

УДК 629.735.083.02/.03.004.58

## АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБРОБКИ ДАНИХ СИСТЕМИ СТАТИСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*О.О. Редько, В.С. Єременко, В.М. Мокійчук*

*Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова 1, м. Київ, 03680,  
e-mail: nau\_307@mail.ru*

*Запропонований алгоритм та програмне забезпечення, розроблене в програмному пакеті LabVIEW, які реалізують статистичну обробку даних за результатами неруйнівного контролю композиційних матеріалів із застосуванням методу низькошвидкісного удару. Проведено експериментальне дослідження роботи алгоритму та програмного забезпечення, отримані інтервальні оцінки ступеню ушкодження композиційних матеріалів. Актуальність даної роботи полягає у реалізації автоматизації та універсального підходу до обробки даних, отриманих у результаті неруйнівного контролю.*

*Ключові слова: неруйнівний контроль, композиційний матеріал, стільникова панель, статистична обробка даних, робастна регресія, LabVIEW.*

*Предложен алгоритм и программное обеспечение, разработанное в программном пакете LabVIEW, которые реализуют статистическую обработку данных по результатам неразрушающего контроля композиционных материалов с использованием метода низкоскоростного удара. Проведено экспериментальное исследование работы алгоритма и программного обеспечения, получены интервальные оценки степени повреждаемости композиционных материалов. Актуальность данной работы заключается в реализации автоматизации и универсального подхода к обработке данных, полученных в результате неразрушающих контролю.*

*Ключевые слова: неразрушающий контроль, композиционный материал, сотовая панель, статистическая обработка данных, робастная регрессия, LabVIEW.*

*It was suggested an algorithm and software is developed in the program package LabVIEW for implement the statistical data processing of the nondestructive testing findings of composite materials using the method of low-velocity impact. An experimental research of the algorithm and software were realized. Interval assessment of damage of composite materials was received. The relevance of this work is to implement automation and universal approach to the data processing of the nondestructive testing findings. Keywords: nondestructive testing, composite material, honeycomb panel, statistical data processing, robust regression, LabVIEW.*

### **Вступ**

На сьогоднішній день все більше проникають у різні галузі науки і техніки полімерні композиційні матеріали (КМ). Завдяки стійкості до корозії, підвищеній міцності при невеликій масі вони знайшли широке застосування в таких галузях виробництва, як авіабудування, машинобудування, ракетобудування та приладобудування. Тому до надійності таких виробів висувуються високі вимоги. Адже від їх технічного стану може залежати життя та здоров'я людей. Але при всіх своїх позитивних якостях КМ характеризуються широким спектром можливих типів дефектів, анізотропією, значним розкидом своїх властивостей від виробу до виробу.

### **Опис об'єкту контролю та методів його діагностики**

Виникнення дефектів у деталях з композиційних матеріалів значною мірою пов'язано з технологічними причинами у процесі виробництва та дією різноманітних впливаючих чинників при експлуатації. Дефектами, що зменшують міцність композиційного матеріалу, є пори, мікротріщини, розшарування, дефекти з'єднання елементів, розриви волокон, зони нерівномірного затвердіння матриці тощо. Так, навіть мала частка порожнин за об'ємом матриці впливає на характеристики міцності.

Згідно з [1], кінетика руйнування волоконного композиційного матеріалу наступна: у момент розриву волокна

напруження в матеріалі волокна падає, але при подальшому навантаженні матриця матеріалу волокна деформаційно зміцнюється і навантажує зруйновані волокна. Вся композиція руйнуватиметься тільки після того, коли вичерпається запас пластичності матриці. При подальшому збільшенні навантаження у матриці відбувається локальний наклеп і навантаження зростає настільки, що вона стає здатним навантажити нові відрізки волокон до їх руйнування в іншому січнні.

Не завжди міцний матеріал добре чинить опір розповсюдженню тріщин. При великій статичній міцності у нього може бути низька в'язкість руйнування, яка лімітується процесами розвитку тріщин. Один і той же матеріал при випробуванні тонких зразків може поводитися як пластичний і в'язкий, а при випробуваннях крупних зразків і деталей стає крихким. Це пов'язано із зміною напруженого стану у вершині тріщини, що розповсюджується, – переходом від плоского напруженого стану до плоского деформованого стану.

