

УДК 681.5.032

Профессор М.М. Благовещенская

(Московский государственный университет пищевых производств, г. Москва)

кафедра информационных технологий и автоматизированных систем. тел.+7 (499) 750-01-11

E-mail: mmb@mgupp.ru

старший научный сотрудник В.В. Макаров

(Институт проблем управления РАН, г. Москва) тел.(495)334-87-59

E-mail: makarov@ipu.ru

Professor M.M. Blagoveshchenskaia

(Moscow State University of Food Production) Department of Information Technologies and Automated Systems.phone +7 (499) 750-01-11

E-mail: mmb@mgupp.ru

senior scientist V.V. Makarov

(Institute of Control Sciences RAS, Moscow) phone (495)334-87-59

E-mail: makarov@ipu.ru

Идентификационный аспект в методологии создания систем управления технологическими объектами с нестационарными параметрами

Identification aspect of methodology design of control system time-variant process

Реферат. Специфика производства продуктов питания требует совершенствования систем автоматического регулирования процессов в аппаратах, агрегатах и установках. При создании адаптивной системы управления технологическим процессом производства продуктов питания на основе модели объекта управления следует провести дополнительный анализ по выбору алгоритма идентификации на реальной достаточно представительной выборке входных данных и результатов измерений выходного сигнала. В работе с помощью имитационного моделирования проанализировано свыше 53 алгоритмов рекуррентной идентификации плюс основные модификации этих алгоритмов, используя в общей сложности 47 возможных критериев оценивания для нестационарных многомерных динамических объектов. На основе этого анализа для рассматриваемого класса объектов для инженерной практики рекомендован ряд алгоритмов. Обсуждаются возможности программного пакета, имеющего самый полный на сегодняшний день набор алгоритмов параметрической идентификации. Для данных конкретных условий сравнения алгоритмов идентификации в пакете при идентификации стационарных коэффициентов в уравнении объекта наиболее эффективными оказались: Айзерман-1, Качмаж, Нагумо-Нода, Растринг, Фильтр Калмана, Фактор забывания, Цыпкин. При нестационарных коэффициентах объекта – Качмаж, Нагумо-Нода, Фильтр Калмана; лучший результат показал алгоритм идентификации Нагумо-Нода.

Summary. Specificity of a food manufacture demands perfection of automatic control systems of processes in devices, units and installations. Creation of an adaptive control system by technological process of a food on the basis of model of control object it is necessary to carry out the additional analysis for choice algorithm of identification on real enough to representative sample of input data and output signal/data. In article on the basis of simulation it is analyzed over 53 algorithms of recurrent identification plus the basic modifications of these algorithms by 47 criteria for time-varying multivariable linear dynamic objects. On the basis of this analysis for engineering practice for a considered class of objects some algorithms are recommended. Possibilities of the software suite having for today the fullest set of parametrical identification algorithms are discussed. For given specific conditions of comparison in the package identification algorithms for identification of stationary coefficients in the equation object of the most effective were: Yzerman-1, Kaczmarz, Nagumo-Noda, Rastrigin, Kalman filter, the forgetting factor, Zipkin. When pointwise object - Kaczmarz, Nagumo-Noda, Kalman filter; showed the best result identification algorithm-Nagumo Noda.

Ключевые слова: идентификация, рекуррентные алгоритмы, метод наименьших квадратов, нестационарный процесс, адаптивная система управления, оценка параметров, моделирование, параметрические модели, дискретные сигналы.

Keywords: identification, recursive algorithms, least squares method, time-variant process, adaptive control system, parameter estimation, simulation, parametric models, discrete time signals.

Специфика производства продуктов питания требует совершенствования систем автоматического регулирования процессов в аппаратах, агрегатах и установках. Это технологическое оборудование составляют сложные объекты управления со значительным временем запаздывания, ярко обозначенными критическими границами, вблизи которых необходимо вести процесс с переменными параметрами [1].

Одним из наиболее эффективных видов систем управления объектами с изменяющимися параметрами являются адаптивные системы с идентификатором. Блок идентификации в этих системах непрерывно или периодически уточняет параметры модели объекта управления. При этом подразумевается, что в блоке идентификации реализован аппаратно или программно один из рекуррентных алгоритмов идентификации.

Однако алгоритмы идентификации, которые разработаны и применяются для оценки неизвестных, но неизменяющихся во времени параметров в условиях моделирования для независимых входных сигналов и других явных и неявных априорных условий, на практике показывают далеко не лучшие результаты. Нестационарность параметров, их взаимосвязь, изменяющиеся вероятностные характеристики входных сигналов могут приводить к трудно предсказуемым теоретически результатам построения моделей таких производственных объектов.

