

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337 DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.03

А. О. БОБУХ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",

А. М. ПЕРЕВЕРЗЄВА, асп., НТУ "ХПІ"

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ

В результаті досліджень розроблено алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який є економічним з точки зору необхідного для його реалізації числа операцій, сприяє значному підвищенню енергозбереження з поліпшенням якості управління за рахунок отримання адекватного математичного опису технологій при розробці та впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцированої соди аміачним способом. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: алгоритм; структурна ідентифікація; покрокова регресія; управління; комп'ютерно-інформаційна технологія; виробництво кальцированої соди.

Постановка проблеми. Процес визначення математичної моделі хімічних технологій включає як їх експериментальне дослідження, так і розробку алгоритмів, які передбачають визначення структури моделі (структурна ідентифікація), оцінку параметрів математичної моделі визначеної структури (параметрична ідентифікація) та оцінку адекватності цієї моделі реальної технології [1 – 9].

Значні труднощі отримання адекватного математичного опису технології виробництва кальцированої соди (ТВКС) завдають неконтрольовані зміни значень параметрів технологічних процесів, які викликані старінням обладнання, нестабільністю характеристик сировини тощо. При ідентифікації ТВКС лінійних параметрів математичних моделей описується широкий клас технологій: статичних, динамічних, лінійних та нелінійних за незалежними параметрами. Використовуються нелінійні математичні моделі не вище другого порядку [10].

Підвищення точності ідентифікації технології шляхом його опису нелінійними математичними моделями статички до другого порядку приведе до багато розмірної задачі параметричної ідентифікації, а з урахуванням інерційності технологій отримують ще більше розмірні задачі.

Для виходу із цієї складної ситуації треба розробити алгоритми, які б забезпечували зменшення розмірності математичної моделі шляхом виключення із її структури незалежних параметрів (парних добутоків параметрів тощо), які не забезпечують значного підвищення точності цієї моделі.

Аналіз літератури. При структурній ідентифікації визначають структуру і вид оператора технології, або іншими словами вид математичної моделі технології. Завданням структурної ідентифікації є уявлення реальної технології у вигляді математичної моделі, конкретний вибір якої залежить від типу технології [1 – 9].

До існуючих методів структурної ідентифікації відноситься цілий ряд алгоритмів, які дозволяють з моделей заданого класу вибрати оптимальну модель. Найбільш відомими є: метод усіх регресій, покрокова регресія (методи послідовного включення і виключення), метод Ефроїмсона, метод групового обліку аргументів [1 – 5]. У цих роботах подано докладний огляд існуючих методів структурної ідентифікації. Для зазначених методів важко дати вичерпний порівняльний аналіз, так як одні з них носять більш строгий характер (методи всіх регресій, Ефроїмсона), інші – в значній мірі евристичну організацію [6 – 9]. Все це, в свою чергу, ускладнює вибір конкретного методу структурної ідентифікації.

Мета статті – розробити алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який був би економічним з точки зору необхідної для його реалізації кількості операцій, сприяв підвищенню енергозбереження з покращанням якості управління за рахунок отримання адекватного математичного опису технологій при розробці та впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди аміачним способом.

Матеріали та результати аналізу. Введемо деякі допущення:

1) задаємо клас операторів $A_k \in A$, якими можливо описати співвідношення поміж вхідними (незалежними) та вихідними (залежними) параметрами ТВКС, для якої виконується ідентифікація, тобто вигляд математичної моделі визначається рівнянням:

$$y = A_k(x), \quad (1)$$

де y – вихід (залежний параметр) ТВКС; $x = (x_1, \dots, x_k)^T$, k – мірний вектор входів (незалежних) параметрів ТВКС; T – символ транспонування; A_k – оператор ТВКС, який треба визначити.

Практично в залежності від призначення математичної моделі (управління, прогнозування, оптимізації тощо) клас операторів задається евристично.

2) усі оператори A_k можливо апроксимувати на базі співвідношення:

$$A_k(x) = k^T \varphi(x), \quad (2)$$

де $k = (k_1, \dots, k_m)^T$ – m -мірний вектор; $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))^T$ – m -мірний вектор, елементами якого є деякі функціональні перетворення від вхідних (незалежних) параметрів.