Проте для армованих композиційних матеріалів, в результаті наявності значного числа поверхонь розділу характерні такі механізми руйнування, які можуть загальмувати розповсюдження тріщин (відшарування волокна від матриці, розрив і прослизання волокон, витягування волокон з матриці і пластична деформація матриці).

В умовах циклічних навантажень композиційні матеріали мають високу стійкість, при цьому їх втомленість відмінна від втомленості металів за множинністю типів руйнування, чутливістю до надрізів і поведінки при стисненні. При рівній масі однонаправлені композиційні матеріали (скло– і вуглепластики) мають втомну міцність в 2–3 рази вищу у порівнянні з конструкційними металами [2].

Для контролю технічного стану КМ використовуються акустичні та ультразвукові методи неруйнівного контролю (НК), такі, як: імпедансний метод, метод низькошвидкісного удару (МНУ) та метод вільних коливань.

Наявність дефекту у виробі при контролі згаданими методами може привести до зміни одночасно кількох параметрів інформаційного сигналу. Для імпедансного методу при безперервному збудженні перетворювача має місце зміна таких параметрів, як амплітуда та початкова фаза синусоїдального сигналу, при імпульсному збудженні – амплітуда, фаза та частота інформаційних імпульсів; для методу вільних коливань – множина гармонік вільних коливань контрольованої зони; для методу низькошвидкісного удару – амплітуда, тривалість і форма імпульсу ударної взаємодії.

Останній метод дозволяє виявляти більш небезпечні дефекти, а також зміну модуля пружності та коефіцієнту Пуассона [3].

### **Алгоритм обробки даних системи статистичної діагностики КМ**

Задача підвищення достовірності НК композитів може вирішуватись декількома шляхами, одним з яких є використання двох та більше взаємодоповнюючих фізичних методів. Але цей шлях веде до підвищення вартості контролю внаслідок необхідності виконання наступних умов: наявності обладнання, що реалізує кожний вид контролю; наявності атестованих методик і атестованого персоналу на кожний вид контролю.

Іншим шляхом підвищення достовірності контролю є застосування нових методів обробки діагностичної інформації, пошук додаткових діагностичних ознак та їх впорядкування по інформативності при використанні одного фізичного методу контролю із стандартним атестованим обладнанням. Цей шлях вимагає розробки відповідного інформаційного забезпечення, яке б дозволило:

- здійснити обробку інформаційних сигналів (ІС);
- отримати необхідне число діагностичних ознак, які можливі при даному виді контролю;
- провести відбір інформативних параметрів (ІП) ІС;
- визначити функціональну залежність між статистичними характеристиками масиву значень ІП та величиною, що описує дефект;
- в автоматичному режимі встановити рівень uszkodження та прийняти рішення про придатність виробу.

З огляду на це в даній роботі запропонований алгоритм обробки даних, який реалізовано у програмному забезпеченні комп'ютеризованої системи статистичної діагностики КМ (рис. 1). Суть алгоритму полягає у реалізації безеталонної дефектоскопії шляхом використання двох послідовних режимів роботи: режим визначення залежності між ІП ІС та величиною, що описує дефект, та режим проведення НК КМ. Величиною, що описує дефект, може бути ступінь ударного пошкодження, коефіцієнт пошкодження або площа дефектної області. До складу алгоритму входять наступні дії у визначеній послідовності:

- 1) вимірювання інформаційного сигналу;
- 2) виокремлення значень інформативних параметрів. З масивів значень імпульсів ударної взаємодії (ІУВ) для кожної зони контролю із застосуванням математичних методів отримують максимальні амплітудні значення та значення тривалості імпульсів;

