

Запропонована методика дозволяє визначити ступінь ударного пошкодження на основі даних неруйнівного контролю стільникових панелей з використанням стійких оцінок робастної регресії. Актуальність даної роботи полягає у можливості застосування запропонованого підходу для результатів вимірювання, що містять похибки, розподілені за довільним законом

Ключові слова: робастна регресія, М-оцінки Хьюбера, неруйнівний контроль, композиційні матеріали, стільникові панелі

Предложенная методика позволяет определять степень ударного повреждения на основе данных неразрушающего контроля сотовых панелей с использованием устойчивых оценок робастной регрессии. Актуальность данной работы заключается в возможности использования предложенного подхода для результатов измерений, содержащих погрешности, распределенные по случайному закону

Ключевые слова: робастная регрессия, М-оценки Хьюбера, неразрушающий контроль, композиционные материалы, сотовые панели

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ УДАРНОГО ПОШКОДЖЕННЯ СТІЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛЕЙ

В. С. Єременко

Кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: 067-209-07-69

E-mail: nau_307@ukr.net

В. М. Мокійчук

Кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: 097-255-39-70

E-mail: nau_307@ukr.net

О. О. Редько*

Контактний тел.: 066-433-77-25

E-mail: ralex_sh@mail.ru

*Кафедра інформаційно-вимірювальних систем
Національний авіаційний університет
пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03680

1. Вступ

Сучасна авіаційна промисловість широко використовує композиційні матеріали (КМ) із стільниковим заповнювачем, що по своїм основним параметрам значно перевершують метали та їх сплави. Додатковості виробів з КМ висуваються дуже високі вимоги, тому що від їх технічного стану може залежати не тільки працездатність кошовної техніки, але і життя людей.

При проведенні неруйнівного контролю (НК) виробів із КМ більш широко застосовуються низькочастотні акустичні методи: метод вільних коливань, імпедансний та низькошвидкісного удару. Наявність дефекту у виробі при контролі згаданими методами може призвести 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 та форма обвідної інформаційного імпульсу; для методу вільних коливань – множина гармонік вільних коливань контрольованої зони; для методу низькошвидкісного удару (МНУ) – амплітуда, тривалість і форма імпульсу ударної взаємодії.

Останній метод дозволяє виявляти більш небезпечні дефекти, а також зміну модулю пружності та коефіцієнту Пуассона.

На кафедрі інформаційно-вимірювальних систем Національного авіаційного університету була роз-

роблена спеціальна система для виявлення дефектів композиційних матеріалів МНУ, методи обробки інформаційних сигналів, а також розроблено в середовищі LabVIEW 2010 відповідне програмне забезпечення, яке реалізує ці методи обробки. Розроблена система була випробувана для виявлення та діагностики дефектів на зразках КМ, що належать ДП «АНТОНОВ» і використовуються при виробництві літаків моделей «Ан» [1]. На відміну від згаданої системи НК серія дефектоскопів Woodpecker, японської фірми Mitsui & Company, Ltd., цільовим призначенням яких також є НК стільникових панелей базуючись на МНУ, використовує в якості інформативного параметру (ІП) тільки тривалість імпульсу, чого не достатньо для точної класифікації дефектів та визначення ступеня пошкодження об'єкту контролю. Даний прилад успішно використовується в НК літаків моделей «Airbus». [2].

Як правило, при проведенні діагностики стільникових панелей, основною задачею є визначення достовірності контролю – придатний або непридатний. В деяких випадках (напр. брак при виготовленні, розслідування причин пошкодження, які привели до тяжких наслідків і т.д.) необхідно визначити параметри аномальних зон об'єкту контролю, та передумови їх виникнення.

З огляду на це метою даної роботи є створення методики, яка дозволить визначити ступінь ударного пошкодження стільникових панелей КМ на основі обробки статистичних характеристик ІП інформаційних сигналів (ІС).

