

# МЕТОДИ РЕДУКЦІ ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛІНІЙНИХ ДІНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ БАГАТОМІРНИХ ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ

В.Д.Павленко, О.О.Фомін

Одеський національний політехнічний університет  
65044, пр. Шевченка 1, Одеса, Україна  
тел. (048) 746 72 29, e-mail: pavlenko\_vitalij@mail.ru

Пропонується розвиток методу модельної діагностики, заснованого на непараметричній ідентифікації об'єктів контролю з використанням інтегро-ступеневих рядів у вигляді багатомірних вагових функцій.

Досліджується інформативність діагностичних ознак вейвлет-перетворень функцій головного перетину, що формуються за допомогою багатомірний вагових функцій.

Розглядаються питання впливу порядку моделі об'єкта контролю на інформативність отриманої системи діагностичних ознак.

## ВСТУП

У 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 (ОК) 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 приналежність даного об'єкта до певного класу за фізичному (технічному) станом. Для побудови діагностуючого правила використовують методи статистичної класифікації (розпізнавання образів) або нейронні мережі.

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.

У роботі розвивається метод модельної діагностики, заснований на непараметричній

ідентифікації об'єктів контролю з використанням багатомірний вагових функцій (БВФ) [2], досліджується інформативність діагностичних параметрів, що формуються на основі вейвлет-перетворень таких моделей.

## НЕЛІНІЙНІ НЕПАРАМЕТРИЧНІ ДІНАМІЧНІ МОДЕЛІ

Як інформативний опис ОК пропонується використати нелінійні непараметричні динамічні моделі у вигляді інтегро-ступеневих рядів:

$$y_j(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i_1=1}^{\nu} \dots \sum_{i_k=1}^{\nu} \int_0^t \dots \int_0^t w_{i_1 \dots i_k}^j(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) \times \prod_{l=1}^k x_{i_l}(t - \tau_l) d\tau_l \quad (1)$$

де  $K=1, 2, \dots, \infty$ ,  $w_{i_1 \dots i_k}^j(\tau_1, \dots, \tau_k)$  - БВФ  $n$ -го порядку по  $i_1, \dots, i_k$  входам і  $j$ -му виходу ( $j=1, 2, \dots, \mu$ ),  $\nu, \mu$  - кількість входів та виходів відповідно,  $x(t)$  - вхідний вплив,  $y_j(t)$  - відгук об'єкта на  $j$ -м виході при нульових початкових умовах.

Сукупність МВФ повністю характеризує і нелінійні і динамічні властивості, а отже, технічний стан ОК. Застосування моделей на основі МВФ дозволяє більш повно і точно врахувати нелінійні і інерційні властивості ОК, робить процедуру модельної діагностики більш універсальною, підвищує надійність діагнозу.

Діагностична процедура в цьому випадку зводиться до визначення МВФ за даними експеримента "вхід вихід" у тимчасовій або в частотній області і побудові на основі отриманого МВФ діагностичної системи ознак, в просторі яких будується вирішальне (діагностичне) правило оптимальної класифікації.

Як критерій ефективності процедури класифікації застосовується експериментальна оцінка: імовірність правильного розпізнавання (ВПР):

$$P = 1 - \sum_{i=1}^m L_i \cdot \left( \sum_{i=1}^m N_i \right)^{-1}, \quad (2)$$

де  $L_i$  - кількість об'єктів  $i$  класу, помилково віднесених до іншого класу;  $N_i$  - кількість елементів  $i$ -го класу в екзаменаційній вибірці;  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $m$  - кількість класів екзаменаційної вибірки.

Необхідно зазначити, що в задачах модельної діагностики адекватність моделі ОК 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 МВФ при формуванні вхідного опису нелінійних динамічних ОК в діагностичних дослідженнях необхідно забезпечити насамперед високу точність оцінки перетинів МВФ малих порядків, що часто на практиці виявляється достатнім для побудови ефективної системи, що розпізнає.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ВЕЙВЛЕТ- ПЕРЕТВОРЕНЬ МВФ

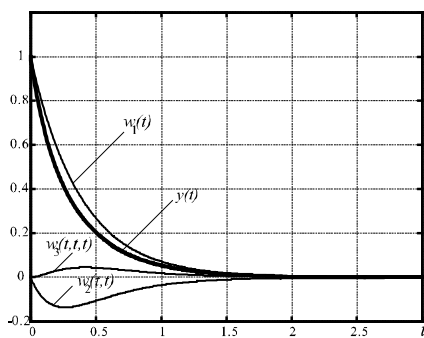
Представляє інтерес використання методу стиснення діагностичної інформації за допомогою перетворення сплесків (вейвлет - перетворення) [3]. Вейвлет-обробка сигналів забезпечує можливість ефективного стиснення сигналів з малими втратами інформації.

