

УДК 658.562.012.7

В.С. Єременко, Р.М. Галаган, кандидати техн. наук

ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ СУМАРНОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ В МАТЕРІАЛАХ З НЕОДНОРІДНОЮ СТРУКТУРОЮ

Присвячено задачі підвищення точності вимірювання швидкості ультразвуку в порошкових матеріалах. Наведено класифікацію похибок, що впливають на результат вимірювань, та проведено їх аналіз. Описано алгоритм статистичної обробки результатів контролю та конструктивні особливості розробленої інформаційно-вимірювальної системи.

Ключові слова: похибка, ультразвук, порошкові матеріали, статистичні критерії

V.S. Eremenko, PhD., R.M. Galagan, PhD.

WAYS TO MINIMIZE THE TOTAL ERROR OF ULTRASONIC VELOCITY MEASUREMENTS IN MATERIALS WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE

The article is devoted to the problem of increasing the accuracy of ultrasonic velocity measurements in powder materials. The basic errors, that affect the measurement result, are described and analyzed. An algorithm for processing the test results and design features of the developed information-measurement system are described.

Keywords: error, ultrasound, powder materials, statistical criteria

В.С. Єременко, Р.М. Галаган, кандидаты техн. наук

ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В МАТЕРИАЛАХ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Посвящена задаче повышения точности измерения скорости ультразвука в порошковых материалах. Приведена классификация погрешностей, влияющих на результат измерений, и проведен их анализ. Описан алгоритм обработки результатов контроля и конструктивные особенности разработанной информационно-измерительной системы.

Ключевые слова: погрешность, ультразвук, порошковые материалы, статистические критерии

Вступ. Вироби з порошкових матеріалів широко застосовуються в багатьох галузях промисловості. Методи порошкової металургії дають змогу створювати принципово нові матеріали, які складно або неможливо отримати іншими способами. Однією з особливостей порошкової металургії є можлива нестабільність фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів як в межах однієї партії, так і в об'ємі окремого зразка [9].

Виготовлення виробів методом порошкової металургії – багатоетапний процес, що включає в загальному випадку пресування порошку, спікання, додаткову обробку тиском (калібровку, штамповку та ін.), повторне спікання, хіміко-термічну обробку формовок та ін. На кожній з цих операцій можлива поява браку, в результаті чого готовий виріб не матиме властивостей, що вимагаються за технічними умовами. Таким чином, контроль фізико-механічних властивостей виробів з порошкових матеріалів є важливою задачею.

Постановка завдання. Для характеристики фізико-механічних властивостей матеріалів використовують пружні постійні матеріалу: Модуль Юнга, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона, які однозначно визначаються за виміряними значеннями швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль в об'єкті контролю (ОК) [2]. Внаслідок впливу технологічних факторів, що виникають в процесі виготовлення виробу, фізико-механічні властивості (а, отже, і швидкість ультразвуку) неоднорідні в об'ємі виробу (рис. 1).

Зміни фізико-механічних властивостей можуть бути незначними, що приводить до незначних коливань швидкості ультразвуку в ОК (в межах десятків метрів за секунду). Проте навіть такі зміни фізико-механічних властивостей можуть привести до неможливості використання виробу в заданих умовах. Таким чином, підвищення точності вимірювання швидкості ультразвуку в виробах із порошкових матеріалів є важливим завданням. Причому для аналізу результатів контролю порошкових матеріалів потрібно по-

трібно аналізувати не лише абсолютне значення вимірної швидкості ультразвуку в окремих точках, але й зміни швидкості (ΔC_x , ΔC_y , ΔC_z) між окремими точками вимірювання.

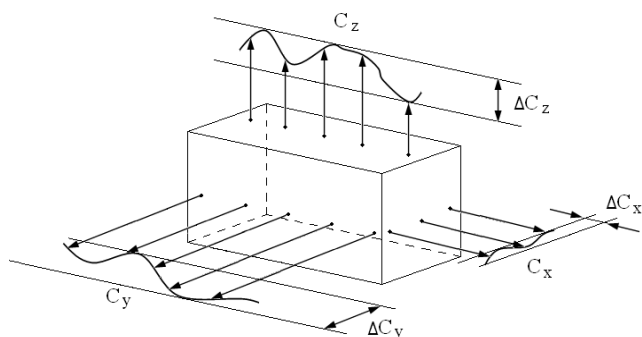


Рис. 1. Схематичний розподіл швидкості ультразвуку в ОК

Найпоширенішим способом вимірювання швидкості ультразвуку на даний час є наступний: спочатку вимірюється база прозвучування (або геометричний розмір ОК) h за допомогою штангенциркуля, після чого вздовж тієї ж бази вимірюється часовий інтервал поширення ультразвукової хвилі t за допомогою ультразвукового дефектоскопа [11]. Для луно-імпульсного методу контролю невідома швидкість розраховується за формулою [5]

