

5. Al-Wattar, A. Efficient On-line Hardware/Software Task Scheduling for Dynamic Run-time Reconfigurable Systems [Text] / A. Al-Wattar, S. Areibi, F. Saffih // Proceeding in 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW), 21-25 May 2012. – IEEE, 2012. – P. 401–406. doi:10.1109/ipdpsw.2012.50
6. Liu, S. Achieving Energy Efficiency through Runtime Partial Reconfiguration on Reconfigurable Systems [Text] / S. Liu, R. N. Pittman, A. Forin, J.-L. Gaudiot // ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS). – 2013. – Vol. 12, № 3. – P. 1–21. doi:10.1145/2442116.2442122
7. Liu, S. Minimizing the runtime partial reconfiguration overheads in reconfigurable systems [Text] / S. Liu, R. N. Pittman, A. Forin, J.-L. Gaudiot // The Journal of Supercomputing. – 2012. – Vol. 61, № 3. – P. 894–911. doi:10.1007/s11227-011-0657-6
8. Кулаков, Ю. О. Організація багаторівневої пам'яті в реконфігурованих обчислювальних системах [Текст]: зб. наук. пр. / Ю. О. Кулаков, І. А. Клименко // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – К.: Век+, 2014. – № 61. – С. 18–26.
9. Ahmed, W. Adaptive Resource Management for Simultaneous Multitasking in Mixed-Grained Reconfigurable Multi-core Processors [Text] / W. Ahmed, M. Shafique, L. Bauer, J. Henkel // Proceedings of the 9th International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), Taiwan, Taipei, 9-14 October 2011. – IEEE, 2011. – P. 365–374. doi:10.1145/2039370.2039426
10. Кулаков, Ю. О. Метод оптимізації ярусно-паралельної форми подання задачі для реконфігурованих обчислювальних систем [Текст] / Ю. О. Кулаков, І. А. Клименко // Електроніка та зв'язок. – К: НТТУ «КПІ», 2014. – Том 19, № 4 (81). – С. 90–96.

В статті розглянуто питання моделювання динаміки процесу дроблення руди з використанням апарату ортонормованих функцій Лагерра. Виконано порівняльний аналіз якості наближення виходу моделі до характеристик досліджуваного об'єкту. В результаті визначено структуру і масштабний коефіцієнт моделі Лагерра, а також інтервал дискретизації, які забезпечують мінімальну середньоквадратичну похибку ідентифікації

Ключові слова: процес дроблення, модель Лагерра, ідентифікація, інтервал дискретизації, моделювання

В статье рассмотрен вопрос моделирования динамики процесса дробления руды с использованием аппарата ортонормированных функций Лагерра. Выполнен сравнительный анализ качества приближения выхода модели с характеристиками изучаемого объекта. В результате определена структура и масштабный коэффициент модели Лагерра, а также интервал дискретизации, которые позволяют обеспечить минимальную среднеквадратичную ошибку идентификации

Ключевые слова: процесс дробления, модель Лагерра, идентификация, интервал дискретизации, моделирование

УДК 65.011.56:681.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47318

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ РУДИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ ЛАГЕРРА

О. Ю. Михайленко

Асистент

Кафедра електропостачання
та енергетичного менеджменту

ДВНЗ «Криворізький

національний університет»

вул. XXII Партз'їзду, 11,

м. Кривий Ріг, Україна, 50027

E-mail: epem.mykhailenko@gmail.com

1. Вступ

Для рішення задачі підвищення якісних показників процесу дроблення руди у конусних дробарках шляхом автоматизованого керування ним, необхідно отримати математичний опис залежностей між вхідними параметрами і вихідної величиною, що характеризує протікання цього процесу.

Використання існуючих аналітичних і експериментальних моделей процесу дроблення для рішення задач автоматизації обмежено. Так, матричні моделі [1] дозволяють дослідити загальні закономірності форму-

вання гранулометричного складу готового продукту при різних значеннях вхідних параметрів (розподілу за класами крупності живлення і ширини розвантажувальної щілини). Проте, даний клас моделей не враховує вплив неконтрольованих збурень, а також вони описують процес дроблення лише у статичних режимах. Наявність складних функціональних залежностей, здебільшого нелінійних, ускладнює налаштування моделей стосовно реального процесу.