К настоящему времени разработано и в той или иной мере исследовано большое число рекуррентных алгоритмов идентификации. Алгоритмы идентификации разбросаны по многочисленным монографиям, специальным периодическим изданиям и техническим отчетам. Далеко не полная библиография приводится в данной работе [3-12]. Скромная часть этого множества алгоритмов реализована в виде программных инструментальных средств таких, как Matlab, Unity Pro и других подобных систем. Проблема заключается в том, что нет среди всех алгоритмов наилучшего для реальных условий идентификации.

Инженер-практик, взявшийся за реализацию адаптивной системы управления с идентификатором, оказывается перед проблемой выбора конкретного алгоритма идентификации. В таких системах управления именно идентификатор позволяет получать модели заданного качества для управления по модели, когда по поступающим данным, результатам измерений, уточняются параметры модели.

В работе на основе имитационного моделирования проанализировано свыше 53 алгоритмов рекуррентной идентификации плюс ос-

новные модификации этих алгоритмов с возможностью оценки работы идентификатора по большому числу критериев, в общей сложности до 47 критериев для нестационарных многомерных односвязных динамических объектов.

В условиях неопределённости широкое применение получили итерационные или рекуррентные алгоритмы идентификации, обладающие рядом преимуществ: простота реализации, большое быстродействие, возможность получения состоятельных оценок. Некоторые конструктивные особенности в итерационные алгоритмы вносятся в процессе непосредственной реализации их в системах управления, что связано с особенностями и свойствами исследуемого процесса или объекта.

Как сказано выше, ряд методов рекуррентной идентификации реализован в известном программном пакете Matlab. В пакете Matlab возможно получение оценок параметров модели объекта непосредственным программированием, т.е. обращением к функции расчета полинома коэффициентов ARMAX или использованием подсистем Simulink и System Identification Toolbox. Однако ни в целом пакет, ни отдельные его части, даже алгоритмы нецелесообразно использовать на промышленных контроллерах в системах адаптивного управления. Причем размер и стоимость пакета, отнюдь не главные причины отказа в использовании пакета в промышленных регуляторах. Все средства Matlab работают с одномерными односвязными объектами. В целом пакет не ориентирован на получение текущих оценок параметров и их анализ в реальном времени. В работах [9, 10] было предложено сделать расширение возможностей Matlab, включением в него пакета Recursive Identification Algorithms Library в подсистему Simulink. Однако только в релизе пакета Matlab R2013b в System Identification Toolbox представлены три алгоритма рекуррентной идентификации из предлагаемой библиотеки.

Кроме того, используемые в Matlab алгоритмы идентификации: фактор забывания и алгоритм Левенберга-Маркварда [7, 8], на разных выборках не всегда показывают для нестационарных объектов хорошие результаты, в сравнении с другими алгоритмами. Это означает, что нет универсального лучшего для всех условий идентификации алгоритма.

Отсутствие ясных рекомендаций в использовании алгоритмов идентификации является, по-видимому, одной из причин того, что ведущие фирмы-производители промышленных контроллеров и программного обеспечения к ним предпочитают использовать в своих

системах классические PID-контроллеры или PID-контроллеры с самонастройкой [11]. Однако для систем управления нестационарными объектами такие контроллеры проигрывают в точности настройки, а часто требуют эвристического подбора параметров настройки, т.е. присутствия оператора [2].

Практически все рассматриваемые алгоритмы идентификации представляют собой нелинейные функции, поэтому получение аналитических оценок для большинства алгоритмов вызывает значительные трудности. Кроме того, для практических приложений важными являются такие параметры модели объекта, как высокий порядок дифференциального или разностного уравнения и произвольное количество входов. Поэтому сравнение алгоритмов выполнялось численным моделированием. Для получения достоверных убедительных результатов на основе численного моделирования необходимо с одной стороны иметь возможность получать достаточно разнообразные входные сигналы и возможность рассматривать различные типы параметрической нестационарности. С этой целью был создан программный пакет, позволяющий выполнить поставленную задачу [12].

В программном пакете предусмотрена возможность либо моделирования входных сигналов по вероятностным распределениям: равномерное, нормальное, гамма, бета, экспоненциальное, Лапласа, Коши, либо использование данных с реального объекта управления. Реализованы алгоритмы идентификации коэффициентов в авторегрессионном уравнении [3-10]: алгоритмы на основе Р- и SP- подходов, алгоритмы Айзермана, Качмаж, Нагумо-Нода, МНК, РМНК, Аведьян, Растрингин, алгоритмы Цыпкина, фильтр Калмана, алгоритм фактор забывания, алгоритм Левенберга-Маркварда и другие. Всего проанализировано 53 алгоритма идентификации плюс основные модификации этих алгоритмов.

