

УДК 519.254

**Р.П. МИГУЩЕНКО**, д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**М.М. ВОЛОБУЄВ**, канд. хім. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**О.М. РЕБРОВА**, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»

## КОВАРІАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ОБРОБЦІ ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Розглянуто питання автоматичного формування множин статистик Фішера, які однозначно характеризують стан об'єкта контролю, управління або ідентифікації, за рахунок використання методів статистичного аналізу. Формування множини  $F$  – статистик здійснюється застосуванням коваріаційного аналізу до тривимірних зображень об'єкта, шляхом проведення ряду перетинів вздовж осей аргументів. Результатом виконання перетинів є множини з координатами  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ . Проведені дослідження можуть бути використані для розробки алгоритмічного та програмного забезпечення засобів виявлення дефектів складного промислового обладнання. Розроблене програмне забезпечення може бути застосованим при імітаційному моделюванні.

**Ключові слова:**  $F$  – статистика, коваріаційний аналіз, регресії, двовимірна модель, трансформація, архів даних.

**Вступ.** Неруйнівний контроль та безрозбірна діагностика є найбільш перспективними напрямками при побудові сучасних систем контролю і управління. Останнім часом у названих напрямках активно створюються алгоритми, що реалізують названі технології, які ґрунтуються на опрацюванні вимірюваної інформації від датчиків, встановлених на важливих вузлах складних промислових агрегатів, і представленні цієї інформації у вигляді тривимірних зображень [1, 2]. Перетворення тривимірних зображень в двовимірні дозволяє спростити представлену інформацію та використати її в системах контролю і управління, які працюють в режимі реального часу.

**Аналіз останніх досліджень.** Відповідно до [3, 4] будь яку тривимірну інформаційну модель можна замінити скінченною множиною двовимірних моделей:

$$\{V_{jl} = F_a[a_j | b_l = \text{const}] + \delta_{jl}\}_{l=1}^L; \quad (1)$$

$$\{V_{jl} = F_b[b_l | a_j = \text{const}] + \varepsilon_{jl}\}_{j=1}^J. \quad (2)$$

Функції  $F_a$  і  $F_b$  це не випадкові функції (*тренди*), а  $\delta_{jl}$  і  $\varepsilon_{jl}$  – випадкові величини (*випадкові залишки*). Функції  $F_a$  і  $F_b$  можна оцінити, представивши їх послідовностями лінійних регресій з випадковими коефіцієнтами. Коваріаційний аналіз таких послідовних випадкових регресій (груп двовимірних спостережень) дозволяє виявити статистично значущі адитивні і мульти-

плікативні зміни трендів на фоні непереборних шумів (випадкових залишків). На практиці це надає можливість ідентифікувати справність промислового обладнання при порівнянні множин коефіцієнтів  $F$  – статистик, які отримані з об'єктів, що мають дефекти та без них [5].

Теорія дисперсійного аналізу випадкових регресій (коваріаційний аналіз [4]) виділяє чотири незалежні  $F$  – статистики, що дозволяють тестувати на статистичну значущість незалежні складові дисперсійного розкладання коефіцієнтів  $V_{jl}$  по перетинах  $a$  і  $b$  тривимірного зображення досліджуваної моделі.

**Постановка задачі.** Мета статті полягає у розробці методичного, алгоритмічного і програмного засобів визначення множин  $F$  – статистик, що характеризують стан складних промислових об'єктів шляхом обробки тривимірних зображень з застосуванням коваріаційного аналізу.

**Розробка методики формування множини F-статистик для аналізу тривимірних зображень.** Алгоритм формування множин  $F$  – статистик має наступний вигляд [6].

1. Вихідна парна вибірка розмірністю в  $N$  елементів розбивається на  $s$  груп ( $s = \overline{1, k}$ ) по  $i$  елементів ( $i = \overline{1, n_s}$ ) у кожній групі  $s$ .

2. Кожна група  $s$  апроксимується лінійною регресією  $v_s = A_s + B_s z$ .

3. Для кожної групи  $s$  розраховуються вагові коефіцієнти

$$\omega_s = \sum_{i=1}^{n_s} (z_{s_i} - \bar{z}_s)^2, \text{ де } \bar{z}_s = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} z_{s_i}.$$

4. Розраховуються значення:

$$\omega_c = \sum_{s=1}^k \omega_s, \quad B_c = \frac{1}{\omega_c} \sum_{s=1}^k \omega_s \cdot B_s. \quad (3)$$

5. Розраховуються середні значення  $v_s$  у кожній з  $s$  вибірок із вихідних

даних  $\bar{V}_s = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} v_{s_i}$  і складаються нові пари з  $\bar{Z}_s$  і  $\bar{V}_s$ .