Регресійні та стохастичні моделі [2] мають більшу точність, у порівнянні з аналітичними, проте вони також мають недоліки, які полягають в їх неінтерпре-

тованості і жорсткій прив'язці до параметрів та умов роботи конкретної конусної дробарки. Це ускладнює застосування отриманих з їх допомогою результатів до інших агрегатів дробильного комплексу.

Отже, зважаючи на недоліки аналітичних, регресійних і стохастичних моделей необхідно розглянути інші підходи до розробки моделей процесу дроблення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для побудови якісного регулятора має бути відомий математичний опис процесу. В теорії ідентифікації систем запропонована достатня кількість уніфікованих структур [3, 4] для моделювання і прогнозування поведінки динамічних об'єктів. Вибір виду моделі залежить від поставленої практичної задачі. При цьому враховується узгодженість параметрів, кількість параметрів необхідних для опису динаміки процесу з прийнятною точністю і обчислювальна потужність параметричної ідентифікації моделі.

Для апроксимації динаміки об'єктів застосовують дві основні форми структур: моделі у просторі станів і моделі входу-виходу. Останні широко представлені наступними поліноміальними моделями [3, 4]: авторегресійна (AR), з ковзним середнім (MA), авторегресійна з ковзним середнім (ARMA), авторегресійна з зовнішніми входами (ARX), авторегресійна з ковзним середнім з зовнішніми входами (ARMAX), Бокса-Дженкінса (BJ), «вихід-похибка» (OE) та рекурсивний фільтр (FIR).

На даний момент в задачах керування технологічними процесами широко застосовуються ARX, ARMAX і FIR моделі через можливість оцінки параметрів методом найменших квадратів. Проте, вони мають ряд недоліків. Так, для точної апроксимації динаміки об'єкту керування з використанням FIR моделі необхідно визначити значну кількість параметрів. ARX і ARMAX моделі характеризуються неузгодженістю параметрів. Це пояснюється тим, що передавальні функції за входом і збуренням мають однаковий знаменник $1/A(z)$ [3]. В результаті моделі цих впливів корелюють. Моделі Бокса-Дженкінса і «виходу-похибки» позбавлені вказаного недоліку внаслідок незалежності передавальних функцій входу та збурення. Тим не менш, їх параметрична ідентифікація здійснюється методами нелінійної оптимізації, що викликає значне підвищення обчислювального навантаження.

Іншим підходом до побудови моделей лінійних об'єктів є використання систем ортонормованих базисних функцій (ОБФ). Моделі на їх основі мають властивість лінійності за параметрами, що дозволяє визначати коефіцієнти методом найменших квадратів [5]. При цьому для моделювання динаміки з високою точністю необхідно здійснити оцінку меншої кількості параметрів, у порівнянні з поліноміальними моделями. В роботі [6] вказано, що ОБФ моделі демонструють високу якість прогнозування поведінки об'єктів з невизначеними запізненнями, що особливо актуально для технологічних процесів гірничо-збагачувального виробництва.

В якості ортонормованих базисних фільтрів можуть бути використані системи функцій Лагерра [7], Коотца [8], Уолша, Хаара [9]. Особливо необхідно відзначити

систему функцій Лагерра [7, 10–12]. Головна її перевага полягає у тому, що ортогональний базис повністю визначається вибором масштабного коефіцієнту ψ , який представляє собою дійсний полюс, справедливий для усього набору функцій Лагерра з кратністю p . При зміні розміщення полюса відбувається збільшення або зменшення експоненціального коефіцієнту затухання ортонормованих функцій, що дозволяє регулювати швидкість спаду імпульсної перехідної характеристики [10]. Ця властивість забезпечує високу якість апроксимації динамічних характеристик довільної природи.