Пряме безперервне вейвлет-перетворення функції  $w_n(t - T_1, t - T_2, \dots, t - T_{n-1}, t)$  задається шляхом обчислення вейвлет-коефіцієнтів по формулі:

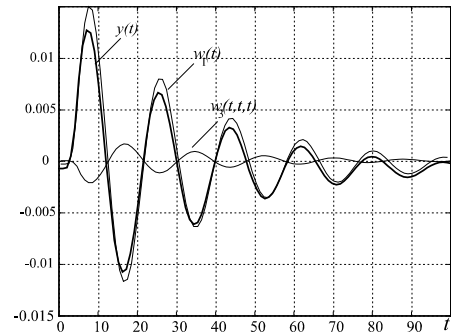
$$C(a, b) = \int_0^{\infty} w_n(t - T_1, t - T_2, \dots, t - T_{n-1}, t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

тут  $\psi(t)$  - функція перетворення (материнський вейвлет);  $a$  та  $b$  - параметри масштабу і зсуву вейвлета відповідно.

Для дослідження засобів стиснення даних при формуванні простору діагностичних ознак вибрані нелінійні динамічні ОК: аперіодична нелінійна система (мал. 1) [4, 5] і система управління двигуном постійного струму [6] (мал. 2).

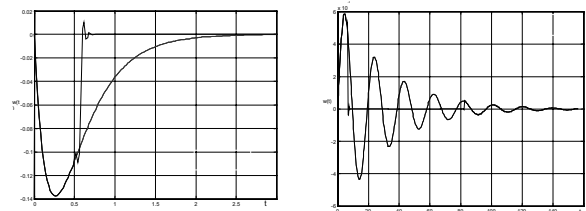


Мал. 1. БВФ 1-го, 2-го, 3-го порядку та відгук нелінійного динамічного ОК на імпульсний вхідний вплив

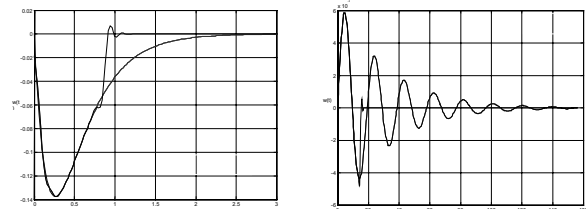


Мал. 2. БВФ 1-го, 3-го порядку і відгук ОК на імпульсний вхідний вплив системи управління двигуном постійного струму ОК

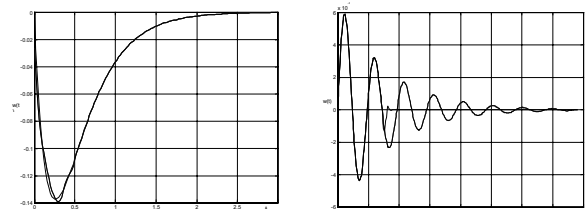
Для вибору вейвлета  $\psi(t)$  проведено ряд експериментів по перетворенню і відновленню сигналів різної форми з використанням вейвлетів Haar, Coiflet, Dobechi і Symlet.) (Найменші помилки апроксимації МВФ досягаються з використанням Coiflet, який взятий в якості базового вейвлета при стисненні діагностичної інформації (мал. 3).