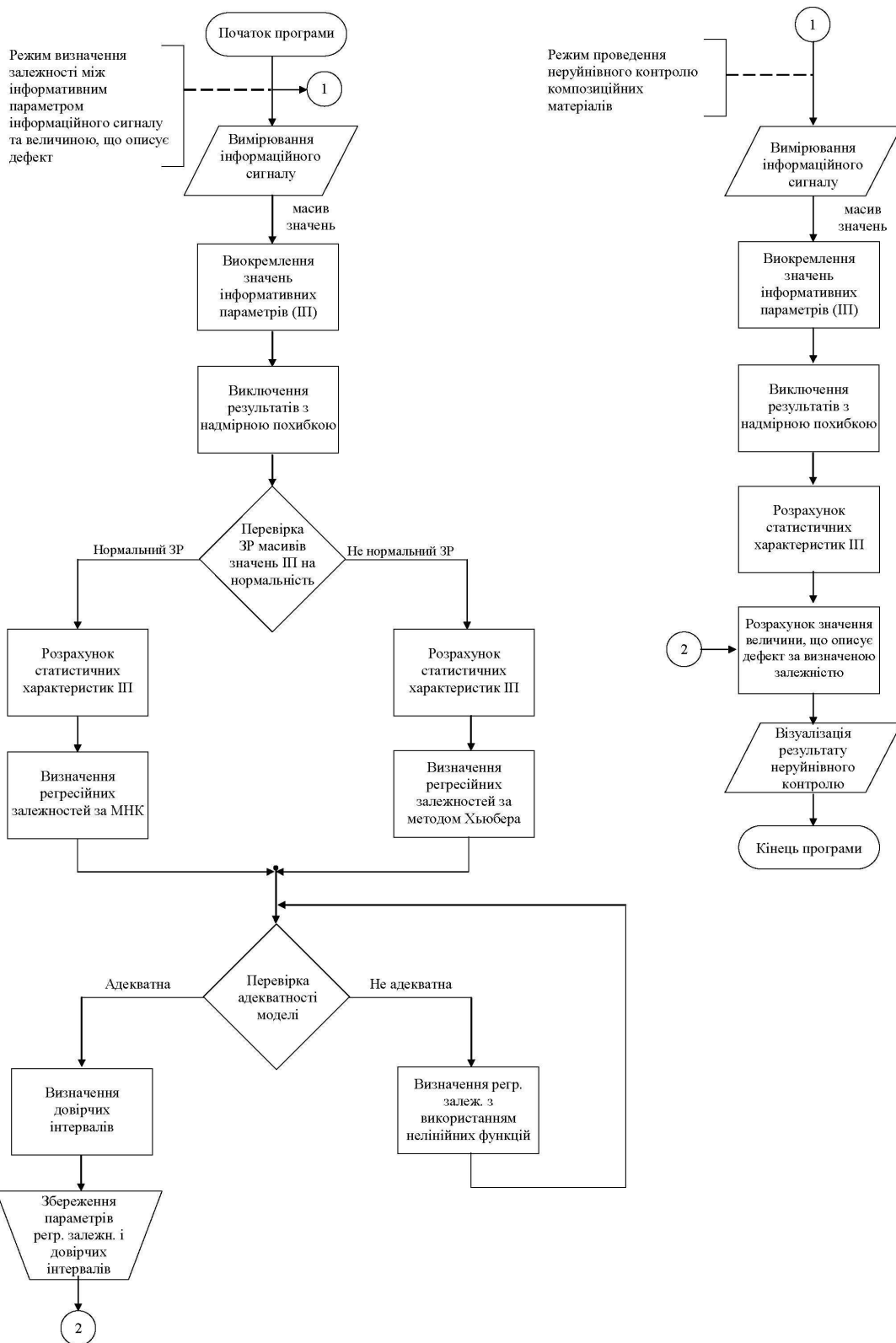
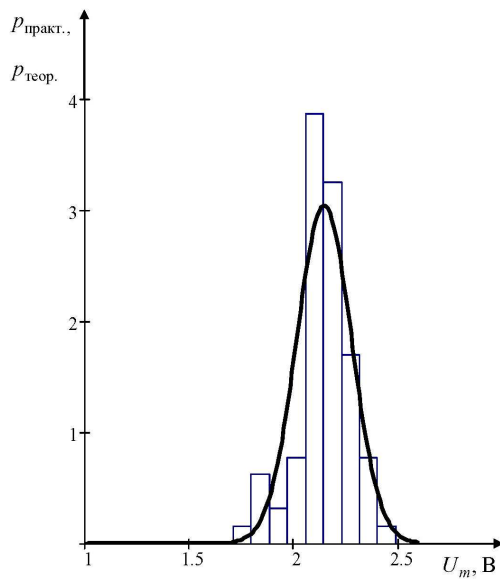