Швидкість збіжності розкладу по функціям Лагерра залежить від найбільшої відстані між розташуванням масштабного коефіцієнту і окремих полюсів системи, що моделюється [11]. Таким чином, можна досягнути високої швидкості збіжності перетворення шляхом вибору значення масштабного коефіцієнту, що знаходиться у безпосередній близькості до домінуючих полюсів об'єкту. Такий підхід особливо ефективний за умови розміщення всіх полюсів системи у межах невеликої області.

Враховуючи зазначені переваги, доцільно провести дослідження про доцільність застосування ОБФ моделей при моделюванні поведінки процесу дроблення у сталому і перехідних режимах.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи полягає у визначенні структури і масштабного коефіцієнту моделі Лагерра, а також інтервалу дискретизації, котрі при використанні методу найменших квадратів для оцінки параметрів моделі дозволяють забезпечити мінімальну середньоквадратичну похибку апроксимації динамічних характеристик процесу дроблення.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- визначити максимальний інтервал дискретизації, котрий дозволить реконструювати перехідний процес за дискретною вибіркою;
- визначити інтервал дискретизації, структуру моделі Лагерра і її масштабний коефіцієнт, котрі забезпечують мінімальне значення середньоквадратичної похибки моделювання динаміки процесу дроблення;
- виконати аналіз швидкодії процесу параметричної ідентифікації моделі Лагерра.

4. Обладнання та методи дослідження впливу інтервалу дискретизації та параметрів моделі Лагерра на якість моделювання динаміки процесу дроблення

4.1. Джерело тестових вибірок і обладнання, що використовувалося при проведенні обчислювальних експериментів

При проведенні обчислювальних експериментів в якості об'єкту використано аналітичну модель процесу дроблення [13] за каналом «швидкість обертання конусу – однорідність дробленого продукту». На вхід моделі подавалася тестова стохастична послідовність $U = [u[k] \ u[k+1] \ \dots \ u[k+N]]^T$, де N – обсяг вибірки, що розподілена за рівномірним законом на інтервалі $\{u[k+i] \in \mathbb{R} \mid 0 < u[k+i] < 1\}$, де k – номер відліку у вибірці.

Обчислення здійснювалися в програмному пакеті MATLAB на ПК з наступною конфігурацією: Intel Core i3-3120M 2,5 GHz 4 Гб ОЗУ Win7 x64.

4. 2. Методика визначення показників якості ідентифікації

Для оцінки точності апроксимації характеристик процесу дроблення використано середньоквадратичну похибку виду (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y[k+i] - \hat{y}_i[k+i])^2, \tag{1}$$

де $y[k+i]$ – складова вектору вихідних значень об'єкту Y ; $\hat{y}[k+i]$ – складова вектору вихідних значень моделі процесу $\hat{Y} = [\hat{y}[k] \ \hat{y}[k+1] \ \dots \ \hat{y}[k+N]]^T$.

Оцінка часу ідентифікації моделі Лагерра здійснювалася стандартними засобами програмного пакету MATLAB.

5. Результати досліджень впливу інтервалу дискретизації та параметрів моделі Лагерра на якість моделювання динаміки процесу дроблення

Через можливе застосування цифрових пристроїв керування взаємозв'язок між входом і виходом процесу дроблення доцільно представити у наступному дискретному вигляді:

$$y(z) = \left(\sum_{i=1}^p c_i L_i(z) \right) u(z), \tag{2}$$

де $\sum_{i=1}^p c_i L_i(z)$ – оператор Лагерра; $L_i(z)$ – i -та функція

Лагерра; p – кількість функцій Лагерра, що складають ортонормовану систему (далі за текстом порядок моделі).