$$C = \frac{2h}{t} \quad (1)$$

Для достовірного вимірювання швидкості ультразвуку необхідно мінімізувати сумарну похибку вимірювання, в іншому випадку зміна швидкості може бути обумовлена не фізико-механічними характеристиками, а похибкою вимірювань. Аналіз таких даних приведе до прийняття неправильного рішення за результатами контролю.

Основна частина. Для аналізу факторів, що впливають на формування сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку, побудуємо діаграму Ісікави (рис. 2). Діаграма Ісікави є графічним зображенням, яке в стислій формі та логічній послідовності розподіляє причини, що зумовлюють наслідок.

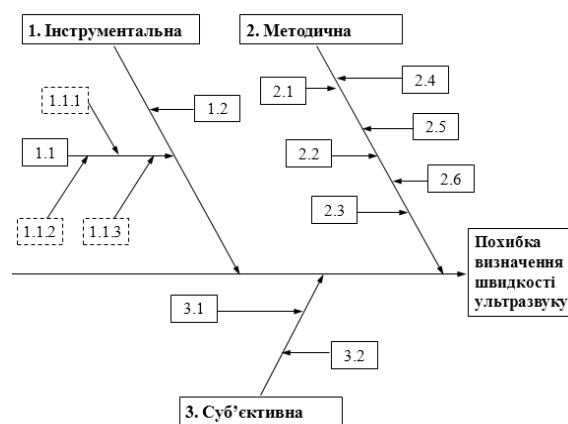


Рис. 2. Діаграма Ісікави для аналізу складових похибки визначення швидкості ультразвуку в порошкових матеріалах

На рис. 2 прийнято такі позначення:

1.1 – похибка ультразвукового дефектоскопа при вимірюванні часової затримки;

1.1.1, 1.1.2 і 1.1.3 – похибки, обумовлені відповідно амплітудним способом вимірювання, зміною довжини переднього фронту відбитого імпульсу, неідеальністю характеристик п'єзоперетворювача;

1.2 – похибка штангенциркуля;

2.1, 2.2, 2.3, 2.4 – похибки, обумовлені шорсткістю поверхні ОК, неплоскопаральністю поверхонь введення та відбиття ультразвуку, нестабільністю акустичного контакту, невідповідністю розміру бази прозвучування розміру акустичного тракту;

2.5, 2.6 – похибки, що визначаються умовами проведення вимірювань (температура, вологість та ін.), площею контактної поверхні п'єзоперетворювача по відношенню до розміру поверхні введення ультразвуку;

3.1 і 3.2 – похибки, які залежать від компетентності оператора, і його зорового сприйняття.

Аналіз вищенаведених складових сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку та проведені дослідження дозволяють припустити, що методична та суб'єктивна похибки значно перевищують інструментальну. Це означає, що недостатньо лише забезпечити високу точність засобів вимірювання, а необхідно також удосконалювати методику вимірювань швидкості ультразвуку. Вплив методичної та суб'єктивної похи-

бок можна оцінити при багаторазових вимірюваннях в кожній окремій точці на поверхні досліджуваного виробу шляхом відриву п'єзоперетворювача від поверхні і наступного його контакту з ОК для проведення вимірювання. Тоді як інструментальну похибку ультразвукового дефектоскопа можна оцінити без відриву п'єзоперетворювача від поверхні, використовуючи при цьому стандартні зразки типу СО–1, СО–2 та СО–3.

Можна визначити декілька шляхів зменшення сумарної похибки. По-перше, в склад системи контролю потрібно ввести блок статистичної обробки результатів вимірювань швидкості ультразвуку. По-друге, слід розробити таку конструкцію системи та алгоритм її роботи, які дали б змогу максимально автоматизувати процес контролю.

Алгоритм роботи блоку статистичної обробки наведено на рис. 3.

