УДК 681.5.017: 622.24

ІДЕНТИФІКАЦІЯ І МОДЕЛЮВАННЯ РОЗІМКНЕНИХ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

В.Б. Кропивницька

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (0342) 504521,
e-mail: public@nung.edu.ua

Проведено огляд існуючих методологічних підходів до ідентифікації і моделювання розімкнених нелінійних динамічних систем. Визначено принципові відмінності моделювання нелінійних динамічних систем з непередбачуваною поведінкою – emergent systems, прикладом яких є системи автоматизованого управління процесом буріння. Виявлено особливості ідентифікації систем контролю параметрів процесу буріння. Здійснено інтерпретацію методологічних підходів з позицій їх можливого використання для автоматизованого управління бурінням свердловин. Запропоновано модель класу Гаммерштейна для інформаційних систем у бурінні.

Ключові слова: моделювання, ідентифікація, автоматизоване управління, процес буріння,нелінійна динамічна система.

Проведен обзор существующих методологических подходов к идентификации и моделированию разомкнутых нелинейных динамических систем. Определены принципиальные различия в моделировании нелинейных динамических систем с непредсказуемым поведением – emergent systems, примером которых является системы автоматизированного управления процессом бурения. Выявлены особенности идентификации систем контроля параметров бурения. Осуществлена интепрпретация методологических подходов с позиций их возможного использования для автоматизированного управления бурением скважин. Предложена модель класса Гаммерштейна для информационных систем в бурении.

Ключевые слова: моделирование, идентификация, автоматизированное управление, процесс бурения, нелинейная динамическая система.

The article dwells upon the existing methodological approaches to the identification and modeling of open nonlinear dynamic systems. The principal differences between modeling of nonlinear dynamical systems with unpredictable behavior – emergent systems are identified, the example of which is the system of automated control of the drilling process. The features associated with the identification of control systems for the parameters of the drilling process are specified. The interpretation of methodological approaches from the perspective of their possible use for automated drill management is carried out. A model of the Hammerstein class for information systems in drilling is proposed.

Keywords: modeling, identification, automated control, drilling process, nonlinear dynamical system.

Постановка проблеми. Інформаційні системи є невід'ємною складовою систем підтримки процесів прийняття рішень, що використовуються для управління бурінням нафтових і газових свердловин. Вони за своєю природою є нелінійними динамічними системами, які можуть бути представлені у вигляді послідовного з'єднання нелінійних безінерційних ланок і лінійних динамічних ланок. При цьому заданими можуть бути моделі нелінійних динамічних систем у вигляді ряду Вольтерра, моделей Н.Вінера, Гаммерштейна, Н.Вінера-Гаммерштейна, Гаммерштейна-Н.Вінера та ін. Відповідно існують різні залежності вихідних сигналів нелінійної стаціонарної системи від вхідних.

Чим більша очевидна фізична інтерпретація і зручність у використанні моделі, тим простіше оцінювати і контролювати технологічний процес, бо це не вимагає використання складних узагальнюючих підходів. У контексті сучасних досліджень інформаційних систем у бурінні, які функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності об'єкта керування, привертає увагу непередбачувана поведінка системи, яка формується із поєднання поведінок окремих її елементів. Це додатково ускладнює управління процесом буріння свердловини та дає підставу звернутися до аналізу певних моделей нелінійних динамічних систем, які сьогодні розглядаються, та переосмислити їх із позицій підвищення інформатизації процесів прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема ідентифікації і моделювання розімкнених нелінійних динамічних систем досить глибоко досліджена у західній науковій літературі. Насамперед вивчаються методи ідентифікації систем Гаммерштейна [1, 6, 8, 11, 14, 22], алгоритми їх ідентифікації [2, 3, 21], ідентифікація рядами Вольтерра нелінійних багатовимірних систем [4], метод ідентифікації Вінера-Гаммерштейна [5], ідентифікація динамічних систем за дискретними спостереженнями [7, 9, 10, 13]. Натомість питання ідентифікації і моделювання розімкнених нелінійних динамічних систем, що застосовуються у буріння, досі залишаються без належного аналізу.

