

Фешанич Лидія Ігорівна – асистент кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ул. Карпатська, 15, г. Івано-Франківськ, Україна, 76019, e-mail: lidia.feshanych@gmail.com.

Олейник Андрей Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри математических методів в інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ул. Карпатська, 15, г. Івано-Франківськ, Україна, 76019, e-mail: andrij-olijnyk@rambler.ru.

Feshanych Lidia – assistant of automation and computer-integrated technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Karpatska St. 15., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019; e-mail: lidia.feshanych@gmail.com.

Olijnyk Andrij – doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Mathematical Methods in Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, e-mail: andrij-olijnyk@rambler.ru.

УДК 681.884

В. Г. БАЖЕНОВ, Т. Д. ШИНДЕРУК

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ КОРЕЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА АКУСТИЧНОЇ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ

Метою роботи є модельна оцінка можливостей кореляційного методу визначення джерела акустичної вибухової хвилі. Моделювання проводилося в програмному середовищі Matlab. В якості тестового зразка був обраний аудіозапис пострілу з пістолета Beretta M9. Аудіозапис був зашумлений «білим» (гаусовим) шумом. Була створена копія аудіозапису, зміщена у часі, щоб імітувати запізнення. Далі для обох сигналів була розрахована взаємна кореляційна функція, на основі якої визначалася затримка у часі між ними.

Ключові слова: взаємна кореляційна функція, акустична хвиля, аудіозапис пострілу, Matlab, «білий» шум.

Целью работы является модельная оценка возможностей корреляционного метода определения источника акустической взрывной волны. Моделирование проводилось в программной среде Matlab. В качестве тестового образца была выбрана аудиозапись выстрела из пистолета Beretta M9. Аудиозапись была зашумлена «белым» (гауссовым) шумом. Была создана копия аудиозаписи, смещенная во времени, чтобы имитировать опоздание. Далее для обеих аудиозаписей была рассчитана взаимная корреляционная функция, на основе которой определялась задержка во времени между ними.

Ключевые слова: взаимная корреляционная функция, акустическая волна, аудиозапись выстрела, Matlab, «белый» шум.

Model assessment of possibilities of correlation method to identifying the acoustic blast source is the main aim of this research. Modeling has been carried out in Matlab software environment. Shot record from a Beretta pistol has been chosen (from online sounds base www.freesound.org) as a test sample for analysis. Audio sampling frequency - 44 kHz, duration - 0.7 s, the number of bits per sample - 16. Signal to noise ratio was very high in the audio test. As a result of the experiment a "white" noise has been added to our audio signal to determine the potential correlation method. Shifted in time copy of this audio has been used for correlation analysis. Then mutual correlation function was calculated for both audio records, based on this calculation the time delay between these records has been determined. Correlation analysis showed that the delay limits could be precisely defined up to 14 dB, i.e. when the noise exceeds the signal 4 times more. It was also calculated the standard deviation for different signal to noise ratios of explored audio.

Keywords: mutual correlation function, acoustic wave, shot record, Matlab, «white» noise.

Вступ. В умовах розростання і загострення терористичної та кримінальної активності питання забезпечення безпеки стають одними з найактуальніших завдань, як для державних правоохоронних структур, так і для недержавного сектора охорони.

Найважливішим завданням всіх структур є своєчасне виявлення загрози, яке дозволяє забезпечити швидку відповідну реакцію.

Однією з небагатьох демаскуючих ознак є застосування терористами автоматичної вогнепальної зброї. Визначення джерела цих пострілів є одним з першочергових завдань. Для цих цілей використовуються різноманітні системи спостереження ґрунтовані на різних методах (звукометричний та тепловізійний метод, лазерна локація) [1, 2].

За основу даного дослідження було взято звукометричний метод, тому що він володіє такими

перевагами як круговий сектор виявлення та пасивний режим виявлення (нічого не випромінює).

