ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Павленко В.Д., Фомин А.А. (Одесса, Украина)

Одесский национальный политехнический университет

Разработана информационная технология модельной диагностики, основанная на непараметрической идентификации объектов контроля с использованием интегро-степенных рядов Вольтерра. Рассмотрены способы формирования вектора диагностических признаков на основе многомерных ядер Вольтерра: эвристических признаков, моментов, Фурье-образов, вейвлет-преобразований и преобразовании Карунена-Лоэва.

Введение

В настоящее время в технической диагностике развивается направление, основанное на восстановлении модели (оператора) диагностируемого объекта [1]. Обычно предполагается, что неисправности изменяют только параметры модели объекта, которые при диагностировании оцениваются методами параметрической идентификации. Однако часто, например, при производстве изделий электронной техники, большинство дефектов приводит к изменению не только параметров модели объекта, но и ее структуры, что обуславливает применение методов непараметрической идентификации для построения математической модели объекта контроля (ОК) на основе данных эксперимента "вход-выход".

В модельной диагностике процедура диагностирования выполняется в два этапа. На первом получают исходную (первичную) информацию об объекте в виде сигналов откликов на пробные воздействия. На втором этапе эта информация обрабатывается для выделения диагностических признаков и решения о принадлежности данного объекта к определенному классу по физическому (техническому) состоянию. Для построения диагностирующего правила используют методы статистической классификации (распознавания образов) [2, 3] или нейронные сети [4, 5].

Существующие методики модельной диагностики, основанные на использовании динамических характеристик, ограничиваются только линейными моделями, а методики, основанные на учете эффектов нелинейности, используют информацию только о свойствах статических характеристик. Реальные объекты, как правило, одновременно обладают и нелинейными и динамическими свойствами.

Поэтому, в качестве описания ОК неизвестной структуры целесообразно использовать нелинейные непараметрические динамические модели на основе интегро-степенных рядов Вольтерра (РВ), которые описывают свойства ОК в виде последовательности инвариантных к виду входного сигнала многомерных весовых функций (МВФ).

В данной работе предлагается информационная технология модельной диагностики, основанная на непараметрической идентификации ОК с использованием рядов Вольтерра, исследуется с помощью методов статистической классификации информативность формируемых диагностических параметров на основе таких моделей.

1. Нелинейные непараметрические динамические модели

Ряды Вольтерра от многих функциональных аргументов $x_1(t),...,x_\nu(t)$ применяются при описании нелинейных многомерных систем:

$$y_j(t)=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{i_1=1}^{\nu}...\sum_{i_n=1}^{\nu}\int_0^t...\int_0^t w^j{}_{i_1 i_2 ... i_n}(\tau_1,\tau_2,...,\tau_n)\prod_{k=1}^{n}u_{i_k}(t-\tau_k)d\tau_k \text{ , j=1,2,…,μ} \quad (1)$$

где ν - количество входов, μ - количество выходов, $w^j_{i_1 i_2 ... i_n}(\tau_1,\tau_2,...,\tau_n)$ - многомерные весовые функции или ядра Вольтерра (ЯВ) n-го порядка по i_1, i_2,...,i_n входам и j-му выходу, симметричные относительно τ_1, τ_2,…,τ_n; $u(t)$ – входное воздействие, а $y(t)$ – отклик объекта при нулевых начальных условиях.

Широкое применение моделей на основе МВФ объясняется его принципиально важными достоинствами: инвариантностью относительно вида входного воздействия, явными соотношениями между входными и выходными переменными; универсальностью – возможностью исследования нелинейных непрерывных во времени и импульсных систем, стационарных и нестационарных, одновременным и компактным учетом нелинейных и инерционных (динамических) свойств объектов.

Ограничением применения РВ в виде МВФ является только ограниченность уровня входных сигналов. Последнее необходимо для обеспечения сходимости РВ. В случае же значительного уровня входных сигналов, на основании теоремы М. Фреше, нелинейная система может быть описана не функциональным рядом, а функциональным полиномом. Фактически так и происходит на практике при описании систем, т.е. ряды аппроксимируют полиномами.

