УДК 517.9

Фомін О.О.
Одеський національний політехнічний університет

МЕТОД ПОБУДОВИ ПРОСТОРУ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Запропоновано удосконалення методу модельної діагностики. Метод засновано на непараметричній ідентифікації динамічних систем у вигляді багатовимірних вагових функцій і побудові на їх основі простору діагностичних ознак. Простір діагностичних ознак будується з використанням моментів різних порядків та вейвлет-перетворень отриманих інтегральних моделей. Проаналізовано ефективність запропонованих просторів діагностичних ознак на основі інтегральних моделей за допомогою імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта.

Ключові слова: *інтегральні моделі, багатовимірні вагові функції, технічна діагностика, редукція простору ознак, вейвлет-перетворення.*

Постановка проблеми. На сьогодні збільшення складності об'єктів контролю (далі – ОК) при збереженні динамічних та нелінійних властивостей систем, збільшення вимог до точності та об'єктивності рішень порушує проблему розвитку складних обчислювальних систем. Такі системи забезпечують необхідні характеристики процесів управління, діагностування та моніторингу об'єктів різної фізичної природи. Сучасні діагностичні системи будуються на основі нових математичних прийомів [1; 2]. Тому наукова проблема створення, вдосконалення та використання ефективних математичних моделей об'єктів діагностування в загальному випадку залишається не вирішеною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переважно широко відомі методи технічної діагностики, розроблені на основі реконструкції моделей ОК [3; 4]. Як правило, очікується, що несправності змінюють лише характеристики ОК. Але часто помилки змінюють також структуру об'єкта [5–7]. Наслідки таких дій призводять до використання непараметричних методів ідентифікації для побудови моделей об'єктів на основі експериментальних даних «вхід/вихід».

Для універсального опису ОК невідомої структури доцільно використовувати нелінійні непараметричні динамічні моделі на основі багатовимірних вагових функцій (БВФ) [8; 9], головною особливістю яких є одночасне і компактне урахування нелінійних і динамічних властивостей ОК.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є підвищення надійності та якості процедури діагностування стану нелінійного динамічного об'єкта. Як джерело первинних даних про ОК пропонується використовувати первинну модель у вигляді БВФ [10–12], побудовану за допомогою процедури непараметричної ідентифікації. Шляхом параметризації первинної моделі у вигляді БВФ за допомогою обчислення її моментів різних порядків та вейвлет-перетворень будуються сукупності діагностичних ознак.

У роботі запропоновано непараметричні нелінійні динамічні моделі на основі БВФ $w_k(\tau_1,\ldots,\tau_k)$, k=1,2,… [5], інваріантних до форми вхідного сигналу.

Використання моделей на основі БВФ дає змогу розглядати нелінійні та динамічні характеристики ОК. За допомогою цього підходу діагностична процедура стає надійною і універсальною [6].

У цьому разі алгоритм діагностики складається з таких етапів:

1. побудова БВФ на основі даних експерименту «вхід/вихід» у частотній або часовій області [7; 8].
2. побудова набору просторів діагностичних ознак на основі отриманих БВФ;
3. інформаційна оптимізація системи діагностування шляхом пошуку найефективніших просторів діагностичних ознак та їх комбінацій. Класифікатор станів ОК будується у вибраному діагностичному просторі за допомогою методів статистичного розпізнавання [8; 9].

1. Побудова моделі у вигляді багатовимірних вагових функцій

Розглянемо нелінійний динамічний об'єкт. Вхідні та вихідні сигнали з нульовими початковими умовами *x(t)* можуть бути представлені у вигляді ряда Вольтерра:

$$y(t)=\int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau+\int_0^t\int_0^t w_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2+$$
$$+\int_0^t\int_0^t\int_0^t w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3+\ldots \quad (1)$$

де $w_1(\tau_1)$, $w_2(\tau_1,\tau_2)$, $w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)$ – БВФ 1го, 2го та 3го порядку; t – поточний час.

Висока точність визначення БВФ досягається за допомогою протишумових методів ідентифікації, запропонованих у роботах [5, 13].

2. Побудова простору діагностичних ознак

Методи параметризації первинної моделі. Застосування запропонованої інтегростепеневої моделі в діагностиці тягне за собою необхідність параметризації БВФ: $\{w_k(t_1,t_2,\ldots,t_k)\}_{k=1,2,\ldots,N}\Rightarrow \mathbf{x}=(x_1,x_2,\ldots,x_n)'$.