Алгоритм ґрунтується на припущенні, що закон розподілу виміряних значень швидкості ультразвуку в кожній окремій точці не суперечить нормальному. Це дозволяє використовувати параметричні статистичні критерії. Результат j -го вимірювання швидкості ультразвуку в i -й точці на поверхні виробу

$$C_{i,j} = C_i(Tf) \pm \Delta C \pm \varepsilon_{i,j}, \quad (2)$$

де $\varepsilon_{i,j}$ – значення сумарної випадкової похибки вимірювання, що характеризується середньоквадратичним відхиленням (СКВ), ΔC – систематична похибка, що виникає при калібруванні дефектоскопа, $C_i(Tf)$ – істинне значення швидкості ультразвуку, що є випадковою функцією, яка залежить від впливу технологічних факторів.

Спочатку оператор проводить N вимірювань швидкості ультразвуку в кожній окремій точці (рис. 3). Коли отримані всі дані, система перевіряє відповідність закону розподілу виміряних значень швидкості нормальному за критеріями: типу χ^2 , Колмогорова-Смірнова та Епса-Палі. По-перше, відмінність закону розподілу від нормального свідчить про нестационарність процесу контролю та порушення умов вимірювань, а, відповідно, неможливість використання отриманих даних для достовірної оцінки фізико-механічних характеристик виробу.

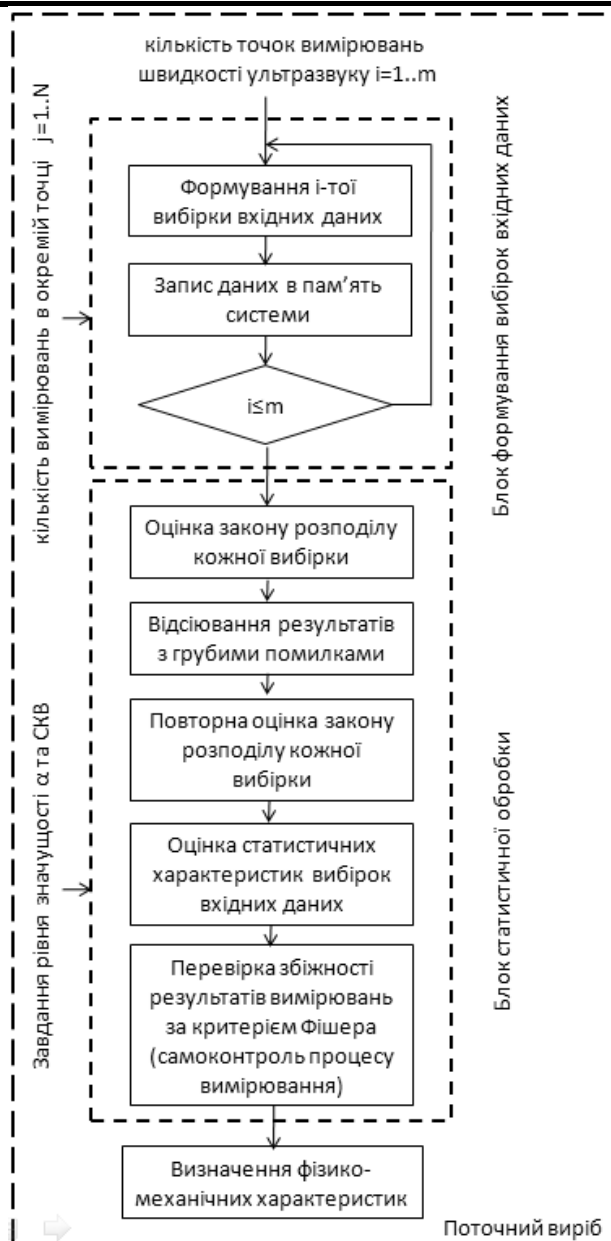


Рис. 3. Алгоритм статистичної обробки результатів вимірювання швидкості ультразвуку в порошкових матеріалах

По-друге, для практичного застосування методів теорії ймовірностей і математичної статистики знання закону розподілу ймовірностей надзвичайно важливе. Спроба застосувати методи аналізу результатів спостережень, розроблені для конкретних законів розподілу ймовірностей, в умовах, коли реальний розподіл відрізняється від гіпотетичного, є серйозною помилкою, що призводить до невірних висновків і, в остаточному підсумку, до істотних матеріальних втрат і витрат часу [4].