Метою статті є оцінка існуючих методів ідентифікації і моделювання розімкнених нелінійних динамічних систем та визначення методологічних засад ідентифікації та моделювання показників процесу буріння свердловин.

Основні результати дослідження. Системі автоматизованого управління процесом буріння властиві нелінійні перетворення вхідних впливів: осьового навантаження на долото, частоти обертання долота, моменту на валі занурного двигуна, активної потужності приводних двигунів та ін. Лінеаризація нелінійностей дозволяє отримати задовільні результати лише у вузькому діапазоні зміни вхідних сигналів, а лінійна модель часто не відображає суттєвих властивостей досліджуваного об'єкта, наприклад нелінійностей механічних характеристик турбобурів, електробурів. Від індивідуальних властивостей нелінійних систем залежить вибір методу їх моделювання й ідентифікації [9, 12, 17, 20].

Розглянемо метод побудови моделі «вхід – вихід» нелінійної динамічної системи, яка представлена у вигляді послідовного з'єднання її нелінійних безінерційних і лінійних динамічних ланок. Вважатимемо, що спостережуваний вихідний сигнал $y(t)$, є адитивною сумішшю корисного сигналу $u(t)$, який повністю визначається вхідним сигналом $x(t)$, і завади $Z(t)$, яка відображає вплив неконтрольованих збурювальних впливів і не залежить від вхідного впливу $x(t)$ (рис. 1).

Рисунок 1 – Структурна схема досліджуваної одновимірної нелінійної динамічної системи SI-SO

Математичну модель такої нелінійної динамічної системи можна побудувати у вигляді:

• кінцевого відрізку функціонального ряду Вольтерра [4, 16, 17];

• моделі Н.Вінера [4, 8];

• моделі Гаммерштейна [1, 2, 3, 8, 10];

• моделі Н.Вінера-Гаммерштейна [5, 25, 26];

• моделі Гаммерштейна-Н.Вінера [7, 9];

• диференціального еволюційного алгоритму [8];

• АРМАХ-моделі і багатовимірної МА-моделі [28];

• генетичних алгоритмів [14];

• за допомогою soft computing [19];

• штучних нейронних мереж [20].

Якщо модель побудувати у вигляді кінцевого відрізку функціонального ряду Вольтерра, то вихідний сигнал $u(t)$ детермінованої частини системи буде представлений у вигляді [9]

$$u(t) = w_0 + \sum_{i=1}^{n} T_i[x(t)], \tag{1}$$

де w_0 – складова вихідного сигналу, що не обумовлена вхідним впливом,

$T_i[x(t)]$ – оператор Вольтерра i-го порядку

$$T_i[x(t)] = \int_0^{\infty}...\int_0^{\infty}\{w_i(\tau_1, \tau_2, ..., \tau_i)\, x(t-\tau_1)$$
$$(\tau-\tau_2)...x(t-\tau_i)\, d x\tau_1, d x\tau_2, ... d\tau\}, \tag{2}$$

$w_i(\tau_1, \tau_2, ..., \tau_i)$ – ядро Вольтерра, тобто імпульсна перехідна функція i-го порядку, що для систем, які можуть бути фізично реалізованими, задовільняє умові:

$$w_i(\tau_1, \tau_2, ..., \tau_i) = 0 \quad \forall \tau_i < 0 \ (j = \overline{1, i}). \tag{3}$$

Слід відзначити, що степеневий характер рядів Вольтерра веде до певних труднощів, оскільки виникає проблема збіжності ряду, яка аналогічна до використання рядів Тейлора [9]. Наприклад, нелінійні системи, які містять елементи з насиченням, не можна описати рядом Вольтерра, що сходиться при усіх значеннях вхідного впливу. Водночас рядом Вольтерра можна описати поведінку нелінійних систем з аналітичними нелінійностями.