Вибір методу параметризації має вирішальний вплив на точність діагностичної моделі та, зрештою, на надійність класифікації станів об’єктів. Зазвичай, як простір діагностичних ознак використовують відліки БВФ 1го порядку $w_1(t)$ та діагональні перетини БВФ 2го та 3го порядку $w_2(t,t)$ та $w_3(t,t,t)$ відповідно до заданої дискретності (V_k, $k=\overline{0,3}$).

У роботі пропонуються альтернативні простори діагностичних ознак, а саме інтегральні характеристики первинної моделі.

1. Моменти БВФ $\mu_r^{(k)}$ різних порядків *r*, ($r=\overline{0,3}$) ($\mathbf{M}_k$, $k=\overline{0,3}$ – порядок БВФ):

$$\mu_{ij\ldots l}^{(k)}=\int_0^\infty\int_0^\infty\ldots\int_0^\infty \tau_1^i\tau_2^j\ldots\tau_k^l w_k(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_k)d\tau_1 d\tau_2\ldots d\tau_k, \quad (2)$$

де $i, j,\ldots, l=0, 1, 2, \ldots$ моменти порядку *r* для ядра порядку *k*, $i+j+\ldots+l=r$ – порядок моменту.

Моменти діагональних перетинів БВФ ($\mathbf{M}_k$), які розглядаються в цій роботі, обчислюються за виразом

$$\mu_r^{(k)}=\int_0^\infty t^r w_k(t,t,\ldots,t)dt, \quad (3).$$

2. Коефіцієнти прямого безперервного вейвлет-перетворення, застосованих до БВФ 1го порядку (W_1) та діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядків (W_2, W_3).

Вейвлет-обробка забезпечує ефективне стиснення сигналу з невеликими втратами інформації. Тому це підвищує інформативність діагностичного простору.

Пряме безперервне вейвлет-перетворення функції $w_n(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{n-1},t)$ визначається розрахунком вейвлет-коефіцієнтів за формулою:

$$C(a,b)=\int_0^\infty w_n(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{n-1},t)a^{-1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt, \quad (4)$$

де $\psi(t)$ – функція перетворення; *a* та *b* – параметри масштабування та зсуву вейвлетів.

Наведені характеристики є універсальним підходом до побудови простору діагностичних ознак на основі первинної моделі.

Оцінка якості простору діагностичних ознак. Якість побудованого простору ознак (інформативність) визначається на основі максимуму критерію вірогідності вірного визнання *TPR* застосованого до підмножини X′ цілого простору ознак X (X′⊂X).

Для навчальної вибірки, яка містить *m* класів станів ОК, послідовно розраховуються *m*-1 дискримінантних функцій $d_1(\mathbf{x})$, $d_2(\mathbf{x})$, …, $d_{m-1}(\mathbf{x})$. Функція $d_1(\mathbf{x})$ відокремлює об’єкти 1го класу від об’єктів *m-1* класів, що залишилися; $d_2(\mathbf{x})$ – відокремлює об’єкти 2го класу від об’єктів *m-2* класів, що залишилися; ..., $d_{m-1}(\mathbf{x})$ – відокремлює об’єкти класу *m-1* від об’єктів класу *m*.

Максимальне значення критерію вірогідності вірного визнання описується таким виразом:

$$TRP_{\max}=\max_k\left\{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m-1}TRP_{ik}\right\}, \quad (3)$$

де *k* – номер за порядком простору діагностичних ознак X′ в повному переліку просторів.

Таким чином, під час процедури пошуку серед всіх можливих сполучень ознак для розглянутого діагностичного простору X визначається найбільш цінна комбінація двох, трьох та іншої кількості ознак.

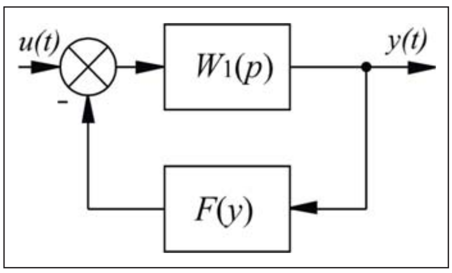

Рис. 1. Імітаційна модель нелінійного динамічного об’єкту

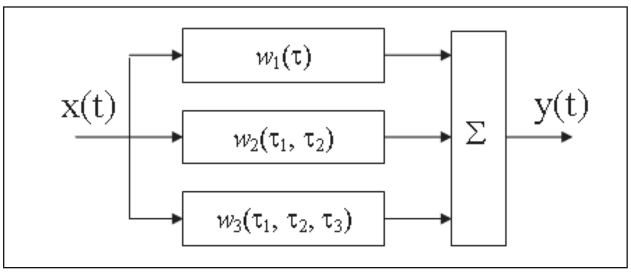

Рис. 2. Структурна схема БВФ 3-го порядку

3. Аналіз якості простору діагностичних ознак на основі інтегральних динамічних моделей

Імітаційна модель об'єкта контроля. У цьому розділі аналізується запропонований метод побудови простору діагностичних ознак на прикладі імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта.