2. Постановка задачі

В роботі [3] вирішувалась задача виявлення дефектів стільникових панелей на основі регресійного аналізу з використанням методу найменших квадратів (МНК).

В якості ІІІ пропонується використовувати оцінки математичних сподівань та середньоквадратичні відхилення (с.к.в.) амплітуд та тривалостей інформаційних сигналів.

При знятті ІС в процесі НК присутні похибки засобу контролю, які призводять до наявності у вибірці ІС результатів з надмірною похибкою (РНП). Трапляється, що похибки (залишки) мають невелику вагу із-за чого їх неможливо видалити з вибірки. Як правило ці похибки розподілені не за нормальним законом, а так як в МНК при отриманні оцінок параметрів кожне спостереження має однакою вагу, залишки впливають на коефіцієнти регресії. Тому має сенс використовувати робастні методи, які дозволяють зменшувати вагу тих спостережень, які дають велику похибку [4].

В даній роботі пропонується застосовувати процедуру М-оцінювання Хьюбера для визначення коефіцієнтів рівняння регресії.

Підставивши в якості аргументу в отримане рівняння відповідні статистичні характеристики параметрів ІС стає можливим не тільки визначення, а й прогнозування ступеня дефектності об'єкту контролю.

3. Визначення параметрів робастної регресії

М-оцінки Хьюбера відносяться до класу оцінок методу максимальної правдоподібності. Згідно з [5] М-оцінки робастної регресії отримують методом ітерацій, які мінімізують вираз:

$$\sum_{i=1}^m \rho\left(\frac{z_i}{s}\right) \rightarrow \min,$$

де m – кількість вимірювань;

$\rho(\alpha_i)$ – критерій мінімізації при параметрі $\alpha_i = \frac{z_i}{s}$;

s – деяка оцінка масштабу;

z_i – похибка вимірювання вихідних величин;

Згідно методу Хьюбера критерій мінімізації має вигляд

$$\rho(\alpha_i) = \begin{cases} 0,5 \cdot \alpha_i^2, & -a \leq \alpha_i \leq a, \\ a \cdot |\alpha_i| - 0,5 \cdot a^2, & \alpha_i < -a \cup \alpha_i > a, \end{cases}$$

де a – точка зламу.

Вагова функція для $\rho(\alpha_i)$:

$$\omega(\alpha_i) = \begin{cases} 1, & -a \leq \alpha_i \leq a, \\ \frac{a}{|\alpha_i|}, & \alpha_i < -a \cup \alpha_i > a. \end{cases}$$

Але виникає складність при виборі констант налаштування: точки зламу a , масштабного множника s та параметру правила зупину іте-

раційної процедури d . В [5] посилаючись на роботу П. Хьюбера пропонують використовувати $a=2$ та $s=1,4826 \cdot \text{median}|z_i - \text{median}|z_i||$, який забезпечує приблизно оцінку стандартного відхилення. Вибір оцінки s впливає на результати, так як оцінки робастної регресії не інваріантні відносно цього масштабного множника.

МІ 2175-91 [6] рекомендує використовувати дві вагові функції, які мають вигляд (1) з подальшим розрахунком на їх основі відповідних сум, які в свою чергу впливають на результат приростів оцінок регресії:

$$\omega_1(\alpha_i) = \begin{cases} \alpha_i, & |\alpha_i| < a; \\ 1, & |\alpha_i| > a; \end{cases} \quad \omega_2(\alpha_i) = \begin{cases} 1, & |\alpha_i| < a; \\ 0, & |\alpha_i| > a; \end{cases} \quad (1)$$

де $a=1,5$, $s=1,4826 \cdot \text{median}|z_i|$.