Важливою складовою алгоритму є відсіювання результатів з грубими похибками. Грубі похибки (промахи) належать до числа похибок, що змінюються випадково при повторних спостереженнях [3]. Причинами грубих похибок можуть бути неконтрольовані зміни умов вимірювань, несправність обладнання, помилки оператора та ін. Оскільки критеріальні вимоги (коефіцієнти), що визначають границю, за якою перебувають грубі (в сенсі похибок) результати вимірювань у різних авторів різні, то перевірку варто виконувати відразу по декількох критеріях (рекомендується використовувати не менше трьох) [10]. Остаточний висновок про приналежність «підозрілих» результатів вимірювань швидкості ультразвуку до грубих похибок варто робити по більшості критеріїв. Для відсіювання грубих похибок використано критерії Шовене, Діксона та Грубса. Такий підхід дає змогу підвищити вірогідність контролю виробів з порошкових матеріалів. Після відсіювання грубих похибок знову перевіряється закон розподілу отриманих даних на відхилення від нормального, і якщо він не суперечить нормальному, то розраховуються оцінки математичного сподівання та дисперсії.

Ще однією особливістю розробленого алгоритму є самоконтроль процесу вимірювання в різних точках на поверхні ОК, який полягає в перевірці збіжності результатів вимірювання [8]. Для цього використовується критерій перевірки однорідності двох дисперсій (критерій Фішера):

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \quad (3)$$

де s_1^2 , s_2^2 – оцінки дисперсій першої та другої вибірок вимірюваних значень швидкості ультразвуку відповідно (в чисельнику має завжди стояти більша з двох порівнюваних дисперсій).

Розраховане значення параметра F порівнюють з критичним значенням $F_{кр}$, що залежить від трьох величин: рівня значущості α і двох чисел, якими виражаються ступені свободи $f_1=n_1-1$ і $f_2=n_2-1$, де n_1 , n_2 – кількість елементів першої та другої вибірки. Якщо $F < F_{кр}$, приймається рішення на підставі на-

явних експериментальних даних, що при рівні статистичної значущості α вибіркові дисперсії однорідні. Якщо дисперсії в різних точках будуть неоднорідними, то система сигналізує оператору про порушення умов контролю.

Для перевірки однорідності ряду вибіркових дисперсій застосовують G -критерій (критерій Кохрена).

Для реалізації заданого алгоритму була розроблена інформаційно-вимірювальна система (рис. 4), що складається з плати збору інформації, приєднаної до персонального комп'ютера [1]. Забезпечення взаємодії розробленої плати та комп'ютера, організація інформаційних потоків системи, реалізація алгоритмів обробки та відображення отриманих результатів покладене на математичне, інформаційне забезпечення та програмне забезпечення, реалізоване в системі програмування LabVIEW.

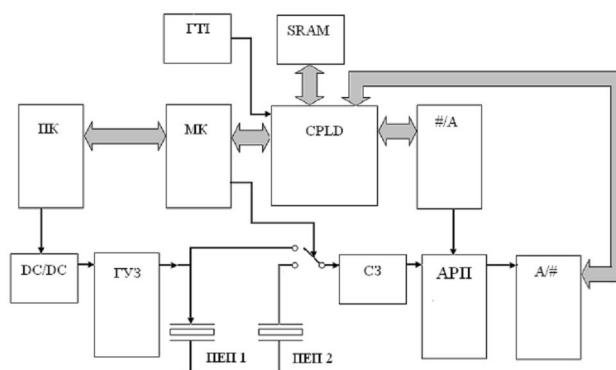


Рис. 4. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи

До складу розробленої системи входять: ПК – персональний комп'ютер, МК – мікроконтролер, ГТІ – генератор тактових імпульсів, SRAM – пам'ять, CPLD – програмована логічна інтегральна схема (ПЛИС), ГУЗ – генератор ударного збудження, СЗ – схема захисту, АП – схема амплітудного регулювання підсилення, ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач, #/A – цифро-аналоговий перетворювач, А/# – аналого-цифровий перетворювач, DC/DC – перетворювач напруги.

Другим шляхом мінімізації сумарної похибки є розробка спеціалізованої конструкції системи вимірювання та методики проведення контролю [6]. Замість звичайних п'єзоперетворювачів розроблено фокусуючі

перетворювачі, які побудовані на базі рефрактора, що випромінює в тверде конусоподібне тіло концентратора [7]. Дана конструкція дає змогу вводити високочастотні коливання в ОК через точкову поверхню контакту, причому в точці контакту концентратора з поверхнею виробу відбувається фазове фокусування випроміненого сигналу. Такі перетворювачі дозволяють зменшити використання контактної рідини, а також мінімізувати вплив шорсткості та кривизни поверхні ОК на результат контролю.

