

АНАЛИЗ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ИМПУЛЬСНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ю. В. КУЦ, Ю. Ю. ЛЫСЕНКО, А. Л. ДУГИН, А. Ф. ЗАКРЕВСКИЙ

Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

Исследована возможность применения вихретокового метода с импульсным возбуждением для контроля диаметра электропроводного цилиндрического объекта. Для обработки информативных сигналов преобразователя предложены преобразование Гильберта и условие для узко- и широкополосной системы "вихретоковый преобразователь–объект контроля", что позволит на этапе проектирования прибора вихретокового контроля задавать спектральный состав сигналов.

Ключевые слова: *импульсный вихретоковый контроль, преобразование Гильберта, частота и затухание сигнала, контроль диаметра и электропроводности.*

Постановка задачи. Неразрушающий вихретоковый контроль широко применяют в промышленности благодаря простоте и надежности. Одно из актуальных направлений его развития – повышение информативности выходных сигналов вихретоковых преобразователей (ВТП) [1], которое реализуют, совершенствуя способы возбуждения поля и обработки сигналов. Особое внимание уделяют конструкции ВТП, от которых зависит степень сложности его настройки [2].

В вихретоковом неразрушающем контроле изделий из электропроводящих материалов в основном используют непрерывные гармонические возбуждения вихревых токов в исследуемых образцах [3, 4]. В этом случае электрофизические и геометрические параметры материалов образцов определяют по амплитуде и фазе информационных сигналов. Например, процесс выращивания цилиндрических полупроводниковых образцов контролируют [5] трансформаторным проходным ВТП в непрерывном режиме.

Импульсный режим в вихретоковом контроле используют, как правило, для дефектоскопии многослойных материалов и объектов со сложной поверхностью. За счет возбуждения ВТП периодическими импульсными токами информационный сигнал содержит ряд частотных составляющих, с помощью которых можно повысить информативность и скорость контроля, а также выявить дефекты в многослойных материалах на большей глубине. Сигналы ВТП обычно анализируют в частотной области, применяя преобразование Фурье или Лапласа [6], либо во временной – посредством свертки двух функций [7], одна из которых соответствует исходному сигналу напряжения возбуждения, а вторая – переходной функции системы. Решение задачи сводят к определению переходной функции системы как функции контролируемых параметров по известному воздействию и реакции системы на него.

Известно много способов практического использования импульсного режима работы ВТП [3, 4]. Особый интерес вызывает оценка характеристик переходного процесса по его отклику на фронты возбуждающего сигнала. Установлено, что при вариации характеристик объектов контроля (ОК) изменяются декремент

и частота вносимых сигналов ВТП [8]. При импульсном вихретоковом контроле цилиндрических ОК из электропроводящих немагнитных материалов декремент α и частота f колебаний зависят соответственно от электропроводности материала γ и радиуса образцов R , т.е. $\alpha = F_1(\gamma)$ и $f = F_2(R)$ [9]. Однако вид функциональной зависимости параметров сигналов от характеристик ОК изучен недостаточно. Оценку усложняют шумы и помехи, сопровождающие контроль. Математические модели, описывающие зависимость выходных сигналов ВТП от характеристик ОК, также исследованы не полностью [10].

Цель работы – изучить функциональную взаимосвязь постоянных во времени параметров ОК с характеристиками выходного сигнала трансформаторного проходного ВТП в импульсном режиме, а также сравнить теоретические результаты с экспериментальными.

Теоретические предпосылки и математическая модель. Рассмотрим систему “трансформаторный ВТП–цилиндрический ОК”. На возбуждающую катушку ВТП воздействует единичный импульс напряжения

$$u(t) = \begin{cases} U_m, & 0 \leq t \leq \tau_p, \\ 0, & \tau_p < t. \end{cases} \quad (1)$$

где U_m – амплитуда импульса; τ_p – его длительность. ОК имеет радиус R , электропроводность материала γ и относительная магнитная проницаемость μ_r (т.е. немагнитный образец). Радиус возбуждающей катушки равен R_i , а измерительной R_m . Поскольку длина возбуждающей катушки существенно превышает длину измерительной, размещенной внутри возбуждающей (рис. 1а), для расчета преобразователя можно принять гипотезу об однородности электромагнитного поля в области измерительной катушки (на рис. 1а H_0 – напряженность магнитного поля). Эквивалентная схема такого ВТП представлена на рис. 1б, где $u(t)$, $i(t)$ – входные напряжение и ток возбуждающего генератора; C_0 – емкость входной цепи; L – индуктивность возбуждающей катушки; M – взаимная индуктивность между возбуждающей и измерительной катушками; r_1 – активное сопротивление возбуждающей катушки. Измерительная работает в режиме холостого хода.

Рассмотрим более детально возбуждающий импульс напряжения (1) и сам преобразователь. В общем случае ВТП представляет собой звено второго порядка, которое описывает дифференциальное уравнение второго порядка (рис. 1б). В таких цепях система реагирует на воздействие аperiodически и колебательно. Аperiodическая реакция свойственна цепи с широкой полосой частот пропускания, т.е. низкочастотным колебательным системам, а колебательная – с узкой, т.е. высокочастотным колебательным системам. Поэтому целесообразно изучить реакцию на воздействие системы в частотной области.

Рассмотрим процессы, протекающие в ВТП, который работает в колебательном режиме и возбуждается напряжением

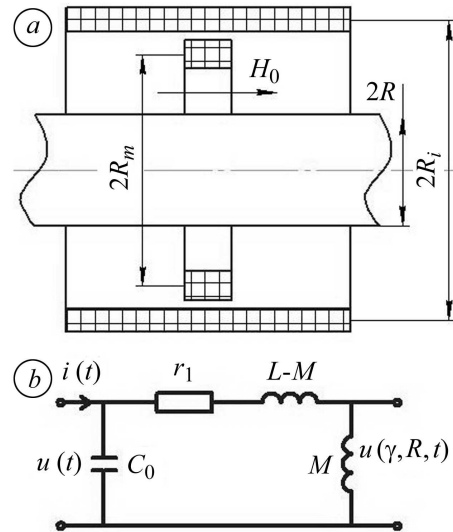


Рис. 1. Трансформаторный вихретоковый преобразователь (а) и его эквивалентная схема в режиме холостого хода (б).

Fig. 1. Transformer eddy current probes (a) and its equivalent scheme in no load operation (b).

$$u(t) = U_m e^{-t/\tau} \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2)$$

Напряжение на выходе измерительной катушки определим в соответствии с законом Фарадея:

$$u(\gamma, R, t) = d\Psi(\gamma, R, t)/dt, \quad (3)$$

где $\Psi(\gamma, R, t)$ – сцепление магнитного потока вихревых токов ОК с измерительной катушкой.

Учитывая выражения (2) и (3), напряжение измерительной катушки определим так:

$$u(\gamma, R, t) = \omega(\gamma, R) L(\gamma, R) I_0 e^{-t/\tau(\gamma, R)} \cos(\omega(\gamma, R)t + \varphi_0(\gamma, R)) - \\ - r(\gamma, R) I_0 e^{-t/\tau(\gamma, R)} \sin(\omega(\gamma, R)t + \varphi_0(\gamma, R)).$$

Импульсный режим возбуждения катушки в составе частотно-селективной системы можно описать гармоническим [11], который математически задает интегро-дифференциальное уравнение

$$L \frac{d}{dt} i(t) + ri(t) + \frac{1}{C_0} \int i(t) dt = u(t). \quad (4)$$

Учитывая, что система работает в колебательном режиме, т.е. узкополосная, зависимостью ее параметров от времени в первом приближении можно пренебречь.

Частоту и декремент затухания выходного сигнала определяют параметры возбуждающей катушки, а от параметров измерительной (взаимной индуктивности и активного сопротивления потерь) зависит сдвиг фазы выходного сигнала относительно входного. Поскольку входная цепь системы – колебательный контур, возбуждаемый на частоте резонанса, начальный сдвиг фазы входного сигнала $\varphi_0 = 0$.

Чтобы построить зависимость тока входной цепи от параметров системы, продифференцируем уравнение (4) по времени:

$$\frac{d^2}{dt^2} i(t) + \frac{r_1}{L_1} \frac{d}{dt} i(t) + \frac{1}{C_0 L_1} i(t) = \frac{1}{L_1} \frac{dU(t)}{dt}. \quad (5)$$

Введем функцию

$$i(t) = i_1(t) e^{-\alpha t}, \quad (6)$$

где $\alpha = r_1 / (2L_1)$ – декремент затухания.

Уравнение (5) с учетом (6) запишем так:

$$\frac{d^2}{dt^2} i_1(t) + \left(\frac{1}{C_0 L_1} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_1}{L_1} \right)^2 \right) i_1(t) = \frac{e^{\frac{r_1}{2L_1} t}}{L_1} \frac{dU(t)}{dt}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) в общем виде

$$i_1(t) = B_1 \cos\left(\int \omega_r dt\right) + C_1 \sin\left(\int \omega_r dt\right) + i_{1p}(t),$$

где $\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{r_1^2 C_0}{2L_1}}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_0}}$; B_1, C_1 – постоянные; $i_{1p}(t)$ – частное решение уравнения (7).

Для узкополосной системы решение (7) справедливо, если

$$\frac{1}{L_1 C_0} > \frac{r_1^2}{2L_1^2}. \quad (8)$$

Условие (8) может служить критерием разграничения импульсного режима для узко- и широкополосных систем.

Выходное напряжение проходного ВТП в однородном электромагнитном поле с цилиндрическим ОК как функцию его диаметра и удельной электрической проводимости материала описывает выражение [3]:

$$\dot{U}(\gamma, R, t) = -j\pi\omega(\gamma, R, t)\mu_0 W_2^2 \frac{\dot{I}_0}{l_2} \times \left(R_2^2 - R^2 + \frac{2\mu_r R I_1 \left[R \sqrt{-j\omega(\gamma, R, t) \gamma \mu_r \mu_0} \right]}{R_2^2 \sqrt{-j\omega(\gamma, R, t) \gamma \mu_r \mu_0} \left[R \sqrt{-j\omega(\gamma, R, t) \gamma \mu_r \mu_0} \right]} \right), \quad (9)$$

где \dot{I}_0 – амплитуда гармонического тока возбуждения; $\omega(j, R, t)$ – круговая его частота как функция параметров ОК; R_2, R – радиусы измерительной катушки и ОК, соответственно; W_2 – количество витков измерительной катушки; I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка; $j = \sqrt{-1}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Нп/м; μ_r, γ – относительная комплексная магнитная проницаемость и удельная электропроводность материала объекта.

Таким образом, получаем выражения, учитывающие связь параметров выходного сигнала (частоты, декремента затухания, сдвига по фазе) с характеристиками ОК:

$$\alpha(\gamma, R) = \frac{r_1(\gamma, R)}{2L_1(\gamma, R)}, \quad (10)$$

$$\omega(\gamma, R) = \sqrt{\frac{1}{C_0 L_1(\gamma, R)} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_1(\gamma, R)}{L_1(\gamma, R)} \right)^2}, \quad (11)$$

$$\varphi_2(\gamma, R) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im} \left(j\omega(\gamma, R) \dot{M}(\gamma, R) \right)}{\operatorname{Re} \left(j\omega(\gamma, R) \dot{M}(\gamma, R) \right)} \right). \quad (12)$$

Из математического описания работы трансформаторного проходного ВТП (10) следует возможность многопараметрового контроля цилиндрических деталей. Изменяя длительность возбуждающего импульса (1), можно задавать его начальную амплитуду и фазу, а задавая емкость частотно-селективной цепи – устанавливать частоту сигнала. В качестве такой цепи можно использовать параллельный колебательный контур. При этом для определенных условий дополнительно повышается чувствительность ВТП за счет резонанса тока в нем. Колебательный контур можно формировать, используя паразитную емкость катушки преобразователя. С помощью квадратурных составляющих сигнала, в частности начальной амплитуды, декремента и частоты колебаний, удастся определить три параметра ОК. Таким образом, возможен одновременный контроль диаметра прутка, удельной электропроводности и магнитной проницаемости его материала.

Работу системы “трансформаторный проходной ВТП–цилиндрический ОК”, основанной на выражении (9), моделировали по следующему алгоритму: определяли параметры входной цепи из выражения (9); частоту выходного сигнала согласно (11); декремент и фазовый сдвиг выходного сигнала согласно (10) и (12); выходное напряжение системы.