Використання вейвлета Coiflet 1-го рівня



Використання вейвлета Coiflet 2-го рівня

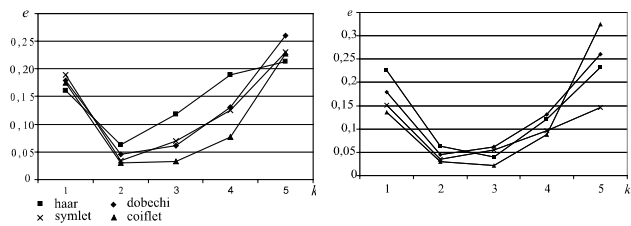


Використання вейвлета Coiflet 3-го рівня  
Мал.3. Відновлення сигналів різної природи за допомогою вейвлета Coiflet різних рівнів

## ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ, ЩО ФОРМУЮТЬСЯ НА ОСНОВІ ОКРЕМОГО МВФ

Для двох вейвлетів *Coiflet* і *Haar* виконані вейвлет-перетворення функції головного перетину МВФ другого порядку і отримані системи ознак *WC* і *WH*, що являють собою коефіцієнти вейвлет-образів (з індексами  $1+5(k-1)$ , з інтервалу, де сконцентрована вся енергія функцій, що перетворюються), отриманих на основі цих базових вейвлетів відповідно.

Результати класифікації нелінійних динамічних ОК у вигляді ВПР на отриманих системах ознак приведені в таблиці 1.



Мал.4. Помилки  $e$  відновлення сигналу за допомогою вейвлетів порядку  $k$  для нелінійної аперіодичної системи і системи з коливаннями.

Для порівняння вказані значення ВПР для систем ознак: евристичних (E), на основі моментів МВФ (M), відліків АЧХ і ФЧХ (AC і AF відповідно) і розкладання Карунена-Лоева МВФ (KL).

Таблиця 1. ВПР чотирьох класов ОК для систем признаков E, M, WC, WH, AC, AF, KL

Система ознак	Кількість ознак								
	1			2			3		
	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$
E	0,74	0,68	1,00	0,96	0,99	1,00	0,96	0,99	1,00
M	0,78	0,91	0,78	0,96	0,98	1,00	0,96	0,98	1,00
WC	0,87	0,85	0,98	0,96	0,99	1,00	0,96	0,99	1,00
WH	0,79	0,84	1,00	0,95	0,99	1,00	0,96	0,99	1,00
AC	0,85	0,82	1,00	0,96	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
AF	0,75	0,67	0,99	0,75	0,67	1,00	0,75	0,67	0,99
KL	0,83	0,96	0,66	0,93	0,99	1,00	0,96	0,99	1,00

Найбільш високі значення ВПР в системі ознак E досягаються для поєднання двох ознак: екстремума і інтеграла від модуля головного перетину МВФ другого порядку.

У системі ознак M найбільш високі значення ВПР досягаються при використанні моментів  $\mu_0^2$  і

$\mu_1^2$ , а для системи WC коефіцієнти вейвлет-образів  $WC_1$  і  $WC_2$ .

Результати класифікації стану систем управління двигуном постійного струму по функції головного перетину МВФ третього порядку у вигляді ВПР на отриманих системах ознак приведені в таблиці 2.

Таблиця 2. ВПР чотирьох класів ОК для систем ознак E, M, WC, WH, AC, AF, KL

Система ознак	Кількість ознак											
	1			2			3			4		
	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$
E	0,85	0,82	0,88	0,98	0,97	1,00	0,98	0,097	1,00	0,98	0,097	1,00
M	0,86	0,82	0,90	0,97	0,98	1,00	0,97	0,98	1,00	0,97	0,98	1,00
WC (1345)	0,85	0,81	0,89	0,95	0,91	0,92	0,96	0,95	0,98	0,97	0,99	1,00
WH (1245)	0,86	0,78	0,64	0,86	0,77	0,70	0,86	0,77	0,72	0,86	0,77	0,73
AC	0,85	0,82	1,0	0,93	0,92	0,90	0,96	1,0	1,0	0,96	1,0	1,0
AF	0,75	0,67	0,99	0,78	0,69	0,99	0,78	0,71	1,0	0,78	0,71	1,0
KL	0,86	0,84	0,90	0,98	0,97	1,00	0,98	0,97	1,00	0,97	0,99	1,0

Найбільш високі значення ВПР в системі ознак E досягаються для поєднання двох ознак: екстремума і інтеграла від модуля головного перетину МВФ третього порядку. Ця ж комбінація ознак дає високий.

У системі ознак M найбільш високі ВПР досягаються при використанні моментів  $\mu_0^3$  і  $\mu_1^3$ , а для системи WC - значення коефіцієнтів вейвлет-образів  $WC_1, WC_3, WC_4, WC_5$ .

