ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

УДК 681.5.015.52

В.Д. Павленко, канд. техн. наук., ст. науч. сотр.,
С.В. Павленко, специалист,
Одес. нац. политехн. ун-т

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В ВИДЕ ЯДЕР ВОЛЬТЕРРА

В.Д. Павленко, С.В. Павленко. **Дослідження ефективності методів детермінованої ідентифікації нелінійних систем у вигляді ядер Вольтерра.** Розглядаються компенсаційний, апроксимаційний та інтерполяційний методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра в часовій області. Тестовими впливами використовуються нерегулярні послідовності імпульсів. Досліджуються похибки, що виникають при застосуванні методів детермінованої ідентифікації, проводиться порівняльний аналіз їх ефективності щодо точності і завадостійкості. Для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів ідентифікації застосовуються процедури шумозаглушення, засновані на вейвлет-перетвореннях.
Ключові слова: нелінійні системи, моделі Вольтерра, ідентифікація, вейвлет-перетворення

В.Д. Павленко, С.В. Павленко. **Исследование эффективности методов детерминированной идентификации нелинейных систем в виде ядер Вольтерра.** Рассматриваются компенсационный, аппроксимационный и интерполяционный методы детерминированной идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра во временной области. В качестве тестовых воздействий используются нерегулярные последовательности импульсов. Исследуются погрешности, возникающие при применении методов детерминированной идентификации, проводится сравнительный анализ их эффективности по точности и помехоустойчивости. Для повышения вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации применяются процедуры шумоподавления, основанные на вейвлет-преобразованиях.
Ключевые слова: нелинейные системы, модели Вольтерра, идентификация, вейвлет-преобразования

V.D. Pavlenko, S.V. Pavlenko. **Investigation of efficiency of the methods of deterministic identification of nonlinear systems on the basis of Volterra kernels.** Compensation, approximation and interpolation methods of deterministic identification of nonlinear dynamic systems on the basis of Volterra models in time domain are considered. Irregular pulse sequences are used as test impacts. Inaccuracies appearing when using the methods of deterministic identification are studied; benchmark analysis of their efficiency by accuracy and noise-immunity is carried out. For increasing computational stability of identification algorithms, the procedures of noise suppression based on wavelet-transforms, are used.
Keywords: nonlinear systems, Volterra models, identification, wavelet-transforms

Для математического моделирования сложных нелинейных динамических систем (НДС) широко используются интегростепенные ряды Вольтерра (РВ) [1…3]. При этом нелинейные и динамические свойства системы полностью характеризуются последовательностью многомерных весовых функций — ядер Вольтерра (ЯВ), и задача идентификации НДС — построения модели в виде РВ — заключается в определении ЯВ на основе данных экспериментальных исследований системы “вход — выход” [4].

Известны методы детерминированной идентификации НДС с использованием тестовых нерегулярных импульсных последовательностей: компенсационный [5], аппроксимационный [6] и интерполяционный [7]. Преимущества детерминированных методов по сравнению с методами статистической идентификации [8] — сравнительная простота обработки экспериментальных данных и реализации тестовых сигналов. Однако, на результаты детерминированной идентификации существенное влияние оказывают погрешности измерений. Получаемые реше-

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

ния — оценки ЯВ — оказываются неустойчивыми к погрешностям исходных данных — измерений откликов идентифицируемой НДС [9], что ограничивает применение методов в условиях реального эксперимента.

Предлагаются исследование погрешностей, возникающих при использовании методов детерминированной идентификации [5…7], способ повышения вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации с помощью применения вейвлет-фильтрации, сравнительный анализ эффективности методов по точности и помехоустойчивости.

Компенсационный метод идентификации НДС в виде ЯВ во временной области основан на испытании исследуемой системы нерегулярными последовательностями импульсов с варьируемыми параметрами: амплитудой A и длительностью $\Delta\tau$ импульса и интервалами между импульсами [5].

