УДК 661.333–681.513.63

РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ АМІАЧНИМ СПОСОБОМ

Бобух А. О., Переверзєва А.М., Лобойко В. О.

Вступ

При дослідженні стаціонарних і нестаціонарних технологій більшості хімічних виробництв необхідно мати досить надійно працюючі алгоритми ідентифікації. Для стаціонарних технологій в цьому випадку використовуються розроблений рекурентний метод найменших квадратів [1] та його модифікації [2], що отримують шляхом мінімізації квадратичного функціонала і використовують при побудові оцінки безпосередні вимірювання вхідних і вихідних параметрів. Для нестаціонарних технологій зазначені адаптивні алгоритми ідентифікації мають обмежені функціональні можливості і малу точність. Технологія виробництва кальцинованої соди за аміачним способом (ВКС) має в своєму складі основні і допоміжні технології зі складними технологічними процесами та апаратами і замкненими циклами за матеріальними потоками [3]. Особливість цих технологій полягає в змінюванні характеристик в часі із-за непередбачених порушень технологічного режиму за рахунок наявності агресивних та абразивних середовищ, які кристалізуються, тобто відносяться до нестаціонарних технологій. Окрім того, для цих технологій характерними являються: складні залежності поміж вхідними та вихідними параметрами, значні запізнювання за основними каналами управління тощо.

Мета роботи

Розглянути теоретичні підстави та розробити адаптивний алгоритм ідентифікації нестаціонарних технологій ВКС, додатково до можливості ідентифікації стаціонарних технологій, для підвищення точності і розширення його функціональних можливостей за рахунок збільшення класу вирішуваних завдань.

Основна частина

Адаптивний алгоритм ідентифікації нестаціонарних технологій [4] в загальному випадку може бути записаний у вигляді :

$$C_n = C_{n-1} + \gamma_{1,n}(Y_n - C_{n-1}^T X_n) X_n + \gamma_{2,n}(Y_{n-1} - C_{n-1}^T X_{n-1}) X_{n-1}, \qquad (1)$$

де C_n – вектор оцінки параметрів нестаціонарної технології на *n*-ій ітерації; X_n – вектор узагальнених входів нестаціонарної технології; Y_n – вихід нестаціонарної технології на *n*-ій ітерації; $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$ – деякі позитивні коефіцієнти, що визначають швидкість збіжності розробляємого алгоритму.

Одним з найбільш зручних критеріїв, що характеризують швидкість збіжності розробляємого алгоритму, є величина:

$$\psi_n = \| \theta_{n-1} \|^2 - \| \theta_n \|^2, \qquad (2)$$

де $\theta_i = C_i - C^*$ – помилка ідентифікації на *i*-ій ітерації; C^* – шуканий вектор параметрів $\| \theta_i \|^2 = \sum_{i=n}^{N} \theta_i^2$, де N - розмірність узагальненого вектора входів.

Для поліпшення процесу збіжності алгоритму (1) необхідно, щоб рівність (2) прагнула до свого максимального значення:

$$\psi_n = \| \theta_{n-1} \|^2 - \| \theta_n \|^2 \to \max_{\gamma_{i,n}, \gamma_{2,n}} . \qquad (3)$$

Якщо обчислити систему із двох рівнянь виду:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \psi_n}{\partial \gamma_{1,n}} = 0 \\ \dfrac{\partial \psi_n}{\partial \gamma_{2,n}} = 0 \end{cases}, \tag{4}$$

отримуємо оптимальні значення коефіцієнтів γ_1 і γ_2, що забезпечують максимальну швидкість збіжності алгоритму (1).

Розглянемо процес вибору коефіцієнтів $\gamma_{1,n}$ і $\gamma_{2,n}$ детально.