Необходимо отметить, что в задачах модельной диагностики адекватность модели ОК следует понимать не в смысле точности описания отклика объекта, а в смысле информативности ее с точки зрения достоверного (надежного) распознавания технического состояния. Поэтому в случае применения ЯВ при формировании входного описания нелинейных динамических ОК в диагностических исследованиях необходимо обеспечить в первую очередь высокую точность оценки сечений многомерных ЯВ малых порядков, что часто на практике оказывается достаточным для построения эффективной распознающей системы.

Высокая точность оценивания ядер достигается применением предложенных в работах [8, 9-11] помехоустойчивых методов детерминированной идентификации.

2. Информационная технология модельной диагностики нелинейных динамических объектов

Ввиду сложности математического аппарата описания МВФ в качестве описания ОК используются вторичные признаки, полученные путем параметризации МВФ $\{w_k(t_1,t_2,…,t_k)\}_{k=1,2,…,K} \Rightarrow \mathrm{x}=(x_1,x_2,…,x_n)'$ (K – порядок МВФ, n – размерность пространства признаков, штрих – транспонирование вектора).

Диагностическая процедура в этом случае сводится к определению ЯВ по данным эксперимента “вход – выход” во временной [1, 8, 9] или в частотной [1, 10, 11] области и построению на основе полученных ядер диагностической системы признаков, в пространстве которых строится решающее (диагностическое) правило оптимальной классификации [12].

Эффективность применения методов распознавания образов для диагностирования в основном зависит от информативности используемой совокупности параметров. Если выбранные параметры достаточно полно характеризуют внутреннюю структуру объекта диагностирования, то основная масса объектов, являясь идентичной по структуре, отобразится в пространстве этих параметров в виде плотного множества точек. Объектам с особенностями структуры (дефектным) будут соответствовать точки, отклоняющиеся от этого плотного множества и расположенные значительно реже ввиду разнообразия дефектов у таких объектов и их относительной малочисленности (если диагностируются высоконадежные приборы, например, интегральные микросхемы).

Применение методов теории распознавания образов для решения задач технической диагностики с использованием непараметрических динамических моделей ОК в виде рядов Вольтерра основано на следующих предпосылках:

a) Существует объективная (но неявная) связь между многомерными ЯВ, характеризующими структуру ОК и его техническим состоянием, иными словами, существует некоторая функция $F(H,S)$, связывающая состояние S с ЯВ $H=\{h_n(\tau_{1,\ldots,}\ \tau_n)\}^{N}_{n=1}$.

b) Функция $F(H,S)$, восстановленная на основе ЯВ исследованных объектов, может быть экстраполирована на объекты с неизвестными свойствами.

c) Структура ОК может быть адекватно представлена с помощью ЯВ.

Большое количество методов интеллектуальной обработки диагностической информации и наличие четко выраженных этапов решения задачи вынуждает разработать информационную технологию модельной диагностики для исследований нелинейных динамических объектов. Структурна схема предлагаемой информационной технологии приведена на рис. 1.

Рис. 1. Структурна схема информационной технологии модельной диагностики

3. Построение пространства признаков и сжатие данных

Выбор совокупности диагностических признаков - задача формирования пространства информативных признаков, - оказывает решающее влияние на точность распознавания технического состояния объектов диагностирования.

Переход от первичных данных – набора МВФ различных порядков - к пространству диагностических признаков (сжатие диагностической информации) осуществляется различными способами: выборкой отсчетов МВФ с заданной дискретностью, выделением эвристических признаков (экстремум модуля сечения k-мерной МВФ, точка экстремума, производная функции в точке t=0, интеграл модуля функции и время переходного процесса), моментов МВФ различных порядков, коэффициентов вейвлет-преобразований [12, 14] и разложения Карунена-Лоэва [8] МВФ.

