УДК 681.5.015.52

В.Д. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Одесса,
С.В. ПАВЛЕНКО, м.н.с., ОНПУ, Одесса,
Д.Ю. РОМАНОВ, студ., ОНПУ, Одесса

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯРИЗОВАННОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Исследуется точность и помехоустойчивость метода детерминированной идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра, основанного на дифференцировании откликов по параметру–амплитуде тестовых сигналов. Вычисление производных сводится к решению соответствующих линейных интегральных уравнений Вольтерра I рода. Вычислительная устойчивость метода идентификации обеспечивается применением метода регуляризации некорректных задач А.Н. Тихонова. Для сглаживания оценок ядер Вольтерра используется вейвлет–фильтрация. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: детерминированная идентификация, нелинейные системы, ядра Вольтерра, регуляризация, вейвлет–фильтрация.

Постановка проблемы и анализ литературы. Для моделирования нелинейных динамических систем (НДС) применяются интегро-степенные ряды Вольтерра (РВ) [1 – 3]. При этом нелинейные и динамические свойства системы полностью характеризуются последовательностью инвариантных относительно вида входного сигнала многомерных весовых функций – ядер Вольтерра (ЯВ). Задача идентификации НДС – построения модели в виде РВ – заключается в определении ЯВ на основе данных экспериментальных исследований системы "вход–выход".

Идентификация по своей сути относится к обратным задачам, при решении которых возникают трудности вычислительного плана, обусловленные некорректностью постановки задачи. Получаемые решения оказываются неустойчивыми к погрешностям исходных данных – ошибкам измерений откликов идентифицируемой системы [4, 5]. Кроме того, при использовании моделей в виде РВ возникает задача разделения отклика исследуемой НДС на парциальные составляющие (ПС), соответствующие отдельным членам РВ, поскольку измеряется суммарный отклик на тестовый сигнал [2]. Известные экспериментальные методы оценки ЯВ во временной области, основанные на применении пробных импульсных (ступенчатых) сигналов [6, 7], характеризуется малым временем измерения, простотой обработки информации и генерирования тестового сигнала. Однако, низкая помехоустойчивость методов детерминированной идентификации ограничивает их применение в реальных условиях при наличии погрешностей измерений откликов, полученных в результате экспериментальных исследований "вход–выход" идентифицируемой НДС [2, 8]. Это обусловливает необходимость разработки новых методов идентификации НДС, с использованием детерминированных пробных воздействий, основанных на применении алгоритмов регуляризации некорректных задач [5, 8, 9] и шумоподавления (сглаживания) с помощью вейвлет–преобразований [10].

Целью работы является анализ точности и вычислительной устойчивости интерполяционного метода идентификации НДС в виде ЯВ с использованием импульсных тестовых сигналов, основанного на выделении ПС с помощью процедуры дифференцирования откликов по параметру – амплитуде тестовых сигналов [11, 12].

Метод идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра. Для непрерывной НДС связь между входным $x(t)$ и выходным $y(t)$ сигналами при нулевых начальных условиях может быть представлена РВ

$$y(t)=\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)=\sum_{n=1}^{\infty}\underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n\ \text{раз}} w_n(\tau_1,\dots,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)d\tau_i, \qquad (1)$$

где $w_n(\tau_1,\dots,\tau_n)$ – ЯВ n–го порядка, функция симметричная относительно вещественных переменных $\tau_1,\dots,\tau_n$; $y_n(t)$ – n–я ПС отклика НДС (n-мерный интеграл свертки); t – текущее время.

Отклик модели НДС в момент времени t в виде РВ на воздействие $a\,x(t)$:

$$\begin{gathered} y(t)=y[ax(t)]=\sum_{n=1}^{\infty}y_n[ax(t)]= \\ =\sum_{n=1}^{\infty}a^n\underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n\ \text{раз}} w_n(\tau_1,\dots,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)d\tau_i, \end{gathered} \qquad (2)$$

где a – произвольное вещественное число, причем $0<|a|\le 1$. Тогда n-я ПС отклика НДС находится по формуле

$$n!\underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n\ раз} w_n(\tau_1,\dots,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)d\tau_i = y_a^{(n)}[a\,x(t)]_{a=0}. \qquad (3)$$

При тестовых импульсных воздействиях длительностью $\Delta\tau$ оценка диагонального сечения ЯВ n-порядка вычисляется по формуле [11]

$$\hat{w}_n(t,t,...,t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{(\Delta\tau)^n}, \quad (4)$$

где $\hat{w}_n(t,t,...,t)$ – оценка диагонального сечения ЯВ n-го порядка; $\hat{y}_n(t)$ – оценка n-й ПС отклика НДС на одиночный импульс в момент времени t, полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3).