Якщо використовуються дискретні моделі, то вихідну послідовність u_l можна представити у такому вигляді:

$$u_l = \tilde{w}_0 + \sum_{i=1}^{n} \tilde{T}_i(x_l), \tag{4}$$

де

$$\tilde{T}_i(x_l) = \sum_{t_1=0}^{-\infty}...\sum_{t_1=0}^{-\infty} w_1[t_1, t_2, ... t_l] x_{l-t_1}, x_{l-t_2} ..., x_{l-t_i},$$

x_i – послідовність вхідних сигналів нелінійної системи.

У прикладних задачах зазвичай використовують перші три члени ряду Вольтерра [16, 17]. Отже, побудова моделі нелінійної системи у вигляді кінцевого відрізку ряду Вольтерра передбачає визначення потрібної кількості членів ряду (1) або (3) і оцінювання ядер Вольтерра відповідних порядків. При цьому слід враховувати, що ефективні алгоритми ідентифікації безпосередньо ядер Вольтерра отримуються лише при гаусівському білому шумі або псевдовипадкових сигналах на вході системи. Тому часто ядра Вольтерра спочатку параметризують шляхом розкладання в ряди за лінійно незалежними функціями [9]. Такий підхід дозволяє суттєво знизити розмірність задачі ідентифікації.

Проте, при практичному застосуванні моделей нелінійних систем у вигляді ряду Вольтерра виникають дві основні труднощі, пов'язані з визначенням ядер Вольтерра досліджуваної системи й із збіжністю ряду. Ці проблеми вдалося усунути Н.Вінеру шляхом використання як моделі нелінійної системи ортогонального ряду [5, 26]:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{n} G_i[k_l, x(t)], \tag{5}$$

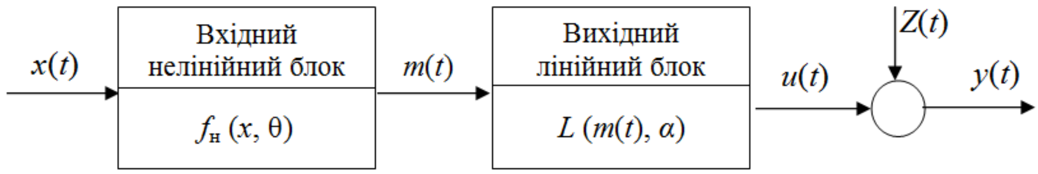
де G_i – G-функціонали Вінера, які отримують ортогоналізацією функціоналів Вінера (2) у класі вхідних впливів у вигляді гаусівського білого шуму;

$k_i(\tau_1, \tau_2, .., \tau_i)$ – ядро Н.Вінера i-го порядку.

Ядра такого типу Н.Вінер розкладав за ортогональними функціями Лагерра [9].

Наприклад, якщо представити ядра Вінера в симетричній формі, то перші три G-функціонали матимуть такий вигляд:

Нафтогазова енергетика
2017. № 2(28)
ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online



Θ, α – коефіцієнти передачі нелінійного і лінійного блоків, $m(t) = f_н(x(t), \Theta)$, $u(t) = L(m(t),\alpha)$

Рисунок 2 – Структура нелінійної системи Гаммерштейна типу SI- SO

$$G_0[k_0, x(t)] = K_0,$$

$$G_1[k_1, x(t)] = \int_0^\infty k_1(\tau_1)x(t-\tau_1)d\tau_1,$$

$$G_2[k_2, x(t)] = \int_0^\infty\int_0^\infty k_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 -$$

$$-\lambda\int_0^\infty k\ (\tau_1,\tau_2)d\tau_1\ ,$$

де λ – інтенсивність білого шуму.

Отже, рядом Вінера можна описати більш широкий клас нелінійних систем, ніж рядом Вольтерра при вхідних сигналах, які можна перетворити в гаусівський білий шум. Це викликано тим, що збіжність ортогонального ряду Вінера є збіжністю у середньому. Якщо ядра Вінера $k_i(\tau_1, \tau_2,.., \tau_i)$ оцінені, то ядра Вольтерра в моделі (1) можна знайти додаванням ядер Вольтерра одного порядку в кожному *G*-функціонали Вінера. Дискретні моделі Н.Вінера будуються аналогічно моделям (3), (4).