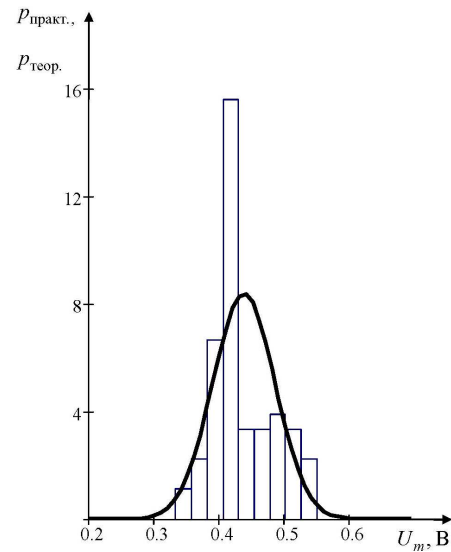
Рисунок 1 – Алгоритм обробки даних системи статистичної діагностики виробів із композиційних матеріалів

3) виключення результатів з надмірною похибкою. У процесі багаторазового вимірювання можлива поява окремих результатів спостережень, що різко відрізняються від інших. Ці спостереження приводять до появи випадкових похибок, які істотно перевищують очікувані за даних випадкових умов. Такі похибки називаються надмірними. Вони є наслідком цілої низки факторів, що впливають на проведення контролю: неправильні дії експериментатора або несправності засобів вимірювання, помилки під час запису результату вимірювання, різкого поштовху в момент відліку показів, стрибка напруги живлення вимірювальної системи тощо. Ці результати слід виявити та виключити із отриманих результатів як явно помилкові результати спостережень. Для виявлення надмірних похибок застосовуються статистичні критерії Ектона, Тітьєна-Мура-Бекмана і Прескотта-Лунда, які обирають в залежності від об'єму досліджуваної вибірки;

4) перевірка законів розподілу масивів значень ІІ на нормальність. Більшість прикладних методів математичної статистики виходить з припущення нормальності розподілу ймовірностей досліджуваних випадкових величин. Для чисельної оцінки згоди оцінених ЗР амплітуди та тривалості ІУВ з нормальним розподілом було застосовано критерій Пірсона заснований на статистиці. На рис. 2 зображені оцінки емпіричних законів для бездефектної та дефектної областей контролю КМ із пінопластовим заповнювачем ПС4-40;



а)



б)

а) – для бездефектної зони контролю; б) – для дефектної зони розміром 900 мм<sup>2</sup>

**Рисунок 2 – Оцінки емпіричних законів розподілу амплітуд ІУВ КМ із пінопластовим заповнювачем**

5) розрахунок статистичних характеристик ІІ: оцінки медіан та середньоквадратичних відхилень (СКВ) амплітуд та тривалостей ІУВ, як найбільш інформативних характеристик зміни технічного стану КМ [4];

6) визначення регресійних залежностей за методом найменших квадратів (при підтвердженні гіпотези про нормальність закону розподілу) або робастним методом Х'юбера (якщо закон розподілу ймовірностей не є гаусівським), який є стійким до результатів з надмірною похибкою і до виду закону розподілу значень. Методика ітераційного розрахунку параметрів регресії за останнім методом та обґрунтування доцільності його застосування наведено у [5];

7) перевірка значущості коефіцієнтів та адекватності розрахованої моделі регресії проводиться за критеріями Ст'юдента та Фішера, відповідно. Якщо модель не є адекватною, то проводиться визначення параметрів регресійної залежності на основі методу лінеаризації із використанням нелінійних функцій [6]. Якщо модель адекватна, то оператор зберігає параметри залежності статистичних характеристик ІІ від величини, що описує дефект у відповідний текстовий файл.