Дискретные значения ЯВ и откликов ОК. В качестве вектора признаков $\mathbf{x}=(x_1,x_2,\ldots,x_n)'$ используется конечный набор дискретных значений диагональных сечений МВФ: $x_j=w_k(t_j,\ldots,t_j)$, $t_j=j\Delta t$, $j=1, 2,\ldots,n$, Δt – интервал дискретизации. Аналогично формируется вектор признаков на основе частотных характеристик: многомерной амплитудно-частотной $\mathrm{A}_k(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_k)$ и фазо-частотной $\varphi_k(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_k)$: $x_{2j-1}=A_k(\omega_j,\ldots,\ \omega_j)$, $x_{2j}=\varphi_k(\omega_j,\ldots,\ \omega_j)$, $\omega_j=j\Delta\omega$, $j=1, 2,\ldots, n$.

Эвристические признаки. Формируются некоторые эвристические признаки диагональных сечений МВФ, которые входят как компоненты в вектор признаков**:**

1. Экстремум модуля сечения k-мерной МВФ и точка экстремума t_{max}

$$t_{\max} : w_k(t_{\max}-T_1,t_{\max}-T_2,\ldots,t_{\max}-T_{k-1},t_{\max}) = \max_{t\in[0,\infty)}\left|w_k(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{k-1},t)\right| \tag{2}$$

2. Производная функции

$$\dot{w}_k(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{k-1},t) \text{ при } t=0; \tag{3}$$

3. Интеграл модуля функции

$$\int_0^\infty |\, w_k(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{k-1},t)\,|\, dt \tag{4}$$

4. Время переходного процесса t_{nn}.

Здесь $T_1,T_2,\ldots,T_{k-1}$ – параметры, определяющие диагональное сечение МВФ k-го порядка ($T_1\geq T_2,\geq\ldots\geq T_{k-1}$).

Моменты МВФ. В качестве вектора признаков используются моменты МВФ ОК:

$$\mu^k_{ij..l}=\int_0^\infty\ldots\int_0^\infty \tau_1^i\tau_2^j..\tau_k^l w_k(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_k)d\tau_1 d\tau_2\ldots d\tau_k \tag{5}$$

где $i,j,\ldots,l=0,1,\ldots,\infty$; $i+j+\ldots+l=r$ – порядок момента.

Диагональные сечения МВФ ОК определяются согласно выражению:

$$\mu^n_r=\int_0^\infty t^r w_n(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{n-1},t)dt \tag{6}$$

Разложение Карунена-Лоэва. Применение дискретного разложения Карунена-Лоева МВФ при выборе признаков сводится к построению матрицы преобразования размерностью $n\times q$, в качестве столбцов которой выбираются q нормированных характеристических векторов, соответствующих наибольшим характеристическим числам корреляционной матрицы $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R}=\sum_{i=1}^m p(\Omega_i)E\{\mathbf{x}_i\mathbf{x}_i'\} \tag{7}$$

где $E\{\mathbf{x}_i\mathbf{x}_i'\}$ – оператор математического ожидания, который вычисляется по всем наблюдениям, которые относятся к i-му классу.

Вейвлет-преобразования. В качестве вектора признаков используются коэффициенты вейвлет-преобразования сечений МВФ $w_n(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{n-1},t)$, которые вычисляются по формуле:

$$c(a,b)=\int_0^\infty w_k(t-T_1,t-T_2,\ldots,t-T_{k-1},t)a^{-1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \tag{8}$$

где $\psi(t)$ – функция преобразования (материнский вейвлет), a и b – параметры масштаба и сдвига вейвлета соответственно.

4. Применение информационной технологии модельной диагностики нелинейных динамических объектов

Эффективность предложенной информационной технологии модельной диагностики, основанной на первичной информации, полученной по результатам идентификации ОК в виде РВ (1), демонстрируется на примере нелинейных динамических ОК: системы с апериодическими характеристиками (рис. 2) и системы управления следящим приводом с колебательными характеристиками (рис. 3).

