


RESEARCH OF EDDY CURRENT TESTING SYSTEM FOR COATING THICKNESS
**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВИХРЕТОКОВОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

 Проф., д.т.н. Куц Ю.В.¹, доц., к.т.н. Петрик В.Ф.², Лысенко Ю.Ю.², Дугин А.Л.²
¹ Институт информационно – диагностических систем, Национальный авиационный университет – Киев, Украина

² Приборостроительный факультет, Национальный технический университет Украины

”Киевский политехнический институт” – Киев, Украина

 e-mail: j.lysenko@kpi.ua

Abstract: *This article describes the use of eddy current NDT method with pulse excitation mode for testing the coating thickness of workpiece made of aluminum, bronze and steel. The algorithm was used for analysis of informative signals and it included determining Hilbert images of these signals to find their amplitude and phase characteristics. The experimental results are shown and the general nature relation of the informative signals parameters on the dielectric coating thickness are discussed.*

KEY WORDS: *PULSED EDDY CURRENT MODE, HILBERT TRANSFORM, FREQUENCY AND ATTENUATION OF SIGNAL*

1. Введение

Применение в средствах неразрушающего контроля современных цифровых методов обработки информативных сигналов позволяет повысить их эффективность и расширить функциональные возможности. Традиционный вихретоковый метод неразрушающего контроля (ВТНК) с использованием гармонического сигнала возбуждения при оценке толщины диэлектрического покрытия на объекте контроля (ОК) заключается в анализе таких информативных параметров, как амплитуда и фаза принятых сигналов [1]. Сегодня наряду с традиционным методом применяют метод ВТНК с импульсным возбуждением. Например, в работе [2] рассмотрено совместное использование гармонического и импульсного режимов возбуждения электромагнитного поля при контроле стенок трубы с целью увеличения числа контролируемых характеристик ОК. Положительный эффект достигается за счет использования при обработке информативного сигнала вихретокового преобразователя (ВТП) дополнительных информативных параметров, таких как затухание сигнала ВТП и изменение временного положения точки пересечения нулевого уровня этим сигналом. В работе [3] описан импульсный режим ВТНК, который применяли для оценки степени коррозионного поражения металла. Предложенный в [3] метод контроля так же основан на оценке временного положения точки пересечения нулевого уровня сигналом ВТП.

Применение метода обработки сигналов ВТНК на основе преобразования Гильберта позволяет получать амплитудные и фазовые характеристики сигнала (АХС и ФХС) ВТП, по которым можно оценить дополнительные информативные параметры – затухание и частоту этого сигнала [4].

Таким образом, ВТНК с импульсным возбуждением может существенно дополнить известные методы ВТНК за счет возможности анализа таких параметров сигналов как частота, дисперсия фазы, декремент сигнала и временное положение характерных точек сигнала.

Дополнительным преимуществом современных информационных технологий является возможность пространственного разделения преобразовательной части системы

и блока обработки сигналов за счет применения беспроводных технологий передачи данных [5]. Такое технологическое решение позволяет проводить контроль объектов в труднодоступных, удаленных, пространственно разнесенных местах.

Целью данной работы является разработка и анализ беспроводной системы ВТНК толщины диэлектрического покрытия на проводящей основе, а также выявление информационных параметров сигналов накладного ВТП в режиме импульсного возбуждения.

2. Проведение эксперимента

2.1 Описание системы

На рис.1 приведена структура разработанной системы ВТНК. Преобразовательный блок состоит из накладного трансформаторного ВТП, на первичную катушку которого поступает возбуждающий импульсный сигнал от источника тока (ИТ). Сигнал измерительной катушки ВТП усиливается и оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Полученные данные записываются в буфер памяти для последующей передачи в блок обработки данных. Эта передача осуществляется через микроконтроллер (МК) и беспроводной модуль связи. Беспроводной режим реализован на базе Bluetooth модуля третьего класса мощности с внешней антенной, который обеспечивает связь между блоками обработки данных и преобразования на расстоянии до 300 метров. Синхронизация работы основных элементов блока преобразования обеспечивается блоком управления БУ.

Блок обработки данных включает приемник (Пр), персональный компьютер (ПК) со специальным программным обеспечением (ПО).

2.2 Методика проведения эксперимента

На первом этапе проведения эксперимента было проанализировано влияние характеристик материала заготовок на параметры информативного сигнала накладного трансформаторного ВТП, работающего в импульсном режиме. В качестве ОК использовались заготовки из алюминия, бронзы и стали толщиной,

значительно превышающей глубину проникновения вихревых токов. На втором этапе анализировалось влияние различной толщины диэлектрического покрытия ОК из указанных выше материалов на параметры информативного сигнала ВТП.