Співставляючи інформацію наведену в джерелах [5,6], провівши дослідження на експериментальних даних з перевіркою побудованих моделей на адекватність в програмному пакеті MathCAD розробили наступну методикку:

1. Якщо значення вхідних величин X_i точно відомі, а випадкові похибки N вимірювань Y_i мають розподіли, відмінні від гаусівських, або можуть містити грубі похибки, то для побудови моделі виду $y(x)=k \cdot x + b$ рекомендується використовувати стійкі методи, зокрема оцінки Хьюбера.

2. При використанні стійких методів необхідно отримати початкові наближення b_0, k_0 для коефіцієнтів регресії, в якості яких можна використовувати МНК-оцінки або стійкі оцінки Вальда чи Барлетта. Застосування оцінки за МНК може бути ризикованим внаслідок її дуже великої чутливості до РНП.

2.1. Для отримання стійких оцінок Вальда чи Барлетта розбивають усі експериментальні точки на 2 або 3 групи рівного об'єму (у порядку зростання X_i) і знаходять медіани значень X_i та Y_i по першій групі (X^I та Y^I) і по другій (або третій) групі (X^{II} та Y^{II}). Оцінки обчислюють за формулами:

$$k_0 = \frac{(y^{II} - Y^I)}{(X^{II} - X^I)}, \quad b_0 = \bar{Y} - k_0 \cdot \bar{X},$$

де \bar{X}, \bar{Y} – середні значення вхідних і вихідних величин відповідно.

3. Стійкі оцінки Хьюбера знаходять за ітераційним алгоритмом. На q -ому кроці виконують наступні операції

3.1. Обчислюють відхилення даних від розрахункової лінії:

$$z_{iq} = Y_i - (b_{q-1} + k_{q-1} \cdot X_i), \quad i = \overline{1, N}.$$

3.2. Обчислюють оцінку с.к.в. як медіану відхилень:

$$s_q = 1,4826 \cdot \text{median}\left[|z_{iq}|\right].$$

3.3. Визначають значення u_{iq} та v_{iq} :

$$u_{iq} = \begin{cases} \frac{z_{iq}}{s_q}, & \left| \frac{z_{iq}}{s_q} \right| < 2; \\ 1, & \left| \frac{z_{iq}}{s_q} \right| > 2; \end{cases} \quad v_{iq} = \begin{cases} 1, & \left| \frac{z_{iq}}{s_q} \right| < 2; \\ 2 \cdot \left(\frac{z_{iq}}{s_q} \right)^{-1}, & \left| \frac{z_{iq}}{s_q} \right| > 2; \end{cases}$$

3.4. Обчислюють суми

$$h_{0q} = \sum_1^N u_{iq}; \quad h_{1q} = \sum_1^N X_i \cdot u_{iq};$$

$$c_{0q} = \sum_1^N v_{iq}; \quad c_{1q} = \sum_1^N X_i \cdot v_{iq}; \quad c_{2q} = \sum_1^N X_i^2 \cdot v_{iq};$$

3.5. Обчислюють прирости оцінок

$$\Delta b_q = \frac{(h_{1q} \cdot c_{1q} - h_{0q} \cdot c_{2q})}{(c_{1q}^2 - c_{0q} \cdot c_{2q})}, \quad \Delta k_q = \frac{(h_{0q} \cdot c_{1q} - h_{1q} \cdot c_{0q})}{(c_{1q}^2 - c_{0q} \cdot c_{2q})};$$

3.6. Обчислюють нові значення коефіцієнтів

$$b_q = b_{q-1} + \Delta b_q, \quad k_q = k_{q-1} + \Delta k_q;$$

3.7. Ітераційний процес закінчується після виконання заданої кількості кроків q , або при виконанні правила зупину:

$$\Delta b_q < d \cdot S(b_0), \quad \Delta k_q < d \cdot S(k_0),$$

де $S(b_0), S(k_0)$ – с.к.в. початкових наближень, $d > 0$ – обирають в межах від 0,1% до 0,01%.

$$S(y_0) = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - y_0(X_i))^2}{N-2}; \quad S(k_0) = \frac{S(y_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}}; \quad S(b_0) = S(k_0) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}},$$

$$y_0(x) = b_0 + k_0 \cdot x.$$

4. Дослідження методики на експериментальних даних

Експериментальні досліди проводились на п'яти зразках КМ із стільниковим заповнювачем типу ПСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76. Товщина панелі складає 12 мм, товщина обшивки – 1,5 мм.