Дискретний оператор Лагерра можна представити у просторі станів [12]:

$$\begin{aligned} L[k+1] &= \Phi L[k] + \Gamma u[k], \\ y[k] &= C^T L[k], \end{aligned} \tag{3}$$

де $L[k] = [l_1[k] \ l_2[k] \ \dots \ l_p[k]]^T$ – вектор стану, що складається з функцій Лагерра, Φ – нижня трикутна матриця розміру $(p \times p)$; Γ – вектор-стовпчик розміру $(p \times 1)$:

$$\begin{aligned} \Phi &= \begin{bmatrix} \psi & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vartheta & \psi & 0 & \ddots & 0 \\ -\psi\vartheta & \vartheta & \psi & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & 0 \\ (-\psi)^{p-2}\vartheta & (-\psi)^{p-3}\vartheta & \dots & \vartheta & \psi \end{bmatrix}, \\ \Gamma &= \sqrt{\vartheta} \begin{bmatrix} 1 \\ -\psi \\ \psi^2 \\ \vdots \\ (-\psi)^{p-1} \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{4}$$

де $\vartheta = (1 - \psi^2)$.

$$C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_p]^T. \tag{5}$$

Параметр ψ визначає швидкість згасання коливань ОБФ Лагерра, що дозволяє регулювати час перехідного процесу моделі. У роботі [12] встановлено, що для забезпечення стійкості системи ОБФ значення ψ повинно знаходитися у межах $\{\psi \in \mathbb{R} \mid 0 < \psi < 1\}$.

Власне, модель (3)–(5) є цифровим фільтром, структура якого складається з послідовного з'єднання фільтру Лагерра першого порядку з фазовими фільтрами (рис. 1).

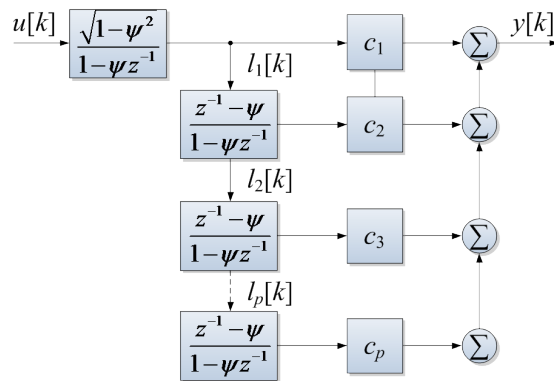


Рис. 1. Структурна схема мережі фільтрів Лагерра

Згідно математичного опису системи Лагерра у просторі станів (3)–(5), задача ідентифікації моделі полягає у визначенні її порядку p з наступною оцінкою складових вектору параметрів C (5) і сталої часу згасання ОБФ ψ .

Враховуючи лінійність за параметрами моделі Лагерра, ідентифікація системи за вектором C здійснюється методом найменших квадратів (OLS):

$$C = (\Lambda^T \Lambda)^{-1} \Lambda^T Y, \tag{6}$$

де Λ – матриця ортонормованих функцій Лагерра

$$\Lambda = [L[k] \ L[k+1] \ \dots \ L[k+N]];$$

Y – вектор вихідних значень об'єкту

$$Y = [y[k] \ y[k+1] \ \dots \ y[k+N]]^T.$$

Для адекватного опису динамічних характеристик технологічного об'єкту необхідно визначити максимальний інтервал дискретизації, котрий дозволить реконструювати перехідний процес за дискретною вибіркою. З цією метою побудовано амплітудний спектр вихідного сигналу (рис. 2).

Було встановлено, що спектр сигналу обмежено максимальною частотою $384,5 \cdot 10^{-3}$ Гц, тоді згідно теорему відновлення Котельникова-Шеннона [14] інтервал дискретизації повинен становити:

$$f \geq 2f_{\max} \Rightarrow f \geq 0,769 \text{ Гц} \Rightarrow \Delta t \leq 1,3 \text{ с.}$$

Розглянемо вплив інтервалу дискретизації і порядку моделі Лагерра на якість апроксимації динаміки

процесу дроблення. При експериментальному дослідженні процесу ідентифікації системи ОБФ Лагерра відбувався прямий перебір інтервалу дискретизації у діапазоні $\{\Delta t \in \mathbb{R} | 0,1 \leq \Delta t \leq 1,3\}$ с з кроком 0,2 с, а також структур моделі шляхом зміни кількості функцій Лагерра у межах $\{p \in \mathbb{N} | 1 \leq p \leq 7\}$. Масштабний коефіцієнт ψ змінювався у діапазоні $\{\psi \in \mathbb{R} | 0,5 < \psi < 0,99\}$ з кроком 0,01.