Оценка поддиагонального сечения ЯВ n-го порядка определяется как

$$\hat{w}_n(t-\tau_1,...,t-\tau_n) = \frac{1}{n!(\Delta\tau)^n} \sum_{\delta_1,...,\delta_n=0}^{1} (-1)^{n+\sum_{i=1}^{n}\delta_i} \hat{y}_n(t,\delta_1,...,\delta_n), \quad (5)$$

где $\hat{y}_n(t,\delta_1,...,\delta_n)$ – оценка n-й ПС отклика НДС в момент времени t, полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3), при действии на входе нерегулярной последовательности импульсов с площадью $\Delta\tau\Delta a$; если $\delta_i = 1$, то на входе НДС в момент времени τ_i есть импульс, при $\delta_i = 0$ – импульс отсутствует.

При такой обработке выходных сигналов идентифицируемой НДС методическая ошибка становится близкой к нулю, но при этом значительно увеличивается погрешность, возникающая за счет ошибок округления вычислений.

Задача нахождения производной n-го порядка $z(a)$ от функции $y(a)$, для которой $y(0) = y'(0) = ... = y^{(n-1)}(0) = 0$, сводится к решению интегрального уравнения Вольтерра первого рода [5] относительно $z(\xi)$

$$\int_0^a \frac{1}{(n-1)!}(a-\xi)^{n-1} z(\xi)d\xi = y(a), \quad (6)$$

и характеризуется отсутствием устойчивости решения к малым изменениям правой части уравнения $y(a)$. Для нахождения приближенного решения уравнения (6), устойчивого к погрешностям исходных данных, применяется метод регуляризации некорректных задач [4, 5].

Для реализации алгоритма идентификации (4) и (5) перейдем к дискретному аналогу задачи нахождения регуляризованных приближенных решений уравнения (6). Измерим отклики НДС на множестве пробных импульсных воздействий, у которых амплитуда импульсов a изменяется дискретно на интервале $|a| \leq a_{\max}$ с шагом Δa.

Затем каждое сечение по времени t полученного множества откликов $y(a_j, t, \delta_1, ..., \delta_n) = y(j\Delta a)$, где $a_j = j\Delta a$, j = 1, 2, ..., L (L – число уровней дискретизации по амплитуде a) подвергается операции n-кратного численного дифференцирования по a, которая сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\sum_{i=1}^{j} \frac{\Delta a}{(n-1)!} (j\Delta a - \xi_i)^{n-1} z(\xi_i) = u(j\Delta a), \tag{7}$$

где $a \in (0, a_{\max}]$, $a_{\max} = L\Delta a$, $\xi_i = i\Delta a$, $u(a) = \sigma(a)y(a)$; $\sigma(a)$ – некоторая функция, для которой выполняются условия:

$$\begin{gathered} \sigma(0) = \sigma'(0) = \ldots = \sigma^{(n)}(0) = 0,\ \sigma(a_{\max}/2) = 1/2, \sigma(a_{\max}) = 1, \\ \sigma'(a_{\max}) = \ldots = \sigma^{(n)}(a_{\max}) = 0. \end{gathered} \tag{8}$$

В качестве функции $\sigma(a)$ можно выбрать, например, сигмоидальную функцию

$$\sigma(a) = \frac{1}{1 + \exp(-a + a_{\max}/2)}. \tag{9}$$

Систему уравнений (6) можно записать в векторно–матричной форме

$$\mathbf{A}_n \mathbf{z} = \mathbf{u}, \tag{10}$$

где $\mathbf{A}_n = \left\| \alpha_{ij} \right\|_{i,j=\overline{1,L}}$, $\alpha_{ij} = \frac{(j - i + 1/2)^{n-1}(\Delta a)^n}{(n-1)!}$ для $i \le j$, $\alpha_{ij} = 0$ для $i > j$; $\mathbf{z} = (z_1, \ldots, z_L)'$, $z_i = z(i\Delta a - \Delta a/2)$; $\mathbf{u} = (u_1, ..., u_L)'$, $u_j = u(j\Delta a) = \sigma(j\Delta a)y(j\Delta a)$.