Слід відзначити, що нелінійні системи часто моделюють [7,20,31] у вигляді різних комбінацій лінійних динамічних ланок і нелінійних безінерційних ланок. Прикладами таких моделей є моделі Гаммерштейна, Вінера-Гаммерштейна, Гаммерштейна-Вінера.

Розглянемо модель Гаммерштейна. У моделі Гаммерштейна нелінійний елемент розташований перед лінійною динамічною частиною (рис. 2).

Система описується рівнянням «вхід – вихід»:

$$y(t) = L(m(t),\alpha)\cdot f_н(x,\theta) + Z(t).$$

Тут $f_н(x,\theta)$ – нелінійна характеристика перетворювача;

$L(m(t),\alpha)$ – лінійна частина системи (інваріантна щодо змін часу);

$Z(t)$ – адитивна завада;

α – коефіцієнт передачі лінійної частини системи, $\alpha \neq 0$.

У даному випадку взаємозв'язок між вхідним $x(t)$ і вихідним $y(t)$ сигналами стаціонарної системи описується оператором Гаммерштейна [9]

$$y(t) = \int_0^\infty w(\tau)f\left[x(t-\tau)\right]d\tau,\ \text{c} \qquad (6)$$

де $w(\tau)$ – імпульсна перехідна функція;

$f(x)$ – нелінійна функція.

Для дискретної системи

$$y_l = \sum_{t=0}^{\infty} w[t]\,f\left(x_{l-t}\right), \qquad (7)$$

де $w[t]$ – імпульсна перехідна функція дискретної системи.

Якщо нелінійну функцію $f(x)$ представити у вигляді кінцевого відрізку степеневого ряду

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n_\theta}\theta_i\,x^i, \qquad (8)$$

де θ_i – числові коефіцієнти,

то рівняння (6) можна привести до такого вигляду [9]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n_\theta}\int_0^\infty w_i(\tau)x_i(t-\tau)d\tau. \qquad (9)$$

Отже, якщо характеристику нелінійного елемента представити у вигляді нелінійної функції (8), тоді модель Гаммерштейна еквівалентна моделі лінійної динамічної системи типу MISO, тобто з n_θ вхідними сигналами $x_i(t) = x^i(t), i = \overline{1, n_\theta}$ із одним вихідним сигналом $y(t)$. При цьому імпульсна перехідна функція *i*-го каналу $w_i(\tau) = \theta w(\tau)$. Слід відзначити, що увага багатьох дослідників [1÷3, 23÷28] до методів моделювання й ідентифікації розімкнених нелінійних динамічних систем, які ґрунтуються на використанні моделей Гаммерштейна різних структур і параметрів, пояснюється очевидною фізичною інтерпретацією і зручністю у практичному використанні.

Модель Вінера. У моделі нелінійної динамічної системи Н.Вінера лінійна динамічна ланка розміщена перед нелінійним безінерційним елементом (рис. 3).

У цьому випадку залежність вихідного сигналу $y(t)$ нелінійної стаціонарної системи від вхідного сигналу $x(t)$ представляють у такому вигляді:

$$y(t) = f[V(t)] + Z(t),$$

$$V(t) = \int_0^\infty w(\tau)x(t-\tau)d\tau. \qquad (10)$$

Слід відзначити, що модель Н.Вінера є сильно нелінійною відносно поведінки параметрів, внаслідок чого з'являються певні труднощі у побудові алгоритмів ідентифікації [9, 26].

Модель Гаммерштейна-Вінера (рис. 4).

У даному випадку вихідний сигнал $y_к = n(w)\cdot\lambda_i\cdot m(x) + Z_к$.

