

УДК 620.179.14

В. Г. БАЖЕНОВ, К. А. ГЛЬОЙНИК, С. В. ХОДНЕВИЧ**ОРТОГОНАЛЬНИЙ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВИХРОСТРУМОВИХ ДЕФЕКТОСКОПІВ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ**

В даній статті розглянуті особливості використання ортогональних методів вимірювання параметрів сигналів при проектуванні вихрострумів дефектоскопів (ВД) на базі мікроконтролерів. Аналізується запропонована авторами нова структура дефектоскопа, яка має один вимірювальний канал, реалізує ортогональний метод вимірювання, має дуже мале енергоспоживання, малі габарити і відповідну вартість. Проведені експериментальні дослідження запропонованої структури ВД на спеціальному експериментальному макеті, де за допомогою високоточного синтезатора сигналів SDG102, фірми SIGLENT, проведено імітацією можливих дефектів які можуть призводити як до зміни фази так і амплітуди вимірювального сигналу, що підтвердило високі метрологічні можливості цієї структури.

Ключові слова: вихрострумівий дефектоскоп, ортогональний метод, синтезатор частоти, вихрострумівий перетворювач, прямий синтез, мікроконтролер, DSP процесор, LabVIEW, аналого-цифровий перетворювач, фільтр нижніх частот.

В данной статье рассмотрены особенности использования ортогональных методов измерения параметров сигналов при проектировании вихротоковых дефектоскопов (ВД) на базе микроконтроллеров. Анализируется предложенная авторами новая структура дефектоскопа, которая имеет один измерительный канал, реализует ортогональный метод измерения, имеет очень малое энергопотребление, малые габариты и соответствующую стоимость. Проведенные экспериментальные исследования предложенной структуры ВД на специальном экспериментальном макете, где с помощью высокоточного синтезатора сигналов SDG102, фирмы SIGLENT, проведено имитацию возможных дефектов, которые могут приводить как к изменению фазы, так и амплитуды измерительного сигнала, что подтвердило высокие метрологические возможности этой структуры.

Ключевые слова: вихротоковый дефектоскоп, ортогональный метод, синтезатор частоты, вихротоковый преобразователь, прямой синтез, микроконтроллер, DSP процессор, LabVIEW, аналого-цифровой преобразователь, фильтр нижних частот.

In this article has been considered features of the using orthogonal methods for measuring signal parameters during the design of eddy-current flaw detectors based on microcontrollers. The proposed new structure of the flaw detector have been analyzing. The structure has one measuring channel, implements an orthogonal measurement method, has very low energy consumption, small size and low cost. Experimental investigations the proposed structure of eddy-current flaw detectors have been done in a special experimental model, where using the high-precision signal synthesizer SDG102, firm SIGLENT, conducted simulation of possible defects that can lead to phase and amplitude changes of the measurement signal. That confirmed the high metrological capabilities of this structure.

Keywords: eddy current defectoscope, orthogonal method, frequency synthesizer, eddy current converter, direct synthesis, microcontroller, DSP processor, LabVIEW, analog-to-digital converter, low pass filter.

Вступ. Вихрострумівий контроль є одним із найпоширеніших на даний час. Для отримання максимальної універсальності і достовірності контролю в сучасних вихрострумівих дефектоскопах використовують амплітудно-фазовий метод, який потребує визначати амплітуду і фазу вимірювального сигналу.

На даний час відомі серійні, багатофункціональні вихроструміві дефектоскопи, на базі сучасних DSP процесорів, але вони мають високу вартість, великі габарити та енергоспоживання.

Мета роботи. Дослідити можливість створення вихрострумівого дефектоскопу, точність якого не буде поступатися існуючим, але вартість та енергоспоживання будуть значно меншими.

