

АЛГОРИТМ ТЕКУЩЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ СИНТЕЗЕ АДАПТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

В.С. Кудряшов, В.К. Битюков, С.В. Рязанцев

*Кафедра информационных и управляющих систем,
Воронежская государственная технологическая академия*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: алгоритм идентификации моделей; дискретные динамические модели; управление ректификацией.

Аннотация: Предлагается метод текущей идентификации дискретных динамических моделей, отличающийся от известных тем, что в процессе получения оценок используются численные значения частных производных критерия по двум значениям оценок параметров модели объекта, полученных на предыдущих шагах. Приводятся сравнительные результаты исследований с рекуррентным методом наименьших квадратов.

Характерными особенностями большинства объектов химической технологии (ректификация, дегидрирование, полимеризация и др.), оказывающими существенное влияние на качество управления, являются многомерность и нестационарность, обусловленные сложной взаимосвязью параметров, дрейфом статических и динамических свойств и наличием возмущений. Непрерывность оптимального управления может быть достигнута путем синтеза адаптивной связанной системы с настраиваемой моделью объекта [1]. Одним из важных этапов адаптации является процедура текущей идентификации. Известные методы не всегда обеспечивают необходимое сочетание точности и скорости получения результатов. Кроме того, отсутствует возможность прямого отдельного измерения выходов основных и перекрестных каналов многосвязного объекта, значения которых используются для проведения процедуры идентификации. Широкие возможности для построения и реализации алгоритмов адаптивного связанного управления практически любого уровня сложности в отличие от аналоговых средств управления предоставляют современные средства вычислительной техники (контроллеры, программно-технические комплексы). При этом основой математического аппарата синтеза адаптивных цифровых систем управления (ЦСУ) являются разностные уравнения [2].

В работе ставится задача повышения качества текущей идентификации при сохранении высокой скорости сходимости. Рассмотрим объект управления (ОУ), каждый канал которого описан дискретной динамической моделью в виде разностного уравнения

$$y_i = \Psi^T \theta, \quad (1)$$

где u_i , y_i – вход и выход ОУ; $\Psi = [y_{i-1}, \dots, y_{i-n}, u_{i-1-d}, \dots, u_{i-(k+1)-d}]^T_m$ – вектор переменных состояния; $\theta = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_{k+1}]^T_m$ – вектор параметров разностного уравнения; $d = \tau/T_0$ – целое число тактов запаздывания; τ – время запаз-

дывания; T_0 – такт квантования; n, k – порядки знаменателей и числителей дискретных передаточных функций каналов ОУ [2] ($n \geq k$); $m = n + k + 1$ – число переменных состояния каналов; i – индекс такта квантования.

В качестве критерия идентификации используем минимум суммы квадратичных отклонений между экспериментальными значениями выхода объекта и рассчитанными по модели

$$\Phi(\theta_H) = (\mathbf{y}^3 - \mathbf{y})^T (\mathbf{y}^3 - \mathbf{y}) \rightarrow \min_{\theta_H}, \quad (2)$$

где $\theta_H = [\theta_{H[1]}, \dots, \theta_{H[m_H]}]_{m_H}^T$ – вектор, элементами которого являются нестационарные параметры; m_H – число нестационарных параметров; $m_H \leq m$; $\mathbf{y}^3 = [y_{n+d+1}^3, \dots, y_{N+n+d}^3]_N^T$ – вектор экспериментальных значений выхода ОУ, полученных путем измерения через такт T_0 ; $\mathbf{y} = [y_{n+d+1}, \dots, y_{N+n+d}]_N^T$ – вектор значений выхода, рассчитанных по модели (1); N – объем выборки при идентификации.

Поскольку вектор \mathbf{y} , с учетом (1), может быть представлен соотношением

$$\mathbf{y} = \Psi^3 \theta, \quad (3)$$

то (2) примет вид

$$\Phi(\theta_H) = (\mathbf{y}^3 - \Psi^3 \theta)^T (\mathbf{y}^3 - \Psi^3 \theta) \rightarrow \min_{\theta_H}, \quad (4)$$

где $\Psi^3 = \begin{bmatrix} y_{n+d}^3 & \dots & y_{d+1}^3 & u_n^3 & \dots & u_{n-k}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{N+n+d-1}^3 & \dots & y_{N+d}^3 & u_{N+n-1}^3 & \dots & u_{N+n-(k+1)}^3 \end{bmatrix}$ – матрица экспериментальных значений, $N \times m$.

