winematerials) / [*M.V. Bil'ko, A.I. Tenetka, M.V. Skorchenko, I.M. Babych*] // Naukovi praci ONAPT. – 2012. – No 42, Iss. 2. – P. 330 – 335. (in Ukrainian). 17. *Bil'ko M. V.* Deyaki aspekty formuvannya fenol'nogo kompleksu rozhevyx stolovyx vynomaterialiv (Some aspects of formation phenolic complex of rose table winematerials) / *M.V. Bil'ko, A.I. Tenetka* // Napitky. Texnologii i innovacii. – 2012. – No 4. – P. 56 – 59 (in Ukrainian). **18.** *Bil'ko M.* The regulation doses of sulfur dioxide with the aid of preparations, based on glutathione of yeasts in the production of pink table wine / *M. Bil'ko, A. Tenetka* // Ukraine journal of food science. – 2013. – No 1. – P. 77 – 82. **19.** *Jackson R.S.* Wine Science. Principles and Applications / *R.S. Jackson.* – [3-rd Edition]. – Amsterdam-Boston-Heidelberg-London-New York-Oxford-Paris-San Diego-San Francisco-Sydney-Tokyo: Academic Press, 2008. – 790 p.

Поступила (*Received*) *08.06.2015*

УДК 681.513.63:519.712

А.А. БОБУХ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
А.М. ДЗЕВОЧКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»,
М.А. ПОДУСТОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
А.С. КРАВЧЕНКО, студ., НТУ «ХПИ»

ДВУХШАГОВЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Проанализированы разработанные для идентификации стационарных объектов рекуррентный метод наименьших квадратов и различные его модификации, которые получаются путем минимизации квадратичного функционала и используют при построении оценки непосредственные измерения входных и выходных параметров. Показано, что для идентификации нестационарных объектов указанные адаптивные алгоритмы идентификации имеют ограниченные функциональные возможности и малую точность, поэтому предложен разработанный двухшаговый адаптивный алгоритм идентификации нестационарных технологических объектов.

Ключевые слова: рекуррентный метод наименьших квадратов, двухшаговый адаптивный алгоритм идентификации нестационарных технологических объектов.

Введение. При проектировании и испытании компьютерно-интегрированных систем управления (КИСУ) стационарными и нестационарными технологическими объектами большинства химических и смежных производств необходимо иметь достаточно надежно работающие алгоритмы идентификации. Для стационарных объектов в этом случае используются обычно разработанный рекуррентный метод наименьших квадратов [1] и различные его модификации [2 – 5], которые получаются путем минимизации квадратичного функционала и используют при построении оценки непосредственные измерения входных и выходных параметров. Для нестационарных объектов указанные адаптивные алгоритмы идентификации имеют ограниченные функциональные возможности и малую точность.

Цель статьи. Разработка двухшагового адаптивного алгоритма идентификации нестационарных технологических объектов, дополнительно к возможности идентификации стационарных объектов, для повышения точности и расширения его функциональных возможностей за счет увеличения класса решаемых задач.

Материалы и результаты исследования. Разрабатываемый двухшаговый адаптивный алгоритм идентификации нестационарных объектов в общем случае может быть записан в виде [6]:

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

где C_n – вектор оценки параметров нестационарного объекта на n – той итерации; X_n – вектор обобщенных входов нестационарного объекта; Y_n – выход нестационарного объекта на n – той итерации; $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$ – некоторые положительные параметры, определяющие скорость сходимости разрабатываемого алгоритма.

Одним из наиболее удобных критериев, характеризующих скорость сходимости разрабатываемого алгоритма, является величина:

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

где $\theta_i = C_i - C^*$ – ошибка идентификации на i – той итерации; C^* – искомый вектор параметров; $\| \theta_i \|^2 = \sum_{i=n}^{N} \theta_i^2$, где N – размерность обобщенного вектора входов.

Для улучшения процесса сходимости алгоритма (1) необходимо, чтобы равенство (2) стремилось к своему максимальному значению:

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

Решая систему из двух уравнений вида:

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

получаем оптимальные значения коэффициентов γ_1 и γ_2, обеспечивающих максимальную скорость сходимости алгоритма (1).

Рассмотрим процесс выбора $\gamma_{1,n}$ и $\gamma_{2,n}$ подробно.

Вычитая из обеих частей алгоритма (1) искомый вектор параметров C^*, запишем его относительно ошибок идентификации. С учетом того, что $Y_n = C^{*T} X_n$, а $Y_{n-1} = C^{*T} X_{n-1}$, получаем:

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

Умножим выражение (5) слева на θ_n^T, получаем:

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

С учетом формулы (6) выражение для критерия скорости сходимости алгоритма (2) будет иметь вид:

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

Дифференцируя полученное выражение (7) по $\gamma_{1,n}$ и $\gamma_{2,n}$, получим систему уравнений:

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

решая которую определим выражения для положительных параметров $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$:

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

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

Полученные выражения для положительных параметров $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$ максимизируют ψ_n, так как

$$\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \gamma_{1,n}^2} = -2(\theta_{n-1}^T X_n)^2 \| X_n \|^2 < 0;$$

$$\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \gamma_{2,n}^2} = -2(\theta_{n-2}^T X_{n-1})^2 \| X_{n-1} \|^2 < 0.$$

Подставив полученные выражения для положительных параметров $\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}$ из формулы (8) в уравнение (1), получим алгоритм:

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

Третье слагаемое в выражении (9) обращается в нуль, так как умножением обеих частей этого выражения на X_n нетрудно проверить, что $Y_n = C_n^T X_n$, а также, аналогично, $Y_{n-1} = C_{n-1}^T X_{n-1}$.