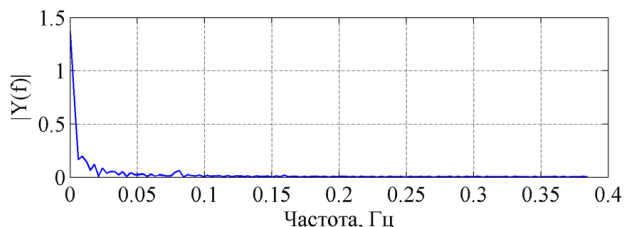


Рис. 2. Модуль спектральної щільності вихідного сигналу об'єкту

Згідно отриманих даних у табл. 1 зведені параметри моделей Лагерра, котрі продемонстрували найкращу точність для кожного розглянутого інтервалу дискретизації. У всіх чотирьох випадках мінімальну похибку забезпечують системи ОБФ 7 порядку, тому при подальших дослідженнях використовується модель такої структури. При зменшенні Δt підвищується точність отриманої у процесі ідентифікації моделі на 96,7 %, проте збільшується час оцінки параметрів на 90,1 %.

Таблиця 1

Похибка і швидкість процесу ідентифікації моделі Лагерра для різних інтервалів дискретизації

$\Delta t, c$	p	ψ	MSE	t, c
1,3	7	0,66	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$7,03 \cdot 10^{-4}$
0,9	7	0,76	$6,19 \cdot 10^{-7}$	$9,22 \cdot 10^{-4}$
0,5	7	0,87	$1,88 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$
0,1	7	0,97	$5,05 \cdot 10^{-8}$	$7,07 \cdot 10^{-3}$

Для подальших розрахунків доцільно використовувати інтервал дискретизації $\Delta t=0,1$ с через мінімальне значення середньоквадратичної похибки.

У табл. 2 наведені показники якості ідентифікації для різного порядку моделі Лагерра p і значення сталої часу ψ , яка відповідає найкращій точності апроксимації. Найгіршу точність, очікувано, має структура, що включає лише фільтр Лагерра першого порядку. Збільшення кількості функцій в ортонормованій системі призводить до підвищення якості моделювання виходу процесу дроблення. Відзначимо, що у діапазоні $\{p \in \mathbb{N} | 5 \leq p \leq 10\}$ значення середньоквадратичної похибки змінюється незначно, а максимальна точність досягається при незмінному значенні сталої часу $\psi=0,97$.

На рис. 3, а, б, наведений фрагмент перехідних характеристик аналітичної моделі процесу дроблення і лінійних систем Лагерра різного порядку з незмінною сталою часу $\psi=0,97$ на інтервалі $\{k \in \mathbb{N} | 300 \leq k \leq 400\}$ при подачі на вхід тестового випадкового сигналу (рис. 3, а) $\{u[k] \in \mathbb{R} | 0 \leq u[k] \leq 1\}$. Для наочності візуалізації на графік винесені динамічні характеристики структур, котрі складаються з непарної кількості ор-

тонормованих функцій. Моделі Лагерра з порядком нижче 5-го демонструють гіршу точність у порівнянні з рештою, що підтверджує дані табл. 2. Використання систем ОБФ з порядком у межах $\{p \in \mathbb{N} | 5 \leq p \leq 9\}$ суттєво не впливає на якість апроксимації. Проте, слід відзначити, що при збільшенні числа ортонормованих функцій у моделі Лагерра, відбувається подавлення височастотних коливань, котрі присутні у вихідному сигналі моделі процесу дроблення.