Шляхом відповідного вибору елементів m -мірного вектору k , які дорівнюють нулю або деякій величині, яка не дорівнює нулю, можливо апроксимувати з достатнім ступенем точності будь-який з операторів $A_k \in A$ (для скорочення запису в подальшому $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))^T$ будемо позначати φ). Розглянуте допущення вводимо для лінійної параметризації завдання ідентифікації, воно є поширеним способом апроксимації;

3) існує оператор $A_k^{\text{опт}} \in A$, який краще других операторів $A_k \in A$ описує ТВКС, який ідентифікують, та складається із елементів $\varphi^{\text{опт}} \supset \varphi$;

4) виходячи із того, що оператори A_k апроксимуються лінійною комбінацією елементів вектора (множини) φ , якість апроксимації справжнього оператора краще за все оцінювати коефіцієнтом множинної кореляції $R_{y/\varphi}^{\text{онм}}$;

5) якість оцінки параметрів математичної моделі краще за все визначати за допомогою випуклого функціонала від різниці виходів цієї моделі та ТВКС.

За зазначених допущеннях формальна постановка завдання структурної ідентифікації визначається наступним чином: із заданого класу операторів A необхідно вибрати оператор $A_k^{\text{опт}} \in A$ та оцінити його параметри, які складаються із елементів $\varphi^{\text{опт}} \supset \varphi$, при цьому повинні виконуватися умови критерію:

$$R_{y/\varphi}^{\text{онм}} = \max R_{y/\varphi}; \quad \forall \varphi^j \subset \varphi; \quad j \leq r \leq m, \quad (3)$$

де j – кількість елементів в множині φ^j ; r – максимально допустиме значення j ; m – розмірність вектору φ ,

а потім визначити оцінку вектору k на основі оптимізації вибраного випуклого показника якості (різниця виходів цієї математичної моделі та ТВКС).

Наведена постановка завдання структурної ідентифікації стала

початковою для розробки алгоритму, який здатний реагувати як на параметричну, а також на структурну нестационарність математичних моделей ТВКС. Під структурною нестационарністю моделі будемо розуміти таку параметричну нестационарність, при якій деякі значимі параметри моделі можуть стати не значимими та/або навпаки.

Одним із таких алгоритмів може стати алгоритм структурної ідентифікації, який подібний алгоритму покрокової регресії [1 – 5], але реалізований шляхом рекурентного розрахунку коефіцієнтів часткової кореляції, що підвищує швидкість його розрахунку.

Для розробленого алгоритму прийняте співвідношення:

$$\frac{S_e^2}{S_y^2} = 1 - R_{y/\Phi^j} = \prod_{i=1}^r (1 - \rho_{y, \Phi_i, \Phi^{i-1}}), \quad \Phi_i \in \Phi \setminus \Phi^{i-1}, \quad (4)$$

де R_{y/Φ^j} – коефіцієнт множинної кореляції; S_e^2 – оцінка дисперсії залишкової помилки математичної моделі; S_y^2 – оцінка дисперсії виходу об'єкта; $\rho_{y, \Phi_i, \Phi^{i-1}}$ – коефіцієнти часткової кореляції;

$$\rho_{y, \Phi_i, \Phi^{i-1}} = \frac{\rho_{y, \Phi_i, \Phi^{i-1}} - \rho_{y, \Phi_{i-1}, \Phi^{i-2}} \cdot \rho_{y, \Phi_{i-1}, \Phi^{i-2}}}{[(1 - \rho_{y, \Phi_{i-1}, \Phi^{i-2}})(1 - \rho_{y, \Phi_{i-1}, \Phi^{i-2}})]^{1/2}}, \quad (5)$$

$i-1$ – число елементів множини Φ^{i-1} .

В формулах (4) та (5) припускається, що елементи множини Φ підпорядковані та включені в множину Φ^{i-1} послідовно 1, 2, ..., $i-1$ тим саме, обумовлено виконання умови $\Phi_i \in \Phi \setminus \Phi^{i-1}$.

На кожному кроці алгоритму (4) перевіряються умови зупинки вибору структури за рахунок зменшення кількості моделей, що розглядаються, тому:

– на першому кроці визначаються усі моделі з одним незалежним параметром. Із цих моделей вибирається та модель, у якій значення критерію (3) максимальне;

– на другому кроці до незалежного параметра в модель, яка вибрана на першому кроці, доповнюються один по одному усі незалежні параметри, що залишилися в множині Φ^m (те ж саме виконується до $(i-1)$ -го кроку);

– на i -му кроці до незалежних параметрів, які вибрані в моделі на $(i-1)$ -му кроці, доповнюються по одному усі незалежні параметри, які залишилися в множині Φ^{m-i+1} .

