

# СТИСНЕННЯ ДАНИХ ПРИ ФОРМУВАННІ ПРОСТОРУ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ НЕПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ

В.Д.Павленко, О.О.Фомін

Одеський національний політехнічний університет

65044, пр. Шевченко 1, Одеса, Україна

тел. (048) 746 72 29, e-mail: pavlenko\_vitalij@mail.ru

Пропонується метод модельної діагностики, заснований на непараметричній ідентифікації об'єктів контролю з використанням інтегровано-ступневих рядів Вольєрра. Досліджується за допомогою методів статистичної класифікації інформативність діагностичних параметрів, що формуються на основі таких моделей: евристичних ознак, моментів багатомірних вагових функцій, а також ознак, виділених з використанням методу стиснення, заснованого на Wavelet-перетворенні.

## ВСТУП

В цей час в технічній діагностиці розвивається напрям, заснований на відновленні моделі (оператора) об'єкта, що діагностується [1]. Звичайно передбачається, що несправності змінюють тільки параметри моделі об'єкта, які при діагностуванні оцінюються методами параметричної ідентифікації. Однак часто, наприклад, при виробництві виробів електронної техніки, більшість дефектів приводить до зміни не тільки параметрів моделі об'єкта, але і її структури, що обумовлює застосування методів непараметричної ідентифікації для побудови математичної моделі об'єкта контролю на основі даних експеримента "вхід - вихід".

У модельній діагностиці процедура діагностування виконується в два етапи. На першому отримують початкову (первинну) інформацію про об'єкт у вигляді сигналів відгуків на пробні впливи. На другому етапі ця інформація обробляється для виділення діагностичних ознак і рішення про належність даного об'єкта до певного класу за фізичним (технічним) станом. Для побудови діагностуючого правила використовують методи статистичної класифікації (розпізнавання образів) [2].

Існуючі методики модельної діагностики, засновані на використанні динамічних характеристик, обмежуються тільки лінійними моделями, а методики, засновані на обліку ефектів нелінійності, використовують інформацію тільки про властивості статичних характеристик. Реальні об'єкти, як правило, одночасно володіють і нелінійними і динамічними властивостями. Формально будь-який нелінійний динамічний об'єкт може бути описаний рядом Вольєрра [2, 3].

У даній роботі пропонується метод модельної діагностики, заснований на непараметричній ідентифікації об'єктів контролю з використанням рядів Вольєрра, досліджується за допомогою методів статистичної класифікації інформативність діагностичних параметрів, що формуються на основі таких моделей.

## 1. НЕЛІНІЙНІ НЕПАРАМЕТРИЧНІ ДИНАМІЧНІ МОДЕЛІ

В якості інформативного опису об'єктів контролю пропонується використовувати нелінійні непараметричні динамічні моделі у вигляді рядів Вольєрра

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

де  $w_1(\tau), w_2(\tau_1, \tau_2), \dots, w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  - багатомірні вагові функції або ядра Вольєрра (ЯВ),  $x(t)$  - вхідний вплив, а  $y(t)$  - відгук об'єкта при нульових початкових умовах.

При цьому сукупність багатомірних ЯВ повністю характеризує і нелінійні і динамічні властивості, отже, технічний стан об'єктів контролю. Застосування моделей на основі рядів Вольєрра дозволяє більш повно і точно врахувати нелінійні і інерційні властивості об'єктів контролю, робити процедуру модельної діагностики більш універсальною, підвищує надійність діагнозу.

Діагностична процедура в цьому випадку зводиться до визначення ЯВ за даними експеримента "вхід - вихід" [3] і побудові на основі отриманих ядер діагностичної системи ознак, в просторі яких будеться вирішальне (діагностичне) правило оптимальної класифікації [4].

Необхідно зазначити, що в задачах модельної діагностики адекватність моделі об'єкту контролю потрібно розуміти не в значенні точності опису відгуку об'єкта, а в значенні інформативності її з точки зору достовірного (надійного) розпізнавання технічного стану. Тому у разі застосування ЯВ при формуванні вхідного опису нелінійних динамічних

об'єктів контролю в діагностичних дослідженнях необхідно забезпечити насамперед високу точність оцінки перетинів багатомірний ЯВ малих порядків, що часто на практиці виявляється достатнім для побудови ефективної системи розпізнавання.