Этап 1. Для имеющихся ОК информационную модель в виде МВФ легко получить аналитически. Модель ОК (рис. 2) в виде трёх членов РВ (1) $w_1(t)$, $w_2(t,t)$, $w_3(t,t,t)$ имеет вид:

$$y(t)=\int_0^t w_1(\tau_1)u(t-\tau_1)d\tau_1+\int_0^t\int_0^t w_2(\tau_1,\tau_2)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2+$$
$$+\int_0^t\int_0^t\int_0^t w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2)u(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 \qquad (9)$$

здесь $u(t)$ и $y(t)$ – измеряемые сигналы соответственно на входе и выходе ОК;

$$w_1(\tau_1)=e^{-\alpha\tau_1};\quad w_2(\tau_1,\tau_2)=\frac{\beta}{\alpha}(e^{-\alpha\tau_1}e^{-\alpha\tau_2}-e^{-\alpha\tau_2}),\quad \tau_1\le\tau_2;$$

$$w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)=\frac{2}{3}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2\cdot(e^{a(\tau_1-\tau_2-\tau_3)}+3e^{-a(\tau_1+\tau_2+\tau_3)}-$$
$$-4e^{-\alpha(\tau_2+\tau_3)}-2e^{-\alpha(\tau_1+\tau_3)}+2e^{-\alpha\tau_3}),\quad \tau_1\le\tau_2\le\tau_3 \qquad (10)$$

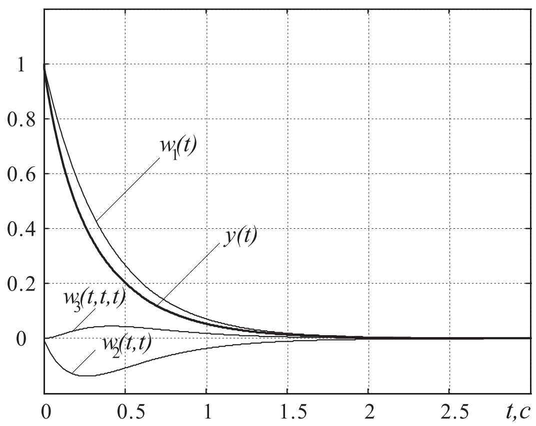


Рис. 2. Отклик ОК на импульсное входное воздействие и МВФ 1-го, 2-го и 3-го порядка нелинейной системы с апериодическими характеристиками

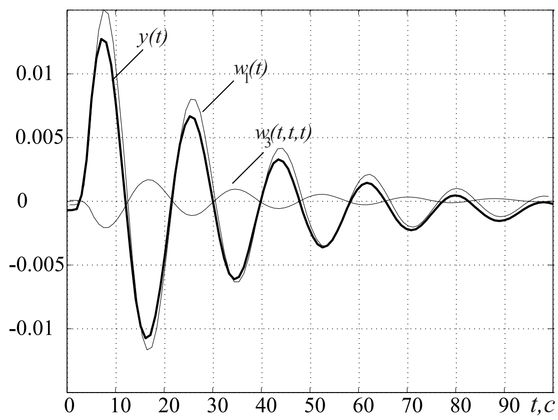


Рис. 3. Отклик ОК на импульсное входное воздействие и МВФ 1-го и 3-го порядка системы управления следящим приводом

Модель системы (рис. 3) в виде двух членов РВ (1) $w_1(t)$, $w_3(t,t,t)$ ($w_2(t,t)$=0) имеет вид:

$$y(t)=\int_0^t w_1(\tau_1)u(t-\tau_1)d\tau_1+ \\ +\int_0^t\int_0^t\int_0^t w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2)u(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 \qquad (11)$$

Для более сложных случаев необходимо воспользоваться одним из известных методов активной идентификации.