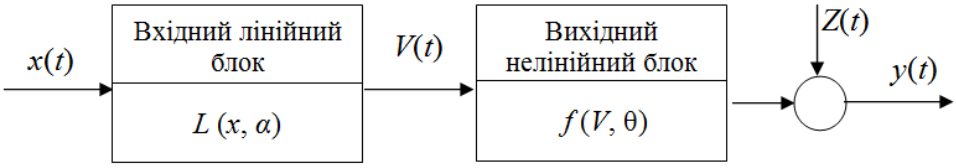


Рисунок 3 – Структура нелінійної системи Н.Вінера

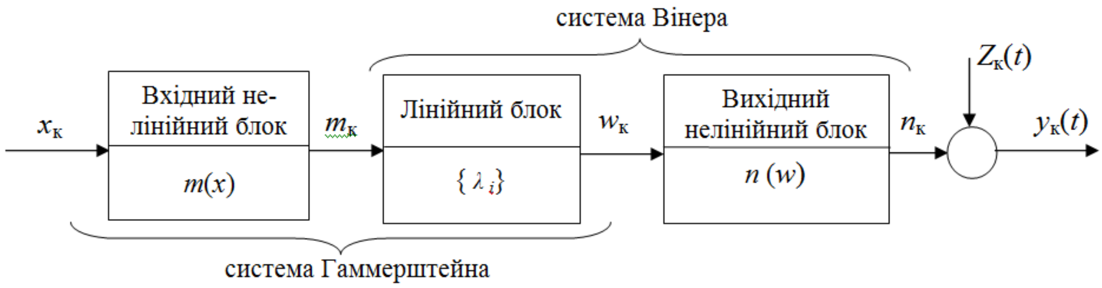


Рисунок 4 – Основна структура моделі Гаммерштейна-Вінера

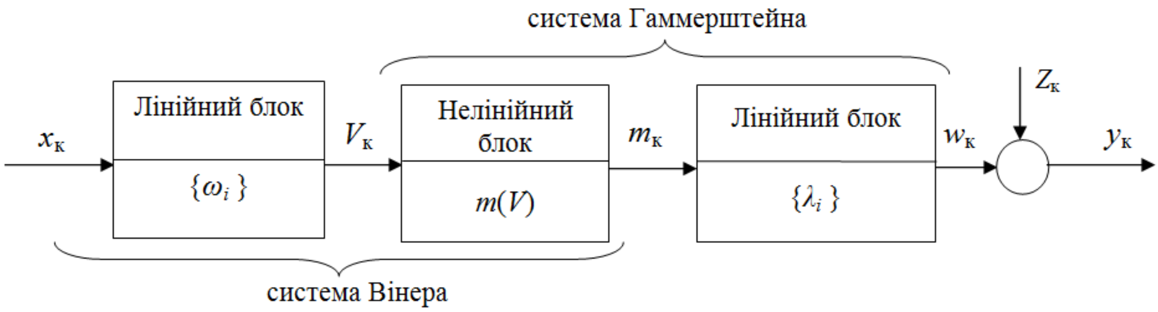


Рисунок 5 – Система Вінера ($\{\omega_i\}$, $m(V)$) і Гаммерштейна ($m(V)$,$\{\lambda_i\}$), що з'єднані в каскад (sandwich system)

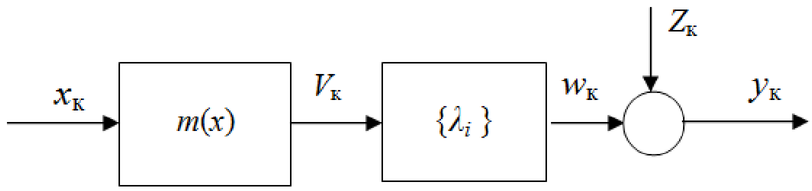


Рисунок 6 – Система Гаммерштейна: $m(x)$ – перетворювач з нелінійною характеристикою $m(x)$, k = 1,2

<u>Модель Вінера-Гаммерштейна.</u> Модель Вінера-Гаммерштейна отримується шляхом послідовного з'єднання трьох ланок – двох лінійних динамічних і однієї нелінійної безінерційної ланки, що розташована між двома лінійними (рис. 5) [5, 25, 26].

У даному випадку вихідний сигнал $y_к = \lambda_i[m(V),\{\omega_i\}] + Z_к$.