При n = 1, 2 и 3 матрицы $\mathbf{A}_n$ соответственно имеют вид

$$\mathbf{A}_1 = \Delta a \begin{Vmatrix} 1\ 1\ 1 \ldots 1 \\ 0\ 1\ 1 \ldots 1 \\ \ldots\ldots\ldots \\ 0\ 0\ 0 \ldots 1 \end{Vmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \frac{(\Delta a)^2}{2} \begin{Vmatrix} 1\ \ 3\ \ 5 \ldots\ (2L-1) \\ 0\ \ 1\ \ 3 \ldots (2L-3) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0\ \ 0\ \ 0 \ldots\qquad 1 \end{Vmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \left(\frac{\Delta a}{2}\right)^3 \begin{Vmatrix} 1 & 3^2 & 5^2 \ldots & (2L-1)^2 \\ 0 & 1 & 3^2 \ldots & (2L-3)^2 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 \ldots & 1 \end{Vmatrix}.$$

Решение поставленной задачи находится на середине интервала $[0, 2a_{\max}]$, т.е. в точках $\xi_i = (i - 0{,}5)\Delta a$.

Таким образом, вычислительный алгоритм, реализующий метод идентификации многомерных ЯВ на основе соотношений (7) – (9), сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (10) для каждого фиксированного момента времени t на интервале $[0, T]$, где T – время моделирования.

Поскольку решение интегрального уравнения (10) – функция $z(a)$, представляет собой производную n-го порядка от функции в правой части уравнения (т.е. с учетом произведенных преобразований – функции $u(a) = \sigma(a)y(a)$), то приближенное значение искомой n-ой производной функции $y(a)$ в точке $a = 0$ находится как

$$y^{(n)}(0) \approx \frac{u^{(n)}(0)}{\sigma(0)} = 2u^{(n)}(0). \tag{11}$$

Регуляризация процедуры идентификации. Для обеспечения вычислительной устойчивости процедуры идентификации воспользуемся одним из вариантов метода регуляризации А.Н. Тихонова [5], основанном на вариационном способе построения регуляризирующего оператора. Этот метод сводится к нахождению приближенного вектора решения $\mathbf{z}^{\alpha}$, минимизирующего некоторый сглаживающий функционал.

Единственный вектор, удовлетворяющий условию минимума сглаживающего функционала, может быть определен из решения СЛАУ

$$(\mathbf{A}^*\mathbf{A} + \alpha\mathbf{I})\mathbf{z}^{\alpha} = \mathbf{A}^*\mathbf{u}, \tag{12}$$

где $\mathbf{A}^*$ – матрица сопряженная к $\mathbf{A}$, $\mathbf{I}$ – единичная матрица, α – параметр регуляризации.

Для выбора значения параметра α используется критерий невязки [5]:

$$\|\mathbf{Az} - \mathbf{u}\| < \varepsilon. \tag{13}$$

где ε – заданная погрешность решения; $\|\cdot\|$ – норма в векторном пространстве.

Приближенное решение, получаемое на основе (12) и (13), соответствует нулевому порядку регуляризации. Для повышения гладкости решений используется регуляризационная матрица $\mathbf{R}$ и находится решение СЛАУ при значении параметра α, которое обеспечивает выполнение условия (12)

$$(\mathbf{A}^*\mathbf{A}+\alpha\mathbf{R})\mathbf{z}^{\alpha}=\mathbf{A}^*\mathbf{u}. \quad (14)$$

Регуляризационная матрица **R** имеет имеет ленточную структуру, диагональные элементы которой равны $r_{ii}=1-(\Delta a)^{-2}$, а элементы в над– и поддиагонали равны $r_{ij}=-(\Delta a)^{-2},\ i\neq j;\ i,j=\overline{1,L}$ (первый порядок регуляризации) [6].