6. Обчислюються загальні середні для всіх  $Z_{s_i}$  і  $V_{s_i}$ :

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^{n_s} z_{s_i}; \quad \bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^{n_s} v_{s_i}, \text{ де } N = \sum_{s=1}^k n_s.$$

7. Обчислюються значення:

$$\omega_m = \sum_{s=1}^k n_s (\bar{Z}_s - \bar{Z})^2, \quad B_m = \frac{1}{\omega_m} \sum_{s=1}^k n_s (\bar{Z}_s - \bar{Z})(\bar{V}_s - \bar{V}). \quad (4)$$

8. Використовуючи (3) і (4), розраховуються

$$\omega_0 = \omega_c + \omega_m, \quad B_0 = \frac{\omega_c B_c + \omega_m B_m}{\omega_0}.$$

9. Розраховуються наступні коефіцієнти:

$$Q_0 = \omega_0 B_0^2; \quad Q_1 = \frac{\omega_c \omega_m}{\omega_0} (B_c - B_m)^2; \quad Q_2 = \sum_{s=1}^k n_s [\bar{V}_s - \bar{V} - B_m (\bar{Z}_s - \bar{Z})]^2;$$

$$Q_3 = \sum_{s=1}^k \omega_s (B_s - B_c)^2; \quad Q_\Delta = \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^{n_s} [v_{si} - \bar{V}_s - B_s (z_{si} - \bar{Z}_s)]^2;$$

$$Q = \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^{n_s} (v_{si} - \bar{V})^2.$$

10. Розраховуються  $F$ -статистики:

$$F_0 = \frac{Q_0}{Q_\Delta} (N - 2k); \quad F_1 = \frac{Q_1}{Q_\Delta} (N - 2k); \quad F_2 = \frac{Q_2}{Q_\Delta} \left( \frac{N - 2k}{k - 2} \right); \quad F_3 = \frac{Q_3}{Q_\Delta} \left( \frac{N - 2k}{k - 1} \right).$$

11. Здійснюється виведення на екран:

$$F_0, n_0 = 1, n_\Delta = N - 2k; \quad F_1, n_1 = 1, n_\Delta = N - 2k;$$

$$F_2, n_2 = k - 2, n_\Delta = N - 2k; \quad F_3, n_3 = k - 1, n_\Delta = N - 2k.$$

Отримані, завдяки наведеному алгоритму, множини  $F$ -статистик використовуються при контролі стану складних промислових об'єктів. Причому, за локальні внутрішні групові геометричні особливості зображення відповідають  $F_1$ ,  $F_2$  (частинні адитивні зміщення) і  $F_3$  (мультиплікативні зміни).  $F_0$  характеризує загальну лінійну зміну середніх значень  $v_{si}$  при монотонних змінах  $j$  (модель (1)) і  $l$  (модель (2)).

**Алгоритмічне забезпечення методики.** Для формування алгоритмічного забезпечення та програмного продукту автоматичного розрахунку  $F$ -статистик, відповідно до мети статті, необхідно виконати послідовно три етапи [7]:

- складання алгоритму роботи програми;
- розробка інтерфейсу користувача;
- розробка програми.

В якості алгоритму при розрахунку  $F$ -статистик інформаційних сигналів приймається алгоритм, зображений на рис. 1. Відповідно до цього алгоритму розрахунок  $F$ -статистик виконується за п'ятнадцять кроків. Сам алгоритм складається з таких складових, як:

- крок;
- трансформація;
- архів даних,

за допомогою яких можлива реалізація набору будь-яких математичних функцій.

Для розробки інтерфейсу користувача закладаються певні принципи роботи з програмою. Вхідна інформація для розрахунків  $F$ -статистик у розробленому програмному забезпеченні представляється у вигляді текстового файлу в форматі XML і може бути викликана на екран монітору, відповідно до рис. 2. При виконанні безпосередньо програми використовується вікно, яке показано на рис. 3.

У вікні основної програми (рис. 3) сформована таблиця, у лівій частині якої знаходяться завантажені вхідні дані, а в правій частині виводиться результат розрахованих  $F$ -статистик. Розроблений інтерфейс має певний на-

бір допоміжних функцій з додавання та видалення вхідних даних, а також вибору розміру групи (регресії) і кількості груп, що необхідно для проведення обробки інформації при дослідженнях.