Відомо[1], що вимірювачі амплітуди та фазового зсуву вимірювального сигналу, які використовують ортогональний метод виміру, являються найбільш точними. Враховуючи вищезазначене, а також сучасний стан електроніки, а саме: появу мікросхем синтезаторів частоти прямого цифрового синтезу (DDS) з малим енергоспоживанням, керованих мікроконтроле-

рами, а також мікросхем помножувачів сигналів, та мікроконтролерів з вбудованими аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), вважаємо за доцільне при розробці ВД використовувати ортогональний метод виміру.

Функціональна схема ВД яка реалізує ортогональний метод виміру може мати такий вигляд представлений на рис. 1.

© В. Г. Баженов, К. А. Гльойнік, С. В. Ходневич. 2017

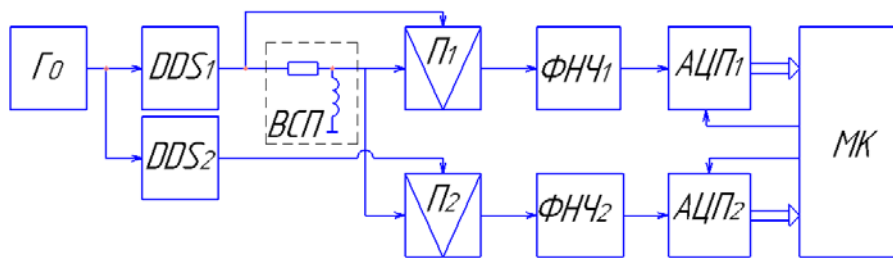


Рис. 1 – Схема вихростумовго дефектоскопу: Γ_0 – опорний генератор, DDS_1 – синтезатор частоти, DDS_2 – другий синтезатор частоти, ВСП – вихрострумний перетворювач, Π_1 – Π_2 – два синхронні амплітудні детектори, $\Phi\text{НЧ}_1$ – $\Phi\text{НЧ}_2$ – фільтри нижніх частот, АЦП₁ – АЦП₂ – аналого-цифрові перетворювачі, МК – мікроконтролер

Дана схема працює наступним чином: два синтезатори частоти які синхронізуються від одного опорного генератора синхроімпульсів одночасно генерують опорні ортогональні сигнали $a_1(t) = A_1 \sin(\omega t)$ та $b_1(t) = B_1 \cos(\omega t)$. Після чого один із сигналів потрапляє на вихрострумний перетворювач (ВП), який в свою чергу взаємодіє з об'єктом контролю.

Амплітуда і фаза на виході ВСП буде залежати від об'єкту контролю та наявності в ньому дефектів. Отримавши певні зміни вимірюваний сигнал $a_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi)$ буде потрапляти на синхронні амплітудні детектори. Де одночасно буде відбуватись перемноження опорних сигналів з вимірюваним. Після перемноження, сигнали з подвоєною частотою відфільтровується, а постійні складові цих сигналів подаються на входи АЦП.

Цифрові коди з АЦП поступають на МК, де значення амплітуди та фази буде визначатись за наступними формулами:

$$A = \sqrt{a_s^2 + a_c^2}, \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \frac{a_s}{a_c}, \quad (2)$$

де $a_c = \frac{1}{2} k A_1 B_1 \cos(\varphi)$ – значення постійної косинусної складової, $a_s = \frac{1}{2} k A_1 B_1 \sin(\varphi)$ – значення постійної синусної складової, k – коефіцієнт перетворення помножувачів (синхронних амплітудних детекторів).

Недоліком такої схеми приладу є апаратна складність виконання, (використовується два АЦП, два помножувача тобто два вимірювальних канали). Крім того не ідентичність каналів вимірювання може знизити чутливість та достовірність контролю.