Компьютерное моделирование. Для исследования метода идентификации в качестве тестового выбран объект, который описывается нелинейным дифференциальным уравнением Рикатти:

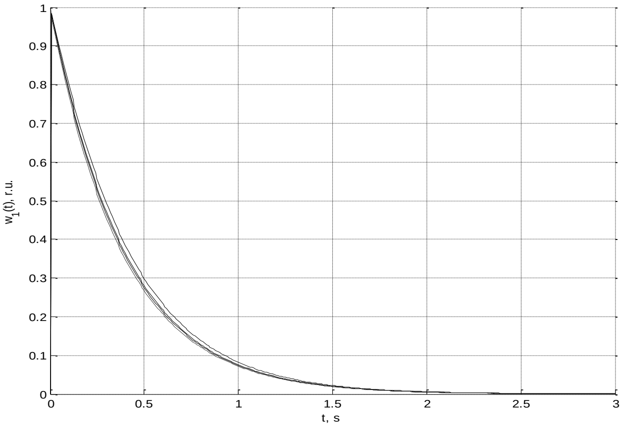
$$y'(t)+\lambda y(t)+\beta y^2(t)=x(t),$$

где λ и β – постоянные коэффициенты.

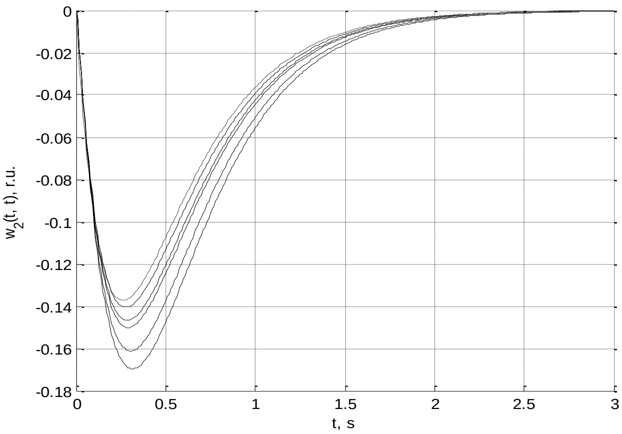
Для этого объекта известны аналитические выражения для ЯВ первого, второго и третьего порядков [10], которые используются в качестве эталонов при исследовании потенциальной точности и вычислительной устойчивости рассматриваемого метода идентификации. Исследования осуществлялись с помощью компьютерного моделирования в среде Matlab–Simulink при следующих значениях параметров тестовых импульсных сигналов: $\Delta\tau$ = 0,01 $a_{\max}$ = 100.

На рис. 1 представлены результаты идентификации тестового объекта без применения регуляризации при точных измерениях откликов – оценки ЯВ 1-го порядка $w_1(t)$ (рис. 1, *а*) и диагонального сечения ЯВ 2-го порядка $w_2(t,t)$ (рис. 1, *б*) при различных экспериментах с шагом по амплитуде Δa, последовательно принимающим значения из множества (25; 20; 12,5; 10; 5). При этом количество экспериментов L равно 4, 10, 16, 20 и 40, соответственно. Наилучшие результаты идентификации получены при Δa = 5 (L = 40).

Оценки диагонального сечения ЯВ 2-го порядка $w_2(t,t)$ при погрешности измерений 1% на основе решения СЛАУ (10) для Δa = 4 (L = 50) без регуляризации представлены на рис. 2, *а.* Полученные при этом большие ошибки не приемлемы на практике (процентная нормированная среднеквадратичная ошибка (ПНСКО) составляет 244,2%). На рис. 2, *б* приведены оценки $w_2(t,t)$, полученные с помощью метода регуляризации [5] и сглаживания с использованием вейвлет-преобразования [10]. При этом ПНСКО идентификации составляет 2,95%.



