



Automated Eddy Current System for Express Monitoring

Yurii KUTS¹, Iuliia LYSENKO^{1,2}, Anatolii PROTASOV¹,
Valentyn PETRYK¹, Alexander ALEXIEV³

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: j.lysenko@kpi.ua

² LLC “Dyagnostychny Prylady”, Kyiv, Ukraine,

³ Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
e-mail: alexiev@imbm.bas.bg

Abstract

In operation, the materials of machine and aircraft elements are exposed to significant mechanical loads and temperature changes. It leads to various defects and damage to elements, components of mechanisms, and devices. So for the safe operation of mechanisms and devices, it is necessary to inspect their elements, and then carry out the necessary work on their replacement in time. In some cases, the inspection or diagnostics of the elements is accompanied by technical difficulties caused by the large size of the objects and limited access to local places. The author of the article suggests using wireless technologies to transmit signals from the probe unit to the data processing one. It allows the separation of the measurement unit and data analysis unit in space and also it simplifies the practical implementation of robotic systems for scanning objects or their elements in hard-to-reach places. The article describes the developed intelligent wireless system of eddy current control of structural materials. Also, the method of information processing and visualization is described. The method can be used to automate decision-making in the system of monitoring the condition of large objects. Special software (using Python) has been developed to process the object scanning results. It allows obtaining the distribution of the values of the signal informative parameters depending on the coordinates of the object.

Keywords: testing system, decision-making system, signal characteristics, information parameters, C-scan

Автоматизированная вихретоковая система экспресс мониторинга объектов

Юрий КУЦ, Юлия ЛЫСЕНКО, Анатолий ПРОТАСОВ,
Валентин ПЕТРИК, Александр АЛЕКСИЕВ

1. Введение

Вихретоковый неразрушающий контроль (ВТК) является одним из наиболее распространенных видов контроля крупногабаритных изделий из конструкционных материалов. Современная номенклатура объектов контроля (ОК) и использование новых материалов требует постоянного развития и совершенствования методов и средств контроля [1]. В последнее время этот процесс развивался по нескольким направлениям [2, 3]. Первый из них заключался в исследовании методов вихретокового контроля, которые основаны на многочастотных компонентах сигналов для реализации многопараметрического контроля [4, 5, 6]. В этом случае датчик устройства с многочастотным анализом использует изменения электропроводности и магнитной проницаемости материала (например, стали) для отслеживания изменений микроструктуры в процессе обработки. Другое направление развития связано с использованием импульсного режима возбуждения вихретокового преобразователя

(ВТП), что также способствует расширению функциональных возможностей контроля [7, 8, 9]. Последние результаты исследования применения импульсного вихретокового НК для обнаружения и идентификации дефектов и повреждений в углеродном волокне показывают хорошие перспективы [10]. Это особенно важно, потому что такой материал широко используется в авиационной промышленности, но его относительная склонность к повреждениям от ударов приводит к определенным требованиям к эффективности методов НК.

Также постоянно ведутся исследования по совершенствованию конструкций ВТП, в частности, в статье [11] представлены результаты разработки и исследования зондов двойного дифференцирования, повышающих чувствительность к некоторым типам дефектов. Благодаря высокой чувствительности многие сложные задачи контроля и поиска подповерхностных дефектов в многослойных конструкциях могут быть решены с помощью таких преобразователей. При этом высокая чувствительность достигается за счет сохранения стабильного зазора между ВТП и контролируемой поверхностью.

Внедрение ВТК часто вызывало технологические трудности из-за больших размеров узлов или агрегатов объектов и ограниченного доступа к их локальным местам. Проблема может быть решена путем использования беспроводных технологий передачи сигналов ВТП от блока преобразователей к блоку обработки данных [12, 13, 14]. Это позволит пространственно разделить часть датчиков и блок обработки сигналов и значительно упростит практическую реализацию контроля крупных объектов. Однако эти вопросы редко затрагивались при разработке средств контроля. Кроме того, представляет определенный интерес использование различных современных методов цифровой обработки сигналов в инструментах ВТК. Так, авторы [15] предложили использовать преобразование Гильберта для получения амплитудных и фазовых характеристик сигнала (АСХ и ФСП) и их последующего анализа.

