

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:

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

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

Функції F_a і F_b це не випадкові функції (*тренди*), а δ_{jl} і ε_{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:

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

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

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

10. Розраховуються F -статистики:

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

11. Здійснюється виведення на екран:

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

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

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.

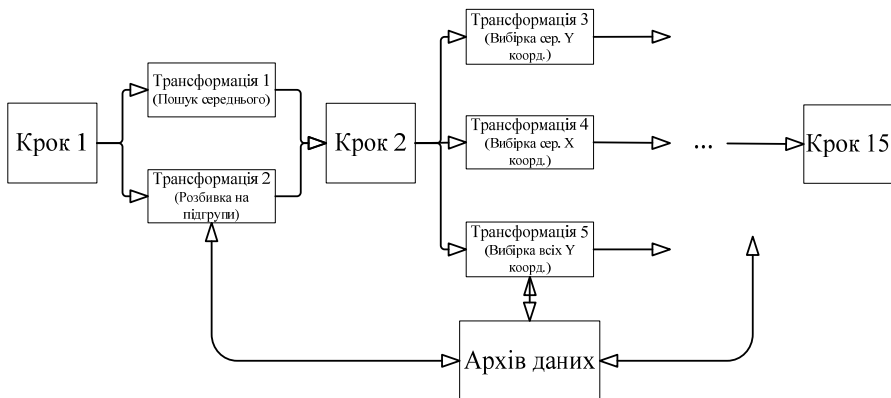


Рис. 1 – Алгоритм програмного забезпечення систем обробки інформації при розрахунку F – статистик.

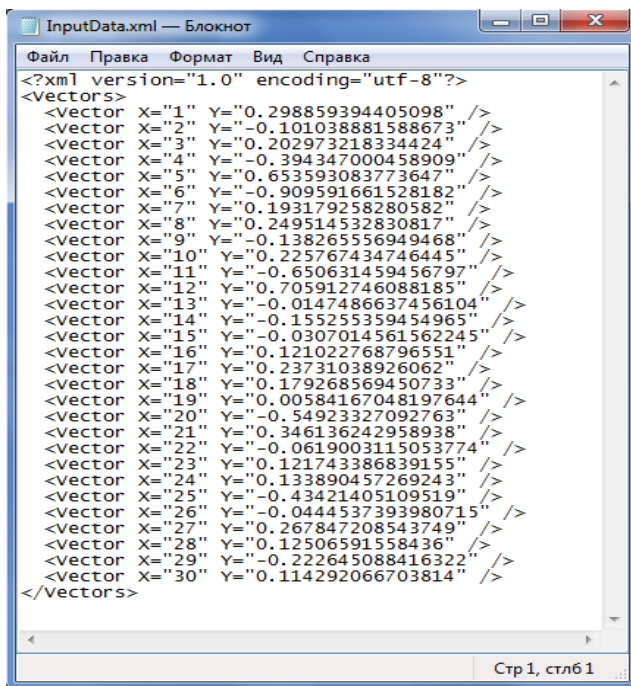


Рис.2 – Вхідна інформація для розрахунків F – статистик.

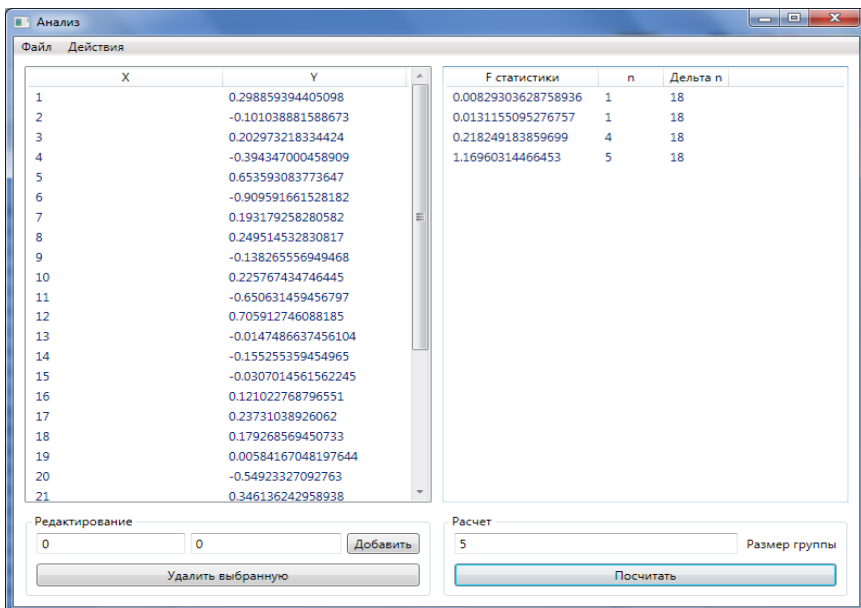


Рис. 3 – Приклад виконання програми.

Фрагменти програмного забезпечення. Для розробки програмного забезпечення була обрана програмна платформа Microsoft.NET Framework 3.5 і мова програмування С# [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 довели 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'jektiv (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. 4th 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 γ , 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 $u(x, t)$, $v(x, t)$ –

© Е. А. Набока, 2015