Сама конструкція системи уможливіє жорстку фіксацію фокусуючих перетворювачів на поверхні ОК, що забезпечує стабільність акустичного контакту. Завдяки конструкції блоку первинних перетворювачів база прозвучування вимірюється автоматично (а не за допомогою штангенциркуля), що зменшує суб'єктивну похибку вимірювання. Для цього використовуються два акустичні тракти: еталонний та об'єктний. Еталонний створюється в твердому тілі (еталонному об'єкті) з точно відомими акустичними характеристиками. Він має змінні геометричні розміри. Система забезпечує рівність геометричного розміру еталонного тракту з геометричним розміром об'єктного тракту з точністю до константи, а також забезпечується паралельність акустичних осей цих трактів. В еталонному тракті використовуються поверхневі хвилі (хвилі Релея). В принципі як еталонний тракт не обов'язково використовувати акустичним. Наприклад, можна використати оптичним вимірювачем відстані, радіохвильовим локатором, вимірювачем механічних переміщень, вимірювачем відстані, побудованим на ємнісному методі, та ін.

Розроблена конструкція та алгоритм обробки результатів застосовані увались для контролю фізико-механічних властивостей фарфорових ізоляторів. Результати порівнювались з тими, що були отримані в тих же умовах, але з використанням стандартних ультразвукових дефектоскопів, датчиків та методик вимірювань. Сумарна похибка вимірювань швидкості ультразвуку була зменшена на порядок.

У більшості випадків у характеристиках ультразвукових дефектоскопів указують ме-

жі абсолютної допустимої похибки вимірювання товщини зразків. Даний параметр, на жаль, неможливо використовувати для оцінки похибки вимірювання швидкості ультразвуку. Також даний параметр не дозволяє оцінити реальний вклад інструментальної похибки в сумарну похибку. Середньоквадратичне відхилення (СКВ) сумарної похибки вимірювання σ_i швидкості ультразвуку можна оцінити лише при натурних вимірюваннях на ОК і стандартних зразках.

Мінімізуювши сумарну похибку, можна підвищити роздільну здатність вимірювань швидкості ультразвуку між двома різними точками. Для розрахунку роздільної здатності вимірювань використовується критерій Стюдента (за умови рівності дисперсій у кожній точці вимірювань та однакової кількості вимірювань N):

$$\Delta C_{12} = |\bar{C}_1 - \bar{C}_2| = t_{кр} \cdot \sigma_i \cdot \sqrt{\frac{2}{N}}, \quad (4)$$

де $t_{кр}$ – критичне значення критерію Стюдента при заданому рівні значущості α та відповідній кількості степеней свободи, $\bar{C}_1$ і $\bar{C}_2$ – середні значення вимірюваної швидкості ультразвуку в точках 1 і 2, σ_i – середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань швидкості ультразвуку в окремих точках.

Наприклад, для $N=100$ при рівні значущості $\alpha=0,05$ критичне значення критерію Стюдента $t_{кр}=1,99$. Якщо забезпечити СКВ результатів вимірювань на рівні $\sigma_i=20$ м/с, то за формулою (4) роздільна здатність становитиме $\Delta C_{12}=5,6$ м/с.

Висновки. Наведено класифікацію складових сумарної похибки, яка виникає при вимірюванні швидкості ультразвуку у виробках з порошкових матеріалів. Показано шляхи мінімізації даної похибки. Описано алгоритм роботи системи вимірювання швидкості ультразвуку, в основу якого покладено використання статистичної обробки даних. Алгоритм реалізовано в системі графічного програмування NI LabVIEW. Розроблена спеціальна конструкція блоку первинних перетворювачів дає змогу автоматизувати процес контролю та зменшити суб'єктивну і методичну складові сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку.

Список використаної літератури

1. Галаган Р. М. Ультразвукова система діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів / Р. М. Галаган, В. С. Єременко // Вісник Нац. техніч. ун-ту України «КПІ». Серія приладобудування. – К.: – 2011. – № 42. – С. 62-70.

