

**В.Ф. БЕЗОТОСНИЙ**, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорозьє

**В.В. КОЗЛОВ**, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорозьє

**О.В. НАБОКОВА**, доц., ЗНТУ, Запорозьє

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВИХРЕВОГО ЧАСТОТНОГО БАЛАНСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НАКЛАДНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

В работе показано, что электромагнитные преобразователи, основанные на использовании токовихревого частотного баланса, позволяют практически полностью избавиться от влияния воздушных зазоров между преобразователем и контролируемой деталью. Их можно успешно использовать для контроля электромагнитных свойств ферромагнитных материалов по частоте баланса. Это позволяет без промежуточных преобразований использовать цифровую измерительную аппаратуру.

**Ключевые слова:** токовихревой преобразователь, токовихревой частотный баланс, ферромагнитные материалы, электромагнитные свойства.

**Введение.** Для исследования электромагнитных свойств ферромагнитных материалов широко используются токовихревые преобразователи, принцип действия которых основан на измерении наводимой в измерительной обмотке ЭДС, значение которой зависит от свойств исследуемого материала. Оптимальная частота намагничивающего тока для конкретного материала обычно подбирается экспериментально.

**Постановка проблемы.** Недостатком большинства существующих конструкция таких преобразователей является зависимость выходного сигнала не только от электромагнитных свойств исследуемого материала, но и от размеров зазоров под полюсами, которые трудно контролировать в процессе измерений [1-4].

**Целью** настоящей работы разработка и анализ конструкции токовихревого преобразователя лишеного этого недостатка.

**Материалы исследования.** Принцип действия преобразователя, показанного на рис. 1, основан на токовихревом частотном балансе. Это позволяет практически полностью избавиться от влияния воздушных зазоров при некоторых их рациональных размерах и контролировать электромагнитные свойства ферромагнитных материалов, так как в качестве выходной информации используется частота намагничивающего тока. Преобразователь выполнен из трех

© В.Ф. Безотосный, В.В. Козлов, О.В. Набокова, 2015

П-образных магнитопроводов 3, 4 и 5, имеет обмотку намагничивания 1, охватывающую все три магнитопровода и измерительную обмотку 2, расположенную на среднем – измерительном магнитопроводе. Боковые магнитопроводы предназначены для создания в исследуемом материале корректирующих магнитных потоков, так как ограничивают область распространения магнитного потока проходящего через измерительный магнитопровод. При измерениях преобразователь устанавливается на исследуемый ферромагнитный материал 6.

Рис. 2 иллюстрирует характер распространения магнитного потока, создаваемого преобразователем, на поверхности исследуемого материала.

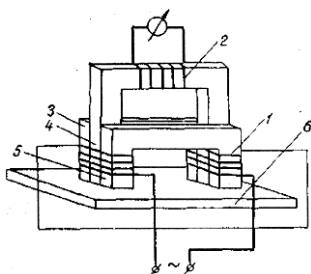


Рис. 1 – Конструкция преобразователя

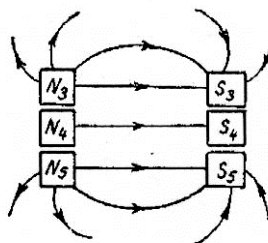


Рис. 2 – Распределение магнитного потока

В этом случае контролируемый участок материала ограничен шириной полюса среднего магнитопровода  $b$ , несущего измерительную обмотку, и активной базой преобразователя  $l$ . Тогда магнитный поток, проходящий в области ферромагнетика шириной  $b$  [6], определится соотношением

$$\Phi = \frac{\mu}{\sqrt{2}} \delta b H_0 e^{-j\frac{\pi}{4}} = \frac{\mu}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_a \gamma}} b H_0 e^{-j\frac{\pi}{4}}, \quad (1)$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость исследуемого материала;  $\gamma$  – электропроводность материала;  $f$  – частота намагничивающего тока;  $H_0$  – напряженность магнитного поля на поверхности исследуемого материала;  $\delta$  – глубина проникновения магнитного поля. Соотношение (1) можно представить в следующем виде

$$\Phi = \mu_\phi b H_0 e^{-j\frac{\pi}{4}},$$

где  $\mu_\phi = \frac{\mu}{\sqrt{2}}\delta$  – фиктивная магнитная проницаемость материала.

При отсутствии ферромагнитной среды, то есть при наличии диэлектрической среды под полюсами преобразователя, магнитный поток, проходящий через средний магнитопровод, равен  $\Phi_d = \mu_o H_o S_{cp}$ , где  $S_{cp}$  – среднее сечение диэлектрической среды, через которое проходит магнитный поток.