Віднімаючи з обох частин алгоритму (1) шуканий вектор параметрів $C*$, запишемо його щодо помилок ідентифікації. З урахуванням того, що $Y_n = C*^T X_n$, а $Y_{n-1} = C*^T X_{n-1}$, отримуємо:

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \gamma_{1,n}(\theta_{n-1}^T X_n) X_n - \gamma_{2,n}(\theta_{n-2}^T X_{n-1}) X_{n-1}. \tag{5}$$

Помножимо вираз (5) зліва на θ_n^T, отримуємо:

$$\begin{gathered} \| \theta_n \|^2 = \| \theta_{n-1} \|^2 - 2\gamma_{1,n}(\theta_{n-1}^T X_n)^2 - 2\gamma_{2,n}(\theta_{n-2}^T X_{n-1})(\theta_{n-1}^T X_{n-1}) + 2\gamma_{1,n}\gamma_{2,n} \cdot \\ \cdot (\theta_{n-1}^T X_n)(\theta_{n-2}^T X_{n-1})(X_n^T X_{n-1}) + \gamma_{1,n}^2(\theta_{n-1}^T X_n)^2 \| X_n \|^2 \ \gamma_{2,n}^2(\theta_{n-2}^T X_{n-1})^2 \| X_{n-1} \|^2 \end{gathered} \tag{6}$$

С урахуванням формули (6) вираз для критерію швидкості збіжності алгоритму (2) буде мати вигляд:

$$\begin{gathered} \psi_n = 2\gamma_{1,n}(\theta_{n-1}^T X_n)^2 + 2\gamma_{2,n}(\theta_{n-2}^T X_{n-1})(\theta_{n-1}^T X_{n-1}) - 2\gamma_{1,n}\lambda_{2,n}(\theta_{n-1}^T X_n) \cdot \\ \cdot (\theta_{n-2} X_{n-1})(X_n^T X_{n-1}) - \gamma_{1,n}^2(\theta_{n-1}^T X_n)^2 \| X_n \|^2 - \gamma_{2,n}^2(\theta_{n-2}^T X_{n-1})^2 \| X_{n-1} \|^2 . \end{gathered} \tag{7}$$

Диференціюючи отриманий вираз (7) за $\gamma_{1,n}$ і $\gamma_{2,n}$, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \psi_n}{\partial \gamma_{1,n}} = 2(\theta_{n-1}^T X_n) - 2\gamma_{2,n}(\theta_{n-1}^T X_n)(\theta_{n-2}^T X_{n-1})(X_n^T X_{n-1}) - \\ \qquad -2\gamma_{1,n}(\theta_{n-1}^T X_n)^2 \| X_n \|^2 = 0; \\ \dfrac{\partial \psi_n}{\partial \gamma_{,n}} = 2(\theta_{n-2}^T X_{n-1})(\theta_{n-1}^T X_{n-1}) - 2\gamma_{1,n}(\theta_{n-1}^T X_n)(\theta_{n-2}^T X_{n-1})(X_n^T X_{n-1}) - \\ \qquad -2\gamma_{2,n}(\theta_{n-2}^T X_{n-1})^2 \| X_{n-1} \|^2 = 0, \end{cases}$$

вирішуючи яку визначимо вирази для позитивних коефіцієнтів $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$:

$$\gamma_{1,n} = \frac{(\theta_{n-1}^T X_n) \| X_{n-1} \|^2 - (\theta_{n-1}^T X_{n-1})(X_n^T X_{n-1})}{(\theta_{n-1}^T X_n)\left[\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2\right]}$$
$$\gamma_{2,n} = \frac{(\theta_{n-1}^T X_{n-1}) \| X_n \|^2 - (\theta_{n-1}^T X_n)(X_n^T X_{n-1})}{(\theta_{n-2}^T X_{n-1})\left[\| X_n \|^2 \| X_{n-2} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2\right]}. \quad (8)$$

Отримані вирази для позитивних коефіцієнтів $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$ максимізують, так як підставивши отримані вирази для позитивних коефіцієнтів із формули (8) в рівняння (1), отримаємо алгоритм:

$$C_n = C_{n-1} + (Y_n - C_{n-1}^T X_N) \frac{\| X_{n-1} \|^2 X_n - (X_n^T X_{n-1}) X_{n-1}}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2} +$$
$$+ (Y_{n-1} - C_{n-1}^T X_{n-1}) \frac{\| X_n \|^2 X_{n-1} - (X_n^T X_{n-1}) X_n}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2}. \quad (9)$$

Третя складова в виразі (9) звертається в нуль, так як помноженням обох частин цього виразу на X_n неважко перевірити, що $Y_n = C_n^T X_n$, а також, аналогічно, $Y_{n-1} = C_{n-1}^T X_{n-1}$.