Для оценки качества идентификации используются различные критерии адаптации: по выходу и параметрам, точечные и интегральные, оценки скорости сходимости, отношения ошибки дисперсии, величины ошибки, среднеквадратические оценки – всего возможно использовать 47 критериев.

В общем случае под объектом для сравнения алгоритмов идентификации, подразумевалась модель технологического процесса, которая описывается как многомерный односвязный объект, получаемый декомпозицией из

многомерного многосвязного объекта с наблюдаемыми входами x_r , $r = \overline{1, L}$ и выходом y [2]:

$$y(n) = \sum_i C_j(n) X(n-i) + \sum_j A_j(n) y(n-j) + v(n), \quad (1)$$

где $C_j^T(n) = (C_1(n), C_2(n), \dots, C_L(n))$ – вектор неизвестных параметров при входных переменных; $A^T(n) = (a_1(n), a_2(n), \dots, a_K(n))$ – вектор неизвестных параметров при выходных переменных; $X(n) = \sum_{r=1}^L x_r(n), v(n)$ – приведенный шум.

Модель для объекта заданного уравнением (1) обычно записывают в более компактном виде:

$$y_n = \varphi_n^T \theta_{n-1},$$

где

$$\varphi_n^T = (x_1(n), x_2(n), \dots, x_L(n), x_1(n-1), x_2(n-1),$$

$$\dots, x_L(n-1), \dots, x_1(n-I), x_2(n-I), \dots,$$

$$\dots, x_L(n-I), y(n-1), y(n-2), \dots, y(n-K))$$

обобщенный вектор входов;

$$\theta_{n-1}^T = (\hat{c}_1(n-1), \hat{c}_2(n-1), \dots, \hat{c}_L(n-1), \hat{c}_1(n-2), \hat{c}_2(n-2),$$

$$\dots, \hat{c}_L(n-2), \hat{c}_1(0), \hat{c}_2(0), \dots, \hat{c}_L(0), \hat{a}_1(n-1), \hat{a}_2(n-1),$$

$$\dots, \hat{a}_K(n-1))$$

– вектор оцениваемых параметров на временном такте $(n-1)$, соответственно, $\hat{C}_j(n-i)$ – оценки коэффициентов при L входах $x_j(n)$ для временного лага до I , $\hat{a}_i$ – оценки коэффициентов при выходах в соответствующие моменты времени.

В работе проведен анализ сходимости коэффициентов модели объекта по оценке качества идентификации в случае их стационарности или нестационарности для многомерного объекта с десятью входами при использовании различных алгоритмов идентификации, которые были реализованы в программном пакете при устойчивом объекте. На выходе объекта добавлен аддитивный шум.

На рисунке 1 приведены коэффициенты объекта и модели в случае периодической нестационарности при идентификации алгоритмом Нагумо-Нода, в сравнении, на рисунке 2 – алгоритм идентификации на основе фильтра Калмана.

Рассматривая этот модельный пример, хочется обратить внимание на очевидное заключение, вытекающее из качественного анализа результатов слежения за параметрами. Алгоритм идентификации на основе калмановской фильтрации, специально разработанный для рекуррентного оценивания нестационарных систем, при определенных условиях проигрывает в точности слежения алгоритму идентификации Нагумо-Нода.

Для методологии построения адаптивных систем с идентификатором этот вывод приводит к необходимости использовать при проектировании не один единственный алгоритм оценивания, какой бы хороший по заключению разработчика алгоритма он не был, а все множество алгоритмов (в нашем пакете собрано 53 алгоритма [12]) для реальных условий идентификации. Выбрав наилучший алгоритм, можно приступить к аппаратно-программной реализации системы управления.

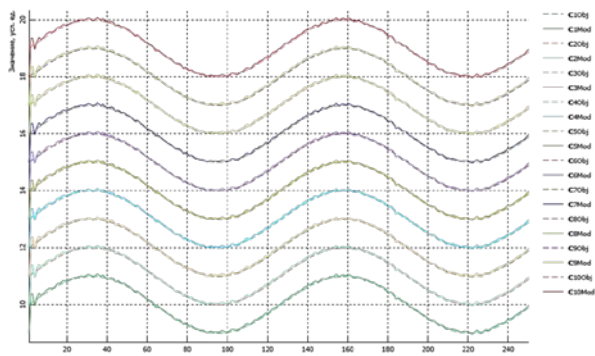


Рисунок 1. Коэффициенты объекта C_{oi} и модели C_{mi} . Алгоритм идентификации Нагумо-Нода.

ЛИТЕРАТУРА

1 Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2005. 768 с.

2 Александров А.Г., Паленов М.В. Самонастраивающийся ПИД/И-регулятор // Автоматика и телемеханика. 2011. № 10.

