

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ОСНОВЕ ЯДЕР ВОЛЬТЕРРА

Павленко В.Д., Фомин А.А.,

Одесский национальный политехнический университет

В настоящее время в технической диагностике развивается направление, основанное на восстановлении модели (оператора) диагностируемого объекта [1]. Обычно считается, что неисправности изменяют только параметры модели объекта. Однако часто дефекты приводят к изменению не только параметров модели объекта, но и её структуры, что обуславливает применение методов непараметрической идентификации для построения математической модели объекта контроля по данным эксперимента "вход-выход".

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

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, одновременно обладают и нелинейными и динамическими свойствами.

В данной работе предлагается метод модельной диагностики, основанный на непараметрической идентификации объектов контроля с использованием рядов Вольтерра [1, 3]. С помощью методов статистической классификации исследуется информативность диагностических параметров, формируемых на основе таких моделей.

В качестве информативного описания объектов контроля предлагается использовать нелинейные непараметрические динамические модели в виде рядов Вольтерра

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

где  $w_1(\tau), w_2(\tau_1, \tau_2), \dots, w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  – многомерные весовые функции или ядра Вольтерра (ЯВ),  $x(t)$  – входное воздействие, а  $y(t)$  – отклик объекта при нулевых начальных условиях.

При этом совокупность многомерных ЯВ полностью характеризует и нелинейные и динамические свойства, а следовательно, техническое состояние объектов контроля. Применение моделей на основе рядов Вольтерра позволяет более полно и точно учесть нелинейные и инерционные свойства объектов контроля, делает процедуру диагностики более универсальной.

Диагностическая процедура сводится к определению ЯВ по данным эксперимента “вход – выход” [3] и построению на основе полученных ядер диагностической системы признаков, в пространстве которых строится решающее правило оптимальной классификации [4].

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

1. Существует объективная (но неявная) связь между многомерными ЯВ, характеризующими структуру объекта контроля и его техническим состоянием, иными словами, существует некоторая функция  $F(H, S)$ , связывающая состояние  $S$  с ЯВ  $H = \{h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)\}_{n=1}^N$ .

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

3. Структура объекта контроля может быть адекватно представлена с помощью ЯВ.

Возможны различные подходы к решению задач технической диагностики, отличающиеся способами выбора информативных признаков и алгоритмами восстановления функции  $F(H, S)$  [2,4].

Эффективность применения методов распознавания образов для диагностирования в основном зависит от информативности используемых параметров. Если выбраны параметры, достаточно полно характеризующие внутреннюю структуру объекта диагностирования, то основная масса идентичных по структуре объектов 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 реже ввиду разнообразия дефектов и их относительной малочисленности.

Выбор совокупности диагностических признаков (формирование пространства информативных признаков) оказывает решающее влияние на точность распознавания технического состояния объектов диагностирования.

Математически задача выбора диагностических признаков формулируется следующим образом. Пусть задано исходное пространство признаков  $X$ , размерностью  $p$ . Необходимо найти преобразованное пространство  $Y$ , элементами которого являются  $q$ -мерные векторы, причем  $q < p$ . Формально эта задача заключается в определении отображения  $A: X \rightarrow Y$ , которое исходному пространству  $X$  ставит в соответствие искомое пространство  $Y$ . Решение этой задачи может быть достигнуто двумя путями.

Первый из них основан на взвешивании тем или иным способом различных систем признаков с целью оценки их информативности (полезности) при распознавании. В данной работе, эффективность выбранного набора признаков оценивалась по результатам решения задачи классификации объектов экзаменационной выборки с помощью построенного решающего правила. Наборы признаков, для которых вероятность правильного распознавания мала, отбрасываются и в качестве диагностической системы признаков выбирается набор, для которого добавление любого нового признака не увеличивает или увеличивает незначительно его информативность. При такой процедуре формирования признакового пространства значения самих признаков не меняются, а только уменьшается их число.

Другой путь решения задачи сжатия диагностической информации заключается в отыскании оптимального в некотором смысле преобразования исходного пространства векторов измерений в пространство изображений меньшей размерности. Однако в отличие от описанного выше метода выбора признаков этот метод не предусматривает сокращения количества измерений. В этом случае новые признаки оказываются оторванными от конкретного физического содержания и имеют только абстрактное информационное значение.

Для описания объекта контроля на входе распознающей системы в виде вектора первичных признаков  $\bar{X}$  можно использовать либо конечный набор значений отсчетов сечений многомерных ЯВ, либо коэффициенты разложения ЯВ по некоторой системе функций. В ряде случаев можно сформировать некоторые эвристические характеристики, которые могут входить как компоненты в вектор признаков. В качестве таких характеристик можно выбрать максимальное по модулю значение и соответствующее ему время, площадь главного сечения ЯВ, крутизну его в точке  $t=0$ , время переходного процесса. Применение таких эвристических признаков часто позволяет сократить размерность вектора признаков исходного описания.

Более универсальный подход при формировании вектора информативных параметров состоит в использовании так называемых моментов ЯВ объектов контроля, которые вычисляются по формуле:

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

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

Представляет также интерес использования метода сжатия диагностической информации с помощью преобразования всплесков (Wavelet-преобразования) [5].

Для исследования способов сжатия данных при формировании пространства диагностических признаков выбран объект, который описывается нелинейным дифференциальным уравнением вида

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

где  $\alpha$  и  $\beta$  - постоянные коэффициенты (параметры), недоступные для измерений. Для такого объекта модель в виде двух членов ряда Вольтерра при нулевых начальных условиях имеет вид

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

здесь  $x(t)$  и  $y(t)$  - измеряемые сигналы на входе и выходе объекта;

$$\begin{aligned} w_1(\tau_1) &= e^{-\alpha\tau_1}, \\ w_2(\tau_1, \tau_2) &= \frac{\beta}{\alpha} (e^{-\alpha\tau_1} e^{-\alpha\tau_2} - e^{-\alpha\tau_2}), \tau_1 \leq \tau_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда видно, что для диагностики состояний такого объекта по параметрам  $\alpha$  и  $\beta$  вполне достаточно при формировании вектора информативных признаков использовать ЯВ второго порядка. В качестве исходного описания объекта контроля здесь используется главное сечение ЯВ при  $\tau_1 = \tau_2 = t$

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

Построение модели (6) по данным эксперимента "вход-выход" осуществляется одним из методов активной идентификации [1,3].

Эффективность выделенных диагностических признаков оценивается по результатам решения задачи классификации объектов экзаменационной выборки с помощью построенного методом статистических решений диагностического правила [2,4]. Достоверность диагностирования определяется как процент правильного распознавания (ППР):

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

где  $l_i$  - количество правильно классифицированных элементов  $i$ -го класса в экзаменационной выборке;  $L_i$  - количество элементов  $i$ -го класса в экзаменационной выборке;  $m$  - количество классов.

Реализации объектов с различными значениями параметров  $\alpha$  и  $\beta$  генерировались средствами имитационного моделирования в среде MATLAB. Обучающая и экзаменационная выборки формировались

на основе дискретных значений функций (6) для объектов четырёх классов: 1-ый класс составляют объекты условно работоспособные (параметры  $\alpha$  и  $\beta$  изменяются в пределах  $\pm 5\%$  от номинальных значений  $\alpha_n$  и  $\beta_n$ ); 2-ой класс - объекты условно неработоспособные по параметру  $\alpha$  (параметр  $\beta$  изменяется в пределах  $\pm 5\% \beta_n$ , а параметр  $\alpha \in (-1.1\alpha_n; -1.05\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n; 1.1\alpha_n)$ ); 3-й класс - объекты условно неработоспособные по параметру  $\beta$  (параметр  $\alpha$  изменяется в пределах  $\pm 5\% \alpha_n$ , а параметр  $\beta \in (-1.1\beta_n; -1.05\beta_n) \cup (1.05\beta_n; 1.1\beta_n)$ ); 4-ый класс - неработоспособные объекты по  $\alpha$  и  $\beta$  одновременно.

Таким образом для разделения этих классов находились три решающих функции  $d_1(x)$ ,  $d_2(x)$ ,  $d_3(x)$ . Решающая функция  $d_1(x)$  отделяет объекты 1-го класса от 2-го, 3-го и 4-го;  $d_2(x)$  - отделяет объекты 2-го класса от 3-го и 4-го;  $d_3(x)$  - разделяет объекты 3-го и 4-го классов.

Исследовалась информативность следующих эвристических признаков, выделенных на основе функций (6): 1-экстремум функции, 2-время экстремума; 3-производная функции в точке  $t=0$ , 4-интеграл от функции, 5-время переходного процесса. Наилучшие результаты исследований информативности отдельных признаков и их совокупностей в виде полученных значений ППР для трёх решающих правил приведены в таблице 1.

Таблица 1.

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

Таблица 2.

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

Наиболее высокие ППР достигаются для сочетания двух признаков  $\{1,4\}$ : экстремума и интеграла от функции (6). Для сочетаний признаков из трех и выше ППР существенно ниже.

При сжатии с помощью моментов функций (6) исследовалась информативность четырех моментов: 0-го, 1-го, 2-го и 3-го порядков. Соответствующие номера этих признаков при исследованиях: 1,2,3 и 4. Наилучшие результаты ППР приведены в таблице 2.