Застосування методів теорії розпізнавання образів для рішення задач технічної діагностики з використанням непараметричних динамічних моделей об'єктів контролю у вигляді рядів Вольтерра засноване на наступних передумовах:

1. Існує об'єктивний (але неявний) зв'язок між багатомірними ЯВ, що характеризують структуру об'єкта контролю і його технічним станом, іншими словами, існує деяка функція  $F(H, S)$ , зв'язуюча стан  $S$  з ЯВ  $H = \{h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)\}_{n=1}^N$ .

2. Функція  $F(H, S)$ , відновлена на основі ЯВ досліджених об'єктів, може бути екстрапольована на об'єкти з невідомими властивостями.

3. Структура об'єкта контролю може бути адекватно представлена за допомогою ЯВ.

Можливі різні підходи до рішення задач технічної діагностики, відмінні засобами вибору інформативних ознак і алгоритмами відновлення функції  $F(H, S)$  [2,4].

Ефективність застосування методів розпізнавання образів для діагностування в основному залежить від інформативності сукупності параметрів, що використовується. Якщо вибрані параметри, що досить повно характеризують внутрішню структуру об'єкта діагностування, то основна маса об'єктів, будучи ідентичною по структурі, відобразиться в просторі цих параметрів у вигляді щільної множини точок. Об'єктам з особливостями структури (дефектним) будуть відповідати точки, що відхиляються від цієї щільної множини і розташовані значно рідше в зв'язку з різноманітністю дефектів у таких об'єктів і їх відносної нечисленності (якщо діагностуються високонадійні прилади, наприклад, інтегральні мікросхеми).

## 2. ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРУ ОЗНАК

Вибір сукупності діагностичних ознак (задача формування простору інформативних ознак) впливає вирішальним чином на точність розпізнавання технічного стану об'єктів діагностування.

Математично задача вибору діагностичних ознак формулюється таким чином. Нехай заданий початковий простір ознак  $X$ , розмірністю  $p$ . Необхідно знайти перетворений простір  $Y$ , елементами якого є  $q$  - мірні вектори, притому  $q < p$ . Формально така задача полягає у визначенні відображення  $A: X \rightarrow Y$ , яке початковому простору  $X$  ставить у відповідність шуканий простір  $Y$ . Рішення цієї задачі може бути досягнуто двома шляхами.

Перший з них заснований на зважуванні тим або іншим засобом різних систем ознак з метою оцінки

їх інформативності (корисність) при розпізнаванні. У даній роботі, ефективність вибраного набору ознак оцінювалась за результатами рішення задачі класифікації об'єктів екзаменаційної вибірки за допомогою побудованого одним з алгоритмів навчання вирішального правила. Набори ознак, для яких вірогідність правильного розпізнавання мала, відкидаються і як діагностична система ознак вибирається набір, для якого додання будь-якої нової ознаки не збільшує або збільшує не набагато його інформативність. Якщо параметри статистично незалежні, то діагностичну систему ознак можна сформувані шляхом оцінки інформативності кожного параметра і відкидання деякої кількості найменш інформативних з них. При такій процедурі формування ознакового простору значення самих ознак не змінюється, а тільки зменшується їх кількість.

Інший шлях вирішення задачі стиснення діагностичної інформації при розпізнаванні станів об'єктів контролю полягає в відшукуванні оптимального в деякому розумінні перетворення початкового простору векторів вимірювань в простір зображень меншої розмірності. Процедура розпізнавання станів об'єкта в редуцированому просторі ознак виявляється більш простою, оскільки обсяг діагностичної інформації, що обробляється зменшується. Зменшення розмірності ознакового простору дозволяє використати більш складні нелінійні вирішальні правила, що підвищують якість розпізнавання. Однак на відміну від описаного вище методу вибору діагностичних ознак цей метод не передбачає скорочення кількості вимірювань. У цьому випадку нові ознаки виявляються відірваними від конкретного фізичного змісту і мають тільки абстрактне інформаційне значення.

Для опису об'єкта контролю на вході системи, що розпізнає у вигляді вектора первинних ознак  $\bar{x}$  можна використати або кінцевий набір значень відліків перетинів багатомірних ЯВ, або коефіцієнти розкладання ЯВ за деякою системою функцій. У ряді випадків можна сформувані деякі евристичні характеристики, які можуть входити як компоненти у вектор ознак. В якості таких характеристик можна вибрати максимальне по модулю значення і відповідний йому час, площу головного перетину ЯВ, крутість його в точці  $t=0$ , час перехідного процесу. Застосування таких евристичних ознак часто дозволяє значно скоротити розмірність вектора ознак початкового опису.

