УДК 681.5.015.52

Павленко В.Д.
Одеський національний політехнічний університет

Ломовий В.І.
Національний університет «Одеська морська академія»

ПОБУДОВА АПРОКСИМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ У ВИГЛЯДІ ПОЛІНОМА ВОЛЬТЕРРА

Пропонується метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра нелінійної динамічної системи в часовій області з використанням поліімпульсних тестових сигналів різних амплітуд. Метод заснований на використанні регуляризованого методу найменших квадратів і виборі оптимальної величини кроку по амплітуді тестових сигналів, що забезпечує підвищення точності та обчислювальної стійкості процедури ідентифікації.

Ключові слова: *нелінійні динамічні системи, поліноми Вольтерра, ядра Вольтерра, ідентифікація, регуляризація.*

Постановка проблеми. Методи математичного моделювання та експеримент є основними засобами дослідження складних нелінійних динамічних систем (далі – НДС). Для опису НДС, які розглядаються як «чорний ящик», часто використовуються моделі Вольтерра (МВ) [1; 2]. При цьому нелінійні та динамічні властивості системи повністю характеризуються послідовністю багатовимірних вагових функцій – ядер Вольтерра (далі – ЯВ). Задача ідентифікації у вигляді МВ полягає у визначенні ЯВ на основі даних вимірювань «вхід–вихід» НДС [2].

Однак наявні натепер прикладні алгоритми ідентифікації НДС на основі МВ все ще не дають змогу повною мірою використовувати можливості цього математичного апарата. Це зумовлено цілою низкою причин, найбільш важливими з яких є: недоврахування істотного впливу похибок вимірювань на результат ідентифікації в алгоритмах експериментального визначення ЯВ (що обмежує їх застосування в реальних умовах), а також недостатній рівень розробки програмно-алгоритмічного забезпечення задач ідентифікації НДС на основі МВ.

Удосконалення методів та інструментальних засобів ідентифікації неперервних НДС на основі МВ, призначених для дослідження об'єктів різної фізичної природи, є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для побудови МВ НДС необхідно вирішити завдання виділення із сумарного відгуку *y(t)* парціального складника (ПС) n-го порядку та визначення з нього відповідних ЯВ. У [3] пропонується метод виділення ПС за допомогою n-разового диференціювання відгуків НДС по параметру – амплітуді тестових сигналів. При цьому пропонується використовувати тестові сигнали – нерегулярні послідовності імпульсів (поліімпульсні сигнали). У роботах [3; 4] розроблено обчислювальні методи оцінки багатовимірних ЯВ (їх діагональні та піддіагональні перетини), що базуються на чисельному диференціюванні реакцій НДС по амплітуді тестових сигналів.

Область застосування МВ у вигляді інтегростепеневих рядів обмежена слабо нелінійним режимом функціонування, тобто роботою НДС за малих амплітуд вхідних сигналів або малої нелінійності. Для опису істотно нелінійної системи застосовують інтегростепеневі поліноми Вольтерра [5; 6]. Доказана М. Фреше теорема [7] обґрунтовує принципову можливість такої апроксимації. Однак теорема не вказує на конструктивні алгоритми побудови поліномів Вольтерра за даними експериментів «вхід–вихід».

Метою цієї роботи є теоретичне обґрунтування та дослідження методу побудови апроксимаційної МВ у вигляді полінома Вольтерра за допомогою тестових поліімпульсних сигналів.

На результати ідентифікації НДС на основі апроксимаційної МВ у вигляді поліномів Вольтерра за використання тестових поліімпульсних сигналів істотний вплив чинять похибки вимірювань. Для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів ідентифікації в роботі застосовуються процедури шумоподавлення, засновані на вейвлет-перетворенні [8; 9].