Після цього визначаються математичні моделі з i -ми незалежними параметрами, а із них вибирається математична модель, яка приведе до максимального значення критерію (3).

Процедура продовжується поки не буде виконаний критерій зупинки процесу вибору математичної моделі, але не більше r кроків, оскільки кількість незалежних параметрів в моделі повинно бути не більше r .

Кількість (k) математичних моделей за методом покрокової регресії, які треба переглянути, визначається [1 – 5] за рівнянням:

$$k = \sum_{i=1}^r (m-i+1) + 1. \quad (6)$$

Для зупинки вибору математичної моделі за методом покрокової регресії мають місце дві різновидності критерію цього вибору, перша з них зв'язана із статистикою:

$$E_j = \frac{R_{y/\Phi^j}^2 - R_{y/\Phi^{j-1}}^2}{t-j-1} \cdot \frac{1}{1 - R_{y/\Phi^{j-1}}^2}, \quad (7)$$

яка має розподілення Фішера [5] $F(1, t-j-1)$. Гіпотеза про значимість приросту коефіцієнта множинної кореляції (тобто гіпотеза про необхідність продовження вибору моделі) сприймається, якщо

$$E_j > F(1, t-j-1, \alpha), \quad (8)$$

де α – заданий рівень значимості.

Друга різновидність критерію вибору математичної моделі дозволяє припинити вибір моделі, якщо в множині $\Phi \setminus \Phi^i$ не залишилось елементів Φ_k , для яких коефіцієнт кореляції з елементами Φ^i менший заданого значення R_{\max} (який дорівнює 0,95 – 0,99).

Дослідження підтвердили [4, 5], що розроблений алгоритм структурної ідентифікації (разом з двома різновидностями критерію вибору моделі) є економічним з точки зору необхідної для його реалізації кількості операцій, оскільки не потребує для вибору структури побудови адекватних математичних моделей.

Розроблений алгоритм ідентифікації має підвищену швидкодію та точність ідентифікації, а також може бути застосований для широкого класу не тільки статичних, але також динамічних технологій.

Реалізація розробленого алгоритму може бути виконана на базі сучасних мікропроцесорних контролерів при розробці комп'ютерно-інформаційної ТВКС для підвищення енергозбереження цієї технології.

Висновок. В результаті досліджень розроблений алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який є економічним з точки зору необхідної для його реалізації кількості операцій, сприяє значному підвищенню енергозбереження з покращанням якості технологій за рахунок отримання адекватного математичного опису при впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди за аміачним способом.

Список літератури:

1. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач, В.Г. Шахов. – М.: Лань, 2016. – 292 с.
2. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Учебник / В.П. Тарасик. – М.: Инфра-М, Новое знание, 2016. – 592 с.
3. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин. – М.: Ленанд, 2015. – 416 с.
4. Емельянов С.В. Информационные технологии и вычислительные системы: вычислительные системы. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики / С.В. Емельянов. – М.: Ленанд, 2015. – 96 с.
5. Yiannis Boutalis System Identification and Adaptive Control / Boutalis Yiannis, Manolis A. Christodoulou, Теодор Kommac, Dimitrios Theodoridis // Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – 313 p.
6. Charlie C.L. Wang Recent technology in design and manufacturing automation / C.L. Wang Charlie // International Journal of Computer Integrated Manufacturing.– 2013.– 26 p.
7. Kandethody M. Ramachandran Mathematical Statistics with Applications // M. Ramachandran Kandethody, P. Tsokos Chris. – Elsevier, 2014. – 848 с.
8. Переверзева А.М. Розробка математичної моделі статистики технології насичення очищеного розсолу газами виробництва соди / А.М. Переверзева, А.О. Бобух // Вісник НТУ "ХПІ". – Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 42 (1214). – С. 68-73.
9. Бобух А.О. Синтез адаптивних методів керування технологічними об'єктами хімічної промисловості / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, А.М. Переверзева // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 35 (1207). – С. 31-36.
10. Малакей З.А. Некоторые особенности и современные тенденции производства кальцинированной соды / З.А. Малакей, Л.З. Васерман // Химия и технология основной химической промышленности. Сборник научных трудов ГУ "НИОХИМ". – Харьков. – 2016. – Т. 78. – С. 21-36.