Особливістю ідентифікації процесу буріння є те, що досліджувана система є хаотичною з непередбачуваною поведінкою. Контрольовані об'єкти – турбобур, електробур, бурові насоси, приводи роторного механізму і механізму подачі долота мають нелінійні характеристики. Метою ідентифікації є побудова нелінійної динамічної моделі, яка дозволяє за відомим вхідним сигналом визначити сигнал на виході вимірювального каналу після завершення процесу перетворення. З цієї точки зору, для розв'язання такої задачі ідентифікації доцільно використовувати модель Гаммерштейна (рис. 6).

Система описують рівнянням «вхід–вихід»:

$$y_к = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda_i m(x_{k-1}) + Z_к, \tag{11}$$

де $V_к = m(x_к)$,

$Z_к$ – адитивна завада,

$w_к = \{\lambda_i\} V_к$,

$\{\lambda_i\}$ – коефіцієнт передачі лінійної частини системи, $\lambda \neq 0$, i = 0, 1, 2,…, $\lambda_0 \neq 0$.

Модель Гаммерштейна дозволяє оцінити характер і величину вхідного сигналу. Алгоритми обчислення оцінок параметрів за даними спостережень має два різні аспекти: перший передбачає необхідність охарактеризувати шукану оцінку або як розв'язок рівняння, або як аргумент, що мінімізує деяку функцію; другий аспект пов'язаний з необхідністю формування чисельного методу, що обчислює цю оцінку.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

Висновки

На основі інтерпретації методологічних підходів щодо ідентифікації і моделювання одновимірних розімкнених нелінійних динамічних систем з позицій їх можливого використання для вирішення задач автоматизованого управління бурінням свердловин запропоновано модель класу Гаммерштейна. Вона дозволяє за умов апріорної та поточної невизначеності об'єкта керування і емерджентності самої системи оцінювати характер і величину вхідних сигналів, а також суттєво знизити витрати на розробку програмного забезпечення для вирішення проблем надзвичайно високого ступеня складності.

Література

1 Stoica P. Instrumental-variable methods for identification of Hammerstein systems / P.Stoica, T.Soderstrom // Intern I.Control. – 1982. – Vol. 35, No 3. – P. 459-476.

2 Stoica P. On the convergence of on iterative algorithm used for Hammerstein systems identification / P.Stoica // IEEE trans. Automat. Control. 1981. – Vol. 26, No 4. – P. 967-969.

3 Anbumani K. Self-tuning minimum-variance control of nonliner systems of the Hammerstein model / K. Anbumani, L.Patnaik, I.Sarma // IEEE trans. Automat. Control. – 1981. – Vol. 26, No 4. – P. 959-961.

4 Wakamatsu H. Successive identification of Volterra type nonlinear multy-input-output system and its application to parameter estimation / H. Wakamatsu // Preprints of 6th IFAC Symposium an identification and systems Parameter Estimation. Arlington, Virginia. – 1982. – Vol. 1. – P. 57-62.

5 Lammers H.C. An identification methods for a combined Wiener-Hammerstein filter describing the encoding part of the cochlear system. / H.C. Lammers, H.B.Verbruggen, E. de Boer // Preprints of 5th IFAC Symposium an identification and systems Parameter Estimation. Darmstadt. – 1979. – Vol. 1. – P.484-491.

6 Keviczky L. A self-tuning extremal controller for the generalized Hammerstein model / L. Keviczky, I. Vajk, J. Hetthessy // Preprints of 5th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Darmstadt. – 1979. – Vol. 2. – P. 1147-1151.

7 Billings S.A. Identification at Systems compased of linear dynamic and static nonlinear elements / S.A. Billings, S.Y. Fakhouri // Automatica. – 1982. – Vol. 18. – P. 15-26.

8 Chang F.N. A noniterative method for identification using Hammerstein model / F.N. Chang, R. Luus // IEEC trans. Automat. Control. 1971. – Vol. 16. – P. 464-468.

9 Каминская В.А. Идентификация динамических систем по дискретным наблюдениям / В.А. Каминская – Вильнюс; Монслас, 1985 – 153 с.

10 Haber R. The identification of the discrete-time Hammerstein model / R. Haber, L. Keviczky // Periodica Polytechnica. Electrical Engineering. – 1974. – No 1, Vol. 18. – P. 71-84.