Необходимое программное обеспечение (ПО) было разработано с применением пакета Matlab. В ПО была предусмотрена реализация алгоритма анализа сигналов ВТНК во временной области на базе преобразования Гильберта и получение АХС и ФХС.

На возбуждающую катушку с количеством витков $W_1 = 80$ трансформаторного накладного ВТП подавался импульсный сигнал с источника тока, силой тока $I = 5 \text{ мА}$, периодом повторения $T = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, продолжительностью $\tau = 62.4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$:

$$i(t) = \begin{cases} 5 \text{ мА}, & t_1 + kT_n < t < t_1 + \tau + kT_n \\ 0 \text{ А}, & t_1 + \tau + kT_n < t < t_1 + T_n(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

Аналоговый информативный сигнал $u(t)$ с измерительной катушки ВТП ($W_2 = 420$) оцифровывали в АЦП, в результате чего были получены выборки $u[j]$, $j = 1, \dots, 10000$. Дискретизация сигнала выполнялась с периодом $T_{\text{д}} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Далее выборка $u[j]$ передавалась через беспроводной модуль связи в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

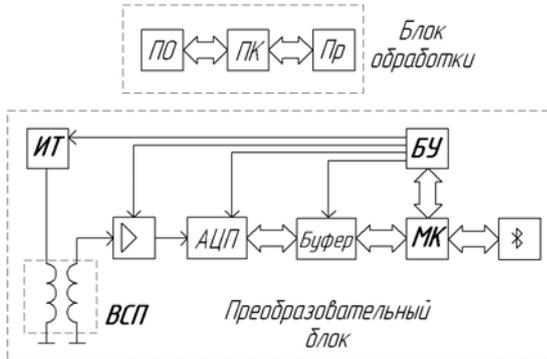


Рис.1. Разработанная вихретоковая система контроля диэлектрических покрытий

2.3 Алгоритм обработки сигналов

Модель информативного сигнала ВТП представляется в виде затухающих гармонических колебаний:

$$u_{\text{вТП}}(t, h, \gamma) = U_m e^{-\alpha(h, \gamma)t} \cdot \cos[2\pi \cdot f(h, \gamma) \cdot t] + u_{\text{ш}}(t), \quad t \in (t_1, t_2), \quad (2)$$

где U_m - амплитудное значение информационной составляющей сигнала ВТП, $\alpha(h, \gamma)$ - декремент сигнала, $f(h, \gamma)$ - частота колебаний сигнала, t - текущее время, (t_1, t_2) - интервал времени анализа сигнала ВТП (реакция на скачек амплитуды возбуждающего сигнала), $U_{\text{ш}}(t)$ - шумовая составляющая сигнала. В зависимости от материала основы и толщины диэлектрического покрытия изменяется частота и затухание этих колебаний.

В процессе обработки и анализа характеристик информативных сигналов ВТП для каждой из выборок (алюминиевого, бронзового и стального ОК с различными по толщине диэлектрическими покрытиями) были определены Гильберт - образы этих сигналов:

$$u_H[j, h, \gamma] = \mathbf{H}[u_{\text{вТП}}[j, h, \gamma]] \quad (3)$$

где \mathbf{H} - оператор дискретного преобразования Гильберта. После этого оценивались фазовая и амплитудная характеристики информативных сигналов [6]:

$$\hat{\Phi}[j, h, \gamma] = \arctg \frac{u_H}{u_{\text{вТП}}} + \mathbf{L}(u_H[j, h, \gamma], u_{\text{вТП}}[j, h, \gamma]), \quad (4)$$

$$\hat{U}[j, h, \gamma] = \sqrt{u_{\text{вТП}}^2[j, h, \gamma] + u_H^2[j, h, \gamma]} \quad (5)$$

где \mathbf{L} - оператор развертывания ФХС за пределами интервала однозначности функции \arctg .

Для анализа влияния характеристик ОК на сигнал ВТП, в качестве информативных параметров были выбраны частота $f(h, \gamma)$ и декремент $\alpha(h, \gamma)$ этих сигналов. По ФХС определялась средняя частота информативных сигналов ВТП согласно формуле:

$$f(h, \gamma) = \frac{\Delta \hat{\Phi}[h, \gamma]}{2\pi \Delta T} = \frac{\Phi(t_2, h, \gamma) - \Phi(t_1, h, \gamma)}{2\pi \Delta T}, \quad (6)$$

де $\Delta \hat{\Phi}[h, \gamma]$ - накопленная за время ΔT фаза сигнала ВТП.