Покажем, что существует частота намагничивающего тока, при котором в результате действия вихревых токов магнитный поток, проходящий в области ферромагнетика, расположенного под полюсами среднего магнитопровода, уменьшится до значения магнитного потока, проходящего в диэлектрической среде. Значение этой частоты найдем из уравнения

$$\Phi_d = \Phi_{cp}. \quad (2)$$

Соотношение (2) будет выполняться при равенстве магнитного сопротивления ферромагнетика и диэлектрической среды, расположенной под полюсами магнитопровода с измерительной обмоткой. С учетом выражения (1) для модуля магнитного сопротивления ферромагнетика получим

$$Z_m = \frac{l}{\mu_\phi b} = \frac{l\sqrt{2f\mu\gamma}}{50,3\mu b}. \quad (3)$$

Для магнитного сопротивления диэлектрической среды под полюсами преобразователя, согласно [7], можно записать

$$R_m = \frac{1}{\mu_o b \ln \frac{m + \sqrt{2m-1}}{m-1}}, \quad (4)$$

где  $m$  – определяется расстоянием между полюсами преобразователя  $l$  и их шириной  $a$  в направлении активной базы

$$m = \frac{l+2a}{2a}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в уравнение (2), получим

$$\frac{l\sqrt{2f\mu\gamma}}{50,3\mu b} = \frac{1}{\frac{\mu_o b}{\pi} \ln \frac{m + \sqrt{2m-1}}{m-1}} \quad (6)$$

Соотношение (6) может иметь место при значительном значении вихревых токов, когда основной магнитный поток  $\Phi$  ослабляется ими

до значения, определяемого магнитным сопротивлением диэлектрической среды. Частота, соответствующая этому случаю (назовем ее частотой токовихревого баланса ЧТБ), может быть определена из выражения (6). Путем несложных преобразований получим

$$f = \frac{2500\mu\pi^2}{l^2\mu_o^2\gamma \left[ \ln \frac{m + \sqrt{2m-1}}{m-1} \right]}. \quad (7)$$

Полученное соотношение (7) соответствует реальному физическому смыслу: чем больше магнитная проницаемость материала, тем больше при одной и той же напряженности магнитного поля магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, а, следовательно, выше частота намагничивающего поля для выполнения равенства (2). При увеличении электропроводности материала сильнее проявится действие вихревых токов, создающих магнитный поток, ослабляющих основной. Следовательно, равенство (2) будет выполнено при меньшей частоте поля.

Из соотношения (7) следует, что ЧТБ определяется прежде всего электромагнитными свойствами ферромагнетика: магнитной проницаемостью и электропроводностью, то есть по ЧТБ можно судить о электромагнитных свойствах этих материалов.

ЧТБ соответствует случаю, когда магнитное сопротивление исследуемого материала равно сопротивлению воздушной среды под полюсами. Это позволяет предположить, что незначительные колебания зазора под полюсами (при некотором их рациональном размере) не повлияют на ЧТБ. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость ЧТБ от размера воздушного зазора при установке преобразователя с активной базой, равной 15 мм, на образец из стали марки X12Ф1. Как следует из графика, при размере воздушного зазора 0,5 мм его колебания в пределах  $\pm 0,2$  мм незначительно влияют на частоту токовихревого баланса.

На рис. 4 приведены результаты практического применения накладного преобразователя при определении остаточных напряжений в образце. Напряжения определялись в образце из стали марки X12Ф1 при стравливание слоев материала в растворе ортофосфорной кислоты с хромовым ангидридом. Значение механических напряжений  $\sigma$  рассчитывалось по методике, приведенной в [8]. Анализ полученных зависимостей показывает, что по ЧТБ можно также судить о

распределении механических напряжений по глубине материала, используя тарировочный график.

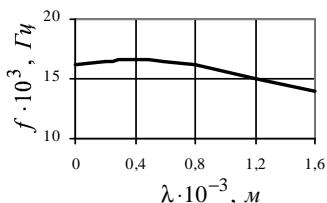


Рис. 3 – Экспериментальная зависимость ЧТБ от размера воздушного зазора

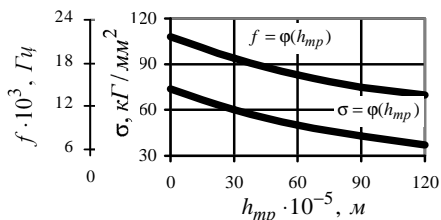


Рис. 4 – Результаты практического применения накладного преобразователя работающего на принципе токовихревого баланса:  $h_{mp}$  – глубина сравненного слоя

**Выводы.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что преобразователи, в которых используется принцип токовихревого баланса, могут успешно применяться для контроля электромагнитных свойств ферромагнитных материалов по балансной частоте намагничивающего тока, что позволяет непосредственно без промежуточных преобразований использовать цифровую измерительную технику.