В этой статье рассмотрена разработка и анализ экспериментальной модели беспроводной системы ВТК, в которой реализованы разные режимы возбуждения и разные способы обработки сигналов и представления информации соответствующими способами. Представлено исследование разработанной системы ВТК с беспроводной связью между блоком преобразователей и блоком обработки и анализа данных. Разрабатываемая система ВТК должна обеспечивать:

- возможность осмотра узлов или агрегатов, имеющих ограниченный доступ к их локальным частям;
- реализация различных режимов вихретокового контроля;
- адаптивный выбор метода и алгоритма обработки сигналов ВТП;
- визуализация результатов в виде 2D и 3D графиков;
- архивирование результатов контроля с последующей их загрузкой в базу данных.

2. Алгоритм определения информативных параметров сигналов

Информационный сигнал ВТП может быть представлен моделью гармонического колебания с гауссовским шумом:

$$u_{exp}(t, \omega) = U_m e^{-\alpha(\omega) \cdot t} \cos(2\pi f(\omega) \cdot t) + u_n(t), \quad t \in (t_1, t_2) \quad (1)$$

где: U_m – амплитуда сигнала ВТП, $\alpha(\omega)$ – затухание, $f(\omega)$ – частота, t – текущее время, (t_1, t_2) – период анализа, $t \in (t_1, t_2)$, u_n – шумовая составляющая, ω – вектор характеристик ОК. Известно, что частота и затухание этих колебаний изменяются в зависимости от таких характеристик ОК, как материал, форма и геометрия, наличие дефектов и др. [16].

Обработка и анализ характеристик сигнала состоят из этапов, представленных на рис. 1. Для уменьшения влияния шумов и повышения точности определения коэффициента затухания и частоты собственных колебаний использовались аппроксимация АХС и сглаживание ФХС ВТП [17].

Для сглаживания функции ФХС использовали метод линейной регрессии Бартлетта-Кенуи. Метод основан на анализе временной последовательности экспериментальных данных и разделении выборки $\Phi[j, \omega]$ на три примерно равные группы.

Суммы $\sum \Phi[j, \omega]$ в каждой группе и $\sum t_j$ определяются соответственно Φ_1, Φ_2, Φ_3 и t_1, t_2, t_3 . Коэффициенты линейной регрессии оцениваются по формуле:

$$\kappa = (\Phi_3 - \Phi_1) / (t_3 - t_1), b = \Phi - \kappa \cdot t \quad (2)$$

где $\Phi = \sum \Phi[j, \omega] / 3M$ и $t = \sum t_j / 3M$, M – количество элементов в группе.



Рис. 1. Методика обработки сигналов ВТП

Собственная частота сигнала ВТП определялась с помощью ФХС по формуле:

$$f(\omega) = \Delta \Phi_{in}[\omega] / (2\pi \Delta T) \quad (3)$$

где $\Delta\Phi_{lin}[\omega]$ – тренд функции фазы сигнала ВТП, который накапливается за время ΔT (например, за время $(t_2 - t_1)$).

Экспоненциальная аппроксимация функции АХС использовалась для повышения точности определения декремента информационного сигнала. Определено, что для повышения точности оценки факторно-экспоненциальной аппроксимации очень важно учитывать часть АХС, соответствующую ранним периодам информационного сигнала. Ранние периоды соответствуют АХС с максимальным наклоном.

Затухание сигнала определялось с помощью АХС по формуле:

$$a(\omega) = (1/\Delta T) \cdot \ln(U(t_1, \omega) / U(t_2, \omega)) \quad (4)$$

где $U(t_1, \omega)$, $U(t_2, \omega)$ – значения САР в моменты времени t_1 и t_2 .

Блок принятия решений анализирует и оценивает данные, а затем предоставляет результаты диагностики.

3. Эксперимент и исследование

3.1. Структура экспериментальной модели

Структура разработанной системы ВТК представлена на рис. 2. Преобразовательный блок состоит из двойного дифференциального ВТП, содержащего две первичные и две вторичные катушки. Параметры ВТП: $R_1=8,2$ Ом, $L_1=100,8$ мкГн, $R_2=14,4$ Ом, $L_2=353,8$ мкГн.