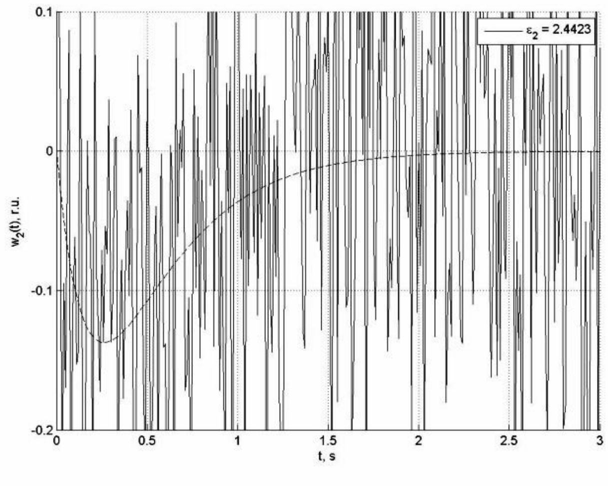
а)



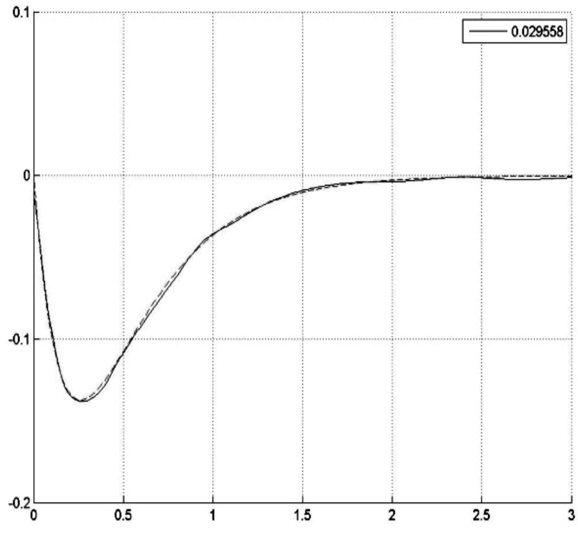
б)

Рис. 1. Результаты идентификации тестового объекта без регуляризации при точных измерениях откликов: оценки ЯВ 1-го порядка (*а*) и диагонального сечения ЯВ 2-го порядка (*б*). Пунктирная линия – эталонные значения

В таблице на основе вычислительных экспериментов выполнено сравнение по величине погрешности предложенного метода идентификации и интерполяционного метода [11]. Анализ данных таблицы показывает, что предложенный метод позволяет существенно повысить точность идентификации.



а)



б)

Рис. 2. Оценки диагонального сечения ЯВ 2-го порядка тестового объекта $w_2(t,t)$ при погрешностях измерений 1% на основе решения СЛАУ (10) без регуляризации (*а*) и полученные с помощью метода регуляризации и сглаживания с использованием вейвлет-фильтрации при $\Delta a = 4$, $L = 50$ (*б*). Пунктирная линия – эталонные значения

Результаты сравнения регуляризованного метода идентификации на основе решения СЛАУ (10) [13] и интерполяционного метода [11], где для численного дифференцирования используются формулы в конечных разностях и применяется естественная регуляризация – оптимизация шага по амплитуде тестовых импульсов, для ядра второго порядка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов идентификации на примере оценки ядра второго порядка $w_2(t,t)$ тестовой НДС

Метод идентификации	Минимальные ПНСКО $\varepsilon_п$, % при погрешности измерений σ, %			
	Применение регуляризации		Применение вейвлет–фильтрации	
	σ = 1	σ = 3	σ = 1	σ = 3
Идентификация на основе решения СЛАУ (10) [13], L=50	6,7	18,4	2,83	5,85
Идентификация на основе интерполяционного метода [11]	13,0	26,3	10,9	15,5

Выводы. Полученные результаты исследований точности регуляризованного метода идентификации нелинейных систем [13], основанного на решении СЛАУ (10) показывают, что при уменьшении шага по амплитуде тестовых импульсов (увеличении количества экспериментов) оценки ядер $w_1(t)$, $w_2(t,t)$ сходятся к эталонным значениям тестовой НДС. При измерениях откликов с погрешностью получаемые оценки ПНСКО идентификации для ядра второго порядка $w_2(t,t)$ в 2 раза меньше, чем минимальная ПНСКО при применении интерполяционного метода. Так как в регуляризованном методе идентификации может использоваться практически неограниченное сверху число экспериментов, это дает возможность повысить точность вычисления производных, а, следовательно, и точность идентификации.

Список литературы: **1.** Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / *Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Н.П. Петров, Б.Л. Шмульян* – М.: Энергия, 1976. – 440 с. **2.** *Пупков К.А.* Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / *К.А. Пупков, Н.Д. Егупов*. – Учебник для ВУЗов. Т. 2, 2–е изд. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 638 с. **3.** *Doyle F.J.* Identification and Control Using Volterra Models / *F.J. Doyle, R.K. Pearson, B.A.Ogunnaike* – Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. – 314 p. **4.** *Тихонов А.Н.* Методы решения некорректных задач / *А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин.* – М.: Наука, 1979. 288 с. **5.** Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / *А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов и др.* – М.: Наука, 1983. – 200 с. **6.** *Giannakis G.B.* A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering / *G.B. Giannakis, E. Serpedin* // Signal Processing – EURASIP, Elsevier Science B.V., 2001. – Vol. 81. – №. 3. – P. 533-580. **7.** Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review / *C.M. Cheng, Z.K. Peng, W.M. Zhang, G. Meng* // Mechanical Systems and Signal Processing – November, 2016. – P. 1-25. – http://dx.doi.org/10.1016/j. ymssp.2016.10.029 (https://www.researchgate.net/publication/

309724868) **8.** *Апарцин А.С.* К исследованию устойчивости решения полиномиального уравнения Вольтерра I рода / *А.С. Апарцин* // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 95-102. **9.** *Апарцин А.С.* О повышении точности моделирования нелинейных динамических систем полиномами Вольтерры / *А.С. Апарцин* // Электронное моделирование. – 2001. – Т. 23. – № 6. – С. 3-12. **10.** *Павленко С.В.* Применение вейвлет–фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра / *С.В. Павленко* // Вост.-европ. журн. передовых технологий. – Харьков, 2010. – № 6/4 (48). – С. 65-70. **11.** *Павленко В.Д.* Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов / *В.Д. Павленко* // Электронное моделирование. – 2010. – Т. 32. – № 3. – С. 3-18. **12.** *Pavlenko V.* Chapter 10: Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain / *V. Pavlenko, S. Pavlenko, V. Speranskyy* // In book: "Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing". V. Haasz and K. Madani (Eds.). – River Publishers, 2014. – P. 233-270. **13.** *Павленко С.В.* Регуляризация процедуры идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра / *С.В. Павленко, В.Д. Павленко* // Идентификация систем и задачи управления: Труды X Международной конференции SICPRO'15, Москва 26-29 января 2015 г., Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 230-238.

References:

1. Popkov Y.S., Kiselev O.N., Petrov N.P., and Shmulyan B.L. (1976), *Identification and optimization of nonlinear stochastic systems.* Energy, Moscow, 440 p.

2. Pupkov K.A., and Egupov N.D. (2004), *Methods of classical and modern automatic control theory. Statistical dynamics and identification of automatic control systems: Textbook for Universities.* Vol. 2, 2nd ed., N.E. Bauman MGTU, 638 p.

3. Doyle F.J., Pearson R.K., and Ogunnaike, B.A. (2001), *Identification and Control Using Volterra Models.* Published Springer Technology & Industrial Arts, 314 p.

4. Tikhonov A.N., and Arsenin V.Y. (1983), *Methods for solving ill-posed problems.* Nauka, Moscow, 288 p.

5. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V. and oth. (1983), *Regularizing algorithms and a priori information.* Nauka, Moscow, 200 p.

6. Giannakis G.B., and Serpedin E. (2001), "A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering", *Signal Processing, EURASIP, Elsevier Science B.V.*, Vol. 81, No. 3, pp. 533-580.

7. Cheng C.M., Peng Z.K., Zhang W.M., and Meng G. (2016), "Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review", *Mechanical Systems and Signal Processing,* November, pp. 1-25. http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.10.029
https://www.researchgate.net/publication/309724868

8. Aparcin A.S. (2011), "The first A. C. to investigate the stability of solutions of polynomial Volterra equations of the first kind". *Automatics and telemechanics,* No. 6, pp. 95-102.