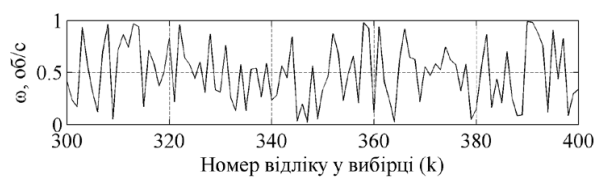


Рис. 3. Перехідні характеристики об'єкту і лінійних моделей Лагерра різної структури: а – швидкість обертання дроблячого конусу; б – однорідність дробленого продукту

Таблиця 2

Середньоквадратична похибка ідентифікації для різних структур моделі Лагерра

p	ψ	MSE	p	ψ	MSE
1	0,99	$4,06 \cdot 10^{-7}$	6	0,97	$5,16 \cdot 10^{-8}$
2	0,99	$1,78 \cdot 10^{-7}$	7	0,97	$5,05 \cdot 10^{-8}$
3	0,99	$1,53 \cdot 10^{-7}$	8	0,97	$3,11 \cdot 10^{-8}$
4	0,98	$8,96 \cdot 10^{-8}$	9	0,97	$2,97 \cdot 10^{-8}$
5	0,97	$5,27 \cdot 10^{-8}$	10	0,97	$2,35 \cdot 10^{-8}$

Додатково побудовано залежність між параметром ψ і середньоквадратичною похибкою для моделі Лагерра 7-го порядку при $\Delta t=0,1$ с (рис. 4).

Для її побудови було зменшено крок зміни ψ у діапазоні $\{\psi \in \mathbb{N} | 0,94 \leq \psi \leq 0,99\}$ до 0,001. Слід відзначити, що отримана залежність носить унімодальний характер, тому для знаходження значення $\hat{\psi} = \underset{\psi}{\operatorname{argmin}} \operatorname{MSE}(\psi)$, де $\hat{\psi}$ – значення сталої часу, котра забезпечує найкращу точність моделювання виходу об'єкту, можна використати оптимізаційні методи. Для моделі 7-го порядку екстремум знаходиться у точці з координатами $[0,972; 5,055 \cdot 10^{-8}]$.

Проаналізувавши експериментальні дані (табл. 2), можна зробити висновок, що оптимум дрейфує зі збільшенням порядку моделі і прямує до $\lim_{p \rightarrow \infty} \hat{\psi}(p) = 0,97$. У

зв'язку з тим, що точність в точках $[0,97; 5,05 \cdot 10^{-8}]$ при кроці 0,01 і $[0,972; 5,055 \cdot 10^{-8}]$ при кроці 0,001 відрізняються незначно, пошук мінімуму доцільно здійснювати з кроком 0,01 з метою збільшення швидкості збіжності.

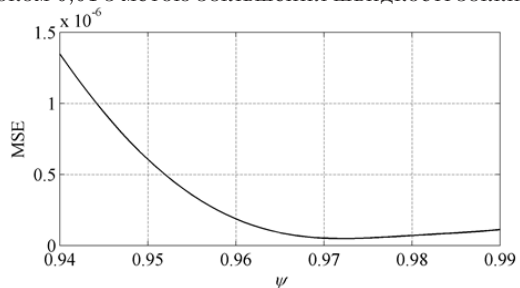


Рис. 4. Залежність похибки апроксимації від параметру ψ для моделі Лагерра 7-го порядку

Фрагмент перехідних характеристик моделі процесу дроблення і лінійних систем Лагерра 7-го порядку з різним значенням сталої часу на інтервалі $\{k \in \mathbb{N} | 300 \leq k \leq 400\}$, при подачі на вхід тестового випадкового сигналу, представлений на рис. 5, а, б.