Постановка завдання. Співвідношення «вхід–вихід» для неперервної НДС з одним входом і одним виходом може бути представлено рядом Вольтерра (РВ):

$$\begin{aligned} y(t) &= w_0(t) + \int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \\ &+ \int_0^t\int_0^t w_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ &+ \int_0^t\int_0^t\int_0^t w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \ldots = \\ &= w_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t), \end{aligned} \tag{1}$$

де $x(t)$ і $y(t)$ – вхідний і вихідний сигнали системи відповідно; $w_n(\tau_1,...,\tau_n)$ – вагова функція або ядро Вольтерра *n*-го порядку (n=1,2,3,...), симетрична щодо дійсних змінних $\tau_1,\ldots,\tau_n$ функція; $y_n(t)$ – парціальний складник (ПС) відгуку системи (*n*-вимірний інтеграл згортки); $w_0(t)$ – вільний член РВ (за нульових початкових умов $w_0(t)\equiv 0$); t – поточний час.

На практиці РВ замінюють поліномом і зазвичай обмежуються кількома першими членами ряду. Побудова моделі НДС у вигляді РВ полягає у виборі виду тестових впливів $x(t)$ і розробці алгоритму, який дав би змогу за виміряними реакціями $y(t)$ виділяти ПС $y_n(t)$ і визначати на їх основі ЯВ $w_n(\tau_1,\ldots,\tau_n)$, n=1,2,... для моделювання системи у часовій області.

Ідентифікація, за своєю суттю, належить до обернених задач, у розв'язанні яких виникають труднощі обчислювального плану, зумовлені некоректністю постановки задачі. Одержувані розв'язки виявляються нестійкими до похибок вхідних даних – вимірювань відгуків НДС, що ідентифікується. У разі використання МВ необхідно також розв'язати задачу поділу відгуку $y(t)$ досліджуваної НДС на ПС $y_n(t)$, що відповідають окремим членам РВ, оскільки вимірюється сумарний відгук $y(t)$ на тестовий сигнал $x(t)$.

Метод ідентифікації НДС на основі апроксимаційної МВ. Пропонується метод побудови апроксимаційної МВ НДС. Метод ідентифікації НДС ґрунтується на апроксимації відгуку НДС $y(t)$ на довільний детермінований сигнал $x(t)$ у вигляді інтегростепеневого полінома N-го порядку (N – порядок апроксимаційної моделі):

$$\hat{y}_N(t) = \sum_{n=1}^{N}\hat{y}_n(t) = \sum_{n=1}^{N}\int_0^t\ldots\int_0^t w_n(\tau_1,...,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)d\tau_i. \tag{2}$$

Нехай на вхід НДС по черзі подаються тестові сигнали $a_1x(t)$, $a_2x(t)$, ,..., $a_Lx(t)$, *де* $a_1, a_2,...,a_L$ – різні дійсні числа, що задовольняють умові $0<|\alpha_j|\le 1$ для $\forall j$=1,2,...,L, тоді

$$\begin{aligned} &\hat{y}_N[a_jx(t)] = \sum_{n=1}^{N}\hat{y}_n[a_jx(t)] = \\ &\sum_{n=1}^{N}a_j^n\int_0^t\ldots\int_0^t w_n(\tau_1,...,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)d\tau_i = \sum_{n=1}^{N}\hat{y}_n(t)a_j^n. \end{aligned} \tag{3}$$

ПС в апроксимаційній моделі визначаються за допомогою методу найменших квадратів (МНК), який дає змогу отримати такі їх оцінки, за яких сума квадратів відхилень відгуків НДС, що ідентифікується, від відгуків моделі мінімальна, тобто забезпечує мінімум середньоквадратичного критерію:

$$\begin{aligned} J_N &= \sum_{j=1}^{L}\left(y[a_jx(t)] - \hat{y}_N[a_jx(t)]\right)^2 = \\ &= \sum_{j=1}^{L}\left(y_j(t) - \sum_{n=1}^{N}a_j^n\hat{y}_n(t)\right)^2 \to \min, \end{aligned} \tag{4}$$

де $y_j(t) = y[a_jx(t)]$. Мінімізація критерію (4) зводиться до розв'язання системи нормальних рівнянь Гаусса, яку у векторно-матричній формі можна записати у вигляді:

$$A'A\hat{y} = A'y, \tag{5}$$

де A' – транспонована матриця;

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^N \\ a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^N \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_L & a_L^2 & \cdots & a_L^N \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \cdots \\ y_L(t) \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \\ \cdots \\ \hat{y}_N(t) \end{bmatrix}.$$