Аудіозаписи пострілів можуть надати інформацію про місцезнаходження джерела пострілу щодо мікрофонів, швидкість і траєкторію снаряду, а в деяких випадках тип вогнепальної зброї та боєприпасів до неї [3].

Фізика пострілу. При вогнестрільному пострілі утворюються два типи акустичних хвиль: ударна – від снаряду, який рухається з надзвуковою швидкістю, вибухова – від вибуху порохових газів [4, 5].

Ударна хвиля утворюється якщо снаряд рухається з надзвуковою швидкістю ($V > c$) і поширюється від шляху кулі (рис. 1). Ударна хвиля розширюється як конус за снарядом, з фронтом хвилі, що розповсюджується назовні зі швидкістю звуку. Конус ударної хвилі має внутрішній кут $\theta_M = \arcsin(1/M)$, де $M = V/c$ є числом Маха. θ_M називається кутом Маха.

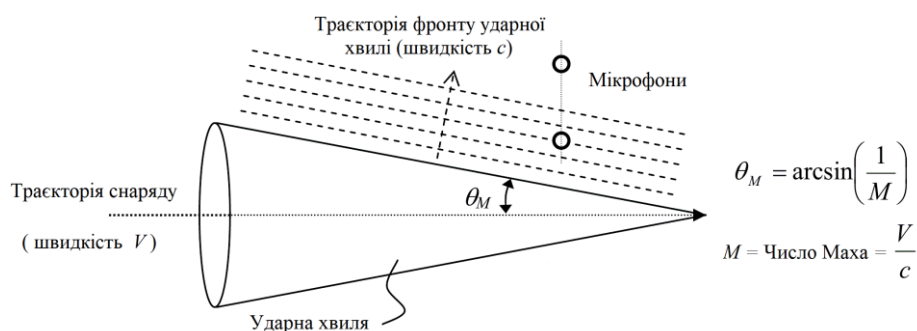


Рис. 1 – Ударна хвиля розширюється як конус за снарядом.

Реєструючи ударну хвилю можна визначити діаметр снаряду та його довжину використовуючи наступну формулу [4]:

$$T \approx 1,82 \left(\frac{d}{c} \right) \left(\frac{Mx}{l} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

де d – діаметр снаряду; l – довжина снаряду, c – швидкість звуку; M – число Маха; x – відстань між траєкторією снаряду і найближчим мікрофоном в точці найбільшого зближення.

Звичайна вогнепальна зброя використовує обмежений заряд вибухової речовини для приведення в рух кулі зі ствола зброї. Гарячий, швидко розширюваний газ викликає акустичний вибух, що з'являється на кінці ствола. Це акустичне обурення триває 3-5 мс, і поширюється у повітрі зі швидкістю звуку (c).

Якщо два або більше мікрофонів розташовані у відомих місцях на шляху поширення вибухової хвилі, різниця часу прибуття (s) може бути використана для визначення джерела пострілу.

Припустимо що ми маємо два мікрофони які розташовані один від одного на відстані l_B в точках А і В (рис. 2). В певній точці простору на відстані приблизно 1 км знаходиться джерело пострілу (Дж). Фронт вибухової хвилі який доходить до мікрофонів має дуже великий радіус кривизни, тому для спрощення розрахунків приймаємо що цей фронт є плоским.

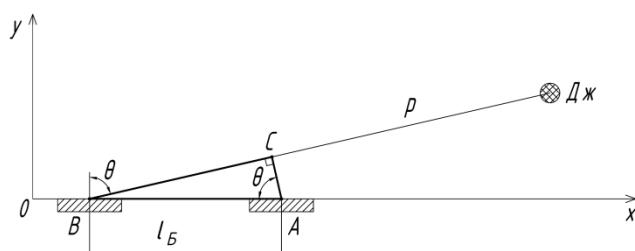


Рис. 2 – Розташування джерела пострілу (Дж) і двох мікрофонів

Розташування джерела пострілу будемо визначати відносно мікрофона розташованого найдалше від джерела - в точці В. Нехай r відстань від цього мікрофона до джерела пострілу.