Критерий $\Phi(\theta_H)$ является квадратичной функцией относительно вектора изменяющихся параметров, а потому может быть представлен в виде

$$\Phi(\theta_H) = \theta_H^T \alpha \theta_H + \beta \theta_H + \zeta, \quad (5)$$

где $\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{[1][1]} & \dots & \alpha_{[1][m_H]} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{[m_H][1]} & \dots & \alpha_{[m_H][m_H]} \end{bmatrix}$ – матрица коэффициентов квадратичной формы

функции; $\beta = [\beta_{[1]}, \dots, \beta_{[m_H]}]$ – матрица-строка коэффициентов линейной части функции; ζ – свободный коэффициент.

Поскольку на каждом шаге текущей идентификации элементы матрицы Ψ^3 значений входа и выхода ОУ определены и фиксированы, то состоящие из них и стационарных параметров модели элементы матриц α , β и коэффициент ζ являются константами.

Частные производные критерия $\Phi(\theta_H)$ по нестационарным параметрам θ_H могут быть представлены системой линейных функций:

$$\Phi'(\theta_H) = 2\alpha \theta_H + \beta^T, \quad (6)$$

где $\Phi'(\theta_H) = \left[\frac{\partial \Phi(\theta_H)}{\partial \theta_{H[1]}}, \frac{\partial \Phi(\theta_H)}{\partial \theta_{H[2]}}, \dots, \frac{\partial \Phi(\theta_H)}{\partial \theta_{H[m_H]}} \right]_{m_H}^T$ – вектор частных производных.

Представим вектор идентифицируемых параметров θ_n в виде суммы точки экстремума θ_n^* и приращения $\Delta\theta_n$

$$\theta_n = \theta_n^* + \Delta\theta_n, \quad (7)$$

где $\theta_n^* = [\theta_{n[1]}^*, \theta_{n[2]}^*, \theta_{n[3]}^*, \dots, \theta_{n[m_n]}^*]_{m_n}^T$ – точка минимума (вектор оптимальных значений идентифицируемых параметров по критерию (2)); $\Delta\theta_n = [\Delta\theta_{n[1]}, \Delta\theta_{n[2]}, \Delta\theta_{n[3]}, \dots, \Delta\theta_{n[m_n]}]_{m_n}^T$ – вектор приращений.

Выполним подстановку выражения (7) в (6)

$$\Phi'(\theta_n) = 2\alpha(\theta_n^* + \Delta\theta_n) + \beta^T, \quad (8)$$

раскрывая скобки и учитывая, что в точке минимума

$$\Phi'(\theta_n^*) = 2\alpha\theta_n^* + \beta^T = 0, \quad (9)$$

выражение (8) примет вид

$$\Phi'(\theta_n) = 2\alpha\Delta\theta_n. \quad (10)$$

Возьмем два значения (начальных приближений) вектора идентифицируемых параметров $\theta_n^{[1]} = [\theta_{n[1]}^{[1]}, \theta_{n[2]}^{[1]}, \theta_{n[3]}^{[1]}, \dots, \theta_{n[m_n]}^{[1]}]_{m_n}^T$, $\theta_n^{[2]} = [\theta_{n[1]}^{[2]}, \theta_{n[2]}^{[2]}, \theta_{n[3]}^{[2]}, \dots, \theta_{n[m_n]}^{[2]}]_{m_n}^T$, которые могут быть представлены суммой точки экстремума θ_n^* и соответствующих приращений $\Delta\theta_n^{[1]}$ и $\Delta\theta_n^{[2]}$:

$$\theta_n^{[1]} = \theta_n^* + \Delta\theta_n^{[1]}, \quad \theta_n^{[2]} = \theta_n^* + \Delta\theta_n^{[2]}. \quad (11)$$