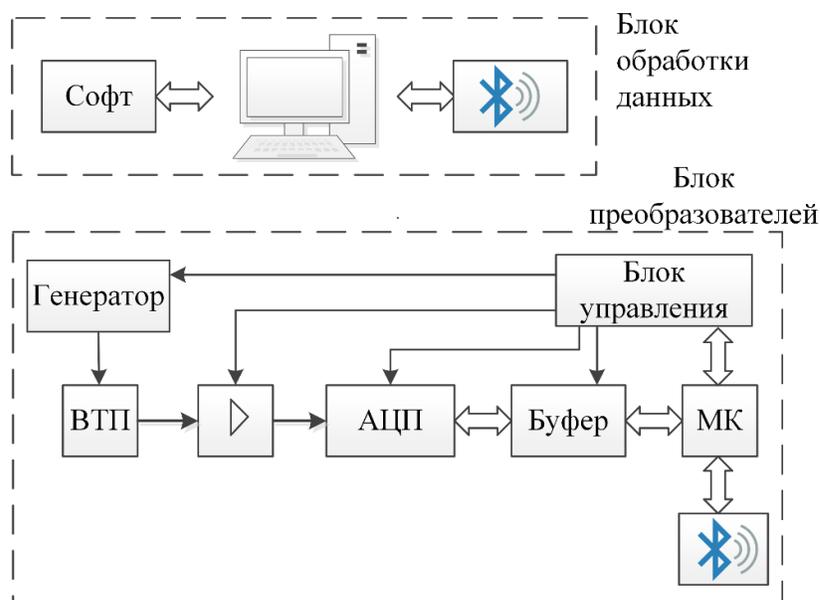


Рис. 2. Разработанная система вихретокового неразрушающего контроля

Возбуждающая катушка получает импульсный сигнал от генератора сигналов (источника тока), а измерительная катушка формирует сигнал, который усиливается и оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Полученные данные сохраняются в хранилище (буфере) для последующей передачи в блок обработки

данных. Эта передача осуществляется за счет микроконтроллера (МК) и блока беспроводной связи. Модуль Bluetooth (третий класс мощности) используется в качестве блока беспроводной связи и имеет внешнюю антенну для обеспечения связи между блоками обработки и преобразования данных на определенном расстоянии. Максимальное расстояние между блоками с приемлемым качеством соединения составляет 300 м. Работа основных узлов преобразовательного блока синхронизируется блоком управления. Блок обработки данных состоит из приемника и персонального компьютера со специальным программным обеспечением.

Реализация преобразовательного блока с ВТП представлен на рис. 3.

Для проверки работоспособности системы использовалась пластина из металлических сплавов с искусственными трещинами различной глубины (от 0,1 мм до 3 мм) и шириной 1 мм (рис. 4). Материал пластин имеет маркировку AD31T5 и состоит из алюминия, магния и кремния (Al-Mg-Si). Этот материал используется в кабинах самолетов и вертолетов, оконных проемах самолетов.

Пластина сканировалась с шагом 1 мм двойным дифференциальным датчиком, входящим в состав блока преобразователя.



Рис. 3. Преобразовательный блок системы ВТК

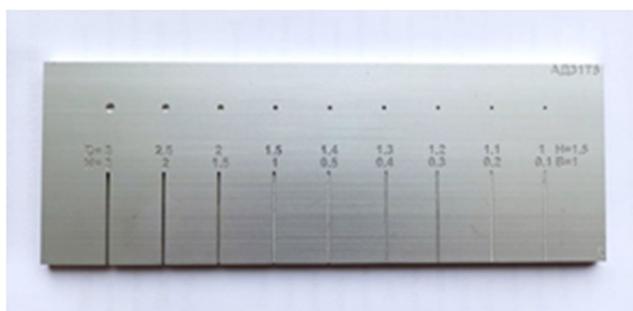


Рис. 4. Образец для тестирования

3.2. Исследование и обсуждение результатов

Импульсный ток с периодом $T_n=50$ мкс и длительностью $\tau=175$ нс использовался для возбуждения первичной катушки дифференциального ВТП. Принятый сигнал от вторичных катушек ВТП имел вид затухающих гармонических колебаний и может быть представлен уравнением (7). Анализ принятых сигналов ВТП проводился с помощью разработанного программного обеспечения, в основе которого лежит обработка сигналов ВТП во временной области с помощью преобразования Гильберта и получение АХС и ФХС и их последующий анализ.