Фронт нашої вибухової хвилі рухається перпендикулярно r . Спочатку фронт хвилі дійде до мікрофона в точці А, а потім вже до мікрофона в точці В. Час затримки приходу хвилі графічно відповідає стороні ВС трикутника АВС. Знаючи час затримки приходу хвилі можна розрахувати довжину відрізка ВС.

А знаючи довжину ВС можна розрахувати кут θ , який показує відхилення від азимуту до джерела пострілу відносно мікрофона розташованого в точці В.

Час затримки приходу хвилі зручно визначати за допомогою взаємної кореляційної функції (ВКФ, cross-correlation function) аудіозаписів пострілів з першого і другого мікрофонів [6-8].

Моделювання визначення часу затримки. Моделювання проводилося в програмному середовищі Matlab [9]. В якості тестового зразка для проведення аналізу був обраний аудіозапис пострілу з пістолета Beretta M9 знайдений в онлайн-базі звуків Freesound (рис. 3) [10]. Частота дискретизації аудіозапису складає 44 кГц, тривалість – 0,7 с, кількість бітів на зразок – 16.

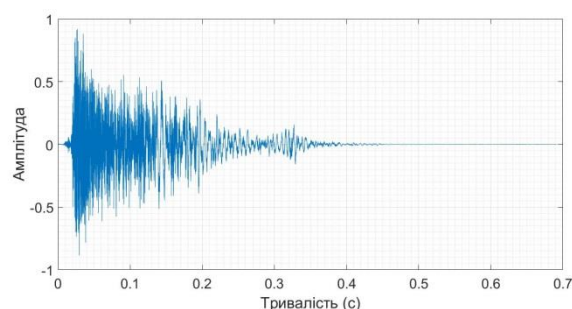


Рис. 3 – Аудіозапис пострілу з пістолета Beretta M9

Для обраного сигналу був розрахований його спектр (рис. 4).

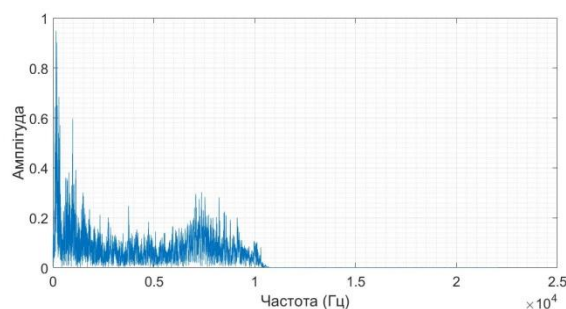


Рис. 4 – Спектр аудіозапису пострілу

Як видно з рис. 4 максимальна частота в розрахованому спектрі не перевищує 11 кГц. Це дозволяє орієнтовно визначити діапазон спектра сигналу пострілу з пістолета досліджуваного типу (Beretta M9). Дана інформація в свою чергу дозволяє спроектувати параметри фільтрів для попередньої фільтрації.

Попередня фільтрація необхідна для підвищення співвідношення сигнал-шум і запобігання накладання спектрів.

Для дослідження можливостей кореляційного методу визначення джерела акустичної вибухової хвилі аудіозапис пострілу був зашумлений «білим» (гаусовим) шумом. Також для даного сигналу була створена його копія, зміщена у часі, щоб імітувати запізнення (рис. 5). Величина запізнення відповідає розташуванню джерела пострілу. Чим більше це значення, тим більше відхилення від азимуту до джерела пострілу відносно мікрофона, який розташований найдалше від цього джерела.