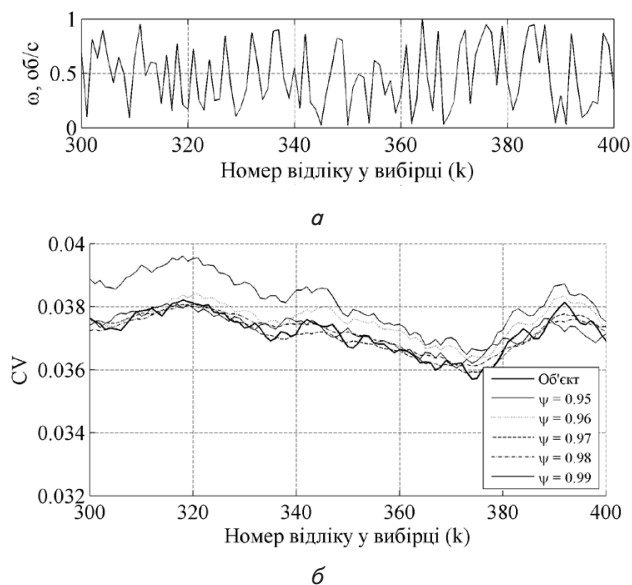


Рис. 5. Перехідні характеристики об'єкту і лінійних моделей Лагерра 7-го порядку з різними значеннями параметру ψ : а — швидкість обертання дроблячого конусу; б — однорідність дробленого продукту

З графіків видно, що гірша точність моделювання досягається при сталих часу $\psi=0,95$ і $\psi=0,96$, а у систем з масштабним коефіцієнтом у межах $\{\psi \in \mathbb{R} | 0,97 \leq \psi \leq 0,99\}$ якість апроксимації значно покращується.

Уся серія обчислювальних експериментів процесу ідентифікації моделі Лагерра на використаному обладнанні зайняла 7,33 с. Враховуючи, що джерелом тестової вибірки є аналітична модель, а не реальний процес, в умовах виробництва час збору і накопичення даних суттєво збільшить час вибору структури моделі та оцінки параметрів. Також необхідно брати до уваги, що при автоматизованому керуванні час додатково витрачається на формування керуючих дій, тому слід зменшити час ідентифікації.

Слід врахувати, що уся вибірка повинна зберігатися у пам'яті даних цифрового пристрою керування. Для усунення цього недоліку можна використати додаткові зовнішні карти пам'яті. Проте, для взаємодії з ними необхідно розробити додаткові програмні модулі, виконання котрих підвищить обчислювальне навантаження контролера. Також дрейф параметрів процесу дроблення може призвести до втрати актуальності моделі до моменту закінчення ідентифікації.

6. Висновки

Досліджена можливість апроксимації динаміки процесу дроблення лінійною моделлю на основі ОБФ Лагерра. Виконаний аналіз статичної і адаптивної параметричної ідентифікації моделі Лагерра, який дозволив встановити, що використання методу найменших квадратів для оцінки параметрів дозволяє отримати мінімальну середньоквадратичну похибку моделювання $5,05 \cdot 10^{-8}$ при використанні моделі Лагерра 7-го порядку з масштабним коефіцієнтом $\psi=0,97$ і інтервалом дискретизації 0,1 секунди. Сам процес ідентифікації при цьому займає 7,07 мілісекунд. Проте, з точки зору раціонального використання пам'яті даних цифрового пристрою керування і обчислювального навантаження можливість застосування статичної ідентифікації обмежена. Отже, подальші дослідження доцільно присвятити застосуванню адаптивних алгоритмів оцінки параметрів моделі, що діють у реальному часі. Їх використання вимагає збереження у пам'яті даних лише попередніх значень функцій Лагерра і вектору параметрів.

Література

- Atta, K. T. Control oriented modeling of flow and size distribution in cone crushers [Text] / K. T. Atta, A. Johansson, T. Gustafsson // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 56. – P. 81–90. doi:10.1016/j.mineng.2013.10.031
- Itavuo, P. Simulation and Advanced Control of Transient Behaviour in Gyrotory Cone Crushers [Text] / P. Itavuo, A. Jaatinen, M. Vilkkko // In Proceedings del 8° Seminario Internacional de Procesamiento de Minerales (Procemin 2011). - Santiago, Chile, 2011. – P. 1–8.
- Nelles, O. Nonlinear System Identification. From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models [Text] / O. Nelles. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 786 p. - ISBN 978-3-662-04323-3. doi:10.1007/978-3-662-04323-3
- Льюнг, Л. Идентификация систем: теория для пользователя [Текст]: пер. с англ. / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с. – ISBN 5-02-014511-4.