Используя параметры ВТП и цилиндрических ОК, получили по приведенному выше алгоритму, теоретические зависимости частоты f (рис. 2а) и декремента затухания α выходного сигнала от диаметра d ОК (рис. 2с).

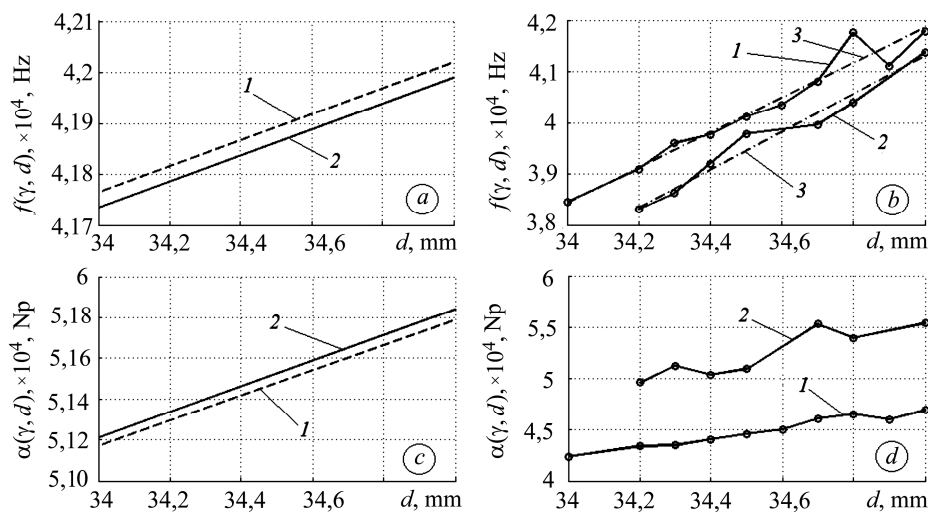


Рис. 2. Зависимость частоты сигнала ВТП (а, б) и его декремента (с, д) от диаметра ОК: а, с – моделирование; б, д – эксперимент (1 – ОК из алюминия; 2 – из бронзы; 3 – их линейный тренд).

Fig. 2. Signal frequency (а, б) and its attenuation (с, д) as a function of the object diameter: а, с – simulation; б, д – measurement data (1 – object from aluminum; 2 – from bronze; 3 – linear trend).

Результаты эксперимента и их обсуждение. В качестве ОК использовали две серии цилиндрических образцов из алюминия и бронзы с диаметрами 34÷35 мм. В процессе обработки и анализа параметров сигналов трансформаторного ВТП, работающего в режиме импульсного возбуждения, определяли гильберт-образ сигналов, а также их амплитудную и фазовую характеристики.

Частоту и декремент сигналов находили из формул

$$f(R, \gamma) = \frac{\Delta \hat{\Phi}[R, \gamma]}{2\pi \Delta T} = \frac{\Phi(t_2, R, \gamma) - \Phi(t_1, R, \gamma)}{2\pi \Delta T}, \quad (13)$$

где $\Delta \hat{\Phi}[R, \gamma]$ – накопленная за время $\Delta T = t_2 - t_1$ фаза сигнала:

$$\Phi(t, R, \gamma) = \arctg \frac{u_H(t, R, \gamma)}{u(t, R, \gamma)} + L(u_H, u),$$

$u_H(t, R, \gamma)$ – гильберт-образ сигнала $u(t, R, \gamma)$; $L(u_H, u)$ – ступенчатая функция, обеспечивающая развертку фазовой характеристики сигнала во времени;

$$\alpha(R, \gamma) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1, R, \gamma)}{\hat{U}(t_2, R, \gamma)}, \quad (14)$$

где $\hat{U}(t_1, R, \gamma)$, $\hat{U}(t_2, R, \gamma)$ – значения амплитудной характеристики сигнала в моменты времени t_1 и t_2 :

$$\hat{U}(t, R, \gamma) = \sqrt{u^2(t, R, \gamma) + u_H^2(t, R, \gamma)}.$$

Построили (рис. 2б) зависимость частоты сигнала ВТП от диаметра алюминиевых (кривая 1) и бронзовых (кривая 2) образцов, а также привели их линейный тренд (кривая 3). Выявили, что с изменением диаметра образцов меняется частото-