**Список литературы:** 1. Безотосный В.В., Козлов В.В., Набокова О.В. Частотный метод контроля качества гальванопокрытий. // Электротехника та електромеханіка. – 2011 – №1. – С. 3-5. 2. Безотосный В.В., Власенко Э.В. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов. // Электротехника та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С. 13-17. 3. Безотосный В.В., Власенко Е.В., Козлов В.В., Набокова О.В., Афанасьева И.О. Деякі актуальні напрямки неруйнуючого контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами. // Электротехника та електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 12-15. 4. Безотосный В.В., Козлов В.В., Набокова О.В. К вопросу повышения точности расчета выходных характеристик базового многофункционального магнитоупругого датчика. // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2010. – № 48. – С. 56-59. 5. Безотосный В.В., Власенко Э.В. Метод контроля механических напряжений. // Электрический журнал. – 1998. – № 2(8). – С. 24-27. 6. Ламмеранер И., Штафль М. Вихревые токи. – М., Энергия, 1987. – 210 с. 7. Константинов О.Я. Расчет и конструирование магнитных и электромагнитных приспособлений. – Л., Машиностроение, 1967. – 275 с. 8. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М., Машгиз, 1968. – 154 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bezotosnyj V.V., Kozlov V.V., Nabokova O.V. "Chastotnyj metod kontrolja kachestva gal'vanopokrytij". *Elektrotehnika ta elektromehanika*. 1 (2011): 3-5. Print. 2. Bezotosnyj V.V., Vlasenko Je.V. "Uchet jenergeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnyh materialov". *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 1 (2004): 13-17. Print. 3. Bezotosnij V.V., Vlasenko E.V., Kozlov V.V., Nabokova O.V., Afanas'eva I.O.

"Dejaki aktual'ni naprjamki ne rujnujuchoho kontrolju vlastivostej materialiv elektromagnitnimi metodami". *Elektrotehnika ta elektromehaniha*. 6 (2008): 12-15. Print. 4. Bezotosnyj V.V., Kozlov V.V., Nabokova O.V. "K voprosu povysheniya tochnosti rascheta vyhodnyh harakteristik bazovogo mnogofunktional'nogo magnitoupругogo datchika". *Vestn. nacional'nogo tehniche-skogo universiteta "HPI"*. 48 (2010): 56-59. Print. 5. Bezotosnyj V.V., Vlasenko Je.V. "Metod kontrolja mehanicheskikh naprjazhenij". *Elektrichnij zhurnal*. 2 (8) (1998): 24-27. Print. 6. Lammeraner I., Shtaffl' M. *Vihrevye toki*. Moscow: Jenergiya, 1987. Print. 7. Konstantinov O.Ja. *Raschet i konstruirovanie magnitnyh i jelektromagnitnyh prisposoblenij*. Saint Petersburg: Mashinostroenie, 1967. Print. 8. Birger I.A. *Ostatochnye naprjazhenija*. Moscow: Mashgiz, 1968. Print.

*Поступила (received) 22.10.2014*



**Безотосный Владимир Федорович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Запорожского национального технического университета. Защитил диплом инженера-конструктора, технолога радиоэлектронной аппаратуры в ЗМИ, диссертацию кандидата технических наук в МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1989 г. по специальности "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления". Одним из научных направлений являются вопросы электромагнитного неразрушающего контроля свойств материалов.



**Козлов Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Запорожского национального технического университета (бывший Запорожский машиностроительный институт). Защитил диплом инженера-электрика по специальности "Электроснабжение промышленный предприятий, городов и сельского хозяйства" в ЗМИ, диссертацию кандидата технических наук в НТУ ХПИ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2004 г. Основное направление научной деятельности - вопросы теплообмена в силовых трансформаторах.



**Набокова Ольга Владимировна**, доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Запорожского национального технического университета (бывший Запорожский машиностроительный институт). Защитила диплом инженера-электромеханика по специальности "Электрические машины и аппараты" в ЗМИ. Основным направлением научной деятельности являются вопросы методологии преподавания курса "Теоретические основы электротехники" на английском языке. Автор учебного пособия с грифом МОН Украины для студентов-электриков с английским языком преподавания "**Theoretical Electrical Engineering**" (2013 г.).