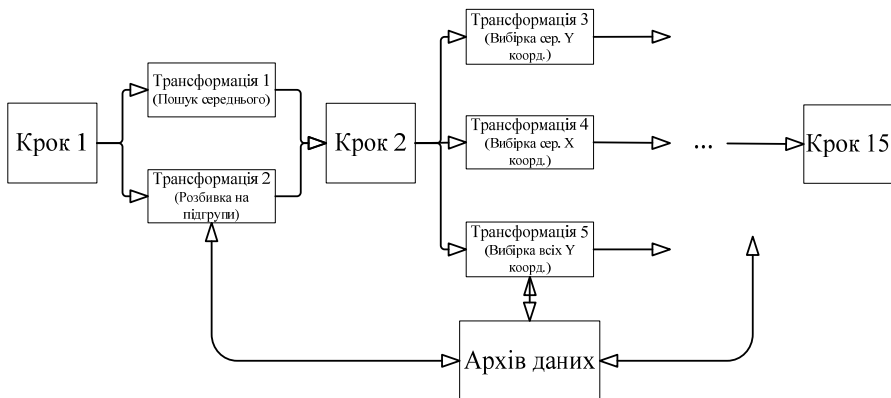


Рис. 1 – Алгоритм програмного забезпечення систем обробки інформації при розрахунку  $F$  – статистик.

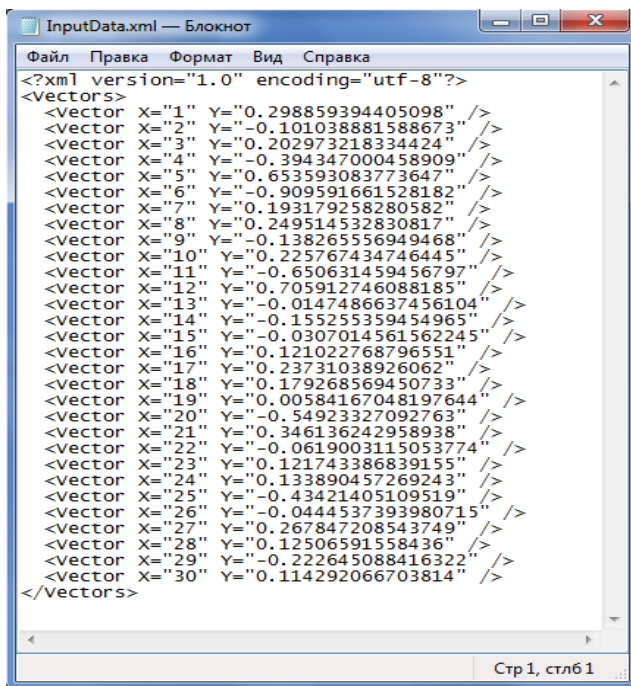


Рис.2 – Вхідна інформація для розрахунків  $F$  – статистик.

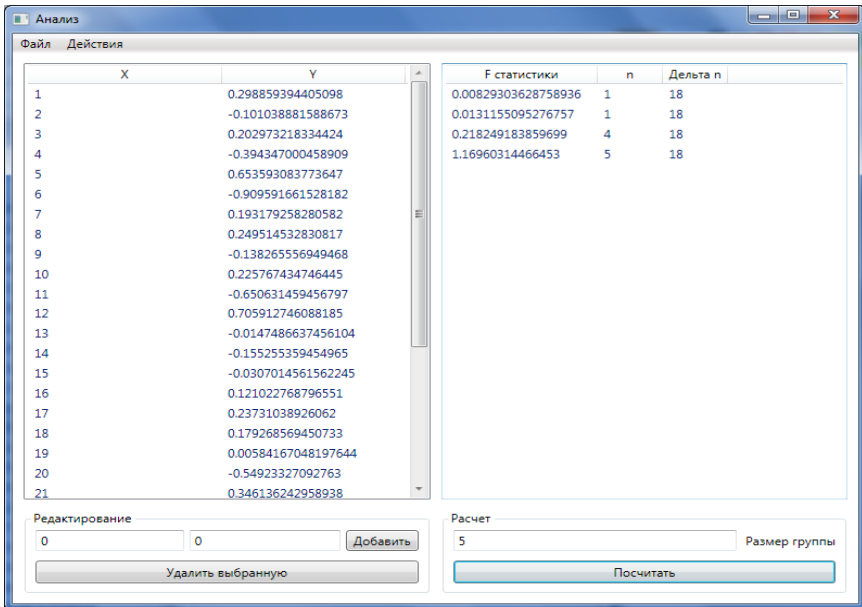


Рис. 3 – Приклад виконання програми.