Модель тестового сигнала в виде нерегулярной последовательности, содержащая не более n импульсов прямоугольной формы, действующих в моменты времени τ_i,

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} \delta_{\tau_i} S\delta(t-\tau_i), \tau_i \in [0,t], \qquad (1)$$

где S=$A\Delta\tau$ — площадь импульса в тестовой последовательности;

$\delta(t-\tau_i)$ — дельта–функция Дирака;

t — текущее время;

δ_{τ_i} — параметр, определяющий количество импульсов последовательности и интервалы между ними; если $\delta_{\tau_i} = 1$, то в момент времени τ_i в последовательности импульс есть; при $\delta_{\tau_i} = 0$ — отсутствует.

С помощью формализма [5] получены соотношения, задающие вычислительный алгоритм экспериментального определения диагонального и поддиагональных сечений ЯВ n-го порядка НДС с одним входом и одним выходом,

$$\hat{w}_n(t-\tau_1, ..., t-\tau_n) = \frac{(-1)^n}{n!S^n} \sum_{\delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n} = 0}^{1} (-1)^{\sum_{i=1}^{n} \delta_{\tau_i}} y(t, \delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n}), \qquad (2)$$

где $\hat{w}_n(t-\tau_1, ..., t-\tau_n)$ — оценка сечения ЯВ n-го порядка;

$y(t, \delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n})$ — отклик НДС, измеренный в момент времени t, при действии на входе модулированных дельта–импульсов площади S соответственно в моменты времени τ_1, ..., τ_n.

Выражение (2) получено при условии, что длительность $\Delta\tau$ и амплитуда A тестовых импульсов достаточно малы [5]. В результате обработки откликов НДС $y(t, \delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n})$ (2) находятся приближенные значения сечений ЯВ, точность определения которых зависит от выбора площади S тестового импульса, т.е. от значений A и $\Delta\tau$.

При уменьшении амплитуды тестовых импульсов уменьшается методическая погрешность идентификации, но возрастает относительная погрешность измерений [5]. Следовательно существует оптимальное значение амплитуды A^*, при которой достигается минимальная погрешность экспериментального определения ЯВ, что позволяет поставить задачу регуляризации процедуры идентификации, используя в качестве параметра регуляризации амплитуду A тестовых импульсов.

Аппроксимационный метод идентификации НДС во временной области основан на выделении в отклике НДС n-й парциальной составляющей (ПС) $y_n[x(t)]$, соответствующей n-му члену РВ, с помощью построения линейных комбинаций откликов на тестовые сигналы с разными амплитудами [6].

Если на вход системы поочередно подаются тестовые сигналы $a_1x(t)$, $a_2x(t)$, …, $a_Nx(t)$, где N — порядок аппроксимационной модели; a_1, a_2, …, a_N — различные вещественные числа, удовлетворяющие условию $0<|a_j|\le 1$ для $\forall j=1, 2, ..., N$; $x(t)$ — произвольная функция, то линейная комбинация откликов НДС на эти воздействия равна n-й ПС отклика на сигнал $x(t)$ с погрешностью Δ, т.е.

$$\sum_{j=1}^{N} c_j y[a_j x(t)] = y_n[x(t)] + \Delta, \tag{3}$$

где c_j — действительные коэффициенты, такие что

$$\left\{ \sum_{j=1}^{N} c_j\, a_j^n = \delta_k^n = \begin{cases} 1, & k=n; \\ 0, & k \ne n; \end{cases} \right. \quad 1 \le n,\ k \le N,$$

δ_k^n — символ Кронекера; (4)

$$\Delta = \sum_{j=1}^{N} c_j \sum_{n=N+1}^{\infty} y_n[a_j x(t)]. \tag{5}$$

При использовании сигналов $x(t)$, представляющих собой нерегулярные импульсные последовательности (1), оценка поддиагонального сечения ЯВ n-го порядка НДС

$$\hat{w}_n(t-\tau_1, ..., t-\tau_n) = \frac{(-1)^n}{n!(\Delta\tau)^n} \sum_{\delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n}=0}^{1} (-1)^{\sum_{i=1}^{n}\delta_{\tau_i}}\, \hat{y}_n(t, \delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n}), \tag{6}$$

где $\hat{y}_n(t, \delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n})$ — оценка n-й ПС отклика НДС в момент времени t, полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3).