Для анализа из набора сигналов ВТП выбирались максимальные значения пиков амплитуды. Распределение пиковых значений амплитуды ВТП с привязкой ко всем сканируемым точкам поверхности ОК показано на рис. 6а в виде С-скана, где 1 – ОК, 2 – амплитуда сигнала [18]. Распределение амплитуд показывает, что трещина в ОК приводит к значительному увеличению значений амплитуд вблизи нее, но уменьшению над самой трещиной, что показано на рис. 6б. На рис. 6 показано распределение значений амплитуд пиков без значений, полученных вблизи границ ОК. Это связано с влиянием краевых эффектов на значения сигналов.

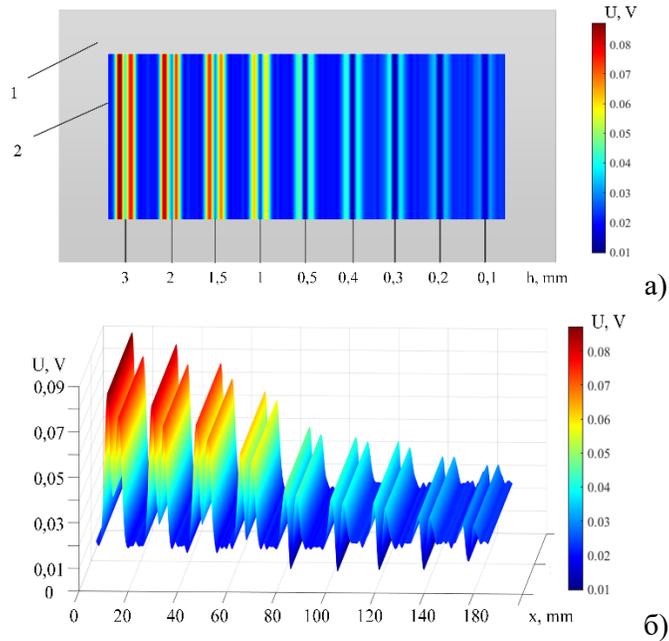


Рис. 5. Распределение амплитуды сигнала на поверхности ОК в режиме С-скан (а) и режиме 3D визуализации (б)

На рис. 6 представлена зависимость значений частоты $f(h)$ и затухания $\alpha(h)$ сигнала дифференциального ВТП от глубины трещины в ТО. Эти зависимости можно описать формулами: полиномом 5-й степени в случае использования собственной частоты в качестве информационного параметра и логарифмической зависимостью в случае затухания сигнала. Очевидно, что полученные таким образом зависимости можно использовать для количественной оценки параметров трещин.

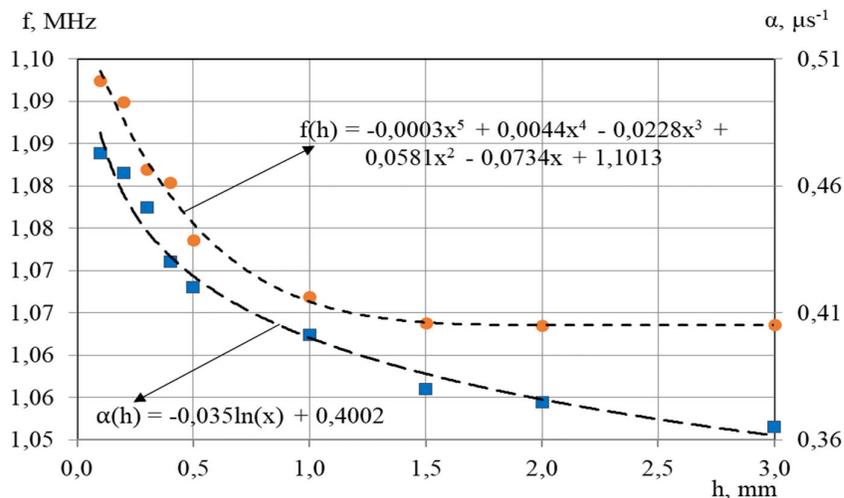


Рис. 6. Зависимость значений собственной частоты и затухания сигнала ВТП

4. Выводы

В статье показано, что импульсное возбуждение в ВТК в сочетании с цифровой обработкой сигналов на основе дискретного преобразования Гильберта существенно дополняет известные методы за счет использования для анализа таких параметров сигналов, как собственная частота, пиковое значение амплитуды и затухание сигнала. Разработанная автоматизированная вихретоковая система предназначена для контроля крупногабаритных деталей, узлов механизмов и аппаратов, доступ к которым ограничен.