5. Heuberger, P. S. C. Modelling and Identification with Rational Orthogonal Basis Functions [Text] / P. S. C. Heuberger, P. M. J. Van Den Hof, B. Wahlberg. – New York: Springer, 2005. – 401 p. – ISBN 1-85233-956-X. doi:10.1007/1-84628-178-4
6. Tufa, L. D. Closed-loop identification of systems with uncertain time delays using ARX–OBF structure [Text] / L. D. Tufa, M. Ramasamy // Journal of Process Control. – 2011. – Vol. 21, № 8. – P. 1148–1154. doi:10.1016/j.jprocont.2011.06.021
7. Ландманн, И. Разработка и исследование алгоритмического и программного обеспечения для идентификации динамических объектов в АСУ ТП [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / И. Ландманн. – М., 1984. – 190 с.
8. Wahlberg, B. System identification using Kautz models [Text] / B. Wahlberg // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1994. – Vol. 39, № 6. – P. 1276–1282. doi:10.1109/9.293196
9. Залманзон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л. А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с. – ISBN 5-02-014094-5.
10. E Silva, T. O. Laguerre Filters – An Introduction [Text] / T. O. e Silva // Revista Do Detua. – 1995. - Vol. 1, № 3. – P. 237–248.
11. De Hoog, T. J. Rational Orthonormal Bases and Related Transforms in Linear System Modeling [Text]: PhD Thesis / T. J. de Hoog. – Minneapolis, 2001. – 211 p.
12. Wang, L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB [Text] / L. Wang. – London: Springer-Verlag, 2009. – 375 p. - ISBN 978-1-84882-330-3. doi:10.1007/978-1-84882-331-0
13. Михайленко, О. Ю. Удосконалення математичної моделі конусної дробарки з урахуванням розділення камери дроблення на зони [Текст]: зб. наук. пр. / О. Ю. Михайленко // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 35. – С. 163–170.
14. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

Запропоновано метод адаптивного пригнічення шуму у растровому образі креслення деталі, що враховує специфічні особливості сканованих зображень креслень, а також властиві їм типи та характер шуму. Запропонований метод передбачає аналіз зображення, на підставі якого обирається найбільш відповідний йому спосіб пригнічення шуму. Проведені експерименти підтвердили ефективність даного методу

Ключові слова: креслення, монохромний, бінарні, шум, контрастність, контур, метод, апертура, примітив, фільтр

Предложен метод адаптивного подавления шума в растровом образе чертежа детали, учитывающий специфические особенности сканированных изображений чертежей, а также присущие им типы и характер шума. Предложенный метод предполагает анализ изображения, на основании которого выбирается наиболее подходящий для него способ подавления шума. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность данного метода

Ключевые слова: чертёж, монохромный, бинарный, шум, контрастность, контур, метод, апертура, примитив, фильтр

УДК 004.93
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47415

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО АДАПТИВНОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА В РАСТРОВОМ ОБРАЗЕ ЧЕРТЕЖА ДЕТАЛИ

В. С. Молчанова

Старший преподаватель

Кафедра информатики

ГВУЗ «Приазовский государственный

технический университет»

пр. Ленина, 74, г. Мариуполь, Украина, 87500

E-mail: vp24@yandex.ru

1. Введение

По оценке International Data Corporation в Мире имеется более 5 млрд. чертежей, которые до сих пор хранятся не в электронной форме, а в бумажных архивах. Предметной областью данного исследования являются автоматизированные системы инженерного документооборота, преобразующие цифровые копии бумажных чертежей деталей в модели, пригодные для обработки в САПР. Такая трансформация растровых образов чертежей деталей предусматривает: бина-

ризацию, фильтрацию, скелетизацию и векторизацию чертежей деталей. При оцифровке и препроцессировании чертежей деталей в их растровых образах появляются паразитные артефакты (шум и искажения). С точки зрения проблемы шумоподавления наиболее значимыми особенностями растровых образов чертежей деталей являются: контурно-штриховой стиль со скачкообразно-меняющейся яркостью пикселей и наличие геометрических примитивов размером в несколько пикселей. При фильтрации шума это может привести к классификации примитивов как шума с их