**Фрагменти програмного забезпечення.** Для розробки програмного забезпечення була обрана програмна платформа Microsoft.NET Framework 3.5 і мова програмування C# [8]. Найбільш цікавими фрагментами розробленої програми є код основної програми та код трансформації лінійної регресії за методом найменших квадратів.

Код основної програми має вигляд:

```

LinearRegressionTransform lineReg = new LinearRegressionTransform("inputGroup", "regression");
SelectTransform<Vector, double> xGroupSelect = new SelectTransform<Vector, double>(v => v.X, "inputGroup", "inputGroupX", true);
SelectTransform<Vector, double> yGroupSelect = new SelectTransform<Vector, double>(v => v.Y, "inputGroup", "inputGroupY", true);
blockLink1.AddTransform(lineReg);
blockLink1.AddTransform(xGroupSelect);
blockLink1.AddTransform(yGroupSelect);
SelectTransform<Line, double> kSelect = new SelectTransform<Line, double>(l => l.K, "regression", "coefK", false);
AverageTransform<double> xGroupAverage = new AverageTransform<double>("inputGroupX", "averageX");
AverageTransform<double> yGroupAverage = new AverageTransform<double>("inputGroupY", "averageY");
blockLink2.AddTransform(kSelect);
blockLink2.AddTransform(xGroupAverage);
blockLink2.AddTransform(yGroupAverage);

```

Код трансформації лінійної регресії за методом найменших квадратів виглядає наступним чином:

```

public override void PerformTransformation()
{
    ITransformData data = Link.DataStorage[inputParamName];
    if (data.Value.GetType() != typeof(Vector[]))
        throw new ArgumentException("Входные данные имеют неправильный тип.");
    Vector[] inputData = (Vector[])data.Value;
    double sumOne = inputData.Aggregate(0d, (sum, point) => point.X * point.Y + sum)
* inputData.Length;
    double sumTwo = inputData.Aggregate(0d, (sum, point) => point.X + sum);
    double sumThree = inputData.Aggregate(0d, (sum, point) => point.Y + sum);
    double sumFour = inputData.Aggregate(0d, (sum, point) => Math.Pow(point.X, 2) +
sum) * inputData.Length;
    double sumFive = Math.Pow(sumTwo, 2);
    double k = (sumOne - sumTwo * sumThree) / (sumFour - sumFive);
    double b = (sumThree / inputData.Length) - k * (sumTwo / inputData.Length);
    TransformData<Line> resultData = new TransformData<Line>(new Line(k, b));
    Link.DataStorage.Add(outputParamName, resultData);
    OnCalculated();
}

```

Розроблена програма була апробована при безпосередній діагностиці стану вібраційних об'єктів на ДП «Харківський бронетанковий завод» і довела свою ефективність.

**Висновки.** У даній статті наведені результати розробки методичного, алгоритмічного і програмного засобів визначення множин  $F$  – статистик, що характеризують стан складних промислових об'єктів шляхом обробки тривимірних зображень з застосуванням коваріаційного аналізу.

**Список літератури:** 1. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // УФН. – 2001. – Т.171. – №5. – С. 465 – 501. 2. Неразрушающий контроль: вибродіагностика. Справочник в 7 томах // Ф.А. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова, Р.В. Васильева и др.; под редакцией В.В. Клюева. – М.: Машиностроение. – Т. 7. – 2005. – 829 с. 3. Щапов П.Ф., Аверунин О.Г. Повышение достоверности контроля и диагностики объектов в условиях неопределённости: монография. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 191 с. 4. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого. – М.: Мир, 1981. – 520 с. 5. Щапов П.Ф., Мигущенко Р.П. Синтез двумерных диагностических параметров при ковариационном анализе трехмерных вейвлет-преобразований вибросигналов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – №3. С. 69 – 75. 6. Мигущенко Р.П. Методи і пристрої систем багатопараметрової функціональної діагностики вібраційних об'єктів (теоретичні основи та впровадження): дис. докт. техн. наук: 05.11.013 / Р.П. Мигущенко. – Харків, 2014. – 475 с. 7. Кристиан Нейгел. C# 5.0 и платформа. NET 4.5 для профессионалов Professional C# 5.0 and .NET 4.5 / Кристиан Нейгел. – М.: «Диалектика», 2013. – 1440 с. 8. Хейлсберг А. Язык программирования C#. Классика Computers Science. 4-е издание / А. Хейлсберг, М. Торгерсен, С. Вилтамут, П. Голд. – СПб.: «Питер», 2012. – 784 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dremin, I. M., O. V. Ivanov and V. A. Nechitajlo. "Vejvlety i ih ispol'zovanie." *UFN*. Vol. 171. No. 5. 2001. 465–501. Print. 2. Balickij, F. A., et al. *Nerazrushajushhij kontrol': vibrodiagnostika. Spravochnik v 7 tomah*. Ed. V. V. Kljuev. Vol. 7. Moscow: Mashinostroenie, 2005. Print. 3. Shhapov, P. F., and O. G. Avrunin. *Povyshenie dostovernosti kontrolja i diagnostiki objektov v uslovijah neopredel'jonnosti: monografija*. Kharkov: HNADU, 2011. Print. 4. Dzhonson, N., and F. Lion. *Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke: Metody planirovanija jeksperimenta. Per. s angl.* Ed. Je. K. Leckij. Moscow: Mir, 1981. Print. 5. Shhapov, P. F., and R. P. Migushhenko. "Sintez dvumernyh diagnosticheskikh parametrov pri kovariacionnom analize trehmernyh vejvlet-preobrazovanij vibrosignalov." *Informacijni tehnologii' ta komp'juterna inzhenerija*. No. 3. 2013. 69–75. Print. 6. Migushhenko, R. P. *Metody i prystroji' sistem bagatoparametrovoi' funkcion-*