References:

1. Gorlach, B.A., Gorlach, B.A., and Shahov, V.G. (2016), *Mathematical modeling. Model building and numerical implementation*, Lan, Moskow, 292 p..

2. Tarasik, V.P. (2016), *Mathematical modeling of technical systems*, Infra-M, Moscow, New Knowledge, 592 p.
3. Fedotkin, I.M. (2015), *Mathematical modeling of technological processes*, Lenand, Moscow, 416 p.
4. Emelyanov, S.V. (2015), *Information technology and computing systems: computing systems. Math modeling. Applied Aspects of Computer Science*, Lenand, Moscow, 96 p.
5. Yiannis Boutalis, Manolis A. Christodoulou, and Dimitrios Theodoridis (2014), "System Identification and Adaptive Control", *Springer International Publishing Switzerland*, 313 p.
6. Charlie C.L. Wang (2013), "Recent technology in design and manufacturing automation", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26 p.
7. Kandethody M. Ramachandran, and Chris P. Tsokos (2014), *Mathematical Statistics with Applications*, Elsevier, 848 p.
8. Pereverzieva A.M., and Bobukh A.O. (2017), "Development of a mathematical model of static technologies purified brine saturation gas production of sod", *Visnik NTU "HPH". Series: New solutions in modern technology, Kharkiv.*, no 32 (1254), p. 68-73.
9. Bobukh A.O., Dzevochko O.M., Podustov M.O., and Pereverzova A.M. (2016), "Synthesis of adaptive methods of Kerwan by technological processes of chemical industry", *Bulletin of NTU "KhPI". Seria: Chemistry, hemy technology and ecolog., Kharkiv.*, no. 35 (1207), p. 31-36.
10. Malakey Z.A., and Vaserman L.Z. (2016), "Some features and modern trends in the production of soda ash", *Chemistry and technology of the main chemical industry. Collection of scientific papers GU "NIOHIM", Kharkiv*, no. 78, p. 21-36.

Статтю представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ", зав. каф. АТС та ЕМ Подустов М.О.

Поступила (received) 08.10.2018

Bobukh Anatoly, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38-096-233-47-96, e-mail: aabobukh@ukr.net
ORCID ID 0000-0002-3405-386X

Pereverzieva Alevtyna, postgraduate,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38-095-253-12-63 e-mail: pereverzieva_alya@ukr.net
ORCID ID 0000-0003-2072-2521

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337

Розробка алгоритму структурної ідентифікації технології виробництва кальцинованої соди / Бобух А.О., Переверзева А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 123 – 130.

В результаті досліджень розроблено алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який є економічним з точки зору необхідного для його реалізації числа операцій, сприяє значному підвищенню енергозбереження з поліпшенням якості управління за рахунок отримання адекватного математичного опису технологій при розробці та впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди аміачним способом. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: алгоритм; структурна ідентифікація; покрокова регресія; управління; комп'ютерно-інформаційна технологія; виробництво кальцинованої соди.

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337

Разработка алгоритма структурной идентификации технологии производства кальцинированной соды / Бобух А.А., Переверзева А.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 123 – 130.

В результате исследований разработан алгоритм структурной идентификации на базе метода пошаговой регрессии, который является экономичным с точки зрения необходимого для его реализации числа операций, способствует значительному повышению энергосбережения с улучшением качества управления за счет получения адекватного математического описания технологий при разработке и внедрении компьютерно-информационной технологии производства кальцинированной соды аммиачным способом. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: алгоритм; структурная идентификация; пошаговая регрессия; управление; компьютерно-информационная технология; производство кальцинированной соды.

UDC 661.333(075)–048.34:005.337

Development of algorithm for structural identification of the technology of production of calcined soda technologies / Bobukh A.A., Pereverzieva A.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 123 – 130.

As a result of the research, the algorithm of structural identification based on the step-by-step regression method, which is economical in terms of the number of operations necessary for its implementation, has been developed, contributes to a significant increase in energy savings with improved management quality by obtaining an adequate mathematical description of technologies in the design and implementation of computer-information technology by production calcined soda by ammonia. Refs.: 10 titles.

Keywords: algorithm; structural identification; step-by-step regression; control; computer-information technology; production of calcined soda.