3 Жиров М.В., Макаров В.В., Солдатов В.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 203 с.

4 Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications. Berlin, Springer-Verlag, 2011. 705p.

5 Bobál V., Böhm J., Fessl J., Macháček J. Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Applications. London, Springer-Verlag, 2005. 318 p.

6 Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 3 томах. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

7 Цыпкин, Я.З. Основы информационной теории идентификации. М.: Наука, 1984. 336 с.

8 MATLAB and Simulink for Technical Computing. Документация по программе MATLAB 2011 [Электронный ресурс] // MathWorks. 2011. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/>.

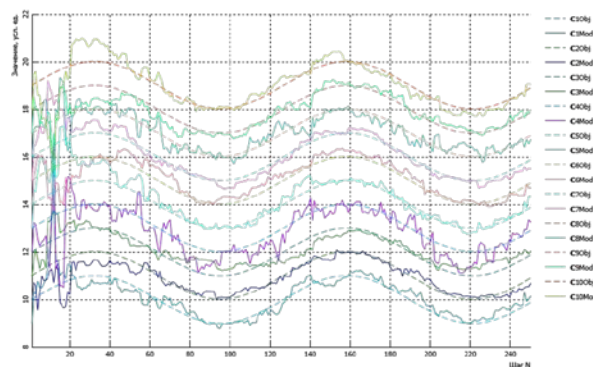


Рисунок 2. Коэффициенты объекта C_{oi} и модели C_{mi} . Идентификация на основе фильтра Калмана.

Для наших конкретных условий сравнения алгоритмов идентификации в пакете [12] при идентификации стационарных коэффициентов в уравнении объекта (1) наиболее эффективными оказались: Айзерман-1, Качмаж, Нагумо-Нода, Растрингин, Фильтр Калмана, Фактор забывания, Цыпкин. При нестационарных коэффициентах объекта – Качмаж, Нагумо-Нода, Фильтр Калмана; лучший результат показал алгоритм идентификации Нагумо-Нода.

9 Ljung L. System Identification Toolbox: For use with MATLAB. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 2004. 830 p.

10 Navrátil P., Bobál V. Recursive identification algorithms library. // Proceedings 17th International Conference on Process Control, 2009. pp. 516-523.

11 Unity PRO. Control Block Library [Электронный ресурс] // Schneider Electric, 2009, no. 4. – Режим доступа: <http://www.schneider-electric.com/>.

12 Макаров В.В., Михеев А.С. Имитационная система моделирования адаптивной системы управления с идентификатором. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2013610594. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013г.

REFERENCES

1 Blagoveshchenskaia M.M., Zlobin L.A. Informatsionnye tekhnologii system upravleniia tekhnologicheskimi protsessami [Information technologies for Process Control Systems]. Moscow, Vysshiaia shkola, 2005. 768 p. (In Russ.).

2 Aleksandrov A.G., Palenov M.V. Self-tuning PID/I Controller. Avtomatika i telemekhanika. [Automation and teleautomatics], 2011, vol. 72, no. 11, pp. 2010. (In Russ.).

3 Zyrov M.V. Identification and adaptive Control for Time-varying Technological Process / M.V. Zyrov, V.V. Makarov, V.V. Soldatov – Moscow, Bauman State Technical University , 2011. – 203 c. (In Russ.).

4 Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2011. 705p.

5 Bobál V., Böhm J., Fessl J., Macháček J. Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Applications. London, Springer-Verlag, 2005. 318 p.

6 Pupkov K.A., Egupov N.D. Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia [Classical and modern methods of theory of automatic control]. Moscow, Izdatel'stvo MGТУ im. N.E. Baumana, 2004. (In Russ.).

7 Tsyarkin Ia.Z. Osnovy informatsionnoi teorii identifikatsii [Foundation of information theory of identification]. Moscow, Nauka, 1984. 336 p. (In Russ.).

8 MATLAB and Simulink for Technical Computing. Documentation on the program MATLAB 2011. MathWorks. 2011. Available at: <http://www.mathworks.com/>.

9 Ljung L. System Identification Toolbox: For use with MATLAB. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 2004. 830 p.

10 Navrátil P., Bobál V. Recursive identification algorithms library. Proceedings 17th International Conference on Process Control, 2009. pp. 516-523.

11 Unity PRO. Control Block Library. Schneider Electric, 2009, no. 4. Available at: <http://www.schneider-electric.com/>.

12 Makarov V.V., Mikheev A.S. Imitatsionnaia sistema modelirovaniia adaptivnoi sistemy upravleniia s identifikatorom. [Simulation system of adaptive control system with identification]. Certificate of state registration computer program №2013610594. (In Russ.).