Таким чином, алгоритм (1) набуває вигляду:

$$C_n = C_{n-1} + (Y_n - C_{n-1}^T X_N) \frac{\| X_{n-1} \|^2 X_n - (X_n^T X_{n-1}) X_{n-1}}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2}. \quad (10)$$

Алгоритм (10) необхідно модифікувати, доповнивши до нього деякий позитивний коефіцієнт γ_n, тобто:

$$C_n = C_{n-1} + \gamma_n (Y_n - C_{n-1}^T X_n) \frac{\| X_{n-1} \|^2 X_n - (X_n^T X_{n-1}) X_{n-1}}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2}. \quad (11)$$

Поступаючи аналогічно з викладеним вище, тобто, віднімаючи із обох частин алгоритму (11) C^*, помножимо отриманий вираз зліва на θ_n^T і підставимо в критерій (2), отримуємо, що для алгоритму (11)

$$\psi_n = \gamma_n (2 - \gamma_n) \frac{(\theta_{n-1}^T \gamma_n)}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})} =$$
$$= \gamma_n (2 - \gamma_n) \frac{(\theta_{n-1}^T \gamma_n)}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 \sin^2 \varphi}, \quad (12)$$

де φ – кут між векторами X_n та X_{n-1}.

З рівняння (12) витікає, що алгоритм (11) монотонно сходиться, тобто $\psi_n > 0$, при виконанні

умови $0 < \gamma_n < 2$. Отже, вибираючи $0 < \gamma_n < 2$, забезпечується монотонна настройка параметрів алгоритму.

Диференціюючи формулу (12) за γ_n і прирівнюючи отриманий вираз до нуля, легко встановити, що оптимальне значення коефіцієнту γ_n, забезпечує максимальну швидкість збіжності, дорівнює одиниці, отже, отримуємо алгоритм (10). У тому випадку, якщо виходи нестаціонарних технологій на *n*-ій ітерації вимірюються з перешкодами, то слід брати $\gamma_n < 1$ при ідентифікації таких технологій і, наприклад, виду $\gamma_n = \frac{\gamma}{n}$, що задовольняють звичайним умовам стохастичною апроксимації:

$$(\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n = \infty, \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 < \infty), \tag{13}$$

при ідентифікації стаціонарних технологій.

Таким чином, розроблений адаптивний оптимальний за швидкодією алгоритм ідентифікації:

$$C_n = C_{n-1} + \gamma_n (Y_n - C_{n-1}^T X_n) \frac{\| X_{n-1} \|^2 \; X_n - (X_n^T X_{n-1}) X_{n-1}}{\| X_n \|^2 \| X_{n-1} \|^2 - (X_n^T X_{n-1})^2}, \tag{14}$$

де в загальному випадку $0 < \gamma_n < 2$ – для нестаціонарних технологій, $\gamma_n = \frac{\gamma}{n}$ – для стаціонарних, в цьому випадку реалізується алгоритм типу стохастичною апроксимації.

Розроблений адаптивний оптимальний за швидкодією алгоритм ідентифікації нестаціонарних технологій (14), а також всі запропоновані формули, критерії, рішення системи рівнянь, процес вибору позитивних значень $\gamma_{1,n}$ і $\gamma_{2,n}$ та інші операції від (1) до (13) найбільш просто можна реалізувати за допомогою сучасних багатоканальних, швидкодіючих мікропроцесорних контролерів (МПК) з багатофункціональними спеціальними програмними забезпеченнями (СПЗ) [5]. МПК в реальному масштабі часу використовуючи СПЗ зможуть забезпечувати виконання всіх необхідних стандартних операцій розробленого алгоритму.