Авторами пропонується функціональна схема [2–4] вихрострумного дефектоскопу (представлена на рис. 2) на мікроконтролері з використанням синтезаторів частоти, яка значно спрощена та має лише

один вимірювальний канал, і фактично реалізує квазіортогональний метод вимірювання. Задача вирішується тим що, у вихрострумному амплітудно-фазовому способі неруйнівного контролю, який включає в себе перемноження вимірювального і опорного сигналів з подальшим визначенням ам-

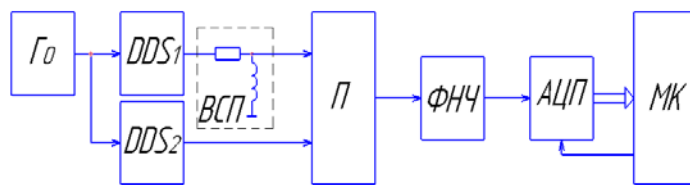


Рис. 2 – Схема вихростумовго дефектоскопу на базі синтезаторів частоти: Γ_0 – опорний генератор, DDS_1 – синтезатор частоти, DDS_2 – другий синтезатор частоти, ВСП – вихрострумний перетворювач, П – синхронний амплітудний детектор, ФНЧ – фільтри нижніх частот, АЦП – аналого-цифрові перетворювачі, МК – мікроконтролер

плітуди отриманої постійної складової. Фази одного із сигналів (DDS_1 або DDS_2) періодично змінюють на 90 градусів.

Метод може бути реалізований за допомогою структурної схеми, яка представлена на рис. 2.

Алгоритм роботи схеми запропонованого вихрострумного дефектоскопу полягає в наступному. За допомогою мікроконтролеру задаються параметри сигналів на виході синтезаторів частоти DDS_1 та DDS_2 . В регістр фази одного із синтезаторів попередньо одноразово завантажуються такі коди, щоб сигнал на виході цього синтезатора змінював значення своєї початкової фази на 90° , по сигналу маніпуляції, який надходить на вивід «pselect» синтезатора з мікроконтролера. Сигнал з виходу синтезатора частоти – DDS_1 надходить на вихрострумний перетворювач – ВСП, який взаємодіє з об'єктом контролю.

Амплітуда і фаза на виході вихрострумного перетворювача буде залежати від параметрів об'єкту контролю, а також від наявності в ньому дефектів. Сигнал з виходу вихрострумного перетворювача подається на один із входів синхронного амплітудного детектора – П, на другий вхід синхронного амплітуд-

ного детектора подається сигнал такої ж частоти з синтезатора DDS₂.

Математично синхронний амплітудний детектор реалізує собою операцію множення. Тому на його виході перед фільтром нижніх частот результуючий сигнал набуде вигляду:

$$\begin{aligned} a(t) \cdot b(t) &= A \sin(\omega t) B \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= \frac{1}{2} AB [\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \omega t + \varphi)] = (3). \\ &= \frac{1}{2} AB [\cos(\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)] \end{aligned}$$

Результат має дві складових, одна з яких залежить від амплітуди та фазового зсуву помножених сигналів і фізично являє собою постійний струм, інша – змінний струм подвійної частоти.

Фільтр нижніх частот відфільтровує складову $\cos(2\omega t + \varphi)$ і результуючий сигнал має, лише постійну складову:

$$U = 0.5AB \cos(\varphi). \quad (4)$$

За допомогою мікроконтролеру періодично здійснюють 90° маніпуляцію фази сигналу одного з синтезаторів частоти шляхом подачі сигналу з одного із виводів мікроконтролера на вивід «pselect» синтезатора. Це буде означати, що постійна складова буде змінюватися на $U = 0.5AB \sin(\varphi)$. Таким чином періодично з частотою маніпуляції на виході синхронного амплітудного детектора (з урахуванням його коефіцієнта перетворення k) отримують постійні складові сигналів пропорційні відповідним проєкціям:

$a_c = \frac{1}{2} kA \cos(\varphi)$ і $a_s = \frac{1}{2} kA \sin(\varphi)$, які відфільтровують і кодують за допомогою АЦП, та обробляються мікроконтролером. Результат вимірювання амплітуди та фази визначають згідно відповідним виразам (1), (2).