Оценка диагонального сечения ЯВ n-го порядка

$$\hat{w}_n(t, t, ..., t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{(\Delta\tau)^n}, \tag{7}$$

где $\hat{y}_n(t)$ — оценка n-й ПС отклика НДС на одиночный импульс в момент времени t, полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3).

Для минимизации погрешности выделения ПС отклика НДС (5), обусловленной членами РВ порядка выше N-го, необходимо обеспечить минимум суммы модулей коэффициентов c_j ($j=1, 2, ..., N$), которые определяются из системы уравнений (4) [10]

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^{N} |c_j| = \sum_{j=1}^{N} \left| \sum_{n=1}^{N} a_{jn}^{-1} \delta_k^n \right| = \sum_{j=1}^{N} \left| a_{jk}^{-1} \right| = \frac{1}{|\det \mathbf{A}|} \sum_{j=1}^{N} |M_{jk}| = \min, \tag{8}$$

где a_{jk}^{-1} — элемент матрицы, обратной матрице

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_N \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_N^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^N & a_2^N & \dots & a_N^N \end{bmatrix},$$

$\det \mathbf{A}$, M_{jk} — определитель и миноры матрицы **A**, соответственно.

В соответствии с (8) задача обеспечения минимума методической ошибки при применении аппроксимационного метода идентификации сводится к нахождению локальных минимумов функции многих переменных, т.е. суммы модулей коэффициентов c_j. С помощью процедуры полного перебора различных значений амплитуд, решением каждый раз для них системы линейных алгебраических уравнений (4), вычисляются соответствующие им коэффициенты. Нахождением минимального значения выражения (8) определяются оптимальные значения амплитуд $a_1, a_2, \dots, a_N$ для заданных параметров n и N метода идентификации [10].

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

Уменьшение погрешности аппроксимационного метода идентификации может быть достигнуто двумя путями — выбором достаточно малой амплитуды A тестовых импульсов при заданном порядке аппроксимации N либо при заданной амплитуде A повышением порядка аппроксимационной модели N [10].

В *интерполяционном* методе идентификации НДС на основе РВ для разделения отклика НДС на ПС $\hat{y}_n(t)$ используется n-кратное дифференцирование выходного сигнала по параметру–амплитуде A тестовых воздействий [7].

Если на вход системы подать тестовый сигнал вида $ax(t)$, где $x(t)$ — произвольная функция; $|a|\leq 1$ — масштабный коэффициент, то для выделения ПС n-го порядка $\hat{y}_n(t)$ из измеряемого отклика НДС $y[ax(t)]$ необходимо найти n-ю частную производную отклика по амплитуде a при a=0

$$\hat{y}_n(t) = \underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n \text{ раз}} w_n(\tau_1, ..., \tau_n) \prod_{r=1}^{n} x(t-\tau_r) d\tau_r = \frac{1}{n!} \frac{\partial^n y[ax(t)]}{\partial a^n} \bigg|_{a=0} . \tag{9}$$

С помощью тестовых нерегулярных последовательностей импульсов длительностью $\Delta\tau$ и процедуры (9) вычисляются ПС откликов $\hat{y}_n(t)$ и $\hat{y}_n(t, \delta_{\tau_1}, ..., \delta_{\tau_n})$, на основе которых и выражений (7) и (6) определяются диагональное и поддиагональные сечения ЯВ.

Получены формулы для численного дифференцирования при использовании центральных разностей для равноотстоящих узлов $y_r = y[rhx(t)]$, $r = -r_1, -r_1 + 1, ..., r_2$ с шагом разностной сетки по амплитуде h=Δa [7]. Для определения ЯВ первого порядка вычисляется первая производная при $r_1 = r_2 = 1$ или $r_1 = r_2 = 2$, соответственно

$$\begin{aligned} y_0' &= y'(0) = \frac{1}{2h}(-y_{-1} + y_1), \\ y_0' &= \frac{1}{12h}(y_{-2} - 8y_{-1} + 8y_1 - y_2). \end{aligned} \tag{10}$$