Імітаційна модель нелінійного динамічного об'єкта (рис. 1) являє собою структуру зі зворотним зв'язком. Блоки імітаційної моделі мають характеристики $W_1(t)=e^{-\alpha t}$ і $F(y)=\beta y^2(t)$. Структурна схема БВФ 3го порядку показана на рис. 2.

Аналітичні вирази БВФ для розглянутої імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта наведені в [13]:

$$w_1(\tau_1) = e^{-\alpha\tau_1}, \quad (4)$$

$$w_2(t,t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(e^{-2\alpha t} - e^{-\alpha t}\right), \quad (5)$$

$$w_3(t,t,t) = 2\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \cdot \left(e^{-3\alpha t} - 2e^{-2\alpha t}\right. \quad (6)$$

Формування навчальної та екзаменаційної вибірки. Для діагностики станів ОК використовуються БВФ 1го порядку $w_1(t)$ та діагональних перетини БВФ 2го $w_2(t,t)$ та 3го порядку $w_3(t,t,t)$.

Навчальна та екзаменаційна вибірки з параметрами ОК готуються для об'єктів чотирьох класів (100 об'єктів у кожному класі). Класи утворюються через значення параметрів α і β відповідно до певних правил:

- нормальний режим – клас A. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in[0.95\alpha_n, 1.05\alpha_n]$, $\beta\in[0.95\beta_n, 1.05\beta_n]$, де α_n і β_n – номінальні значення;
- режим несправності – клас B. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in(0.9\alpha_n, 0.95\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n, 1.1\alpha_n)$, $\beta\in[0.95\beta_n, 1.05\beta_n]$;
- режим несправності – клас C. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in[0.95\alpha_n, 1.05\alpha_n]$ і $\beta\in(0.9\beta_n, 0.95\beta_n) \cup (1.05\beta_n, 1.1\beta_n)$;
- аварійні режими – клас D. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in(0.9\alpha_n, 0.95\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n, 1.1\alpha_n)$, $\beta\in(0.9\beta_n, 0.95\beta_n) \cup (1.05\beta_n, 1.1\beta_n)$.

Оцінки БВФ 1го порядку $w_1(t)$ та діагональних перетинів БВФ БВФ 2го $w_2(t, t)$ та 3го порядку $w_3(t, t, t)$ для згаданих чотирьох класів отримані в процесі комп'ютерного моделювання.

Отримані моделі для всіх класів утворюють ділянки, які перетинаються. У цьому разі для визначення дискримінантних функцій використовується метод максимальної правдоподібності.

На основі тренувальних наборів даних для класів об'єктів A, B, C і D послідовно підраховуються три дискримінантних функції $d_1(\mathbf{x})$, $d_2(\mathbf{x})$ та $d_3(\mathbf{x})$. Функція $d_1(\mathbf{x})$ відокремлює 1^{й} клас об'єктів від об'єктів 2го, 3го і 4го класів $B \cup C \cup D$; $d_2(\mathbf{x})$ – відокремлює об'єкти 2го класу від об'єктів 3го і 4го класів $C \cup D$; $d_2(\mathbf{x})$ – відокремлює об'єкти 3го класу від об'єктів 4го класу D.

Далі проаналізовано інформативність різних діагностичних просторів (дискретні відліки БВФ, моменти та коефіцієнти вейвлет-перетворення БВФ).

Формування просторів діагностичних ознак.

Дискретні відліки БВФ. Тренувальна вибірка створюється на основі десяти дискретних значень БВФ 1го порядку (простір $\mathbf{V_1}$), діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядків (простори $\mathbf{V_2}$ та $\mathbf{V_3}$). Дискретні значення БВФ беруться з рівномірним кроком на інтервалі $(0, T]$, де T – час моделювання.

Моменти БВФ. Тренувальна вибірка створюється на основі чотирьох моментів БВФ 1го порядку (простір $\mathbf{M_1}$) та діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядків (простори $\mathbf{M_2}$ та $\mathbf{M_3}$).