Більш універсальний підхід при формуванні вектора інформативних параметрів складається у використанні так званих моментів ЯВ об'єктів контролю, які обчислюються за формулою

$$M_{ij, \dots, k}^l = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \tau_1^i \tau_2^j \dots \tau_n^k w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n \quad (2)$$

тут  $i, j, \dots, k = 0, 1, \dots, \infty$ .

Представляє також інтерес використання методу стиснення діагностичної інформації за допомогою перетворення сплесків (Wavelet-перетворення) [5].

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ОЗНАК

Для дослідження засобів стиснення даних при формуванні простору діагностичних ознак був вибраний об'єкт, який описується нелінійним диференціальним рівнянням вигляду

$$\frac{dy(t)}{dt} + \alpha \cdot y(t) + \beta \cdot y^2(t) = x(t), \quad (3)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  - постійні коефіцієнти (параметри), недоступні для вимірювань. Для такого об'єкта модель у вигляді двох членів ряду Вольтерра при нульових початкових умовах має вигляд

$$y(t) = \int_0^t w_1(\tau_1) x(t - \tau_1) d\tau_1 + \int_0^t \int_0^{\tau_1} w_2(\tau_1, \tau_2) x(t - \tau_1) x(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (4)$$

тут  $x(t)$  і  $y(t)$  - сигнали, що вимірюються відповідно на вході і виході об'єкта контролю;

$$w_1(\tau_1) = e^{-\alpha\tau_1},$$

$$w_2(\tau_1, \tau_2) = \frac{\beta}{\alpha} (e^{-\alpha\tau_1} e^{-\alpha\tau_2} - e^{-\alpha\tau_2}), \tau_1 \leq \tau_2. \quad (5)$$

Звідси видно, що для діагностики станів такого об'єкта по параметрах  $\alpha$  і  $\beta$  цілком досить використати ЯВ другого порядку при формуванні вектора інформативних параметрів-ознак. Як початковий опис об'єкта контролю тут використовується головний перетин ЯВ при  $\tau_1 = \tau_2 = t$

$$w_2(t, t) = \frac{\beta}{\alpha} (e^{-2\alpha t} - e^{-\alpha t}). \quad (6)$$

Побудова моделі об'єкта (6) за даними експеримента "вхід - вихід" здійснюється одним з методів активної ідентифікації [1,3].

Ефективність виділених діагностичних ознак оцінюється за результатами рішення задачі класифікації об'єктів повчальної вибірки за допомогою побудованого на основі методу статистичних рішень діагностичного правила.

Ефективність виділених діагностичних ознак оцінювалася за результатами рішення задачі класифікації об'єктів екзаменаційної вибірки за допомогою побудованого на основі даних повчальної вибірки методом статистичних рішень діагностичного правила [2,4]. Для оцінки

достовірності діагностування використовувався відсоток правильного розпізнавання (ВІР):

$$P = \sum_{i=1}^m l_i \cdot \left( \sum_{i=1}^m L_i \right)^{-1} \cdot 100 \quad (7)$$

де  $l_i$  - кількість правильно класифікованих елементів  $i$ -го класу в екзаменаційній вибірці;  $L_i$  - кількість елементів  $i$ -го класу в екзаменаційній вибірці;  $m$  - кількість класів.

Реалізації об'єктів з різними значеннями параметрів  $\alpha$  і  $\beta$  генерувалися коштами імітаційного моделювання в середовищі MATLAB. Повчальна і екзаменаційна вибірки формувалися на основі дискретних значень функцій (6) для об'єктів чотирьох класів: 1-й клас складають об'єкти умовно прецедатні (параметри  $\alpha$  і  $\beta$  змінюються в межах  $\pm 5\%$  від номінальних значень  $\alpha_n$  і  $\beta_n$ ); 2-й клас - об'єкти умовно непрацездатні по параметру  $\alpha$  (параметр  $\beta$  змінюється в межах  $\pm 5\%\beta_n$ , а параметр  $\alpha \in (-1.1\alpha_n, -1.05\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n, 1.1\alpha_n)$ ); 3-й клас - об'єкти умовно непрацездатні по параметру  $\beta$  (параметр  $\alpha$  змінюється в межах  $\pm 5\%\alpha_n$ , а параметр  $\beta \in (-1.1\beta_n, -1.05\beta_n) \cup (1.05\beta_n, 1.1\beta_n)$ ); 4-й клас - непрацездатні об'єкти по  $\alpha$  та  $\beta$  одночасно.