Таким образом, алгоритм (1) приобретает вид:

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

Алгоритм (10) необходимо модифицировать, вводя в него некоторый положительный параметр γ_n, то есть:

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

Поступая аналогично с изложенным выше, то есть, вычитая из обеих частей алгоритма (11) C^*, умножая полученное выражение слева на θ_n^T и определяя выражение (2), получаем, что для алгоритма (11)

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

где φ – угол между векторами X_n и X_{n-1}.

Из уравнения (12) следует, что алгоритм (11) монотонно сходится, то есть, $\psi_n > 0$ при выполнении условия $0 < \gamma_n < 2$. Следовательно, выбирая $0 < \gamma_n < 2$, обеспечивается монотонная настройка параметров алгоритма.

Дифференцируя формулу (12) по γ_n и приравнивая полученное выражение к нулю, легко установить, что оптимальное значение γ_n, обеспечивающее максимальную скорость сходимости, равно единице, следовательно, получаем алгоритм (10). В том случае, если выходы нестационарных объектов на n – той итерации Y_n измеряются с помехами, то следует брать $\gamma_n < 1$ при идентификации таких объектов и, например, вида $\gamma_n = \frac{\gamma}{n}$, удовлетворяющие обычным условиям стохастической аппроксимации:

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

при идентификации стационарных объектов.

Таким образом, разработан адаптивный двухшаговый оптимальный по быстродействию алгоритм идентификации:

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

где в общем случае $0 < \gamma_n < 2$ – для нестационарных объектов, $\gamma_n = \dfrac{\gamma}{n}$ – для стационарных, в этом случае реализуется алгоритм типа стохастической аппроксимации.

Разработанный двухшаговый адаптивный оптимальный по быстродействию алгоритм идентификации нестационарных объектов (14), а также все предложенные формулы, критерии, решение системы уравнений, процесс выбора положительных значений $\gamma_{1,n}$ и $\gamma_{2,n}$ и другие операции от (1) по (13) наиболее просто можно реализовать при помощи современных высокопроизводительных, многоканальных, быстродействующих и высоконадежных микропроцессорных контроллеров (МПК), которые применяются при разработке КИСУ, с многофункциональными специальными программными обеспечениями (СПО). МПК в реальном масштабе времени, используя СПО смогут обеспечивать выполнение всех необходимых стандартных операций разработанного алгоритма [7 – 9].

Выводы.

Разработанный адаптивный двухшаговый оптимальный по быстродействию алгоритм позволяет при решении задач идентификации нестационарных технологических объектах управления использовать на каждой итерации не всю имеющуюся информацию о предыстории объекта, как это делается в рекуррентном методе наименьших квадратов, а данные только двух последних наблюдений, что дает возможность отслеживать дрейф параметров объектов идентификации большинства химических и смежных производств.

Применение разработанного адаптивного двухшагового оптимального по быстродействию алгоритма идентификации позволяет оперативно получать достоверную информацию об нестационарных технологических объектах управления, что ведет к повышению качества процесса управления объектами, а это в свою очередь обеспечивает получение положительного экономического эффекта.

Список литературы: **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.** *Nagumo J.I.* A learning method for system identification / *J.I. Nagumo, A. Noda* // IEEE Tr. Aut. Control. – 1967. – Vol. AC 12, – № 3. – P. 282 – 287. **4.** *Зорич В.А.* Математический анализ / *В.А. Зорич.* – М.: Фазис, 1997. – 554 с. **5.** *Романенко В.Д.* Методи автоматизації прогресивних технологій / *В.Д. Романенко*. – К.: Вища школа, 1995. – 519 с. **6.** А. с. SU 1136115 А СССР, G 05 В 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. **7.** *Кузин А.В.* Микропроцессорная техника: учебник / *А.В. Кузин, М.А. Жаворонков*. – М.: Академия, 2004. – 304 с. **8.** *Жук В.И*. Микропроцессорные контроллеры и системы управления на их основе: опыт построения / *В.И. Жук* // Энергетика и ТЭК. – 2010. – № 01 (82). – С. 41 – 43. **9.** *Сиротский А.А*. Микропроцессорные программируемые логические контроллеры в системах автоматизации и управления: учеб. пособие для вузов / *А.А. Сиротский*. – М.: Спутник, 2013. – 170 с.

Bibliography: 1. *Dorf R.C.* Modern control systems. Fourth edition. / *R.C. Dorf, R.H.Bishop*. – [11 ed.]. – New Jersey: Prentice-Hall Inc., 2008. – 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.** *Nagumo J.I.* A learning method for system identification / *J.I. Nagumo, A. Noda* // IEEE Tr. Aut. Control. – 1967. – Vol. AC 12, № 3. – P. 282 – 287. **4.** *Zorich V.A*. Matematicheskii` analiz (Mathematical analysis) / *V. A. Zorich*. – Moskow: Fazis, 1997. – 554 p. (in Russian). **5.** *Romanenko V. D.* Metodi avtomatizatcії progresivnikh tekhnologii (Automation methods of progressive technologies) / *V. D. Romanenko*. – Kyiv: Vishcha shkola, 1995. – 519 p. (in Russian). **6.** 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. **7.** *Kuzin A.V.* Mikroprotcessornaia tekhnika (Microprocessor technics) [Tekst] : uchebnik / *A.V. Kuzin, M.A. Zhavoronkov*. – Moskow: Akademiia, 2004. – 304 p. (in Russian). **8.** *Zhuk V.I.* Mikroprotcessornye kontrollery i sistemy upravleniia na ikh osnove : opyt postroeniia (Microprocesor controllers and control systems on from a basis) / *V. I. Zhuk*. Energetika i TEK. – 2010. – № 01 (82). – P. 41 – 43. (in Russian). **9.** *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).

Поступила (*Received*) *20.05.15*