Принятие гипотезы о линейном изменении во времени функции $\hat{\Phi}[j, h, \gamma]$ позволяет применить для ее сглаживания один из методов определения линейной регрессии, например, метод Барлетта-Кенуя. Данный метод относительно прост и может использоваться для анализа небольших по объему выборок.

Определение частоты сигналов ВТП проводилось с использованием линейного тренда функции $\hat{\Phi}[j, h, \gamma]$:

$$f_{\text{Л}}(h, \gamma) = \frac{\Delta \hat{\Phi}_{\text{Л}}[h, \gamma]}{2\pi \Delta T}, \quad (10)$$

где $\Delta \hat{\Phi}_{\text{Л}}[h, \gamma]$ - накопленная за время ΔT фаза сигнала ВТП, полученная по функции линейной регрессии: для заготовок из алюминия и бронзы $\Delta \hat{\Phi}_{\text{Л}}(h, \gamma) = \hat{\Phi}[j = 4500, h, \gamma] - \hat{\Phi}[j = 1, h, \gamma]$, для стали - $\Delta \hat{\Phi}_{\text{Л}}(h, \gamma) = \hat{\Phi}[j = 2001, h, \gamma] - \hat{\Phi}[j = 1, h, \gamma]$.

Декремент информативного сигнала ВТП определялся согласно выражению:

$$\alpha(h, \gamma) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1', h, \gamma)}{\hat{U}(t_2', h, \gamma)}. \quad (11)$$

где $\hat{U}(t_1', h, \gamma)$, $\hat{U}(t_2', h, \gamma)$ - значения АХС в моменты времени t_1' и t_2' , соответственно. Для повышения точности определения декремента сигнала проводилась экспоненциальная аппроксимация АХС ВТП.

3. Обсуждение полученных результатов

Сигналы ВТП, полученные на первом этапе эксперимента при контроле заготовок из алюминия, бронзы и стали без покрытий, приведены на рис.2. Разные значения электропроводности и магнитной проницаемости материалов заготовок привели к изменению частоты и скорости затухания сигнала ВТП. АХС этих сигналов представлены на рис.3.

На рис.4 изображен график сигналов при контроле заготовки из стали с разной толщиной диэлектрического покрытия. Кривая 1 соответствует фрагменту сигналу ВТП при контроле заготовки без покрытия, кривая 2 - покрытие 1.62мм, кривая 3 - 4.90мм. Как видно, с увеличением толщины покрытия влияние вихревых токов ОК на информативный сигнал ВТП уменьшается. При этом амплитудное значение сигнала увеличивается, а их частота остается постоянной.

На рис. 5 приведен график полученной зависимости $\alpha = F(h)$, который указывает на увеличение декремента сигнала ВТП при уменьшении толщины диэлектрического покрытия в пределах одного материала. Из сопоставительного анализа этих кривых можно сделать вывод о том, что общий вид кривой изменения декремента сигналов ВТП по отношению к толщине покрытия на любой основе является экспоненциальным.

Так же из рис. 5 видно, что характеристики материала основы заготовок влияют на уровень наклона полученных кривых. Для заготовки из стали с покрытием 1.90мм незначительное отклонение результата от общего вида функциональной зависимости может быть следствием имеющихся скрытых дефектов, изменением характеристик образцов или погрешностью определения реального значения толщины покрытия.