З рівняння (5) отримуємо

$$\hat{y} = (A'A)^{-1}A'y. \tag{6}$$

Застосування тестових поліімпульсних сигналів. Якщо тестовий сигнал *x(t)* являє собою одиничний імпульс (функцію Дірака) з вагою s, то розв'язком СЛАР (6) є ЯВ першого порядку $\hat{w}_1(t)$ і діагональні перетини ЯВ *n*-го порядку. Оскільки при $x(t)=s\delta(t)$

$$\begin{aligned} \hat{y}_n(t) &= \int_0^t\ldots\int_0^t \hat{w}_n(\tau_1,...,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}s\delta(t-\tau_i)d\tau_i = \\ &= s^n\hat{w}_n(t,...,t), \end{aligned} \tag{7}$$

то

$$\hat{w}_n(t,...,t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{s^n}. \tag{8}$$

Пропонується метод визначення піддіагональних перетинів ЯВ *n*-го порядку ($2\le n\le N$) НДС, формалізм якого ґрунтується на такому твердженні.

Твердження. Нехай тестові впливи являють собою суму n імпульсних сигналів зі зсувом за часом t на $\tau_1,...,\tau_n$, тоді оцінка піддіагонального перетину ЯВ *n*-го порядку:

$$\hat{w}_n(t-\tau_1,...,t-\tau_n) = \frac{1}{n!\,s^n}\sum_{\xi_{\tau_1},...,\xi_{\tau_n}=0}^{1}(-1)^{n+\sum_{i=1}^{n}\xi_{\tau_i}}\hat{y}(t,\xi_{\tau_1},...,\xi_{\tau_n}), \tag{9}$$

де $\hat{y}(t,\xi_{\tau_1},...,\xi_{\tau_n})$ – оцінка *n*-ої ПС відгуку НДС у момент часу *t*, яку отримано в результаті обробки даних експериментів на основі (6) за дії на вході системи поліімпульсного сигналу з вагою s, причому якщо $\xi_{\tau_i}=1$, то тестовий вплив містить імпульсний сигнал зі зсувом на τ_i, в іншому випадку при $\xi_{\tau_i}=0$ – не містить [4].

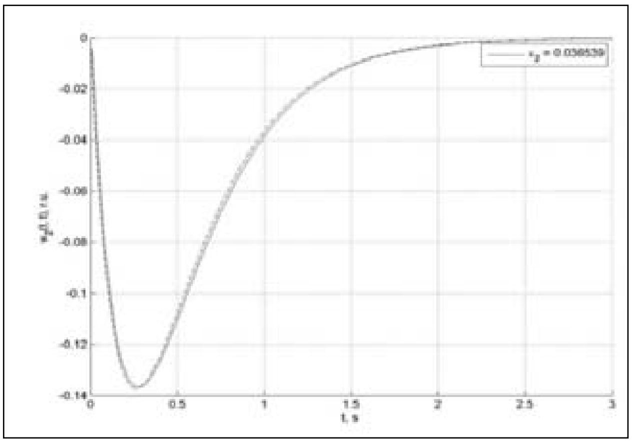


Рис. 1. Оцінка діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС у точних вимірах і еталонна функція (пунктиром)

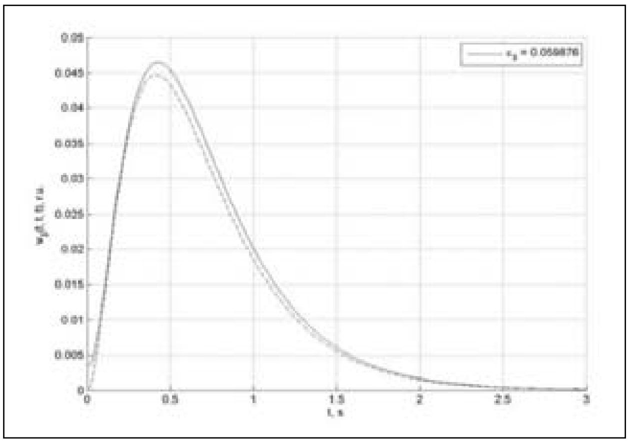
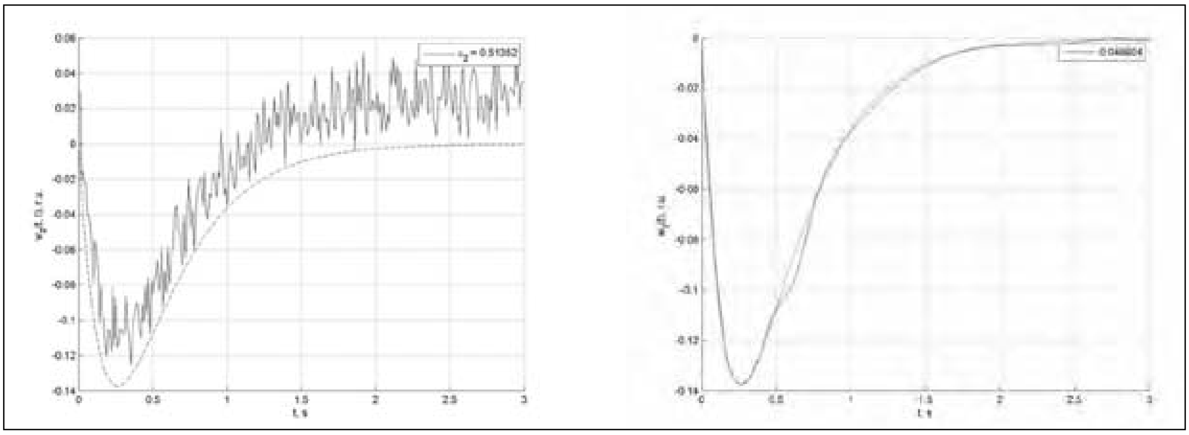
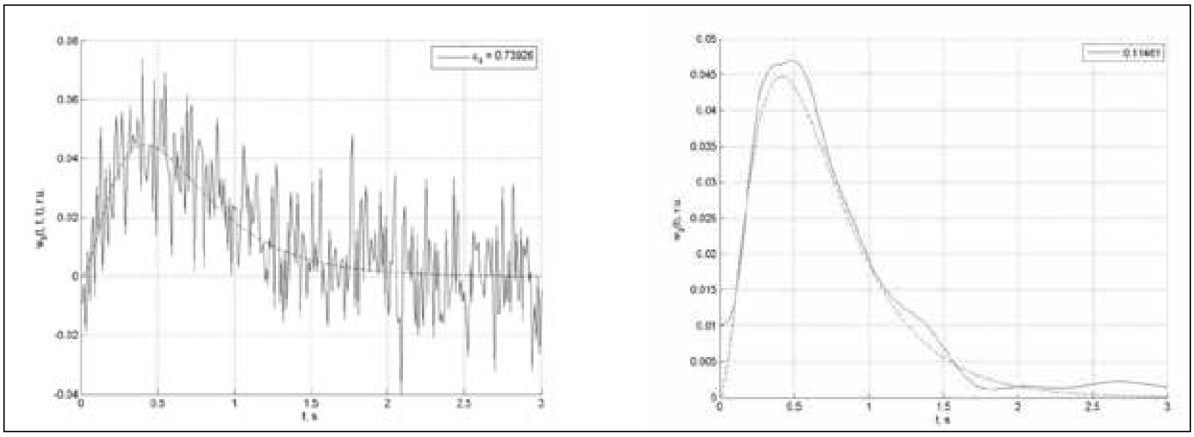


Рис. 2. Оцінка діагонального перетину ЯВ 3-го порядку тестової НДС у точних вимірах і еталонна функція (пунктиром)



а б

Рис. 3. Оцінки діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС за похибок вимірювань 5% і еталонна функція (пунктиром): а) без регуляризації; б) після регуляризації і вейвлет-фільтрації



а б

Рис. 4. Оцінки діагонального перетину ЯВ 3-го порядку тестової НДС за похибок вимірювань 1% і еталонна функція (пунктиром): а) без регуляризації; б) після регуляризації і вейвлет-фільтрації

Таким чином, обчислювальний алгоритм, що реалізує метод ідентифікації багатовимірних ЯВ на основі співвідношення (9), зводиться до розв'язання СЛАР (6) для кожного фіксованого моменту часу t на інтервалі $[0, T]$, де T – час моделювання.

Регуляризація процедури ідентифікації на основі МНК. Система нормальних рівнянь Гаусса (6) дає хороші результати апроксимації функцій, якщо число вимірювань L досить велике (багато більше, ніж ступінь апроксимуючого полінома N) або помилки вимірювань малі. В іншому разі визначник системи виявляється близьким до нуля і система стає погано обумовленою. При цьому можливі великі похибки в оцінці параметрів апроксимуючого полінома.

Для отримання стійкого до похибок вимірювань розв'язку СЛАР (6) використовується метод регуляризації А.М. Тихонова [10], заснований на варіаційному способі побудови регуляризуючого оператора. Цей метод зводиться до визначення наближеного вектора розв'язку, що мінімізує деякий згладжувальний функціонал. Єдиний вектор, що задовольняє умові мінімуму згладжувального функціоналу, визначається на підставі розв'язку СЛАР:

$$(\mathrm{A}'\mathrm{A}+\alpha \mathrm{I})\hat{\mathrm{y}}_{\alpha}=\mathrm{A}'\,\mathrm{y}\,, \qquad (10)$$

де I – одинична матриця; α – параметр регуляризації Тихонова.

Наближений розв'язок, який одержано на основі (10), відповідає нульовому порядку регуляризації [10]. Для підвищення гладкості розв'язку використовується регуляризаційна матриця R і знаходиться розв'язок СЛАР:

$$(\mathrm{A}'\mathrm{A}+\alpha \mathrm{R})\,\hat{\mathrm{y}}_{\alpha}=\mathrm{A}'\,\mathrm{y} \qquad (11)$$

у вибраному значенні параметра α. Регуляризаційна матриця R має стрічкову структуру, діагональні елементи якої дорівнюють: $r_{pp}=1-(\Delta a)^{-2}$, а елементи над- і піддіагоналей дорівнюють: $r_{pq}=-(\Delta a)^{-2},\ p\neq q;\ p,q=\overline{1,L}$; $\Delta a=a_L\,/\,L.$

У реалізації цього алгоритму параметр регуляризації α вибирають досить малим (з аналізу наявної інформації про похибки вхідних даних і похибки обчислень). У роботі відповідне значення параметра регуляризації α визначається шляхом підбору, тобто багаторазовими обчисленнями $\hat{\mathrm{y}}_{\alpha}$ для різних значень α. Квазіоптимальне значення $\alpha=\alpha_0$ вибирається з умови:

$$\|\,\hat{\mathrm{y}}_{\alpha_{i+1}}-\hat{\mathrm{y}}_{\alpha_i}\,\|\to\min\,, \qquad (12)$$

де $\alpha_{i+1}=\mu\alpha_i,\ \ 0<\mu<1,\ \ i=0,1,2,\ldots$ Необхідно відзначити, що різні способи визначення параметра регуляризації можуть дати різні результати, як наслідок, відрізняються один від одного регуляризовані розв'язки.

Аналіз точності та обчислювальної стійкості методу ідентифікації. За допомогою засобів комп'ютерного моделювання виконано дослідження точності та обчислювальної стійкості методу ідентифікації. Числові експерименти проводилися за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab-Simulink. Критерієм якості ідентифікації (адекватності моделі) є нормована середньоквадратична похибка (НСКП) оцінки ЯВ за різних рівнів похибок вимірювань відгуків НДС:

Таблиця 1

НСКП оцінки ядер Вольтерра *n*-го порядку за поліімпульсних сигналів для різної похибки (σ) вимірювань відгуків тестового об'єкта і різних параметрів алгоритму ідентифікації з регуляризацією 0-го порядку (R_0) і за використання вейвлет-фільтрації (W)

Параметри алгоритму			Похибки вимірювань, σ %						
Δa	L	n	0	1	3	5			
			R_0	R_0	W	R_0	W	R_0	W
4	50	1	0,0083	0,0084	0,0084	0,0092	0,0089	0,0099	0,0085
		2	0,1141	0,1078	0,1078	0,0982	0,0979	0,0924	0,0927
		3	0,2226	0,2231	0,2222	0,2299	0,2226	0,2401	0,2226
10	20	1	0,0082	0,0084	0,0082	0,0099	0,008	0,0131	0,0096
		2	0,1212	0,1208	0,1207	0,1225	0,1219	0,1239	0,1223
		3	0,2364	0,2389	0,2365	0,2625	0,2393	0,3158	0,2665
20	10	1	0,0082	0,0097	0,0086	0,0181	0,0105	0,0277	0,0163
		2	0,1317	0,1322	0,1318	0,1335	0,1303	0,1456	0,13
		3	0,2522	0,2623	0,2452	0,3514	0,2393	0,525	0,3042
10	10	1	0,0089	0,0103	0,0091	0,0188	0,0125	0,0281	0,0141
		2	0,0365	0,0422	0,036	0,0786	0,0405	0,1236	0,0466
		3	0,0599	0,3887	0,1146	1,1185	0,3721	1,7448	0,5068

$$\varepsilon_n = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{m}(w_{nl} - \hat{w}_{nl})^2}{\sum_{l=1}^{m} w_{nl}^2}}, \qquad (13)$$

де m – кількість відліків на інтервалі часу спостереження; w_{nl}, $\hat{w}_{nl}$ – еталонні значення й оцінки ЯВ n-го порядку, отримані в результаті обробки експериментальних даних (відгуків системи) у дискретні моменти часу t_l відповідно.

Для підвищення обчислювальної стійкості методу ідентифікації застосовуються процедури шумозаглушення (згладжування) до одержуваних оцінок ЯВ, що базуються на вейвлет-перетворенні [9].

Шумозаглушення досягається видаленням високочастотних складників зі спектра сигналу, що являє собою адитивну суміш інформаційного складника – ЯВ, яку одержано в результаті обробки відгуків і шуму, зумовленого похибкою вимірювальної апаратури. Стосовно вейвлетного розкладання це реалізується безпосередньо видаленням деталізуючих коефіцієнтів високочастотних рівнів. Задаючи певний поріг для їх рівня, зрізуючи по ньому деталізуючі коефіцієнти, зменшується рівень шумів.

Для згладжування результатів ідентифікації використовується утиліта wden з пакета розширення Wavelet Toolbox системи Matlab з материнським вейвлетом coiflet – coif4 за таких значень параметрів: параметр встановлення правила обчислення порогового значення для обмеження коефіцієнтів розкладання TPTR='minimaxi' (мінімаксного оцінювання); параметр установки типу порогу очищення SORH='s' (гнучкий); параметр, який визначає спосіб перерахунку порогу SCAL='one' (використання порога, єдиного для всіх рівнів розкладання, без перемасштабування); глибина розкладання даних – 3.

У дослідженнях модель одержуваної зашумленої оцінки діагонального перетину ЯВ приймається адитивною $w_n(t,\ldots,t) + \zeta(t)$: з рівномірним кроком по аргументу t, де $w_n(t,\ldots,t)$ – корисний інформаційний складник, ζ(t) – перешкода (білий гауссівський шум з дисперсією σ^2 і нульовим середнім значенням).

У табл. 1 наведено значення НСКП ідентифікації тестової НДС у вигляді апроксимаційної МВ третього порядку з використанням тестових імпульсів різної полярності за різних рівнів похибок вимірювань (1%, 3%, 5%) та застосування регуляризації 0-го порядку (10).

Результати ідентифікації тестової НДС з використанням імпульсних сигналів (Δa=10, L=10) і застосуванням регуляризованого МНК у точних вимірах відгуків – оцінки ЯВ $\hat{w}_2(t,t), \hat{w}_3(t,t,t)$ представлено на рис. 1 і рис. 2 відповідно. На рис. 3 і рис. 4 наведено оцінки діагональних перетинів ЯВ другого і третього порядків тестової НДС без регуляризації (а) та після регуляризації і вейвлет-фільтрації (згладжування) (б) за похибок вимірювань відгуків 5 і 1% відповідно.

За похибок вимірювань σ=5% (Δa=10, L=10) у результаті ідентифікації виникають похибки в оцінках ЯВ – похибка оцінки збільшується порівняно з результатом ідентифікації у точних вимірах більш ніж у 6, 14 і 11 разів для n=1, 2 і 3 відповідно. Точність оцінювання ЯВ за рахунок застосування регуляризації 0-го порядку підвищується в 2–4 рази. Застосування вейвлет-перетворення до оцінок ЯВ, які отримано за допомогою регуляризованого алгоритму ідентифікації, підвищує точність ідентифікації в 2–3,4 раза. Похибки ідентифікації за рахунок послідовного застосування процедури регуляризації та вейвлет-перетворення зменшуються в 4–7,4 раза.

Висновки. Отримав розвиток метод побудови апроксимаційної МВ НДС у часовій області з використанням поліімпульсних тестових сигналів. На результати ідентифікації апроксимаційної МВ істотно впливають похибки вимірювань. Для тестової НДС засобами імітаційного моделювання в середовищі Matlab-Simulink виконані дослідження точності і завадостійкості одержуваних оцінок ЯВ першого, другого і третього порядків. Прийнятні на практиці точність і обчислювальна стійкість досягаються застосуванням методу регуляризації некоректних задач за А.М. Тихоновим. Застосування регуляризації дає змогу в 2–4 рази підвищити точність і обчислювальну стійкість процедури ідентифікації. Для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів побудови апроксимаційної МВ застосовуються процедури шумозаглушення до отримуваних оцінок багатовимірних ЯВ, що засновані на вейвлет-перетворенні. Це підвищує точність у 2–3,4 раза і забезпечує гладкість результатів ідентифікації.

Список літератури:

1. Doyle F.J, Pearson R.K., Ogunnaike D.A. Identification and Control Using Volterra Models. Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. 314 p.

2. Giannakis G.B., Serpedin E.A. A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering. Signal Processing. 2001. Vol. 81. Issue 3. P. 533–580. DOI: 10.1016/s0165-1684(00)00231-0

3. Павленко В.Д. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов. Электронное моделирование. 2010. Т. 32. № 3. С. 3–18.

4. Павленко В.Д., Павленко С.В. Методы детерминированной идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра. Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2830–2841.

5. Данилов Л.В., Соловьева Е.Б. Макромоделирование существенно нелинейных электрических цепей на основе функциональных полиномов. Известия вузов. Радиоэлектроника. 1990. № 6. С. 3–7.

6. Золотницкий В.М., Соловьева Е.Б. К решению задачи идентификации модели в виде полинома Вольтерра. Известия ЛЭТИ. Л.: ЛЭТИ, 1990. Вып. 424. С. 15–19.

7. Леви П. Конкретные проблемы функционального анализа. / Пер. с франц. под ред. Г.Е. Шилова. М.: Наука, 1967. 511 с.

8. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.

9. Павленко С.В. Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. № 6/4 (48). С. 65–70.

10. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: 1990. 230 с.

11. Pavlenko, V.D. Computing of the Volterra Kernels of a Nonlinear System Using Impulse Response Data / V.D. Pavlenko, M.M. Massri, V.M. Ilyin. Proc. of 9th International Middle Eastern Simulation Multiconference MESM'2008, August 26–28, 2008, Philadelphia University, Amman, Jordan. P. 131–138.

ПОСТРОЕНИЕ АППРОКСИМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ВИДЕ ПОЛИНОМА ВОЛЬТЕРРА

Предлагается метод построения аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной динамической системы во временной области с использованием полиимпульсных тестовых сигналов разных амплитуд. Метод основан на применении регуляризованного метода наименьших квадратов и выборе оптимальной величины шага по амплитуде тестовых сигналов, что обеспечивает повышение точности и вычислительной устойчивости процедуры идентификации.

Ключевые слова: *нелинейные динамические системы, полиномы Вольтерра, ядра Вольтерра, идентификация, регуляризация.*

CONSTRUCTION OF THE MODEL OF APPROXIMATION NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM IN THE FORM VOLTERRA POLYNOMIAL

A method is proposed for constructing the Volterra approximating model of a nonlinear dynamical system in the time domain using polyimpulse test signals of different amplitudes. The method is based on the application of the regularized least squares method and the choice of the optimal step size for the amplitude of the test signals, which increases the accuracy and computational stability of the identification procedure.

Key words: *nonlinear dynamical systems, Volterra polynomials, Volterra kernels, identification, regularization.*