та сигнала ВТП, а электропроводность материала ОК влияет на нее незначительно. В то же время зависимость декремента сигнала ВТП от диаметра образцов (рис. 2d, кривая 1 – для серии алюминиевых образцов, кривая 2 – для бронзовых) близка к линейной и позволяет судить об электропроводности их материала. В целом характер экспериментальных кривых на рис. 2b и d соответствует кривым на рис. 2a и c, что свидетельствует об адекватности математической модели.

ВЫВОДЫ

Проанализирован импульсный режим работы трансформаторного проходного вихретокового преобразователя, который рассматривали как узкополосную систему. Математически описана его работа, что расширяет возможность применения за счет повышения информативности выходного сигнала. С использованием квадратурных составляющих выходного сигнала можно контролировать три параметра цилиндрического объекта контроля. Предложено математическое условие для узко- и широкополосной системы “ВТП–ОК”, что позволит при проектировании приборов вихретокового контроля задавать спектральный состав сигналов импульсного вихретокового контроля. Приведены результаты теоретического и практического исследования зависимости параметров выходного сигнала от характеристик ОК.

РЕЗЮМЕ. Досліджено можливість застосування вихрострумowego методу з імпульсним збудженням для контролю діаметра та електропровідності циліндричних об'єктів. Для опрацювання інформативних сигналів перетворювача запропоновано перетворення Гільберта та умова для вузько- та широкосмугової системи “вихрострумівий перетворювач–об'єкт контролю”, що дасть можливість на етапі проектування приладів вихрострумowego контролю задавати спектральний склад сигналів.

SUMMARY. The possibility of the use of eddy current method with pulsed mode to control the diameter and conductivity of cylindrical objects was investigated. The informative signals processing method using Hilbert transform was developed. The mathematical computation for narrowband and wideband system of “transducer–object” which enabled specifying the spectral composition of signals at the devices design phase was proposed.

1. *Тетерко А. Я., Назарчук З. Т.* Селективна вихрострумova дефектоскопія. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
2. *Учанін В. М.* Накладні вихроструміві перетворювачі подвійного диференціювання. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.
3. *Baldev Raj, Jayakumar T., and Thavasimuthu M.* Practical non-destructive testing. – India: Woodhead Publishing, 2002. – 184 p.
4. *Johnson M. J.* Pulsed eddy-current measurements for materials characterization and flaw detection. – UK: The University of Surrey, 1997 – 154 p.
5. *Dharmasena K. P. and Wadley N. H. G.* Modeling multifrequency eddy current sensor interactions during vertical Bridgman growth of semiconductors // *Rev. Sci. Instrum.* – 1999. – **70**, № 7. – P. 3125–3142.
6. *Bowler J. and Johnson M.* Pulsed eddy-current response to a conducting half-space // *IEEE Trans. Magn.* – 1997. – **33**, № 3. – P. 2258–2264.
7. *Pavo J.* Numerical calculation method for pulsed eddy-current testing // *IEEE Trans. Magn.* – 2002. – **38**, № 2. – P. 1169–1172.
8. *Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В.* Дослідження імпульсного режиму збудження вихрострумівих перетворювачів // Тези доп. VII Нац. наук.-техн. конф. (Київ, 20–23 лист. 2012 р.). – С. 439.
9. *Куц Ю. В., Лысенко Ю. Ю.* Импульсный вихретоковый контроль объектов цилиндрической формы // *Вестник НТУУ “КПИ”*. Сер. Приборостроение. – 2013. – № 45. – С. 69–75.
10. *Горкунов Б. М., Тюна И. В., Тищенко А. А.* Модель вихретокового преобразователя проходного типа с токопроводящим цилиндрическим образцом // *Техн. електродинаміка*. – 2007. – Ч. 5. – С. 45–48.
11. *Zakrevskiy O. F. and Movchanuk A. V.* The model of Eddy-Current Probe // *Scientific proceedings: “NDT Days 2012”*. – 2012. – № 1 (133). – P. 252–254.

Получено 10.02.2015