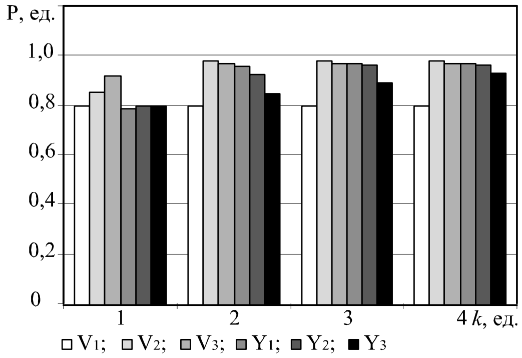
Этап 2. Формирование пространства диагностических признаков (сжатие диагностической информации) может осуществляться одним из рассмотренных способов: выборкой отсчетов МВФ с заданной дискретностью, выделением эвристических признаков (экстремум модуля сечения k-мерной МВФ, точка экстремума, производная функции в точке t=0, интеграл модуля функции и время переходного процесса), моментов МВФ различных порядков, коэффициентов вейвлет-преобразований и разложения Карунена-Лоэва МВФ.

При формированнии пространства диагностических признаков для снижения его размерности проводится определение информативности признаков и отбирается из базового множества подмножества признаков минимального размера, обеспечивающее достаточную достоверность классификации. Определение диагностической ценности совокупности признаков допускает использование конкретного классификатора, поскольку только в его границах имеет смысл достоверность распознавания (1). Поэтому, в работе используются методы выбора совокупностей признаков, основанные на прямой оценке достоверности классификации: методы полного и сокращенного перебора.

Этап 3. При помощи имитационного моделирования для представленных ОК получены обучающая и экзаменационная выборки для объектов четырех классов, пригодных и непригодных по параметрам a_1, a_2, которые характеризуют соответственно инерционные и нелинейные свойства и недоступны для прямых измерений. Методом максимального правдоподобия построены три решающие функции $d_1(x)$, $d_2(x)$, $d_3(x)$ так, что функция $d_1(x)$ отделяет ОК 1-го класса от 2-го, 3-го і 4-го; $d_2(x)$ – отделяет ОК 2-го класса от 3-го и 4-го; $d_3(x)$ – отделяет ОК 3-го и 4-го классов.

На данном этапе возможна оценка диагностической ценности выбранного пространства диагностических признаков и его коррекция в случае необходимости.

Так, для рассмотренных нелинейных динамических систем проведено определение информативности систем диагностических признаков на основе отсчетов с равномерным шагом Δt на интервале (0, t_{nn}] МВФ 1-го порядка (V_1) и диагональных сечений МВФ 2-го (V_2) и 3-го (V_3) порядков, а также откликов ОК на возмущение в виде коротких импульсов разной амплитуды A_1=1.0, A_2=0.5, A_3=0.1 и длительностью τ_i=0.1 (системи признаков Y_1, Y_2, Y_3 соответственно). Достоверности распознавания [5, 6, 8] для квадратичного решающего правила в зависимости от количества используемых признаков k для отмеченных систем представлены диаграммами (рис. 4).



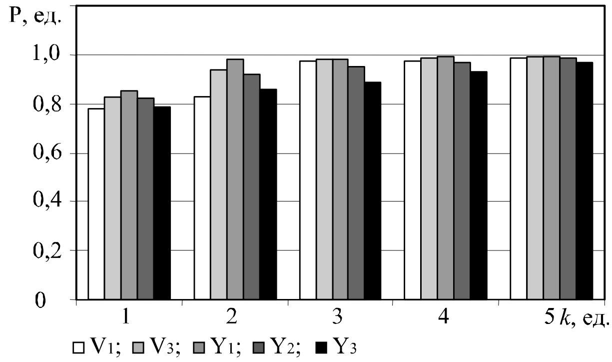


Рис. 4. Обобщенные достоверности распознавания для систем признаков V_1, V_2, V_3, Y_1, Y_2, Y_3 ОК (рис. 2) – слева и ОК (рис. 3) – справа.

Наиболее высоким показателем достоверности распознавания из рассматриваемых систем признаков для рассматриваемых нелинейных динамических ОК обладает система V_2 (для ОК с апериодическими характеристиками) и система V_3 (для ОК с колибательными характеристиками). Поэтому в качестве классификатора состояний принимается семейство решающих правил, постороенное на основе отсчетов диагональных сечений МВФ 2-го и 3-го порядка (системы V_2 и V_3) для системы с апериодическими и колибательными характеристиками соответственно.