Для определения ЯВ второго порядка вычисляется вторая производная при $r_1 = r_2 = 1$ или $r_1 = r_2 = 2$, соответственно

$$\begin{aligned} y_0'' &= y''(0) = \frac{1}{h^2}(y_{-1} + y_1), \\ y_0'' &= \frac{1}{12h^2}(-y_{-2} + 16y_{-1} + 16y_1 - y_2). \end{aligned} \tag{11}$$

Для определения ЯВ третьего порядка вычисляется третья производная при $r_1 = r_2 = 2$ или $r_1 = r_2 = 3$, соответственно

$$\begin{aligned} y_0''' &= y'''(0) = \frac{1}{2h^3}(-y_{-2} + 2y_{-1} - 2y_1 + y_2), \\ y_0''' &= \frac{1}{8h^3}(y_{-3} - 8y_{-2} + 13y_{-1} - 13y_1 + 8y_2 - y_3). \end{aligned} \tag{12}$$

Эффективность методов [5…7], алгоритмов и инструментальных средств идентификации НДС с использованием нерегулярных последовательностей импульсов подтверждена с помощью компьютерного моделирования в системе Matlab-Simulink на тестовом объекте, который описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$\frac{dy(t)}{dt} + \alpha y(t) + \beta y^2(t) = x(t) , \tag{13}$$

где α и β — постоянные коэффициенты.

В качестве эталона при исследованиях потенциальной точности и помехоустойчивости методов идентификации используются аналитические выражения для ЯВ рассматриваемого объекта (13)

$$w_1(\tau_1) = e^{-\alpha\tau_1};$$

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

$$w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3) = \frac{1}{3}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 (e^{\alpha(\tau_1-\tau_2-\tau_3)} + 3e^{-\alpha(\tau_1+\tau_2+\tau_3)} - 4e^{-\alpha(\tau_2+\tau_3)} -$$

$$-2e^{-\alpha(\tau_1+\tau_3)} + 2e^{-\alpha\tau_3}),\ \tau_1 \le \tau_2 \le \tau_3.$$

Для диагональных сечений ЯВ второго и третьего порядков получены при $\tau_1=\tau_2=\tau_3=t$

$$w_2(t,t) = \frac{\beta}{\alpha}(e^{-2\alpha t} - e^{-\alpha t}),\ w_3(t,t,t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 (e^{-3\alpha t} - 2e^{-2\alpha t} + e^{-\alpha t}).$$

Для оценки погрешностей экспериментального определения сечений ЯВ использованы критерии среднеквадратичной ошибки (СКО) и процентной нормированной среднеквадратичной ошибки (ПНСКО), соответственно

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{k}\sum_{t=1}^{k}(w_t - \hat{w}_t)^2},\ \varepsilon_{\text{п}} = 100\%\sqrt{\sum_{t=1}^{k}(w_t - \hat{w}_t)^2\left(\sum_{t=1}^{k} w_t^2\right)^{-1}},$$

где k — количество отсчетов на интервале времени наблюдения;

w_t — эталонные значения ЯВ;

$\hat{w}_t$ — значения оценки ЯВ, полученные в результате обработки экспериментальных данных (откликов системы) в дискретные моменты времени t.

Исследованы погрешности оценок сечений ЯВ, возникающие при применении методов детерминированной идентификации, проведен сравнительный анализ их эффективности по точности и помехоустойчивости. Выбором значений амплитуды A тестового сигнала (1) можно получить оптимальные по точности оценки произвольных сечений многомерных ЯВ. Для повышения вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации к получаемым оценкам многомерных ЯВ применяются процедуры шумоподавления (сглаживания), основанные на вейвлет–преобразовании [11].

Шумоподавление обычно достигается удалением высокочастотных составляющих из спектра сигнала, представляющего аддитивную смесь информационной составляющей, получаемой в результате обработки откликов сечения ЯВ и шума, обусловленного погрешностью измерительной аппаратуры. Применительно к вейвлетным разложениям это может быть реализовано непосредственно удалением детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней. Задавая некоторый порог для их уровня и срезая по нему детализирующие коэффициенты, можно добиться уменьшения уровня шумов [12].