Таким чином для розділення цих класів знаходилися три вирішальні функції  $d_1(x)$ ,  $d_2(x)$ ,  $d_3(x)$ . Вирішальна функція  $d_1(x)$  відділяє об'єкти 1-го класу від 2-го, 3-го і 4-го;  $d_2(x)$  - відділяє об'єкти 2-го класу від 3-го і 4-го;  $d_3(x)$  - розділяє об'єкти 3-го і 4-го класів.

Досліджувалася інформативність наступних евристичних ознак, виділених на основі функцій (6): 1- екстремум функції, 2-час екстремума; 3-похідна функції в точці  $t=0$ , 4-інтеграл від функції, 5-час перехідного процесу. Найкращі результати досліджень інформативності окремих ознак і їх сукупностей у вигляді отриманих значень ВІР для трьох вирішальних правил приведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Ознаки	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$
4	73.03	98.91	48.69
1,4	96.73	99.78	99.67
1,2,4	96.24	99.12	99.67

Найбільш високі ВІР досягаються для поєднання двох ознак {1,4}: екстремума і інтеграла від функції (6). Для сполучень ознак з трьох і вище ВІР істотно нижче.

При стисненні за допомогою моментів функцій (6) досліджувалася інформативність чотирьох моментів: 0-го, 1-го, 2-го і 3-го порядків. Відповідні номери цих ознак при дослідженнях: 1,2,3 і 4. Найкращі з отриманих результатів ВІР приведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Ознаки	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$
4	85,83	88,66	100,00
2,3	97,16	100,00	100,00
1,2,3	95,83	100,00	100,00
1,3,4	95,16	100,00	100,00

При використанні перетворення сплесків (Wavelet-перетворення) від функцій (6) виділялися в якості ознак наступні характерні точки: 1 - максимум функції (по модулю); 2 - час, при якому досягається максимум функції; 3 - значення функції в момент часу  $t=0$ ; 4 - різниця між значенням функції в момент часу  $t=0$  і значенням максимуму функції; 5 - інтеграл від функції. Найкращі з отриманих результатів досліджень у вигляді ВПР приведені в таблиці 3.

Таблиця 3.

Ознаки	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$
3	91,11	90,06	94,71
1,4	98,80	100	98,08
1,3,4	98,80	100	98,08
1,3,4,5	98,56	100	98,08

Крім того, досліджувалися на інформативність ознаки, що являють собою значення Wavelet-образів, взяті через рівні проміжки часу на інтервалі, де сконцентрована вся енергія перетворених функцій. При дослідженнях таких ознак вибрано п'ять: 1,2,...,5. Отримані результати ВПР приведені в таблиці 4.

Таблиця 4.

Ознаки	$d_1(x)$	$D_2(x)$	$d_3(x)$
3	82,83	91,77	100
2,4	97,66	100	100
2,3,4	92,83	100	100
1,2,3,4,5	94,83	100	100

З таблиць 3 і 4 видно, що інформативність ознак, виділених на Wavelet-образах ЯВ вище, ніж інформативність ознак виділених в характерних точках ЯВ (таблиця 1).

## ВИСНОВКИ

Запропонований в роботі метод діагностичного контролю, заснований на використанні для опису нелінійних об'єктів контролю багатомірний вагових функцій (ЯВ) і стисненні діагностичної інформації,

досліджений експериментально за допомогою імітаційного моделювання. Отримані результати показують ефективність методу при розпізнаванні чотирьох класів станів для розглянутого тестового нелінійного об'єкта контролю.

Аналіз діагностичної цінності сукупностей ознак, що формуються, показав, що найбільш висока інформативність ознак досягається при стисненні діагностичної інформації за допомогою Wavelet перетворення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. - 256 с.
2. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. / Пер. с англ. Под ред. Ю.И.Журавлева. - М.: Мир, 1978. - 411 с.
3. Апарцин А.С., Солoduша С.В. О математическом моделировании нелинейных динамических систем рядами Вольтерры. - Электронное моделирование, 1999, №2, с.3-12.
4. Павленко В.Д., Фомин А.А. Комбинированный метод построения решающего правила статистической классификации. - Электронное моделирование, 2001, №4, с.34-39.
5. Лотоцкий Р.В. Методи стискання даних за допомогою перетворення сплесків.-У зб.: Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: Праці 5-ої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2000, Київ, 27 листопада -1 грудня 2000 р., с.63-66.