Зміна амплітуди і зміна фазового зсуву визначається як різниця двох вимірів амплітуди і фазового зсуву до знаходження дефекту і після.

Для дослідження дієздатності та потенційних можливостей роботи ВД на базі ортогонального методу було складено експериментальний макет приладу із серійних приладів, функціональна схема

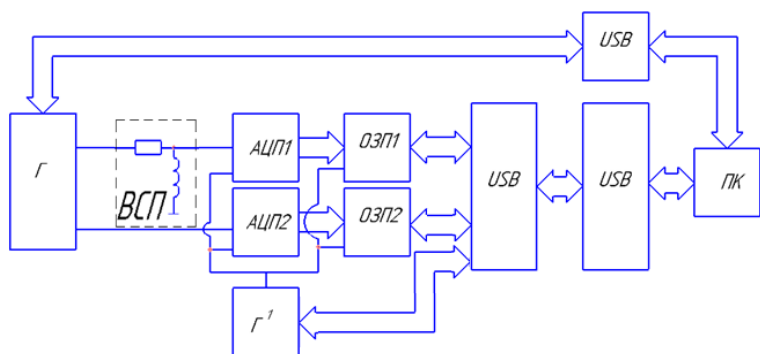


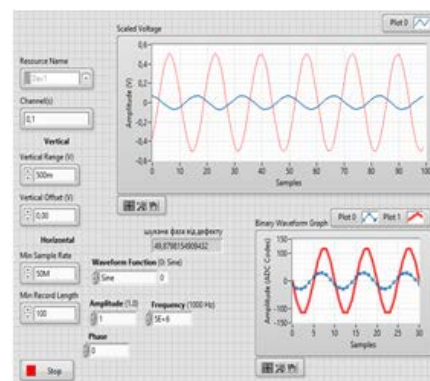
Рис. 3 – Функціональна схема приладу: Г – генератор сигналів, ВСП – вихрострумний перетворювач, Г¹ – опорний генератор, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій USB – шина передачі даних, ПК – персональний комп'ютер

якого представлена на рис. 3.

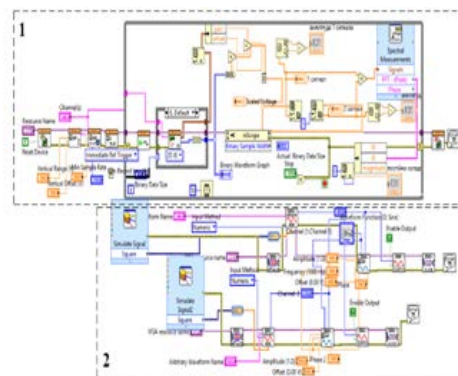
В якості генератора сигналів використано двухканальний синтезатор частоти SDG102, фірми SIGLENT з можливістю зміни його параметрів, а також фазового зсуву між виходами за допомогою ПК через USB інтерфейс. В якості АЦП використано модуль двухканального 8-ми бітного АЦП фірми National Instrument NI5132 з USB інтерфейсом. Коди отриманих сигналів накопичуються в пам'яті модуля АЦП, причому довжина масивів накопичених даних може змінюватися за допомогою комп'ютера.

За допомогою комп'ютеру задаються параметри сигналів на виході генератора, а також виконується періодична маніпуляція початкової фази сигналу на 90° по одному із виходів двухканального синтезатора сигналів. Сигнал з одного виходу генератора поступає на вихрострумний перетворювач, який взаємодіє з об'єктом контролю. Вимірюваний сигнал з виходу перетворювача подається на перший АЦП1. Сигнал з другого виходу генератора сигналів, такої ж частоти, поступає безпосередньо на аналоговий вхід другого АЦП2.