9. Aparcin A.S. (2001), "About increase of accuracy of modeling of nonlinear dynamic systems with Volterra polynomials". *Electron. Modeling,* Vol. 23, No. 6, pp. 3-12.

10. Pavlenko S.V. (2010), "Application of wavelet filtering in the process of identification of nonlinear systems based on Volterra models", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* Kharkiv, No 6/4(48), pp. 65-70.

11. Pavlenko V.D. (2010), "Identification of nonlinear dynamic systems in the form of Volterra kernels on the basis of measurement data of impulse responses". *Electron. modeling*, Vol. 32, No. 3, pp. 3-18.

12. Pavlenko V., Pavlenko S., Speranskyy V. (2014), *Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain.* Chapter 10 In book: "Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing", V. Haasz and K. Madani (Eds.), River Publishers, pp. 233-270.
13. Pavlenko S.V., Pavlenko V.D. (2015), "Regularization of an Identification Procedure of Non-linear Systems in the Form of the Volterra Models", Proceedings of the X International Conference "*System Identification and Control Problems*", *SICPRO'15*, Moscow, January 26-29, 2015. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAN, 2015. P. 230-238.

Поступила (received) 15.08.2016

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (048) 705-8-436, e-mail: pavlenko_vitalij@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Pavlenko Sergey, Junior researcher
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (098) 289-77-83, e-mail: psv85@yandex.ru

Romanov Dmitriy, undergraduate
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (066) 677-66-96, e-mail: dimaromanov2010@gmail.com

УДК 681.5.015.52

Дослідження точності та обчислювальної стійкості регуляризованого методу ідентифікації нелінійних систем / Павленко В.Д., Павлєнко С.В., Романов Д.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № . – С. – .

Досліджується точність і завадостійкість методу детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді ядер Вольтерра, заснованого на диференціюванні відгуків по параметру–амплітуді тестових сигналів. Обчислення похідних зводиться до розв'язування відповідних лінійних інтегральних рівнянь Вольтерра I роду. Обчислювальна стійкість методу ідентифікації забезпечується застосуванням методу регуляризації некоректних задач А.Н. Тихонова. Для згладжування оцінок ядер Вольтерра використовується вейвлет–фільтрація. Табл.: 1. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: детермінована ідентифікація, нелінійні динамічні системи, ядра Вольтерра, регуляризація, вейвлет–фільтрація

УДК 681.5.015.52

Исследование точности и вычислительной устойчивости регуляризованного метода идентификации нелинейных систем / Павленко В.Д., Павленко С.В., Романов Д.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216) . – С. 88 – 99.

Исследуется точность и помехоустойчивость метода детерминированной идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра, основанного на дифференцировании откликов по параметру–амплитуде тестовых сигналов. Вычисление производных сводится к решению соответствующих линейных интегральных уравнений Вольтерра I рода. Вычислительная устойчивость метода идентификации обеспечивается применением метода регуляризации некорректных задач А.Н. Тихонова. Для сглаживания оценок ядер Вольтерра используется вейвлет–фильтрация. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: детерминированная идентификация, нелинейные системы, ядра Вольтерра, регуляризация, вейвлет–фильтрация.

UDC 681.5.015.52

A study of the accuracy and computing stability of a regularized method identification of nonlinear system / Pavlenko V.D., Pavlenko S.V., Romanov D.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. . – P. – .

A study the accuracy and noise immunity of a method of deterministic identification of nonlinear dynamic systems in the form of Volterra kernels based on the differentiation of the feedback parameter is the amplitude of the test signals. The calculation of derivatives is reduced to the solution of the corresponding linear integral Volterra equation of the first kind. The computational stability of the method of identification is provided by using the method of regularization of ill-posed problems A.N. Tikhonov. To smooth the estimates of the Volterra kernels used wavelet filtering.

Keywords: deterministic identification,nonlinear dynamical systems, Volterra kernel, regularization, wavelet filtering. Tabl: 1. Refs.: 13 titles.