Этап 4. Оценка состояния произвольного ОК из множества рассматрриваемых объектов выполняется в следующей последовательности: выполняется идентификация ОК, определяются диагностические признаки (сжатие) диагностической модели, по результатам классификации определяется класс состояния ОК.

Заключение

В работе развивается метод модельной диагностики на основе нелинейных непараметрических динамических моделей в виде интегро-степенных рядов Вольтера. Выделяются 4 этапа диагностирования нелинейных динамических объектов контроля: идентификация ОК, построение диагностической модели, построение классификатора ОК, диагностика ОК. Полученные при помощи имитационного моделирования ОК результаты показывают преимущество метода при роспознавании состояний тестових нелинейных ОК перед методами, использующими линейные модели ОК.

Предложены способы построение диагностической модели (формирования вектора диагностических признаков) на основе многомерных ядер Вольтерра: эвристических признаков, моментов, Фурье-образов, а также признаков, выделенных с использованием методов сжатия, основанных на преобразовании Карунена-Лоэва и вейвлет-преобразовании. Определены наиболее ценные для диагностирования эвристические признаки, моменты, коэффициенты вейвлет-преобразования.

Предложена информационная технология модельной диагностики нелинейных динамических объектов, объединяющая все этапы модельной диагностики в единый вычислительный процесс.

Продемонстрирована эффективность предложенной информационной технологии модельной диагностики на примерах реальных систем.

Список литературы

1. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. 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. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1970. 368 с.

4. Дубровин В.И., Субботин С.А. Диагностика на основе эвристических алгоритмов в условиях ограниченного объема обучающей выборки // Proceedings of International conference “Soft computing and measurement” SCM-2000. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Electrotechnical University (LETI), 2000. CD-ROM.

5. Дубровин В.И., Субботин С.А., Кривенко В.И., Евченко Л.Н. Сокращение объема данных в задачах распознавания и диагностики // Труды VIII Всероссийской конференции “Нейрокомпьютеры и их применение” НКП-2002 с международным участием. Москва, 21-22 марта 2002 г. / Под редакцией проф. А.И. Галушкина. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2002. С. 954-963.

6. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Н.П. Петров, Б.Л. Шмульян. М.: Энергия, 1976. 440 с.

7. Пупков Л.А., Капалин В.И., Ющенко А.С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. М.: Наука, 1976. 448 с.

8. Апарцин А.С., Солодуша С.В. О математическом моделировании нелинейных динамических систем рядами Вольтерры. // Электронное моделирование. 1999. № 2. С. 3-12.

9. Павленко В.Д. Расщепление отклика нелинейной системы на составляющие при идентификации на основе интегро-степенных рядов // Труды Международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2001), Одесса, 2001. С. 74-75.

10. Павленко В.Д., Зиновьев А.А. Амплитуды тестовых сигналов для идентификации ядер Вольтерра // Труды Одесского политехнического университета. 2001. Вып.1 (14). С. 35-41.

11. Павленко В.Д., Зиновьев А.А. Выбор тестовых частот для определения ядер Вольтерры. // Электронное моделирование. 2002. Т. 24, № 1. С. 16-24.

12. Павленко В.Д., Фомин А.А. Комбинированный метод построения решающего правила статистической классификации. // Электронное моделирование. 2001, № 4. С. 34-39.

13. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Энюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. Справочное издание / Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

14. Верлань А.Ф., Игнатченко А.А., Олецкий А.В. Построение математических моделей непрерывных сигналов на основе интегрального преобразования Карунена-Лоэва. // Электронное моделирование. 1992. № 2. С. 3-7.

15. Lotots’kyj R.V. Wawelet Transform for Data Compression. // Signal/Image Processing and Pattern Recognition: Proceedings of the Fifth All-Ukrainian International Conference, UkrOBRAZ'2000. Kyjiv, 2000. P. 63-66.

16. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.

17. Павленко В.Д., Фомин А.А. Критерии отбора информативных совокупностей признаков при многоклассовом распознавании // Труды ОГПУ. 2000. Вып.3 (12). С.146-150.