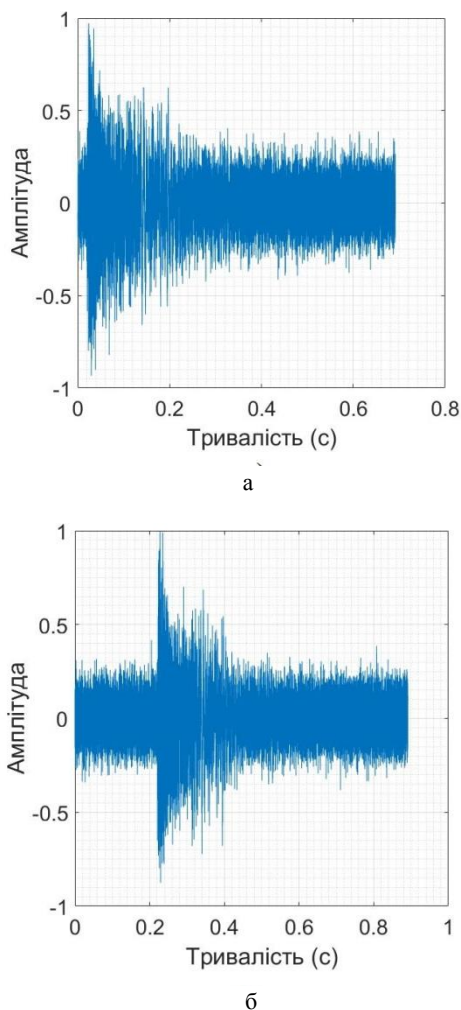


Рис. 5 – Зашумлені аудіозаписи пострілів: а – основний; б – зміщений у часі

Для обох аудіозаписів була розрахована взаємна кореляційна функція за допомогою xcorr - вбудованої функції Matlab, на основі якої визначалася затримка у часі між ними (рис. 6). Розташування максимуму функції на осі абсцис відповідає значенню часу затримки приходу сигналу.

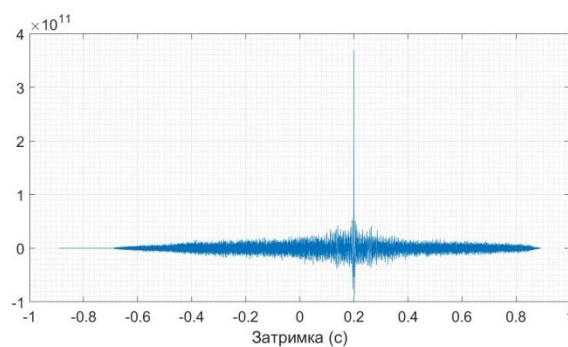


Рис. 6 – Взаємна кореляційна функція двох аудіозаписів

Щоб дослідити можливості кореляційного методу для визначення часових затримок нами були знайдені взаємні кореляційні функції аудіозаписів з різними співвідношеннями сигнал-шум (SNR) в межах від 5 до -40 дБ (рис. 7). Моделювання показало що взаємна кореляційна функція дозволяє безпомилково визначати часову затримку до позначки приблизно -14 дБ співвідношення сигнал шум. Із зменшенням цього значення похибка визначення затримки збільшується.

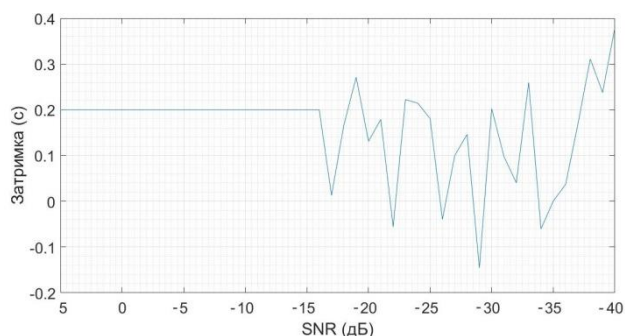


Рис. 7 – Часові затримки для різних значень SNR

Для більш детального дослідження впливу шуму на розрахунок взаємної кореляційної функції і, як наслідок, визначення координат джерела пострілу було розраховано середньоквадратичне відхилення (СКВ) для кожного співвідношення сигнал шум (рис. 8). Розрахунок СКВ для кожного окремо взятого значення SNR проводився на основі вибірки в 5000 значень. Як видно на рис. 7 після відмітки в 14 дБ СКВ починає різко збільшуватися до значення 0,13 с, але не перевищує його.

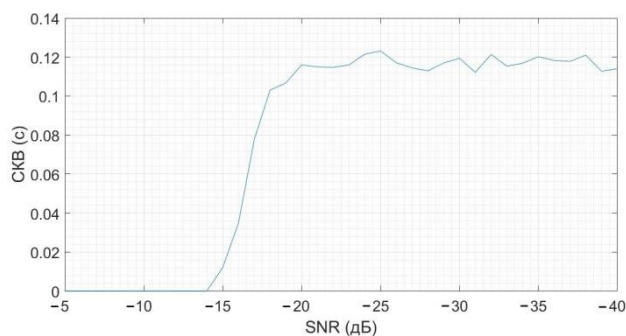


Рис. 8 – СКВ часових затримок для різних значень SNR.

Висновки. В даному дослідженні були використані реальні аудіозаписи пістолета Beretta M9, що дозволило орієнтовно визначити діапазон спектра сигналів пострілів, що в свою чергу дозволяє спроектувати параметри фільтрів для попередньої фільтрації.

В досліджуваному аудіозаписі співвідношення сигнал-шум було дуже велике. В результаті експерименту ми додавали «білий» шум до нашого аудіозапису, для визначення потенційних можливостей кореляційного методу. Для проведення кореляційного аналізу була використана копія цього аудіозапису змещена у часі. Кореляційний аналіз цих двох аудіозаписів показав що затримка між ними точно визначається до межі -14 дБ, тобто коли шум перевищує корисний сигнал більше ніж в 4 рази. Це дослідження показало високі потенційні можливості кореляційного методу для визначення координат джерела звуку і може бути використане не тільки для визначення координат пострілів, а й для визначення джерел інших звуків (битого скла, криків) значно меншої інтенсивності і значно меншого співвідношення сигнал-шум, що можуть бути признаками загрози. В цьому випадку необхідно мати базу спектрів цих інформативних сигналів.

Маючи дану базу взаємну кореляційну функцію можна використовувати і для розпізнавання інформативних сигналів.

Список літератури:

1. Поляков, С. Ю. Пропозиції по вдосконаленню охорони частин (підрозділів), які розташовані у базових таборах [Текст] / С. Ю. Поляков, В. М. Ленкін, Г. А. Змієвський, С. С. Корольов // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 1 (45). – С. 168–174.
2. Мельник, С. Н. Направления автоматизации процессов выполнения задач непосредственным охранением механизированного подразделения [Текст] / С. Н. Мельник, С. С. Корольов, Г. А. Змієвської, В. И. Горбунов // Системи обробки інформації. – 2017. – № 1 (147). – С. 159–167.
3. Dufaux, A. Automatic Classification of Wideband Acoustic Signals [Text] / A. Dufaux, L. Besacier, M. Ansorge, F. Pellandini // Joint 137th meeting of the Acoustical Society of America and Forum Acusticum 99. – Berlin, Germany, 1999. – P. 14–19.
4. Maher, R. Modeling and Signal Processing of Acoustic Gunshot Recordings [Text] / R. Maher // 2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop. – 2006. doi: [10.1109/dspws.2006.265386](https://doi.org/10.1109/dspws.2006.265386)
5. Maher, R. C. Acoustical Characterization of Gunshots [Text] / R. C. Maher // Signal Processing Applications for Public Security and Forensics, 2007. SAFE '07. IEEE Workshop, 109–113.
6. Айфичер, Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход [Текст] / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. – 2-е изд. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 992 с.
7. Тарасов, В. А. Корреляционная пассивная звуковая локация [Текст] / В. А. Тарасов, Д. А. Кропачев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 2. – С. 29–34.
8. Орлов, В. В. Обнаружение местоположения источника излучения на основе корреляционной пространственной обработки [Текст] / В. В. Орлов // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2003. – № 2. – С. 42–46.
9. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов и MATLAB [Текст]: уч. пос. / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 512 с.
10. Онлайн-база звуков Freesound [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.freesound.org>