Моделями дефектів слугували зони з нанесеним точковим ударом з нормованою енергією в діапазоні від 2,0 до 5,1 кДж. Видимі розміри дефектів не перевищували 5 мм.

В результаті проведеного НК МНУ отримали по 250 імпульсів ударної взаємодії (ІУВ) бойка датчика з кожною зоною контролю.

Реалізацію методики, перевірку адекватності та адаптації регресійної моделі, графічне відображення отриманих результатів провели в програмному пакеті MathCAD.

Перевірку оцінок робастної регресії пропонується проводити за критерієм знаків або серій [6]. Критерій адаптації використовується для перевірки, чи за-

довольняє розрахована модель регресії результатам вимірювання. Підібрана модель повинна проходити через області розширених невизначеностей кожної точки (так звані «калібрувальні прямокутники»). В якості критерію адаптації ДСТУ ISO 6143-2003 пропонує використовувати систему умов [7]:

$$|Y_i - f(X_i)| < U(Y_i) \quad \text{та} \quad |X_i - f^{-1}(Y_i)| < U(X_i), \quad \forall i \in \{1, m\},$$

де $U(Y_i), U(X_i)$ – розширені невизначеності результатів НК, $y = f(x)$ – функція залежності виміряної величини від ступеня пошкодження КМ.

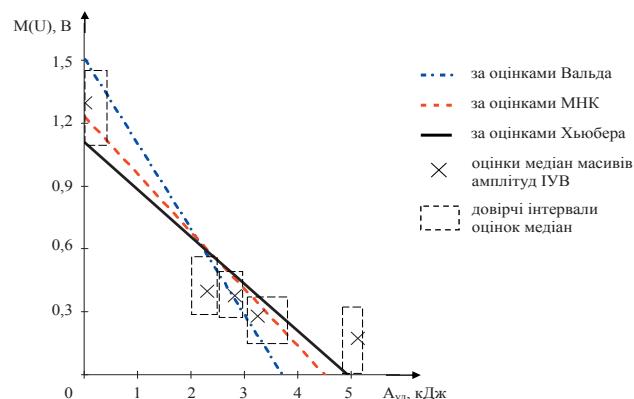


Рис. 1. Регресійні залежності оцінок медіан масивів амплітуд ІУВ від ступеня ударного пошкодження

На рис. 1 та рис. 2 зображені регресійні моделі з довірчими інтервалами, побудовані за оцінками Вальда (штрих-пунктир), МНК (штрихова) і Хьюбера (суцільна) для ІП – медіани амплітуд та тривалостей відповідно. «Хрестиком» позначені оцінки медіан масивів амплітуд та тривалостей для бездефектної (0 кДж) та кожної дефектної зони відповідно.

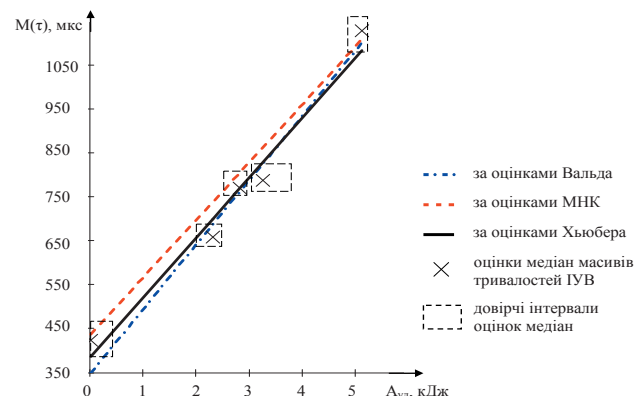


Рис. 2. Регресійні залежності оцінок медіан масивів тривалостей ІУВ від ступеня ударного пошкодження

Для порівняння отриманих рівнянь підібрана за допомогою МНК та робастної регресії застосована остаточна дисперсія, яка визначає розкид результатів вимірювання навколо лінії

регресії: рис. 1 – $S_{MNK} = 0,058$; $S_{Huber} = 0,047$; рис. 2 – $S_{MNK} = 4615$; $S_{Huber} = 2277$.