Вейвлет-перетворення БВФ. Тренувальний зразок створюється на основі перших десяти коефіцієнтів вейвлет-перетворення ядер Вольтерра 1го порядку (функціональний простір $\mathbf{W_1}$) та діагональних ділянок БВФ 2го та 3го порядків (функціональні простори $\mathbf{W_2}$, $\mathbf{W_3}$ відповідно).

Діагностичні простори формуються повним перебором всіх комбінацій ознак. Найкращі результати оцінки якості *TPR* розглянутих просторів ознак наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінки *TPR* для просторів $\mathbf{V_1, M_1, W_1, V_2, M_2, W_2, V_3, M_3, W_3}$.

Простір ознак	Інформативні ознаки	TPR
V1	x_1, x_2, x_3, x_7	0.84
$\mathbf{M}_1$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.83
$\mathbf{W}_1$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.86
$\mathbf{V}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95
$\mathbf{M}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95
$\mathbf{W}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96
V_3	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95
$\mathbf{M}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.94
$\mathbf{W}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96

4. Стійкість діагностичних ознак до спотворення оцінок багатовимірних вагових функцій

Розглянуто задачу аналізу надійності інформативних просторів ознак $\mathbf{V}_i$, $\mathbf{M}_i$, $\mathbf{W}_i$, $i=\overline{1,3}$ в умовах дії шумів при оцінці БВФ. Для цього завдання створено навчальні вибірки на основі БВФ 1го порядку та діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядку з додаванням шуму 1%, 3%, 5%, 10% від екстремумів БВФ. Результати аналізу надійності розглянутих просторів ознак наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінки *TPR* для просторів $\mathbf{V_1}$, $\mathbf{M_1}$, $\mathbf{W_1}$, $\mathbf{V_2}$, $\mathbf{M_2}$, $\mathbf{W_2}$, $\mathbf{V_3}$, $\mathbf{M_3}$, $\mathbf{W_3}$ при дії шуму

Простір ознак	Інформативні ознаки	*TPR* при рівені шуму, %				
		0	1	3	5	***10***
$\mathbf{V}_1$	x_1, x_2, x_3, x_7	0.84	0.83	0.77	0.75	0.71
$\mathbf{M}_1$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.83	0.80	0.80	0.80	0.76
$\mathbf{W}_1$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.86	0.84	0.83	0.82	0.81
$\mathbf{V}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95	0.93	0.91	0.87	0.80
$\mathbf{M}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95	0.93	0.93	0.91	0.90
$\mathbf{W}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96	0.94	0.93	0.93	0.92
$\mathbf{V}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95	0.92	0.90	0.85	0.79
$\mathbf{M}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.94	0.93	0.92	0.91	0.89
$\mathbf{W}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96	0.94	0.93	0.92	0.92

Результати порівняльного аналізу надійності просторів ознак для БВФ 2[го] порядку показані на рис. 3.

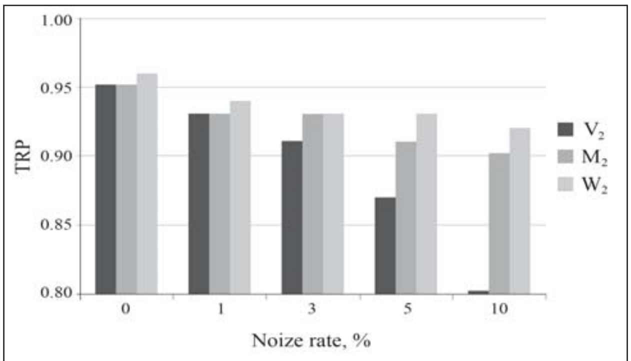

Рис. 3. Оцінка якості просторів ознак $\mathbf{V_2}$, $\mathbf{M_2}$, $\mathbf{W_2}$ при дії шуму

Графік чітко демонструє зміну надійності діагнозу залежності від рівня шуму для розглянутих діагностичних просторів. Найбільш стійкі до шумів простори діагностичних ознак отримані на основі діагональних перетинів БВФ 2[го] і 3[го] порядків – $\mathbf{M}_2$, $\mathbf{W}_2$. При цьому ознаки простору $\mathbf{W}_2$, на відміну від $\mathbf{M}_2$ забезпечує надійність як при малих, так і великих шумах.