11 Haist D.N. Nonlinear identification in the presence of correlated noise using a Hammerstein model / D.N. Haist, F.N. Chang, R. Luus // IEEC trans. Automat. Control. – 1973. – Vol. 18. – P. 552-555.

12 Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с анг., под ред. Л.З.Цыпкина. – М.: Недра, ред. Физ-мат. Лит., 1991. – 432 с.

13 Каминскас В.А. Оценивание параметров дисктертных систем класса Гаммертштейна / В.А.Каминскас // Автоматика и телемеханика. – 1975. – № 7. – 153-169.

14 Каминскас В.А. Идентификация нелинейных дискретных систем класса Гаммерштейна / В.А.Каминскас, Я.Ю.Яницкенс // Труды АНЛИТ ССР. – 1989. – Т. 2(135). – С. 65-76.

15 Wahlborg B. Desingn vqriables for bias distribution in transfer function estimation / B. Wahlborg, L. Ljung // IEEE Trans Automation Control. – 1986. – Vol. AC-31. – P. 164-144.

16 Solbrand G. Resursive methods for aff-line identification / G. Solbrand, A.Ahlen, L. Ljung // Int. I. Control. – 1985. – Vol. 41. – P. 177-191.

17 Huber H. Structure identification of nonlinear dynamic system survey on input/autput approaches / H.Huber, H Unbehauen // Automatic. – 1990. – Vol. 26. – P. 651-677.

18 McCade S. On the use of nonlinear autoreqressiwe moving everage models for simulation and system identification / S. McCade, p.Davies, D.Seidel // American Control Conferens. – 1991. – P. 2559-2562.

19 Pottman M. Application of general multi-model approach for identification of highly nonlinear processes a case study / M. Pottman, H. Unbehauen, D.Seborg // Int. I. Control. – 1993. – Vol.37. – P. 97-120.

20. Barker H.A. Nonlinear system identification by pseudorandom testing / H.A. Barker // Preprints of 6th IFAC Symposium an identification and systems Parameter Estimation. Arlington, Virginia, – 1982. – Vol. 1. – P. 75-79.

21 Gallmon P.G. A comparison of two Hammerstein model identification algorithms / P.G.Gallmon // IEEE Trans Automat Control. – 1976. – Vol. 21, No 1. – P. 124-126.

22 Narendra K.S. An iterative method for the identificate of nonlinear systems using a Hammerstein model / K.S.Narendra, .G.Gallmon // IEEE Trans Automat Control. – 1966. – Vol. 11, No 1. – P. 546-550.

23 Ding F. Chen T2007 Auxiliary model-based least-squares identification methods for Flammerstein output-error systems // Syst. Control Lett. – 2007. – No 6(5). – P. 373-38.

24 Gotmare A Nonlinear system identification using a cuckoo search optimized adaptive Hammerstein model / A.Gotmare, R.Patidar, N. V.George // Expert Syst. Appl. – 2015. – No 42(5) – P. 2538-2546.

25 Hafsi S, Laabidi Kiand Lahmari M. K. Identification of Wiener-Hammerstein model with multi segment piecewise-linear characteristic / S.Hafsi, Laabidi Kiand Lahmari M. K. // In: 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Tunisia, 2012. – P. 5-10.

26 Khani F. Robust model predictive control of nonlinear processes represented by Wiener or Hammerstein models F.Khani, M.Haeri // Chem. Eng. Sci. 129, 2015. – P.223-231.

27 Mao Y. Multi-innovation stochastic gradient identification for Hammerstein controlled autoregressive autoregressive systems based on the filtering technique / Y.Mao, F Ding // Nonlinear Dyn. 79(3), 2015. – P.1745-1755.

28. Ding F., Chen T. Iddentification of Hammerstein nonlinear ARMAX systems / F.Ding, T.Chen // Automatical. – 2005. – P. 1479-1489.

Стаття надійшла до редакційної колегії 19.10.17

Рекомендована до друку
професором ***Семенцовим Г.Н.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук ***Лопатіним В.В.***
(Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро)