Динамика, прочность приборов и аппаратуры

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-3>
УДК 681.326

А.Н. Жирабок, А.Л. Филатов

ЖИРАБОК АЛЕКСЕЙ НИЛОВИЧ – профессор кафедры автоматизации и управления Инженерной школы, e-mail: zhirabok@mail.ru

Дальневосточный федеральный университет,

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

ФИЛАТОВ АРТУР ЛЕОНИДОВИЧ – аспирант *Института проблем*

морских технологий ДВО РАН, e-mail: gryphon1@bk.ru

Суханова ул., 5а, Владивосток, 690091

Повышение эффективности непараметрического метода диагностирования мехатронных систем

Аннотация. Рассмотрена задача функционального диагностирования мехатронных систем, а также различных приборов, динамика которых описывается нелинейными моделями, непараметрическим методом. Отличительная особенность таких приборов и систем состоит в том, что в описывающие их математические модели входят негладкие нелинейности, например люфт, насыщение, сухое трение, которые отражают происходящие в них реальные физические процессы. Характерная черта непараметрических методов состоит в том, что при реализации процедуры диагностирования на их основе значения некоторых, а в линейном случае – всех параметров системы могут быть неизвестными, но их отклонения от текущих значений будут зафиксированы средствами диагностирования. Этот метод реализован в настоящей работе на основе так называемого логико-динамического подхода, предложенного авторами для анализа систем, которые могут содержать негладкие нелинейности. Задача диагностирования на основе этого подхода решается в два этапа, на первом из них ищется линейное решение задачи, которое затем дополняется преобразованным нелинейным членом. Достоинством логико-динамического подхода является то, что он оперирует только методами линейной алгебры, что позволяет избежать использования сложных методов дифференциальной геометрии и пакетов прикладных программ, реализующих аналитические вычисления. В настоящей работе рассмотрены способы реализации непараметрического метода, позволяющие понизить сложность решаемых задач и получить расчетные соотношения для нелинейных систем. Полученные теоретические результаты подтверждены иллюстративными примерами.

Ключевые слова: мехатронные системы, негладкие нелинейности, дефекты, диагностирование, непараметрические методы.

Введение

Одной из важнейших задач, решаемых при эксплуатации мехатронных систем и приборов, является задача обеспечения контроля правильности их функционирования для оперативного обнаружения дефектов, которые могут возникнуть в составляющих их элементах и приводить, в частности, к изменению их прочностных характеристик, и локализации таких дефектов. Нередко для диагностирования таких систем используется непараметрический метод [1–3], позволяющий производить процедуру диагностирования без знания значений некоторых (или

всех) параметров системы. Последнее обстоятельство является основным достоинством непараметрического метода, главный его недостаток состоит в том, что вычисления должны производиться в реальном масштабе времени. Это предъявляет жесткие требования к быстродействию применяемых вычислительных средств и вынуждает искать способы уменьшения сложности вычислений.

Кроме того, для применения непараметрического метода система (или ее часть) должна быть представлена в виде вход-выходных соотношений, которые могут быть получены путем приведения системы к виду без обратных связей. Такие соотношения всегда можно получить в линейном случае простыми средствами, но для нелинейной системы это является достаточно сложной задачей, даже если она в принципе допускает такое приведение.

В статье [2] на языке алгебры функций были получены необходимые и достаточные условия приведения системы к виду без обратных связей, которые, однако, затруднительны в практическом использовании, что вынуждает искать непосредственные методы представления системы в виде вход-выходных соотношений без обращения к ее представлению в форме без обратных связей.

Учитывая сказанное, в работе ставится цель уменьшить сложность вычислений непараметрического метода и разработать прямые методы представления описаний нелинейных систем и приборов в виде вход-выходных соотношений. Настоящая статья является логическим продолжением работ авторов [1, 2], в которых решались общие вопросы непараметрического метода для систем и приборов, описываемых линейными и нелинейными моделями¹.

Основные соотношения непараметрического метода

Общее описание узлов мехатронных систем может быть представлено следующей нелинейной динамической моделью, в которой линейная часть отделена от нелинейных членов:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Fx(t) + Gu(t) + C\varphi(Ax(t), u(t)) + Dd(t), \\ y(t) &= Hx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^l$ – векторы состояния, управления и выхода; F , G , C , D – постоянные матрицы, A – постоянная матрица-строка. Матрица C имеет следующую структуру: если правая часть уравнения (1) для i -й компоненты вектора x содержит нелинейность $\varphi(Ax(t), u(t))$, то $C_i \neq 0$, иначе $C_i = 0$; φ – произвольная нелинейная функция. Для простоты рассматривается случай, когда в системе имеется единственный тип нелинейности. Слагаемое $Dd(t)$ отвечает за дефекты в системе, при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефектов $d(t)$ становится неизвестной функцией времени.

Известно [1, 2], что для применения непараметрического метода исходная система с помощью линейных преобразований

$$x_* = \Phi x, \quad y_* = Ry$$

для некоторой матрицы Φ и матрицы-строки R должна быть преобразована к виду без обратных связей (для простоты рассмотрим прежде всего линейный случай):

$$\begin{aligned} x_{*1}(t+1) &= x_{*2}(t) + J_1 y(t) + G_{*1} u(t), \\ x_{*i}(t+1) &= x_{*(i+1)} + J_i y(t) + G_{*i} u(t), \quad i = 2, 3, \dots, k-1, \\ x_{*k}(t+1) &= J_k y(t) + G_{*k} u(t), \\ y_*(t) &= Ry(t) = x_{*1}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $J_1, \dots, J_k$, $G_{*1}, \dots, G_{*k}$ – строки матриц J и G_* соответственно, некоторые элементы которых зависят от параметров, характеризуемых вектором $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_s)^T$; $x_{*(i+1)}$ – i -я компонента вектора состояния x_* , $x_{*i} = \Phi_i x$, Φ_i – i -я строка матрицы Φ , $i = 1, 2, \dots, k$.

¹ Этим объясняется процент самоцитирования (21%) данной статьи.

Произведем в полученном представлении ряд временных сдвигов и подстановок одних уравнений в другие:

$$x_{*1}(t+2) = J_1 y(t+1) + G_{*1} u(t+1) + x_{*3}(t) + J_2 y(t) + G_{*2} u(t),$$

$$x_{*1}(t+3) = J_1 y(t+2) + G_{*1} u(t+2) + J_2 y(t+1) + G_{*2} u(t+1) + x_{*4}(t) + J_3 y(t) + G_{*3} u(t),$$

...

$$y_*(t+k) = x_{*1}(t+k) = (J_1 \ G_1 \ \dots \ J_k \ G_k) \begin{pmatrix} y(t+k-1) \\ u(t+k-1) \\ \dots \\ y(t) \\ u(t) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Запишем полученное выражение для значения величины y_* для T моментов времени:

$$\begin{aligned} Y_T(t) &= (y_*(t) \ y_*(t-1) \ \dots \ y_*(t-T+1)) = \\ &= (J_1 \ G_1 \ \dots \ J_k \ G_k) V_T(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$V_T(t) = \begin{pmatrix} y(t-1) & y(t-2) & \dots & y(t-T) \\ u(t-1) & u(t-2) & \dots & u(t-T) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y(t-k) & y(t-k-1) & \dots & y(t-k-T+1) \\ u(t-k) & u(t-k-1) & \dots & u(t-k-T+1) \end{pmatrix}.$$

Характерной особенностью выражения (4) является то, что параметры, значения которых могут быть неизвестны, находятся в строке $(J_1 \ G_1 \ \dots \ J_k \ G_k)$; строка $Y_T(t)$ и матрица $V_T(t)$ зависят только от измеряемых значений векторов управления и выхода. Последнее позволяет осуществлять ФД с использованием строки $Y_T(t)$ и матрицы $V_T(t)$, т.е. без знания значений параметров диагностируемой системы.

Для принятия решения о возникших дефектах значение T выбирается минимальным, при котором $\text{rank}(V_T(t)) = \text{rank}(V_{T-1}(t))$ [1–3]. Отсюда следует, что последний столбец матрицы $V_T(t)$ линейно выражается через предыдущие столбцы, т.е. существует ненулевой вектор $v(t)$, для которого $V_T(t)v(T) = 0$; это означает, что матрица $V_T(t)$ имеет непустое ядро. Из (4) тогда следует равенство $Y_T(t)v(T) = 0$, которое является соотношением паритета. Из сказанного следует, что правило генерации невязки имеет вид

$$r_T(t) = Y_T(t)v(T), \quad v(T) \in \ker(V_T(t)). \quad (5)$$

Для генерации невязки достаточно знать размерности векторов системы, но вычисление элементов соотношения (5) должно производиться непосредственно в процессе ФД в реальном масштабе времени. Отметим, что невязка $r_T(t)$ генерируется для каждого момента t , т.е. временное окно T является скользящим.

Способы уменьшения сложности вычислений

Ясно, что операции определения значения T , при котором $\text{rank}(V_T(t)) = \text{rank}(V_{T-1}(t))$, требуют определенных ресурсов времени и не всегда могут быть реализованы в реальном масштабе времени. Для устранения этого недостатка предлагается выбирать T заранее так, чтобы число столбцов матрицы $V_T(t)$ было больше числа ее строк. При известных матрицах J и G_* такое значение T можно определить следующим образом. Пусть $N(J, G_*)$ – число ненулевых элементов матриц J и G_* , тогда условие $\text{rank}(V_T(t)) = \text{rank}(V_{T-1}(t))$ выполняется при $T \geq N(J, G_*) + 1$.

Если значения некоторых параметров известны, то размеры матрицы $V_T(t)$ и временного окна T могут быть уменьшены. Действительно, пусть неизвестными являются параметры, входящие только в матрицу G системы, тогда выражение (4) можно записать в виде

$$Y_T(t) - (J_1 \quad J_2 \quad \dots \quad J_k) \begin{pmatrix} y(t-1) & y(t-2) & \dots & y(t-T) \\ y(t-2) & y(t-3) & \dots & y(t-T-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y(t-k) & y(t-k-1) & \dots & y(t-k-T+1) \end{pmatrix} =$$

$$= (G_{*1} \quad G_{*2} \quad \dots \quad G_{*k}) V_T^u(t),$$

где

$$V_T^u(t) = \begin{pmatrix} u(t-1) & u(t-2) & \dots & u(t-T) \\ u(t-2) & u(t-3) & \dots & u(t-T-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u(t-k) & u(t-k-1) & \dots & u(t-k-T+1) \end{pmatrix}.$$

Ясно, что размеры матрицы $V_T^u(t)$ меньше размеров матрицы $V_T(t)$; кроме того, размеры временного окна T , а также сложность вычислений, которые должны производиться в реальном масштабе времени, уменьшаются.

Дальнейшего сокращения величины T и уменьшения сложности вычислений можно добиться путем анализа выражения (3) за счет приведения подобных членов и перенесения членов, не зависящих от неизвестных коэффициентов, в левую часть уравнения (3). Рассмотрим это на иллюстративном примере системы, описываемой уравнениями [5]

$$x(t+1) = \begin{pmatrix} \gamma_1 x_2(t) - \gamma_2 x_1(t) \\ x_1(t) | x_1(t) | \\ \gamma_1 x_2(t) - \gamma_2 x_3(t) \\ x_3(t) - x_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(t),$$

$$y_1(t) = x_1(t), \quad y_2(t) = x_4(t).$$

Можно показать, что модель системы, нечувствительная к параметру γ_1 , имеет вид

$$x_{*1}(t+1) = x_{*2}(t) + y_1(t) - (\gamma_2 + 1)y_2(t),$$

$$x_{*2}(t+1) = \gamma_2 y_1(t) - \gamma_2 y_2(t) - u_1(t),$$

$$y_*(t) = y_2(t) = x_{*1}(t),$$

где $x_{*1} = x_3 + \gamma_2 x_4 - x_1$, $x_{*2} = x_4$. Произведя временные сдвиги и подстановки, получим вход-выходное описание

$$y_*(t+2) = y_2(t+1) = y_1(t+1) - (\gamma_2 + 1)y_2(t+1) + \gamma_2 y_1(t) - \gamma_2 y_2(t) - u_1(t).$$

Формальное применение описанной выше методики дает размер временного окна $T = 6$. Приведение подобных членов позволяет получить следующее:

$$y_2(t+2) = y_1(t+1) - y_2(t+1) + \gamma_2(y_1(t) - y_2(t) - y_2(t+1)) - u_1(t),$$

а перенос суммы $y_1(t+1) - y_2(t+1) - u_1(t)$ в левую часть приводит к выражению

$$y_2(t+2) - y_1(t+1) + y_2(t+1) + u_1(t) = \gamma_2(y_1(t) - y_2(t) - y_2(t+1)),$$

откуда следует, что $T = 2$ и соотношение (2) принимает вид

$$(y_0(t) \quad y_0(t-1)) = \gamma_2(y_1(t-2) - y_2(t-2) - y_2(t-1) \quad y_1(t-3) - y_2(t-3) - y_2(t-2)),$$

где $y_0(t+2) = y_2(t+2) - y_1(t+1) + y_2(t+1) + u_1(t)$. Задача, таким образом, сводится к определению вектора $v(t)$ такого, что

$$(y_1(t-2) - y_2(t-2) - y_2(t-1) \quad y_1(t-3) - y_2(t-3) - y_2(t-2))v(t) = 0,$$

и к генерированию невязки по правилу

$$r(t) = (y_0(t) \quad y_0(t-1))v(t).$$

Приведение нелинейной системы к вход-выходному виду

Упомянутый выше логико-динамический подход позволяет решить задачу построения модели, независимой от некоторого параметра, однако он не гарантирует, что построенная модель не будет содержать обратных связей. Предлагаемый ниже подход позволяет построить такую модель.

Для простоты рассмотрим случай $k = 3$ и перепишем уравнения, описывающие модель, используя для простоты обозначения $x_*^+ = x_{*1}(t+1)$, $x_* = x_*(t)$, $u = u(t)$, $y = y(t)$:

$$x_{*1}^+ = f_{*1}(x_*, y, u) = f_{*1}(y_*, x_{*2}, x_{*3}, y, u),$$

$$x_{*2}^+ = f_{*2}(x_*, y, u) = f_{*2}(y_*, x_{*2}, x_{*3}, y, u),$$

$$x_{*3}^+ = f_{*3}(x_*, y, u) = f_{*3}(y_*, x_{*2}, x_{*3}, y, u),$$

$$y_* = x_{*1}.$$

Произведем в последнем уравнении два временных сдвига:

$$y_*^+ = x_{*1}^+ = f_{*1}(y_*, x_{*2}, x_{*3}, y, u),$$

$$y_*^{++} = f_{*1}(y_*^+, f_{*2}(y_*, x_{*2}, x_{*3}, y, u), f_{*3}(y_*, x_{*2}, x_{*3}, y, u), y^+, u^+). \quad (6)$$

Введем следующие обозначения:

$$\hat{h}_*(\bar{x}_*) = \begin{pmatrix} f_{*1}(y_*, \bar{x}_*, y, u) \\ f_{*1}(y_*^+, f_{*2}(y_*, \bar{x}_*, y, u), f_{*3}(y_*, \bar{x}_*, y, u), y^+, u^+) \end{pmatrix}, \quad \bar{x}_* = \begin{pmatrix} x_{*2} \\ x_{*3} \end{pmatrix}.$$

Известно, что если

$$\text{rank} \left(\frac{\partial \hat{h}_*(\bar{x}_*)}{\partial \bar{x}_*} \right) = 2$$

почти везде, то уравнения (6) разрешимы относительно переменных x_{*2} и x_{*3} в виде

$$x_{*2} = \bar{f}_{*2}(y_*, y_*^+, y_*^{++}, y, y^+, u, u^+),$$

$$x_{*3} = \bar{f}_{*3}(y_*, y_*^+, y_*^{++}, y, y^+, u, u^+)$$

для некоторых функций $\bar{f}_{*2}$ и $\bar{f}_{*3}$. Произведем дополнительный сдвиг в y_*^{++} и заменим переменные x_{*2} и x_{*3} в полученной формуле для y_*^{+++} функциями $\bar{f}_{*2}$ и $\bar{f}_{*3}$ соответственно. В результате этих действий получится выражение в форме (4).

В качестве примера рассмотрим систему

$$x_1(t+1) = \gamma_1 x_2(t),$$

$$x_2(t+1) = x_2(t)x_4(t) + u_1(t),$$

$$x_3(t+1) = x_1(t)x_5(t),$$

$$x_4(t+1) = \gamma_2 x_3(t)x_5(t) + u_2(t),$$

$$x_5(t+1) = x_3(t)x_4(t),$$

$$y_1(t) = x_2(t),$$

$$y_2(t) = x_3(t).$$

Методами, описанными в [4], построим модель, независимую от параметра γ_1 :

$$x_{*1}(t+1) = y_1(t)x_{*3}(t),$$

$$x_{*2}(t+1) = \gamma_2 x_{*1}(t)x_{*3}(t) + u_2(t),$$

$$x_{*3}(t+1) = x_{*1}(t)x_{*2}(t),$$

$$y_*(t) = x_{*1}(t),$$

где $x_{*1} := x_3$, $x_{*2} := x_4$, $x_{*3} := x_5$, $y_* = y_2$. Как видно, модель содержит обратные связи, поэтому непосредственно применить непараметрический подход невозможно.

Произведем в выражении для $y_* = y_2$ два временных сдвига:

$$y_*(t+1) = y_2(t+1) = x_{*1}(t+1) = y_1(t)x_{*3}(t),$$

$$y_2(t+2) = y_1(t+1)x_{*3}(t+1) = y_1(t+1)x_{*1}(t)x_{*2}(t) = y_1(t+1)y_2(t)x_{*2}(t).$$

Очевидно, что полученная система уравнений разрешима относительно x_{*2} и x_{*3} в виде

$$x_{*2}(t) = \frac{y_2(t+2)}{y_1(t+1)y_2(t)}, \quad x_{*3}(t) = \frac{y_2(t+1)}{y_1(t)}.$$

В результате получаем вход-выходную модель

$$\begin{aligned} y_2(t+3) &= y_1(t+2)y_2(t+1)x_{*2}(t+1) = \\ &= y_1(t+2)y_2(t+1)(\gamma_2 x_{*1}(t)x_{*3}(t) + u_2(t)) = \\ &= y_1(t+2)y_2(t+1) \left(\frac{\gamma_2 y_2(t)y_2(t+1)}{y_1(t)} + u_2(t) \right). \end{aligned}$$

Как показано в предыдущем разделе, некоторые переменные можно перенести в левую часть полученного равенства, уменьшив тем самым сложность решаемой задачи.