Для сглаживания оценок сечений ЯВ использовалась утилита wden из пакета расширения Wavelet Toolbox системы MATLAB с материнским вейвлетом coiflet-coif4 при следующих параметрах: параметр установки правила вычисления порогового значения для ограничения коэффициентов разложения TPTR=’minimaxi’ (по минимаксной оценке); параметр установки типа порога очистки SORH=’s’ (гибкий); параметр, определяющий способ пересчета порога SCAL=’one’ (использование порога, единого для всех уровней разложения, без перемасштабирования); глубина разложения данных — 3.

Модель получаемой зашумленной оценки диагонального сечения ЯВ рассматриваемого тестового объекта принимается аддитивной: $\hat{w}_n(t,t,\ldots,t) + \xi(t)$ с равномерным шагом по ар-

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

гументу t, где $\hat{w}_n(t,t,\ldots,t)$ — полезная информационная составляющая, $\xi(t)$ — помеха типа белый гауссов шум с дисперсией D и средним нулевым значением.

Получены СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго и третьего порядков для тестового объекта (13) при применении компенсационного метода идентификации [5] и погрешности измерений откликов σ=1, 3, 5 % без применения и с применением вейвлет-фильтрации (табл. 1).

Применение вейвлет-фильтрации [12] в процедуре идентификации на основе компенсационного метода [5] позволяет получить сглаженные оценки сечений ЯВ и повысить точность идентификации по критерию СКО на 20…45 %.

Таблица 1

СКО оценки диагональных сечений ЯВ второго и третьего порядков для тестового объекта при применении компенсационного метода идентификации [5]

Порядок ЯВ n	Значения СКО оценки ε					
	без применения вейвлет-фильтрации			с применением вейвлет-фильтрации		
	Погрешность измерений σ, %					
	1	3	5	1	3	5
2	0,024	0,037	0,045	0,019	0,033	0,037
3	0,025	0,028	0,032	0,014	0,017	0,020

Получены зависимости СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго $\hat{w}_2(t,t)$ и третьего $\hat{w}_3(t,t,t)$ порядков с помощью интерполяционного метода идентификации [7] (рис. 1, *а*, *б*, соответственно) от площади тестовых импульсов S при погрешности измерений откликов σ=1, 3, 5 % без применения процедуры сглаживания получаемых оценок ЯВ.

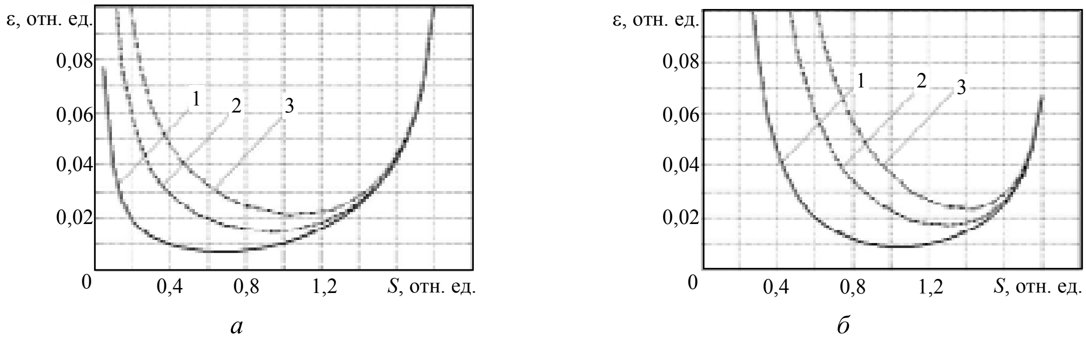


Рис. 1. Зависимости СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго $\hat{w}_2(t,t)$ (а) и третьего $\hat{w}_3(t,t,t)$ (б) порядков с помощью интерполяционного метода идентификации от площади S тестовых импульсов, соответственно для r_1=r_2=1 и r_1=r_2=2 при погрешностях измерений откликов σ=1(1), 3(2), 5 % (3)

Представлены зависимости СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка $\hat{w}_2(t,t)$ с помощью интерполяционного метода идентификации [7] от площади S тестовых импульсов при погрешности измерений σ=1 % и применении вейвлет-фильтрации к полученным оценкам сечений ЯВ с помощью вейвлет–преобразования на основе материнского вейвлета coiflet для уровня разложения L=6, и СКО идентификации с использованием вейвлет–фильтрации на основе вейвлета coif4 при различных уровнях разложения L (рис. 2, *а*, *б*, соответственно).