Предложенная система имеет в своем составе беспроводные технологии для передачи сигналов и предусматривает новый метод обработки сигналов, описанный в статье. Диагностическая система обеспечивает анализ и визуализацию полученных данных в режиме реального времени и использует эти данные для принятия решений о состоянии крупных объектов. Методика была апробирована и проверена на примере импульсной обработки сигнала ВТП при контроле пластины с трещинами различной глубины.

В статье приведены результаты контроля пластины из металлического сплава с искусственными трещинами разной глубины. Экспериментально установлено, что в процессе дефектоскопии образца относительная погрешность определения размера трещины по частоте информационного сигнала ВТП не превышает 0,2 %, по амплитуде – 1,5 %.

Литература

1. S.S. Udpa, P.O. More, Eds, Nondestructive testing handbook (third It is experimentally established that in the process edition): Electromagnetic testing, American Society for NDT, 2004.
2. O. Ostash, V. Fedirko, and S. Bychkov, "Mekhanika ruinovannia i mitsnist materialiv" [Fracture mechanics and strength of materials] (in Ukrainian), Vol. 9. Mitsnist i dovhovichnist materialiv litaka ta konstruktyvnykh elementiv [Strength and durability of airplane materials and structural elements] (in Ukrainian), Lviv, Spolom, 2007.

3. G. S. Tymchik, O. O. Podolian, A. Pavlovyeh, I. Lysenko, P. Komada, and A. Kozbakova, "Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines," Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2018.
4. W. Yin, and A. Peyton, Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors, NDT&E International, pp. 43-48, 2006.
5. S. J. Dickinson, R. Binns, W. Yin, C. Davis, and A. J. Peyton, "The Development of a Multi-frequency Electromagnetic Instrument for Monitoring the Phase Transformation of Hot Strip Steel," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp. 1091-1096, 2005.
6. Y. Kalenychenko, V. Bazhenov, V. Koval, and S. Ratsebariy, "Determination of mechanical properties of paramagnetic materials by multi-frequency method," International Journal «NDT Days», 2 (1), pp. 406-416, 2019.
7. A. Sophian, G. Y. Tian, and M. Fan, "Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: a review," Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30, pp. 500–514, 2017.
8. M.J. Johnson, Pulsed eddy-current measurements for materials characterization and flaw detection, University of Surrey, UK, 1997.
9. D. Vasic, V. Bilas, and D. Ambrus "Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes." IEEE Trans. Instrum. Meas, 53 (4), pp. 1289-1294, 2004.
10. J. Wu, D. Zhou, and J. Wang, "Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current testing," Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT), IEEE Far East Forum on., pp. 181–185, 2014
11. V. Uchanin, Nakladni vykhrostrumovi peretvorjuvachi podvijnogho dyferencijuvannya [Surface double differential type eddy current probes] (in Ukrainian), Lviv, Spolom, 2013.
12. A.P. Kren, M.N. Delendyk, and V.P. Ivanov, Industry 4.0: Transformations in Non-Destructive Testing. Science and innovation, 2 (192), pp. 28–32, 2019.
13. V.F. Petryk, R.M. Galagan, A.G. Protasov, A.V. Muraviov, and I.I. Lysenko, "Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices," Devices and methods of measurements, 11 (4), pp. 272-278, 2020.
14. I. Javorskyj, R. Yuzefovych, P. Matsko, and I. Kurapov, "Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation," Digital Signal Processing, 116 (103113), 2021.
15. I. Lysenko, Y. Kuts, S. Maievskyi, A. Protasov, and O. Dugin "Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing," 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 594-97, 2018.
16. I. Lysenko, Y. Kuts, A. Protasov, M. Redka, and V. Uchanin, "Enhanced feature extraction algorithms using oscillatory-mode pulsed eddy current techniques for aircraft structure inspection," Transactions on Aerospace Research, 3 (264), pp. 1-16, 2021.
17. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Y., Protasov, A. and Uchanin, V., 2020, "Advanced Signal Processing Methods for Inspection of Aircraft Construction Materials." Transactions on Aerospace Research. 259(2). pp. 27-35.
18. Y. Lazarev, Modeling processes and systems in MATLAB [Modelyrovanye protsessov y system v MATLAB] (in Russian), Kyiv, BHV, 2005.