В режимі проведення НК КМ виконуються

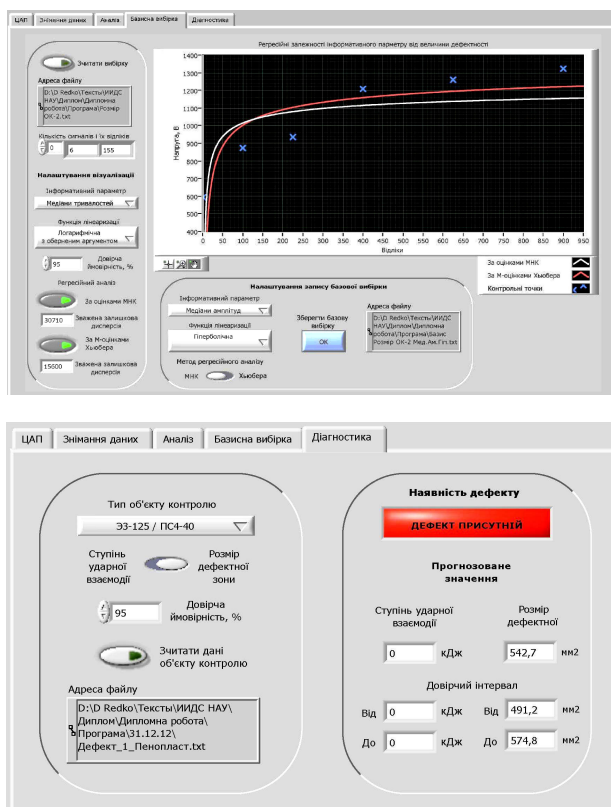
наступні дії:

- 1) встановлення типу ОК та типу величини, що описує дефект;
- 2) вимірювання не менше 10 ІС;
- 3) визначення ІІ ІС;
- 4) виключення результатів із надмірною похибкою з масиву значень ІІ;
- 5) розрахунок статистичних характеристик масиву значень ІІ;

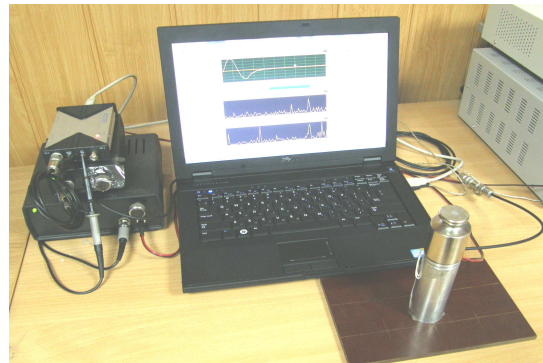
6) розрахунок кількісної оцінки величини, що описує дефект за визначеною у попередньому режимі роботи ПЗ системи залежністю із довірчими інтервалами;

7) візуалізація результату прогнозування значення рівня ушкодження з довірчим інтервалом та рішення про придатність виробу до подальшого застосування.

На основі алгоритму, описаного в даній роботі, було розроблено програмне забезпечення у програмному пакеті NI LabVIEW у якості віртуального приладу (рис. 3). Для експериментального дослідження віртуальний прилад був інтегрований в комп'ютеризовану систему статистичної діагностики КМ (рис. 4).

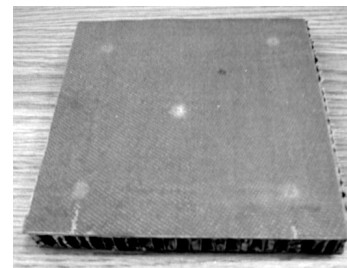


**Рисунок 3 – Інтерфейс програмного забезпечення системи статистичної діагностики виробів із композиційних матеріалів у програмному пакеті NI LabVIEW**

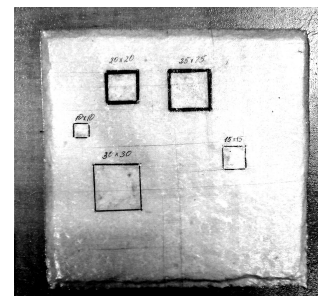


**Рисунок 4 – Зовнішній вигляд системи статистичної діагностики виробів із композиційних матеріалів**

У якості зразків використовувались композитні панелі із стільниковим заповнювачем типу ПСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76 (рис. 5, а) та із пінопластовим заповнювачем ПС4-40 і обшивкою на основі склотканини Э3-125 (рис. 5, б).