В подальших дослідження планується описати правила вибору точок зламу a , масштабного множника s та параметру правила зупину ітераційної процедури d в залежності від статистичних характеристик отриманих даних.

5. Висновок

У статті представлена методика, яка дозволяє вирішувати задачу не тільки визначення, але й на основі розрахованих рівнянь робастної моделі регресії, прогнозування значення ступеня ударного пошкодження стільникових панелей за результатами НК.

Література

1. Єременко, В.С. Багатопараметровий неруйнівний контроль композиційних матеріалів [Текст] / В.С. Єременко, А.В. Переїденко, Є.Ф. Сулов, Ж.О.Павленко // Приладобудування: стан і перспективи : міжнар. наук.-техн. конф., 24-25 квіт. 2012 р. : тези допов. – Київ, 2012. – С. 227-229.
2. Редько, О.О. Системи неруйнівного контролю композиційних матеріалів із стільниковим заповнювачем на основі методу низькошвидкісного удару [Текст] / О.О. Редько // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: Матеріали між нар. наук.-практ. конф., 25-27 жовтня 2012 р. – Чернівці, 2012. – С. 127-128.
3. Редько, О.О. Виявлення дефектів стільникових панелей із застосуванням статистичних характеристик інформаційних сигналів [Текст] / О.О. Редько // Современные методы и средства НК и ТД: сб. научн. трудов по материалам междунар. конф., 05-09 окт. 2009 г. – Киев, 2009. – С. 84-87.
4. Мокійчук, В.М. Застосування стійких оцінок Хубера у прогнозуванні ступені пошкодження стільникових панелей [Текст] / В.М. Мокійчук, О.О. Редько // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2012): міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 травня 2012 р. : тези допов. – Київ, 2012. – С. 152-154.
5. Драйпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] : пер. с англ. / Н. Драйпер, Г. Смит ; [ред. М. Саит-Аметова]. – Изд. 3-е – М.: Диалектика, 2007. – 912 с. – ISBN 978-5-8459-0963-3.
6. Рекомендация по метрологии. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения. Оценивание погрешностей. МИ 2175-91. – С-Пб.:ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1997 – 55 с.
7. Аналіз газів. Методи компарування для визначення та перевіряння складу повітряних газових сумішей: ДСТУ ISO 6143-20-03. – [Чинний від 2003-01-07]. – Київ: Держспоживстандарт, 2003. – 27 с. – (Національний стандарт України).

Abstract

This article focuses on the developed procedure of determining the degree of impact damage honeycomb panels. It is proposed to use the robust regression method due to the fact that the nondestructive testing method of low-velocity impact, as with any measurement, may have excess errors distributed by any law results.

A robust method is based on M-estimates and an Huber iterative procedure. The difficulty in the implementation of the developed procedure is the choice of tuning constants and weighting function. The procedure was modified for estimating the parameters of the regression model by analyzing the sources of scientific and experimental calculations.

The resulting equation of the linear regression was more robust and resistant to errors than regression dependence, calculated by the method of least squares. This procedure can be adapted to different types of data obtained in the diagnosis of any objects without significant changes in the structure of the software. The research results can be applied in the diagnosis of honeycomb panels of composite materials during the production or pre-flight preparation of aircraft

Keywords: *Robust regression, Huber M-estimates, nondestructive testing, composite materials, honeycomb panels*