Висновки

Розроблений адаптивний оптимальний за швидкодією алгоритм дозволяє при вирішенні задач ідентифікації нестаціонарних технологічних технологій ВКС використовувати на кожній ітерації не всю наявну інформацію про передісторію технології, як це робиться в рекурентному методі найменших квадратів, а дані тільки двох останніх спостережень, що дає можливість відстежувати дрейф параметрів при ідентифікації технологій. Застосування розробленого адаптивного оптимального за швидкодією алгоритму ідентифікації дозволяє оперативно отримувати достовірну інформацію про нестаціонарність технологій, що приводить до підвищення якості процесу протікання технологій, а це в свою чергу забезпечує отримання позитивного економічного ефекту.

Література

1. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; [пер. с англ. Б.И. Копылова]. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.

2. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – С.-Пб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.

3. Зайцев И. Д. Производство соды [Текст] / И. Д. Зайцев, Г. А. Ткач, Н. Д. Стоев. – М.: Химия. 1984. – 312 с.

4. А. с. SU 1136115 A СССР, G 05 B 23/00. Адаптивный идентификатор / И. Д. Зайцев,

В.И. Салыга, А.А. Бобух, Н.С. Дяченко, О.Г. Руденко, Е.В. Бодянский, Ю.В. Никуленко. (СССР). № 3691296 / 24–24; заяв. 06.01.84; опубл. 23.01.85 , Бюл. № 3

5. Сиротский А.А. Микропроцессорные программируемые логические контроллеры в системах автоматизации и управления: учеб. пособие для вузов / А.А. Сиротский. – М.: Спутник, 2013. – 170 с.

Bibliographi (transliterated)

1. Dorf R.C. Modern control systems. Fourth edition. / R.C. Dorf, R.H.Bishop. – [11 ed.]. – New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1998. – 730 p.

2. *Olsson G.* Tcifrovy`e sistemy` avtomatizatcii i upravleniia (Digital automation and control systems) / *G. Olsson, D. Piani.* – St. Petersburg: Nevskii` Dialekt, 2001. – 557 p. (in Russian).

3. Zaytsev I. D. Proizvodstvo sodyi [Tekst] / I. D. Zaytsev, G. A. Tkach, N. D.Stoev. – Moskow: Himiya. 1984. – 264 p.

4. A. s. SU 1136115 A SSSR, G 05 B 23/00. Adaptivnyi identifikator / I. D. Zaitcev, V. I. Salyga, A. A. Bobukh, N.S. Diachenko, O. G. Rudenko, E. V. Bodianskii, Yu. V. Nikulenko (SSSR). – № 3691296 / 24–24; appl. 06.01.84; publ. 23.01.85, Bull. № 3.

5. Sirotskii A.A. Mikroprotcessornye programmiruemye logicheskie kontrollery v sistemakh avtomatizatcii i upravleniia (Microprocessor programmable logic controllers in automation and control systems): ucheb. posobie dlia vuzov / A.A. Sirotskii. – Moskow: Sputnik, 2013. –170 p. (in Russian).

УДК 661.333–681.513.63

Бобух А. А., Переверзева А.Н., Лобойко В. А.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ АММИАЧНЫМ СПОСОБОМ

Разработан адаптивный оптимальный по быстродействию алгоритм позволяет при решении задач идентификации нестационарных технологических технологий ВКС использовать на каждой итерации не всю имеющуюся информацию о предыстории технологии, как это делается в рекуррентному методе наименьших квадратов, а данные только двух последних наблюдений, дает возможность отслеживать дрейф параметров при идентификации технологий. Применение разработанного адаптивного оптимального по быстродействию алгоритма идентификации позволяет оперативно получать достоверную информацию о нестационарности технологий, приводит к повышению качества процесса протекания технологий, а это в свою очередь обеспечивает получение положительного экономического эффекта.

UDC 661.333–681.513.63

Bobukh A. O., Pereverzieva A. M., Loboyko V. O.

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE IDENTIFICATION ALGORITHM TECHNOLOGY PRODUCTION OF SODA ASH BY AMMONIA METHOD

An adaptive, optimal algorithm for speeding up the algorithm allows to use not all available information on the history of the technology at each iteration as it is done in the recursive least squares method, and only the last two observations provide an opportunity to track the drift of the parameters during identification technologies. The application of the developed adaptive time-optimal identification algorithm allows you to quickly obtain reliable information about the non-stationarity of technologies, leads to an improvement in the quality of the process of technology, and this in turn ensures a positive economic effect.