При преобразовании всплесков (Wavelet-преобразования) от функций (6) используются вейвлеты вида:

$$\psi(t) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} t e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (8)$$

В качестве признаков выделяются следующие характерные точки: 1-максимум функции (по модулю); 2-время, при котором достигается максимум функции; 3-значение функции в момент времени  $t=0$ ; 4-разность между значением функции в момент времени  $t=0$  и значением максимума функции; 5-интеграл от функции. Наилучшие из полученных результатов исследований в виде ППР приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Признаки	$d_1(x)$	$d_2(x)$	$d_3(x)$
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

Таблица 4.

Признаки	$d_1(x)$	$D_2(x)$	$d_3(x)$
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

Кроме того, исследовались на информативность признаки, представляющие собой значения Wavelet-образов, взятые через равные промежутки времени на интервале, где сконцентрирована вся энергия преобразованных функций (рис.1).

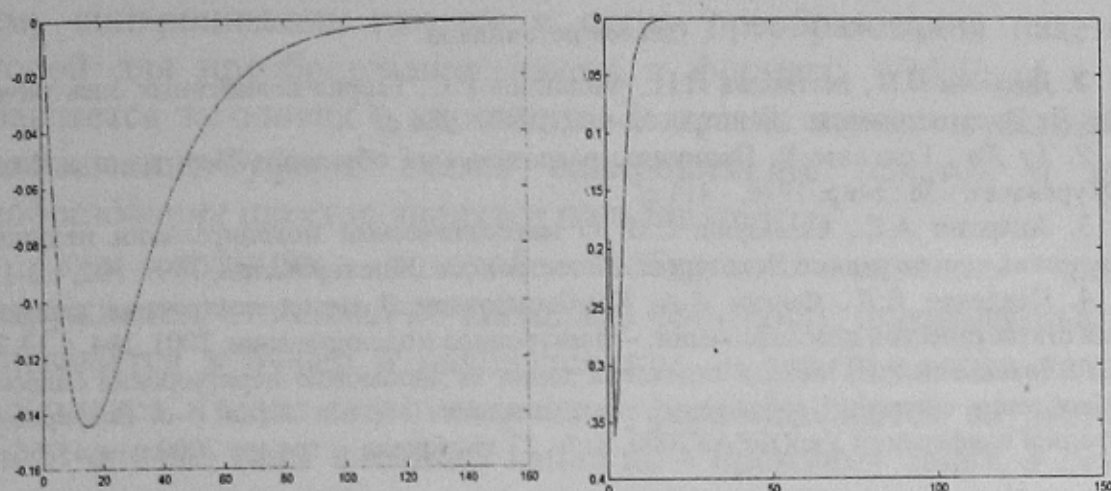


Рисунок 1 - Исходное (слева) и сжатое (справа) при помощи Wavelet-преобразования сечение ЯВ второго порядка

При исследованиях таких признаков выбрано пять: 1,2,...,5. Полученные результаты ППР приведены в таблице 4.

Из таблиц 3 и 4 видно, что информативность признаков, выделенных на Wavelet-образах ЯВ выше, чем информативность признаков выделенных в характерных точках ЯВ (таблица 1).

#### Выводы

Предложенный в работе метод диагностического контроля, основанный на использовании для описания нелинейных объектов контроля многомерных весовых функций (ЯВ) и сжатии диагностической информации, исследован экспериментально с помощью имитационного моделирования. Полученные результаты показывают эффективность метода при распознавании четырёх классов состояний для рассмотренного тестового нелинейного объекта контроля.

Анализ диагностической ценности формируемых совокупностей признаков показал, что наиболее высокая информативность признаков достигается при сжатии диагностической информации с помощью Wavelet – преобразования.



## Список источников

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., Солодуша 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.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРИОРИТЕТОВ ПРИ АНАЛИЗЕ СЕТЕЙ WIDEBAND

Шапо В.Ф.,

Одесская государственная морская академия

При построении вычислительных сетей, предназначенных для высокоскоростной передачи звуковых и видеоданных, может быть применена сетевая технология WideBand. Ее основные возможности рассмотрены в работе [1]. Проблемы и задачи, возникающие при моделировании работы сетей WideBand, рассмотрены в работах [2,3]. В данной работе предлагается алгоритм приоритетов, позволяющий моделировать поведение акселератора Ethernet, являющегося ключевым устройством сетей WideBand. Применение акселератора позволяет стыковать рабочие станции и серверы сетей семейства Ethernet с сетью WideBand с образованием бесколлизийных сегментов. Предложенный алгоритм (рис. 1) позволяет провести моделирование работы акселератора, имеющего 9 стандартных входных портов Ethernet / Fast Ethernet / Gigabit Ethernet и определить время загрузки внешнего канала и количество переданных пакетов; время загрузки каждого буфера; количество пакетов, возвращенных на станцию; общее время простоя каждой станции.

Каждый порт акселератора снабжен буфером, имеющим емкость 4096 байт, в котором могут быть записаны 2 стандартных пакета Ethernet размером 1518 байт. Если канал обмена данными с внешней сетью WideBand свободен, то станция передает кадр через буфер,