusa i udel'noy elektricheskoy provodimosti izdeliiv differentsial'nym elektromagnitnym metodom (Simultaneous determination of the radius and conductivity articles differential electromagnetic method) // Modern instruments, materials and technologies for technical diagnostics and non-destructive testing of industrial equipment: Internat. scient.-techn. conf., 13-15 oct. 1998 y.: transaction. – Kharkov, 1998. – P. 134 – 137. (in Russian).* 6. *Young Du Hijan. Differential'nij transformatornij elektromagnitnij preobrazovatel dlja kontrolya magnitnyh i elektricheskikh parametrov izdelij (Differential transformer electromagnetic transducer to control the magnetic and electrical parameters of products) / Du Hijan Young // Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – Vol. 37. – P. 61 – 63. (in Russian).* 7. *Sebko V.V. Pogreshnosti sovmestnogo izmereniya diametra, udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya i temperatury izdeliya v prodol'nom magnitnom pole (Error of measurement of the diameter of the joint, electrical resistivity and temperature of the product in a longitudinal magnetic field) / V.V. Sebko // Visnyk Shidno-ukraiyns'kogo natsional'nogo universysetu imeni V. Dalja. – 2002. – № 8 – P. 224 – 228. (in Russian).* 8. *Sebko V.V. Vihretokovyj kontrol geometricheskikh, elektricheskikh i temperaturnyh parametrov nemagnitnyh tselindricheskikh izdelij (Eddy current testing of geometrical, electrical and thermal parameters of the non-magnetic cylindrical products) / V.V. Sebko // Integrovani tehnologiji ta energozberezheniya. – 2006. – № 4. – P. 85 – 89. (in Russian).* 9. *Bagmet O.L. Raschet harakteristik elektromagnitnogo preobrazovatelya temperatury (Calculation of the characteristics of the electromagnetic transducer temperature) / [O.L. Bagmet, I.V. Mashknaeva, V.V. Sebko, I.I. Moskalenko] // Izmeritel'naja tehnika. – 1997. – № 1. – P. 57 – 60. (in Russian).*

*Поступила (Received) 30.03.2015*