2. Ермолов И. Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под ред В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

3. Игуменцева Н. В. Статистический анализ результатов экспериментов и наблюдений: Учеб. пособие Н. В. Игуменцева, В. И. Пахомова. – Харьков: «Компания СМІТ», 2005. – 236 с.

4. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.

6. Пат. № 45907 України, МПК (2009) G01N 29/00, G01H 5/00. Спосіб ультразвукового контролю об'єктів / Галаган Р. М., Цапенко В. К., Протасов А. Г.; Укр. – №u200907687; Заявл. 21.07.2009. Опубл. 25.11.2009. Бюл. №22.

7. Пат. №47248 України, МПК (2009) B06B 3/00. Ультразвуковий концентратор / Галаган Р. М., Цапенко В. К., Протасов А. Г., Василенко О. С.; Укр. – №u2009 07366; Заявл. 13.07.2009. Опубл. 25.01.2010. Бюл. №2.

8. РМГ 29–99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Взамен ГОСТ 16263–70. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 46 с.

9. Роман О. В. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии / О. В. Роман, В. В. Скороход, Г. Р. Фридман. – М.: Выш. шк., 1989. – 182 с.

10. Третьяк Л. Н. Обработка прямых измерений с многократными наблюдениями: Учебное пособие / Л. Н. Третьяк. – Оренбург: ИПК ОГУ, 2002. – 60 с.

11. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд.: пер. с нем. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

Отримано 15.05.2012

References

1. Galagan R. M. Ultrasonic system of diagnostics of porcelain insulator technical state / R. M. Galagan, V. S. Eremenko // Bulletin of National Technical University of Ukraine «KPI». Series of instrumentation. – Kyiv: 2011. – № 42. – P. 62–70 [in Ukrainian].

2. Ermolov I.N. Nondestructive Testing / I. N. Ermolov, Y. V. Lange, V.V. Klyuyev: Guide: In 7 volume. Volume 3. Ultrasonic testing – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p. [in Russian].

3. Igumentseva N. V. Statistical analysis of experimental results and observations / Textbook: N. V. Igumentseva, V.I. Pakhomov. – Kharkov: «Company SMIT», 2005. – 236 p. [in Russian].

4. Kobzar A. I. Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists / A. I. Kobzar. – Moscow: FIZMATLIT, 2006. – 816 p. [in Russian].

5. Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics / Z. T. Nazarchuk. – Lviv: Physico-mechanical institute named G.V. Karpenko NAS of Ukraine, 2001. – 1134 p. [in Ukrainian].

6. Patent № 45907 of Ukraine, IPC (2009) G01N 29/00, G01H 5/00. Method of ultrasonic testing of objects / Galagan R. M., Tsapenko V. K., Protasov A. G., Ukr. – № u200907687; Appl. 21.07.2009. Publ. 25.11.2009. Bulletin № 22 [in Ukrainian].

7. Patent № 472.48 of Ukraine, IPC (2009) V06B 3/00. Ultrasonic hub / Galagan R. M., Tsapenko V. K., Protasov A. G., Vasilenko O. S., Ukr. – № u2009 07,366, Appl. 13.07.2009. Publ. 25.01.2010. Bulletin № 2 [in Ukrainian].

8. RMG 29-99. Recommendations on interstate standardization GSI. Metrology. Basic terms and definitions. – Moscow: Publishing House of the IEC standards, 2000. – 46 p. [in Russian].

9. Roman O. V. Ultrasonic and resistance measurements testing in powder metallurgy / O. V. Roman, V. V. Skorokhod, G. R. Friedman. – Minsk: High school, 1989. – 182 p. [in Russian].

10.. Tretiak L. N. Processing of direct measurements with multiple observations: Textbook / L. N. Tretiak. – Orenburg: 2002. – 60 p. [in Russian].

11. Ultrasonic testing of materials: Ref. ed. / J. Krautkremer, G. Krautkremer. – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 752 p. [in Russian].



Єременко
Володимир Станіславович,
канд. техн. наук, проф.
каф. Інформаційно-вимірю-
вальних систем, Нац. авіа-
ційного ун-ту України,
тел. роб.: (044) 406-74-35,
e-mail: nau_307@ukr.net



Галаган
Роман Михайлович,
канд. техн. наук, асистент
каф. Приладів і систем не-
руйнівного контролю, НТУУ
«КПІ»,
тел. роб.: (044) 454-95-47,
e-mail: psnk@kpi.ua