*al'noi' diagnostyky vibracijnyh ob'ektiv (teoretychni osnovy ta vprovadzhennja). Dis. ... d-ra tehn. nauk.* Kharkiv, 2014. Print. 7. Kristian, Nejgel. *C# 5.0 i platforma .NET 4.5 dlja professionalov. Professional C# 5.0 and .NET 4.5.* Moscow: «Dialektika», 2013. Print. 8. Hejlsberg, A., et al. *Jazyk programirovanija C#. Klassika Computers Science. 4<sup>th</sup> ed. izdanie.* St. Petersburg: «Piter», 2012. Print.

Надійшла (received) 13.05.2015

УДК 517.955.8

**Е.А. НАБОКА**, канд. физ.-мат. наук, ст. преп., НТУ «ХПИ»

## **СИНХРОНИЗАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ ДВУХ СВЯЗАННЫХ ПЛАСТИН БЕРГЕРА С НЕЛИНЕЙНЫМ ВНУТРЕННИМ И ГРАНИЧНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ. ЧАСТЬ 1**

Рассматривается модель Бергера нелинейных колебаний двух одинаковых упруго связанных пластин с частично зашумленной и частично свободной границей. Предполагается, что нелинейные диссипационные силы действуют во внутренней части пластин и на свободной части их границ. Изучена зависимость структуры глобального аттрактора системы от параметра  $\gamma$ , пропорционального интенсивности взаимодействия пластин. Доказано, что верхний предел аттрактора при  $\gamma \rightarrow \infty$  принадлежит диагонали фазового пространства системы, что означает наличие эффекта синхронизации динамики пластин в пределе, когда интенсивность связи пластин системы и время стремятся к бесконечности.

**Ключевые слова:** модель Бергера, упруго связанные пластины, асимптотическая синхронизация, нелинейная диссипация, свободная граница.

**Введение.** Разнообразные явления синхронизации составных систем можно наблюдать в физике, химии, биологии, социальном поведении человека и др. Различные аспекты синхронизации изучались с использованием математических теорий, численных и физических экспериментов, статистических расчетов и так далее [1, 2]. С математической точки зрения синхронизация связанных диссипативных уравнений изучалась *Арамановичем* и *Родригесом* [3, 4], *Клойденом* и *Карабалло* [5, 6]. Большинство имеющихся результатов относятся к случаю конечномерных диссипативных систем. Для бесконечномерного случая доступны результаты, описывающие явления синхронизации параболических составных систем [7, 8]. Синхронизация составной системы общего вида с *липшицевой нелинейностью* рассмотрена в [9]. Синхронизация связанных *пластин Бергера* изучалась в работах [10, 11] для случая линейного внутреннего демпфирования, в статье [12] для случая двух связанных пластин с нелинейным внутренним демпфированием, в [13] рассмотрена синхронизация двух частично связанных пластин.

**Постановка задачи.** В данной работе рассматривается система двух связанных пластин с частично зашумленной и частично свободной границей (рис. 1). Предполагается, что в состоянии покоя пластины располагаются одна под другой в параллельных плоскостях. Обозначим  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  область, которую занимает пластина в состоянии покоя. Пусть функции  $u(x, t)$ ,  $v(x, t)$  –