Після накопичення даних в пам'яті ОЗП1 та ОЗП2 масив через порт USB передається в ПК, де здійснюється цифрове перемноження та цифрова фільтрація цих даних. Крім того ПК виконує управління генератором сигналів, АЦП, реалізацію алгоритму ортогонального методу вимірювання згідно приведених виразів (1), (2), визначення значень змін амплітуди та фазового зсуву вимірювального сигналу та візуалізацію результатів контролю за допомогою програми розробленої в пакеті програм labview 2016. Інтерфейс та блок схема програми приведені на рис. 4.



а



б

Рис. 4 – Програма приладу розроблена в

labview 2016: а – інтерфейс програми, б – блока-схема програми.

Програма складається з двох основних частин. У першій частині реалізоване управління АЦП, обробка даних та візуалізація результатів. Друга частина реалізує управління генератором сигналів.

Опис експерименту. Для визначення потенційних можливостей амплітудно-фазового ВД на базі ортогонального методу були проведені наступні випробування експериментального макету представлено на рис. 3:

1. Вимірювалися початкові установлені фазові зсуви сигналів 10^0 ; 45^0 ; 75^0 ; згідно вищезазначеного алгоритму 90^0 маніпуляції фазового зсуву, які попередньо встановлювалися на синтезаторі SDG102. Потім результати порівнювалися.

2. Вимірювалися різниці фазових зсувів (1^0 - 5^0), які задавалися за допомогою синтезатора (імітувалося знаходження дефекту) при початкових фазових зсувах 10^0 ; 45^0 ; 75^0 .

3. Вимірювалися різниці амплітуд вхідних сигналів, які задавалися за допомогою синтезатора (імітувалося знаходження дефекту) при початкових фазових зсувах 10^0 ; 45^0 ; 75^0 .

4. Вимірювалися різниці амплітуд вхідних сигналів, які задавалися за допомогою синтезатора (імітувалося знаходження дефекту) при початкових фазових зсувах 10^0 ; 45^0 ; 75^0 .

Частота вхідного сигналу $f = 3$ МГц, частота дискретизації АЦП1 і АЦП2 складала 25 МГц, довжина масиву вибірок складала 100.

Висновки

Список літератури:

1. Пестряков, В. Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории) [Текст] / В. Б. Пестряков. – М.: Сов. Радио, 1968. – 468 с.
2. Пат. № 118164 UA. Вихрострумний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю. МПК (2017.01) G01N27/01 [Текст] / Баженів В. Г., Глоїнік К. А. – № u2017 01264; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
3. Vazhenov, V. Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer [Text] / V. Vazhenov, A. Protasov, K. Gloinik // 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). – 2017. doi: [10.1109/mrrs.2017.8075051](https://doi.org/10.1109/mrrs.2017.8075051)
4. Пат. № 45908 UA. Цифровий багатофункціональний вихрострумний дефектоскоп. МПК G01N27/00 [Текст] / Баженів В. Г., Климашевская В. М., Глоїнік К. А. опубл. – 25.11.2009, Бюл. № 14.
5. Учанін, В. М. Накладні вихрострумні перетворювачі подвійного диференціювання [Текст] / В. М. Учанін. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.
6. Уолт, К. Проектирование систем цифровой и смешаной обработки сигналов [Текст] / К. Уолт. – Москва: Техносфера, 2010. – 328 с.
7. Мёрфи, Е. Всё о синтезаторах DDS [Текст] / Е. Мёрфи, К. Слэттери // Компоненты и Технологии. – 2005. – № 1.
8. Евстифеев, А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы «Atmel» [Текст] / А. В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 560 с.
9. Vazhenov, V. H. Design features of eddy current flaw detectors on the microcontrollers [Text] / V. H. Vazhenov, K. A. Hloinik // Scientific proceedings NDT days 2016 XXXI International Conference «Defectosopia 16». – Sozopol, Bulgaria, 2016.
10. Герасимов, В. Г. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный контроль [Текст]: практ. пос. / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков; под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.