Минимальная СКО идентификации достигается при использовании материнского вейвлета coiflet — coif4 (рис. 2, *а*) с уровнем глубины разложения L=4 (рис. 2, *б*). При этом получаются сглаженные решения, а погрешность идентификации уменьшается в 1,5...2 раза.

Приведены ПНСКО $\varepsilon_п$ оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка $\hat{w}_2(t,t)$ для тестового объекта, полученные с помощью компенсационного, аппроксимационного и интерполяционного методов детерминированной идентификации при погрешности измерений откликов σ=1, 3, 5 % без применения и с применением вейвлет-фильтрации (табл. 2).

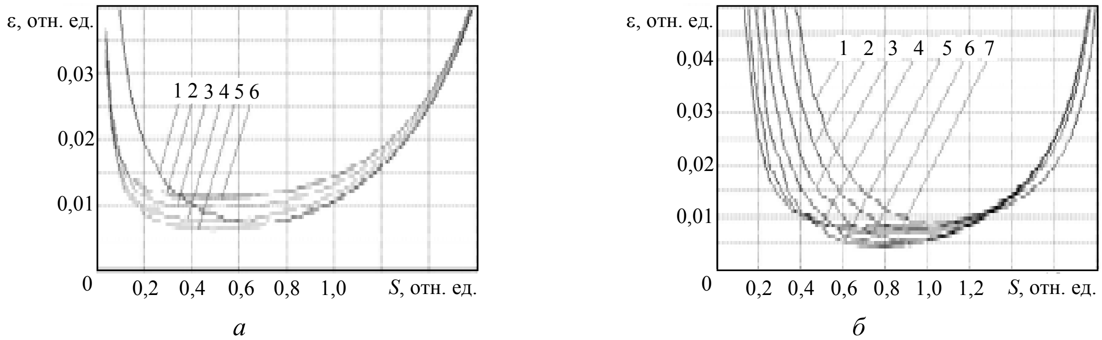


Рис. 2. Зависимости СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка $\hat{w}_2(t,t)$ с помощью интерполяционного метода идентификации от площади S тестовых импульсов при погрешности измерений σ=1 % и применении вейвлет-фильтрации: а — с помощью вейвлетов coif1 (2), coif2 (3), coif3 (4), coif4 (5), coif5 (6); б — на основе вейвлета coif4 с уровнями разложения L=1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5), 5 (6), 6 (7); без фильтрации (1)

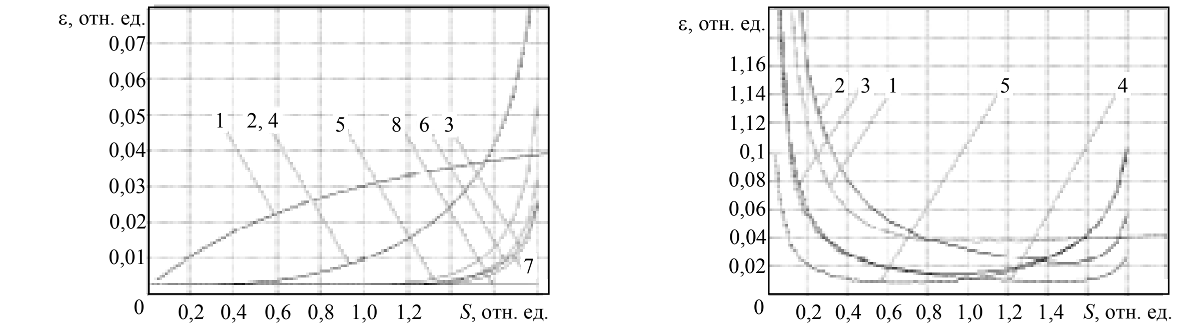
Таблица 2

ПНСКО оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка для тестового объекта, полученные с помощью компенсационного, аппроксимационного и интерполяционного методов детерминированной идентификации

Параметры методов идентификации N, r_1, r_2	Минимальные ПНСКО $\varepsilon_п$ (%) и оптимальные амплитуды A (отн. ед.) при погрешности измерений σ (%)								
	без применения вейвлет-фильтрации						с применением вейвлет-фильтрации		
	σ=1 %	**A**	σ=3 %	**A**	σ=5 %	**A**	σ=1 %	σ=3 %	σ=5 %
	Компесационный метод [5]								
	44,0	20	66,5	60	77,1	70	30,1	43,7	53,7
N	Аппроксимационный метод [6]								
2	12,6	30	25,9	50	37,0	71	10,8	15,0	18,3
3	11,9	30	24,5	50	33,5	71	9,08	13,3	16,9
4	15,7	55	40,3	75	63,3	83	11,2	18,1	24,5
5	15,2	55	38,0	75	58,7	83	11,1	17,0	22,7
6	18,7	70	50,4	80	80,5	87	11,9	20,5	29,3
r_1=r_2	Интерполяционный метод [7]								
1	13,0	34	26,3	45	37,5	53	10,9	15,5	19,2
2	14,7	72	36,5	79	58,1	80	11,2	16,8	23,6
3	19,6	84	54,1	86	88,1	87	11,6	20,8	31,5
4	25,6	86	77,3	90	126,0	91	13,1	25,1	44,0

Представлены зависимости СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка $\hat{w}_2(t,t)$ с помощью методов детерминированной идентификации: компенсационного, аппроксимационного и интерполяционного, от площади S или амплитуды A тестовых импульсов в условиях идеального эксперимента (точные измерения) и с учетом погрешности σ=3 % измерений откликов (рис. 3 *а*, *б*, соответственно).

 ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)



а б

Рис. 3. Зависимости СКО ε оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка $\hat{w}_2(t,t)$ от площади S тестовых импульсов:
а — при точных измерениях для методов: компенсационного (1); интерполяционного при $r_1=r_2=1$ (2); 2 (3); аппроксимационного при N=2, 3 (4); 4, 5 (5); 6 (6); 7 (7);8 (8);
б — при идентификации по измерениям с погрешностью 3% методом: компенсационным (1); аппроксимационным при N=2 (2), 4 и 5 (3); интерполяционным при $r_1=r_2=1$ (4), 2 (5)

Сравнение результатов идентификации НДС тремя методами детерминированной идентификации с помощью нерегулярных последовательностей тестовых импульсов (см. таблицу 2) на тестовом объекте (13) показывает, что наименее точный из них — компенсационный. Аппроксимационный метод, основанный на составлении линейных комбинаций откликов системы на тестовые последовательности импульсов с разными амлитудами (3), (6) и (7), имеет высокие показатели эффективности, но уступает по точности интерполяционному. Наиболее высокой точностью и помехоустойчивостью обладает интерполяционный метод идентификации, заключающийся в дифференцировании откликов по параметру–амплитуде тестовых импульсов (9).

Литература

1. Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления: учеб. для вузов. В 5 т. Т. 2 / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов. — М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 638 с.
2. Третьяк, А.И. Дифференциально-геометрические методы в теории дискретных систем управления: моногр. / А.И. Третьяк, А.В. Усов, А.П. Коновалов. — Одесса: Астропринт, 2008. — 360 с.
3. Doyle, F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, D.A. Ogunnaike. — Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. — 314 p.
4. 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.
5. Павленко, В.Д. Компенсационный метод идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра / В.Д. Павленко // Тр. Одес. политехн. ун–та. — Одесса, 2009. — Вып. 2(32). — С. 121 — 129.
6. Данилов, Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Е.С. Филиппов. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
7. Павленко, В.Д. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов / В.Д. Павленко // Электрон. моделирование. — 2010. — Т. 32, № 3. — С. 3 — 18.
8. Мармарелис, П. Анализ физиологических систем. Метод белого шума / П. Мармарелис, В. Мармарелис; пер. с англ. под ред. Е.А.Умрюхина. — М.: Мир, 1981. — 480 с.
9. Апарцин, А.С. О повышении точности моделирования нелинейных динамических систем полиномами Вольтерра / А.С. Апарцин // Электрон. моделирование. — 2001. — № 6. — С. 3 — 12

10. Павленко, В.Д. Исследование погрешностей аппроксимационного метода идентификации нелинейных динамических объектов в виде ядер Вольтерра / В.Д. Павленко, С.В. Павленко // Электротехнические и компьютерные системы. — 2010. — Вип. 01 (77). — С. 102 — 108.
11. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 304 с.
12. Павленко, С.В. Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра // Вост.-европ. журн. передовых технологий. — Харьков, 2010. — № 6/4 (48). — С. 65 — 70.

References

1. Pupkov, K.A. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. dlya vuzov. V 5 t. T. 2 [Methods of Classic and Modern Automatic Control Theory. Statistical Dynamics and Intensification of Automatic Control Systems: a textbook for institutes of higher education. In 5 vol. Vol. 2] / K.A. Pupkov, N.D. Egupov. — Moscow, 2004. — 638 p.
2. Tret'yak, A.I. Differentsial'no-geometricheskie metody v teorii diskretnykh sistem upravleniya: monogr. [Differential-Geometric Methods in Discrete Control Systems] / A.I. Tret'yak, A.V. Usov, A.P. Konovalov. — Odessa, 2008. — 360 p.
3. Doyle, F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, D.A. Ogunnaike. — Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. — 314 p.
4. 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.
5. Pavlenko, V.D. Kompensatsionnyy metod identifikatsii nelineynykh dinamicheskikh sistem v vide yader Vol'terra [Compensation Method for Identification of Nonlinear Dynamic Systems in the Form of Volterra Kernels] / V.D. Pavlenko // Tr. Odes. politekhn. un–ta.[Transact. of Odessa Polytech. Univ.] — Odessa, 2009. — Issue 2(32). — PP. 121 — 129.
6. Danilov, L.V. Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey [Nonlinear Electric Circuits Theory] / L.V. Danilov, P.N. Matkhanov, E.S. Filippov. — Leningrad, 1990. — 256 p.
7. Pavlenko, V.D. Identifikatsiya nelineynykh dinamicheskikh sistem v vide yader Vol'terry na osnove dannykh izmereniy impul'snykh otklikov [Identification of Nonlinear Dynamic Systems in the Form of Volterra Kernels] / V.D. Pavlenko // Elektron. modelirovanie [Electronic Simulation]. — 2010. — Vol. 32, # 3. — PP. 3 — 18.
8. Marmarelis, P. Analiz fiziologicheskikh sistem. Metod belogo shuma [Physiological Systems Analysis. White Noise Method] / P. Marmarelis, V. Marmarelis; transl. from English edited by E.A.Umryukhin. — Moscow, 1981. — 480 p.
9. Apartsin, A.S. O povyshenii tochnosti modelirovaniya nelineynykh dinamicheskikh sistem polinomami Vol'terra [Improvement of Nonlinear Dynamic Systems Simulation Accuracy with Volterra Polynomials] / A.S. Apartsin // Elektron. modelirovanie [Electronic Simulation]. — 2001, # 6. — PP. 3 — 12
10. Pavlenko, V.D. Issledovanie pogreshnostey approksimatsionnogo metoda identifikatsii nelineynykh dinamicheskikh ob'ektov v vide yader Vol'terra [Invevstigation of Errors in Approximation Identification Method for Identifying Nonlinear Dynamic Objects in the Form of Volterra Kernels] / V.D. Pavlenko, S.V. Pavlenko // Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy [Electrotechnical and Computer Systems]. — 2010. — Issue 01 (77). — PP. 102 — 108.
11. Smolentsev, N.K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB [Wavelet Theory Fundamentals. Wavelets in MATLAB] / N.K. Smolentsev. — Moscow, 2005. — 304 p.
12. Pavlenko, C.V. Primenenie veyvlet-fil'tratsii v protsedure identifikatsii nelineynykh sistem na osnove modeley Vol'terra [Application of Wavelet-Filtration in the Procedure of Nonlinear Systems Identification Based on Volterra Models] // Vost.-evrop. zhurn. peredovykh tekhnologiy East-Europ. J. of Advanced Technologies. — Khar'kov, 2010. — # 6/4 (48). — PP. 65 — 70.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Усов А.В.

Поступила в редакцию 31 августа 2011 г.