Таким чином, формування ознак на основі застосування вейвлет-перетворень забезпечує високу їх інформативність. Однак інформативність отриманих ознак сильно залежить від вигляду базового вейвлета, що використовується, що пояснюється різною точністю відновлення стислого при допомозі вейвлет-перетворення сигналу. Для діагностичних сигналів (аперіодичного і коливального), що досліджуються більш високу

точність відновлення стислого сигналу дають вейвлети *Coiflet* в порівнянні, наприклад, з вейвлетом *Haar*. Це цілком узгодиться з результатами розпізнавання станів ОК на основі систем ознак  $WC$  і  $WH$  (табл. 1 і 2).

## ОЗНАКИ, ЩО ФОРМУЮТЬСЯ НА ОСНОВІ СУКУПНОСТЕЙ МВФ РІЗНИХ ПОРЯДКІВ

При класифікації нелінійних динамічних ОК (з аперіодичними характеристиками) досліджувалася інформативність систем ознак  $C_{12}$  для сукупності МВФ першого і другого порядків, а також систем ознак  $C_{123}$  для сукупності МВФ першого, другого і третього порядків, що формуються на основі систем ознак  $E$ ,  $M$ ,  $W$ . Найкращі з отриманих результатів досліджень порівнювалися з системами ознак  $C_1$  та  $C_2$ , що формуються на основі систем ознак  $E$ ,  $M$ ,  $W$  для МВФ першого і другого порядку відповідно (мал. 5).

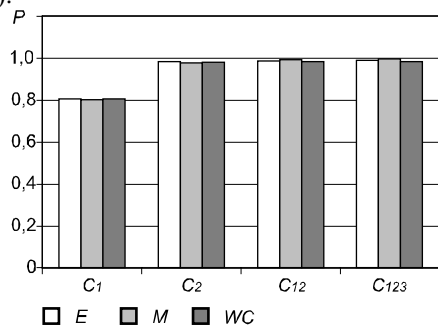


Рис.5. Усереднені значення ВПР для систем ознак  $E$ ,  $M$ ,  $W$ , на основі МВФ.

З мал. 5 видно, що модель ОК 2-го порядку є високоінформативною, а істотне ускладнення моделі дає незначне збільшення ВПР в 1-1,5%.

## ВЫВОДЫ

У роботі вирішена задача побудови високоінформативних систем опису ОК для рішення задач діагностування за рахунок використання вейвлет-перетворень для стиснення діагностичної інформації.

Розроблений і експериментально досліджений за допомогою імітаційного моделювання метод формування простору ознак на основі вейвлет-перетворень функції головного перетину МВФ.

Встановлено, що інформативність системи ознак, виділеної за допомогою вейвлет-перетворень функції головного перетину МВФ залежить від вигляду базового вейвлета, що використовується. При цьому основну діагностичну інформацію несуть перші коефіцієнти вейвлет-перетворення.

Використання діагностичних ознак, виділених на основі багатомірний вагової функції другого порядку є достатнім для побудови ефективних класифікаторів станів ОК.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. - 256 с.
2. Павленко В.Д., Фомин А.А. Стиснення даних при формуванні простору діагностичних ознак на основі нелінійних непараметричних моделей об'єктів контролю.-У зб.: Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: Праці 6-ої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2002, Київ, 8-12 жовтня 2002 р., с.111-114.
3. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
4. Павленко В.Д., Фомин А.А. Метод побудови простору ознак для розпізнавання станів нелінійних об'єктів контролю на основі багатомірних вагових функцій. - Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2003, №6, с. 268-274.
5. Павленко В.Д., Фомин А.А., Череватый В.В. Построение пространства диагностических признаков на основе моделей объектов контроля в виде рядов Вольтерра - Вторая международная конференция по проблемам управления (Москва, 17-19 июня 2003 г.): Избранные труды в двух томах. - М.: Институт проблем управления РАН, 2003. Том 2, с.110-117.
6. Павленко В.Д., Фомин А.А. Формирование пространства диагностических признаков на основе моделей объектов контроля в виде рядов Вольтерра - Труды III международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'04, Москва, 28-30 января 2004, Институт проблем управления РАН - М.: Институт проблем управления РАН, 2004, с.884-898. - На компакт-диске ISBN 5-2001-14966-9.