Bibliography (transliterated):

1. Pestryakov, V. B. (1968). Fazovye radiotekhnicheskie sistemy (osnovy statisticheskoy teorii). Moscow: Sov. Radio, 468.
2. Vazhenov, V. H., Hloinik, K. A. (2017). Pat. No. 118164 UA. Vykhostrumoviy amplitudno-fazoviy sposib neruivnogo kontroliu. MPK (2017.01) G01N27/01. No. u2017 01264; published: 25.07.2017, Bul. No. 14.
3. Vazhenov, V., Protasov, A., Gloinik, K. (2017). Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer. 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). doi: [10.1109/mrrs.2017.8075051](https://doi.org/10.1109/mrrs.2017.8075051)
4. Vazhenov, V. H., Klimashevskaya, V. M., Hloinik, K. A. (2009). Pat. No. 45908 UA. Tsyfrovyy bahatofunktsionalnyi vykhostrumoviy defektoskop. MPK G01N27/00. published: 25.11.2009, Bul. No. 14.
5. Uchanin, V. M. (2013). Nakladni vykhostrumovi peretvoriuvachi podviinoho dyferentsiiuvannia. Lviv: SPOLOM, 268.
6. Uolt, K. (2010). Proektirovanie sistem cifrovoy i smeshanoy obrabotki signalov. Moscow: Tekhnosfera, 328.
7. Merfi, E., Sletteri, K. (2005). Vse o sintezatorah DDS. Komponenty i Tekhnologii, 1.
8. Evstifeev, A. V. (2004). Mikrokontrollery AVR semeystv Tiny i Mega firmy «Atmel». Moscow: Izdatel'skiy dom «Dodeka-XXI», 560.
9. Vazhenov, V. H., Hloinik, K. A. (2016). Design features of eddy current flaw detectors on the microcontrollers. Scientific proceedings NDT days 2016 XXXI International Conference «Defectosopia 16». Sozopol, Bulgaria.

10. Gerasimov, V. G., Pokrovskiy, A. D., Suhorukov, V. V.; Suhorukov, V. V. (Ed.) (1992). Nerazrushayushchiy kontrol'. Kn. 3. Elektromagnitnyy kontrol'. Moscow: Vysshaya shkola, 312.

Надійшла (received) 09.12.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ортогональний амплітудно-фазовий метод вимірювання при проектуванні вихрострумових дефектоскопів на базі мікроконтролерів/ Баженов В. Г., Гльонік К. А., Ходневич С. В. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.60–64. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Ортогональный амплитудно-фазовый метод измерения при проектировании вихретокового дефектоскопа на базе микроконтроллеров/ Баженов В. Г., Гльоник К. А., Ходневич С. В. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.60–64. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Orthogonal amplitude-phase method of measurement in design of extrusion defectoscopes on the basis of microcontrollers/ Bazhenov V., Gloinik K., Khodnevykh S. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.60–64. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баженов Віктор Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри Приладів та систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; email: vgbazhenov@gmail.com.

Баженов Виктор Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры Приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; email: vgbazhenov@gmail.com.

Bazhenov Viktor – PhD, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", associate professor of the Department of Nondestructive Testing Systems; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; email: vgbazhenov@gmail.com.

Гльонік Костянтин Анатолійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри Приладів та систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056.

Гльоник Константин Анатольевич – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», аспирант кафедры Приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056.

Gloinik Konstantin – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute of the City of Sikorsky", postgraduate of the Chair of Priladiv and non-verified control systems; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056

Ходневич Сергій Васильович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», магістрант кафедри Приладів та систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; email: pbf.pk61m@gmail.com.

Ходневич Сергей Васильевич – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», магистрант кафедры Приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; email: pbf.pk61m@gmail.com.

Khodnevykh Serhii – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute of the City of Sikorsky", magistant of the Chair of Priladiv and non-verified control systems; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; email: pbf.pk61m@gmail.com.