Висновки. У роботі запропоновано універсальний підхід до побудови просторів діагностичних ознак нелінійних динамічних об'єктів. Метод розроблено на основі отримання інформації про об'єкт управління з використанням непараметричної ідентифікації моделі у вигляді багатомірних вагових функцій. На основі отриманої моделі побудовано ефективні простори діагностичних ознак як набір моментів та коефіцієнтів вейвлет-перетворення багатомірних вагових функцій.

Доведено ефективність запропонованого методу побудови простору діагностичних ознак на основі інтегральних динамічних моделей на прикладі імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта.

Запропонований метод побудови діагностичних просторів забезпечує ефективне стиснення при невеликих втратах інформації. Найбільш інформативними та завадостійкими просторами для тестового об'єкта контролю є моменти та коефіцієнти вейвлет-перетворення багатомірних вагових функцій 2[го] порядку.

Список літератури:

1. Korbicz J. & Kościelny J.M., (eds). Modeling, Diagnostics and Process Control: Implementation in the DiaSter System. Springer: Berlin, 2010.

2. Mrugalski M., Korbicz J. Robust fault diagnosis via parameter identification of dynamical systems. European Control Conference, ECC 2009. 2014.

3. Simani S., Fantuzzi C., Dynamic system identification and model-based fault diagnosis of an industrial gas turbine prototype. Mechatronics. Volume 16, Issue 6, July 2006, P. 341–363.

4. Pazera, M., Korbicz, J, A process fault estimation strategy for non-linear dynamic systems. Journal of Physics: Conf. Series 783. 2017.

5. Tang, H., Liao, Y. H., Cao, J. Y., Xie, H. Fault Diagnosis Approach Based on Volterra Models. Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 24, pp. 1099–1113.

6. Fomin A., Pavlenko V. Construction of diagnostic features space using Volterra kernels moments. Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2015 20th International Conference: 24–27 Aug. 2015 Miedzyzdroje, Poland. P. 1022–1027.

7. Chen W., Khan A., Abid M., Ding S. Integrated design of observer based fault detection for a class of uncertain nonlinear systems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2011. 21(3). P. 423–430.

8. Pavlenko V., Fomin O., Ilyin V. Technology for Data Acquisition in Diagnosis Processes By Means of the Identification Using Models Volterra. Proc. of the 5th IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009), Rende (Cosenza), Italy, 2009. P. 327–332.

9. Hao Tang, Liao Y.H., Cao J.Y., Hang Xie. Fault diagnosis approach based on Volterra models. Mechanical Systems and Signal Processing. May 2010. Volume 24, Issue 4. P. 1099–1113.

10. Mazzaferri, J., Ledesma, S., Iemmi, C. Multiple feature extraction by using simultaneous wavelet transforms. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2003. Volume 5, Number 4. P. 1464–4258.

11. Favier G., Kibangou A.Y., Bouilloc T. Nonlinear system modeling and identification using Volterra-PARAFAC models. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Wiley, 2012, 26 (1). P. 30–53.

12. Iwaniec J. AASRI Procedia. Sensitivity analysis of an identification method dedicated to nonlinear systems working under operational loads. Journal of theoretical and applied mechanics. 2011. Volume 4. P. 419–438.

13. Fomin O., Medvedev A., Pavlenko V. Technology of Intelligent Diagnostics Based onVolterra Kernels Moments. Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Warsaw. 2015. Volume 2. P. 796–801.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Предложен усовершенствованный метод модельной диагностики. Метод основан на непараметрической идентификации динамических систем в виде многомерных весовых функций и построении на их основе пространства диагностических признаков. Пространство диагностических признак строится с использованием моментов разных порядков и вейвлет-преобразований полученной интегральной модели. Проанализирована эффективность предложенных пространств диагностических признаков на основе интегральной модели с помощью имитационной модели нелинейного динамического объекта.

Ключевые слова: *интегральные модели, многомерные весовые функции, техническая диагностика, редукция пространства признаков, вейвлет-преобразования.*

METHOD FOR DIAGNOSTIC FEATURES SPACE CONSTRUCTION USING INTEGRAL DYNAMIC MODELS

It is proposed an improved method of model diagnostics. The method is based on the nonparametric identification of dynamic systems in the form of multidimensional weight functions and the construction a diagnostic features space on their basis. The diagnostic features space is constructed using the moments of different orders and wavelet transformations of the obtained integral model. The effectiveness of the proposed diagnostic features spaces based on an integral model is analyzed using the simulation model of a nonlinear dynamic object.

Key words: *integral models, multidimensional weight functions, technical diagnostics, reduction of feature space, wavelet transform.*