Заключение

В работе рассмотрены способы реализации непараметрического метода диагностирования мехатронных систем и приборов, динамика которых описывается нелинейными моделями. Основными проблемами, возникающими при применении этого метода к реальным системам и приборам, являются трудности с приведением таких систем и приборов к вход-выходному описанию и большие размеры получаемых в результате расчетов матриц. Предложенные в работе подходы позволяют, во-первых, получить вход-выходное описание произвольной системы, содержащей гладкие нелинейности, во-вторых, в максимальной степени понизить размеры матриц, на основе которых производится процесс диагностирования. Оба результата позволяют расширить класс систем и приборов, к которым может быть применен непараметрический метод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жирабок А.Н., Шумский А.Е., Павлов С.В. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом // Автоматика и телемеханика. 2017. № 7. С. 3–21.
2. Жирабок А.Н., Шумский А.Е. Непараметрический метод диагностирования нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 2019. № 2. С. 24–45.
3. Buciakowski M., Witczak M., Puig V., Rotondo D., Nejari F., Korbicz J. A bounded-error approach to simultaneous state and actuator fault estimation for a class of nonlinear systems. J. Process Control. 2017(52):14–25.
4. Ding S. Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems. London, Springer-Verlag, 2014, 253 p.
5. Haghani A., Krueger M., Jeinsch T., Ding S., Engel P. Data-driven multimode fault detection for wind energy conversion systems. Proc. 9th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes Safeprocess. Paris, 2015, p. 633–635.
6. Lindner B., Auret L. Data-driven fault detection with process topology for fault identification. Proc. 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa. 2014, p. 8903–8908.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-3>

Zhirabok A., Filatov A.

ALEXEY ZHIRABOK, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Department of Automation and Control, School of Engineering, e-mail: zhirabok@mail.ru
Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

ARTUR FILATOV, Post Graduate Student in *Institute of Marine Technology Problem, FEB RAS*, e-mail: gryphon1@bk.ru

5a Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Improvement of nonparametric method of diagnosis in mechatronic systems

Annotation: The problem of fault diagnosis in mechatronic systems and different devices, described by nonlinear dynamic models, by non-parametric method is considered. The peculiarity of such systems and devices is that their mathematical models contain such non-smooth nonlinearities as backlash, saturation, and Coulomb friction reflecting real physical processes in these systems. The feature of the non-parametric methods is that during diagnostic process the values of some parameters (in linear case – all parameters) may be unknown, but deviations from their values are detected by diagnostic tools. The logic-dynamic approach, which is used to implement this method in the present paper, is developed for diagnosis of nonlinear systems which may contain non-smooth nonlinearities. A solution of the problem based on this method is realized by two steps. On the first step, a linear solution is found which then is supplemented by nonlinear term. The feature of the logic-dynamic approach is that it uses the methods of linear algebra only that allows avoiding the use of methods of differential geometry and complex analytical mathematical packages. In this paper, we consider the methods to implement the non-parametric method allowing decreasing the computational complexity and obtaining calculating expressions for nonlinear systems. The theoretical results obtained during this study are confirmed by illustrative examples.

Keywords: mechatronic systems, non-smooth nonlinearities, faults, diagnosis, non-parametric methods.

REFERENCES

1. Zhirabok A., Shumsky A., Pavlov S. Diagnosis of linear dynamic systems by the nonparametric method. *Automation and Remote Control*, 2017(78);7:3–21.
2. Zhirabok A., Shumsky A. Nonparametric method for diagnosis of nonlinear dynamic systems. *Automation and Remote Control*. 2019(80);2:24–45.
3. Buciakowski M, Witczak M, Puig V, Rotondo D, Nejjari F, Korbicz J. A bounded-error approach to simultaneous state and actuator fault estimation for a class of nonlinear systems. *J. Process Control*. 2017(52):14–25.
4. Ding S. *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*. London, Springer-Verlag, 2014, 253 p.
5. Haghani A., Krueger M., Jeinsch T., Ding S., Engel P. Data-driven multimode fault detection for wind energy conversion systems. *Proc. 9th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes Safeprocess*. Paris, 2015, p. 633–635.
6. Lindner B., Auret L. Data-driven fault detection with process topology for fault identification. *Proc. 19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa. 2014, p. 8903–8908.