а)



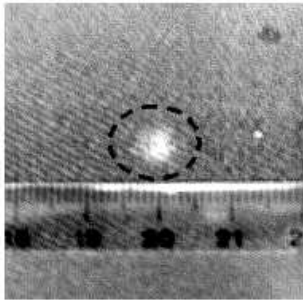
б)

а – із стільниковим заповнювачем типу ПСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76; б – із пінопластовим заповнювачем ПС4-40 і обшивкою на основі склотканини Э3-125

**Рисунок 5 – Зразки композитних матеріалів**

Моделями дефектів першого типу об'єкту контролю були зони, по яких попередньо за допомогою сталевий кульки було завдано точкового удару з нормованою енергією  $A_{уд}$ ,

рівною 2,297; 2,812; 3,240 та 5,109 кДж, який спричиняв руйнацію зразка в зоні контакту. Видимі розміри діаметру зон руйнування не перевищували 5 мм (рис. 6, а). Моделями дефектів другого типу зразків слугували зони із штучно зруйнованим пінопластовий заповнювачем, нормованою площею квадратної основи в 100, 225, 400, 625 і 900 мм<sup>2</sup>. На рис. 6, б, відображено просвічене денним світлом аномальну зону площею 900 мм<sup>2</sup>.



а)



б)

**Рисунок 6 – Моделі дефекту об'єктів контролю**

При знятті ІС по поверхні зразка КМ бойком датчика низькошвидкісного удару наносилися удари з енергією, що змінювалась квазі-випадковим чином за нормальним законом розподілу у діапазоні від 10 до 40 мДж. Для кожного з 4-х отриманих зразків з дефектами та бездефектного зразка із стільниковим заповнювачем типу ПСП-1 були отримані по 250 реалізацій ІУВ та для кожного з 5-х отриманих зразків з дефектами та бездефектного зразка із пінопластовим заповнювачем ПС4-40 були отримані по 75 реалізацій ІУВ.

## ВИСНОВКИ

Запропоновано та обґрунтовано використання статистичних методів аналізу і обробки інформаційних сигналів при

застосуванні МНУ. Розглянуто використання методу робастної регресії для визначення рівня ушкодження КМ на основі розробленого алгоритму з використанням М-оцінок Х'юбера.

Створений універсальний алгоритм та відповідне програмне забезпечення статистичної обробки даних, отриманих за результатами НК, який можна використовувати в комп'ютеризованих системах НК. Перевагою даного алгоритму, відносно існуючих, є можливість адаптації для використання в системах, які реалізують методи НК без істотних змін програмного забезпечення, що значно розширює простір його застосування.

1. Фудзиси Т. *Механика разрушения композиционных материалов [Текст]* / Т. Фудзиси, М. Дзако; пер.с япон. – М.:Мир, 1982. – 232 с. 2. Єременко В.С. *Метод оцінювання ступеня ушкодженості композиційних матеріалів [Текст]* // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 56 (1029)– С. 21–26. 3. Єременко В.С. *Обнаружение ударных поврежденных сотовых панелей методом низкоскоростного удара [Текст]* / В.С. Єременко, В.М. Мокийчук, А.М. Овсянкин // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* – К., 2007. – №1. – С. 24–27. 4. Редько О.О. *Виявлення дефектів стільникових панелей із застосуванням статистичних характеристик інформаційних сигналів [Текст]* // *Современные методы и средства НК и ТД: сб. научн. трудов по материалам междунар. конф., 05-09 окт. 2009 г.* – Киев, 2009. – С. 84–87. 5. Єременко В.С. *Методика визначення ступеня ударного пошкодження стільникових панелей [Текст]* / В.С. Єременко, В.М. Мокийчук, О.О. Редько // *Східно-Європейський журнал передових технологій.* – 2012. – Т. 6, N 11(60). – С. 41–44. 6. *Рекомендація по метрології. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения. Оценивание погрешностей. МИ 2175-91 [Текст].* – С-Пб.:ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1997 – 55 с.

**Поступила в редакцію 29.11.2013р.**

**Рекомендували до друку: Оргкомітет 4-ої н/п конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (26-27.11.2013р., ІФНТУНГ) та докт. техн. наук, проф. Горбійчук М. І.**