Bibliography (transliterated):

1. Poliakov, S. Yu., Lenkin, V. M., Zmiivskiy, H. A., Korolov, S. S. (2016). Propozitsii po vdoskonalenniu okhorony chastyn (pidrozdiliv), yaki roztashovani u bazovikh taborakh. Systemy ozbroeniia i viiskova tekhnika, 1 (45), 168–174.
2. Mel'nik, S. N., Korolev, S. S., Zmievskoy, G. A., Gorbunov, V. I. (2017). Napravleniya avtomatizatsii processov vypolneniya zadach neposredstvennym ohraneniem mekhanizirovannogo podrazdeleniya. Systemy obrobky informatsii, 1 (147), 159–167.
3. Dufaux, A., Besacier, L., Ansorge, M., Pellandini, F. (1999). Automatic Classification of Wideband Acoustic Signals. Joint 137th meeting of the Acoustical Society of America and Forum Acusticum 99. Berlin, Germany, 14–19.
4. Maher, R. (2006). Modeling and Signal Processing of Acoustic Gunshot Recordings. 2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop. doi: [10.1109/dspws.2006.265386](https://doi.org/10.1109/dspws.2006.265386)
5. Maher, R. C. (2007). Acoustical Characterization of Gunshots. Signal Processing Applications for Public Security and Forensics, 2007. SAFE '07. IEEE Workshop, 109–113.
6. Ayficher, E. S., Dzhervis, B. U. (2004). Cifrovaya obrabotka signalov: prakticheskiy podhod. Moscow: Izdatel'skiy dom "Vil'yams", 992.
7. Tarasov, V. A., Kropachev, D. A. (2002). Korrelyatsionnaya passivnaya zvukovaya lokatsiya. Tekhnologiya i konstruirovaniye v ehlektronnoy apparature, 2, 29–34.
8. Orlov, V. V. (2003). Obnaruzhenie mestopolozheniya istochnika izlucheniya na osnove korrelyatsionnoy prostranstvennoy obrabotki. Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnia, 2, 42–46.
9. Solonina, A. I., Klionskiy, D. M., Merkucheva, T. V., Perov, S. N. (2013). Cifrovaya obrabotka signalov i MATLAB. Sankt-Peterburg: BHV-Peterburg, 512.
10. Onlain-baza zvukiv Freesound. Available at: <http://www.freesound.org>

Надійшла (received) 15.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз можливостей кореляційного методу визначення джерела акустичної вибухової хвилі / Баженов В. Г., Шиндерук Т. Д. / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 19(1241). – С.119–123. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ возможностей корреляционного метода определения источника акустической взрывной волны / Баженов В. Г., Шиндерук Т. Д. / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 19(1241). – С.119–123. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of possibilities of correlation method for determining the source of acoustic blast/ Bazhenov V., Shynderuk T. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 19 (1241). – P.119–123. – 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 і систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e mail: 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; e mail: vgbazhenov@gmail.com.

Bazhenov Victor – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Nondestructive Testing; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e mail: vgbazhenov@gmail.com.

Шиндерук Тарас Дмитрович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», магістрант кафедри Приладів і систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e mail: deskeyn@live.com.

Шиндерук Тарас Дмитриевич – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», магистрант кафедры Приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e mail: deskeyn@live.com.

Shynderuk Taras – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", master's degree at the Department of Nondestructive Testing; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine; e mail: deskeyn@live.com.