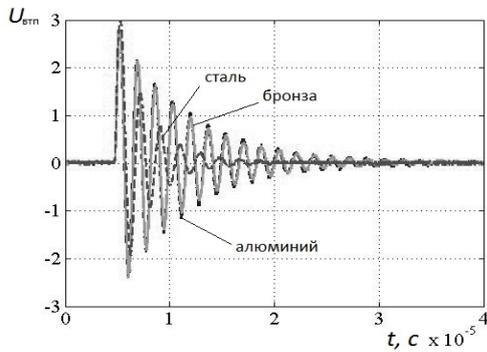


Рис.2. График участка сигналов ВТП

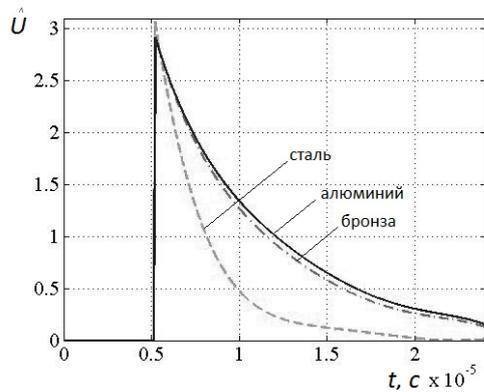


Рис.3. Амплитудная характеристика сигналов ВТП

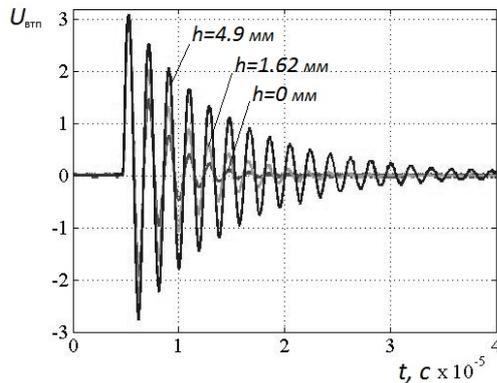


Рис.4. Зависимость амплитуды сигналов ВТП от толщины покрытия

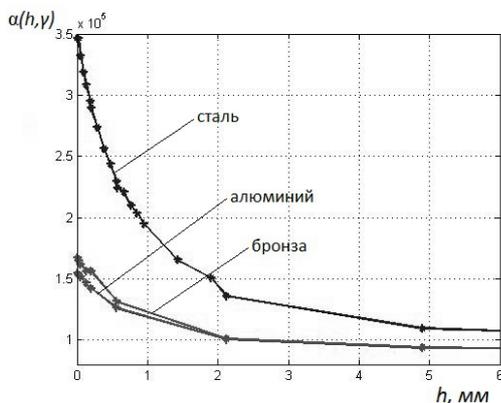


Рис.5. Зависимость декремента сигналов ВТП от толщины покрытия

Результаты определения частоты сигналов ВТП как функции от толщины диэлектрического покрытия приведены на рис. 6. Как видно из графиков судить о толщине покрытия по такому параметру информативного сигнала как частота довольно сложно. Однако наблюдается существенное влияние магнитной проницаемости материалов заготовок на значение частоты сигнала ВТП, при чем это влияние усиливается с уменьшением толщины покрытия.

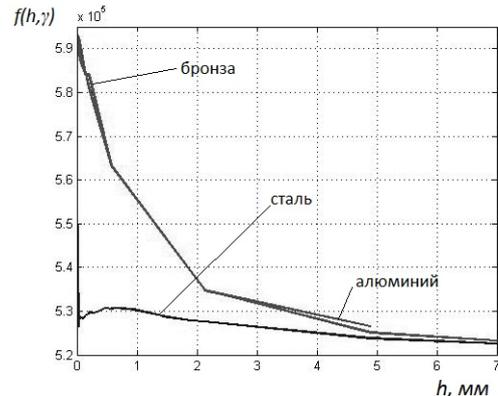


Рис.6. Зависимость частоты сигналов ВТП от толщины покрытия

4. Заключение

Установлено, что при контроле толщины диэлектрического покрытия заготовок из различных материалов в импульсном режиме, декремент информативного сигнала преобразователя зависит от толщины покрытия и магнитной проницаемости материала заготовок. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер.

Предложенная система импульсного ВТНК дает возможность исследовать объекты в труднодоступных местах за счет использования беспроводной связи Bluetooth. Показана возможность использования при анализе сигналов импульсного ВТНК таких параметров как декремент и частота колебаний информационного сигнала. Установлен общий характер зависимости этих параметров от толщины покрытия заготовок.

5. Литература

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2 т. / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2003. Т. 2: Вихретоковый контроль. – 2003. – 688с.
2. D. Vasic, V. Bilas, D. Ambrus, Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 53, no. 4, pp. 1289-1294, Aug. 2004
3. R. A. Morris, Quantitative Pulsed Eddy Current Analyses, Proc. of the 10th Symposium on NDE, pp. 90-97, 1975.
4. Куц Ю. В. Импульсный вихрострумовый контроль объектов цилиндрической формы / Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю. // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 45. – С. 69–75.
5. Дугін О.Л. Мобільний вихрострумовий дефектоскоп / Дугін О.Л., Кустовський О.Л., Петрик В.Ф. // Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики: XX-та Міжнар. конф. та вист., 01 - 05 жовтн. 2012 р. – 2012. – с. 239.
6. Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя, 2009. – 383 с.