На i -ом шаге текущей идентификации, когда элементы матриц α , β и коэффициент ζ по причинам, указанным выше, являются константами, частные производные критерия $\Phi'(\theta_n)$ в выбранных точках примут значения:

$$\Phi'(\theta_n^{[1]}) = 2\alpha\theta_n^{[1]} + \beta^T, \quad \Phi'(\theta_n^{[2]}) = 2\alpha\theta_n^{[2]} + \beta^T. \quad (12)$$

Подставив выражение (11) в (12) и учитывая (9), получим:

$$\Phi'(\theta_n^{[1]}) = \Phi'(\Delta\theta_n^{[1]}) = 2\alpha\Delta\theta_n^{[1]}, \quad \Phi'(\theta_n^{[2]}) = \Phi'(\Delta\theta_n^{[2]}) = 2\alpha\Delta\theta_n^{[2]}. \quad (13)$$

Из отношения приращений $\Delta\theta_n^{[1]}$ и $\Delta\theta_n^{[2]}$ аналогично [3] получим выражение в векторно-матричной форме для расчета точки экстремума θ_n^* в случае векторной нестационарности

$$\theta_n^* = (\Theta_n^{[1]}\Delta\Theta_n^{[2]} - \Theta_n^{[2]}\Delta\Theta_n^{[1]})(\Delta\Theta_n^{[2]} - \Delta\Theta_n^{[1]})^{-1}, \quad (14)$$

где $\Theta_n^{[j]}$, $\Delta\Theta_n^{[j]}$ – диагональные матрицы, m_n ; $\text{diag } \Theta_n^{[j]} = \theta_n^{[j]}$; $\text{diag } \Delta\Theta_n^{[j]} = \Delta\theta_n^{[j]}$; $j = \overline{1, 2}$.

Из выражения (14) по аналогии с [3] перейдем к зависимости, при которой не требуется решать систему (6), что обеспечивает высокое быстродействие

$$\Theta_n^* = (\Theta_n^{[1]} \Phi'(\Theta_n^{[2]}) - \Theta_n^{[2]} \Phi'(\Theta_n^{[1]})) (\Phi'(\Theta_n^{[2]}) - \Phi'(\Theta_n^{[1]}))^{-1}, \quad (15)$$

где $\Phi'(\Theta_n^{[j]})$ – диагональная матрица, m_n ; $\text{diag } \Phi'(\Theta_n^{[j]}) = \Phi'(\theta_n^{[j]})$; $j = \overline{1, 2}$.

Расчет параметров модели объекта осуществляется с помощью последовательного применения выражений (6) и (15). Необходимым условием реализации является возможность определения $\Phi'(\theta_n)$ для известного (заданного) значения вектора θ_n идентифицируемых параметров. Проведенные на основе моделирования расчеты подтвердили сходимость оценок к истинным значениям параметров модели ОУ в процессе текущей идентификации.

Анализ (10) показывает, что при нестационарности объекта управления, проявляющейся в изменении двух и более параметров разностных уравнений вида (1), отношение частных производных, рассчитанных как при одном, так и при нескольких значениях вектора θ_n , в общем случае, не равно отношению приращений

$$\frac{\frac{\partial \Phi(\theta_n^{[i]})}{\partial \theta_{n[l]}}}{\frac{\partial \Phi(\theta_n^{[v]})}{\partial \theta_{n[x]}}} \neq \frac{\Delta \theta_{n[l]}^{[1]}}{\Delta \theta_{n[x]}^{[2]}}, \quad (16)$$

где $l, x, j = \overline{1, m_n}$; $i, v = \overline{1, 2}$.

По этой причине получаемые значения точки экстремума θ_n^* могут иметь некоторую погрешность. Однако, несмотря на это обстоятельство, скорость (количество итераций) и точность получения результатов с помощью предложенного алгоритма зачастую выше, чем при использовании наиболее популярного рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК), что подтверждается результатами машинного моделирования.

Для многомерных ОУ (рис. 1) значения управляемых величин $y^{[j]}$, получаемых при измерении, представляют собой суммарные сигналы основных, перекрестных и каналов возмущения. Сигналы $y^{[j]}$ не могут непосредственно использоваться для расчета параметров θ_n моделей нестационарных каналов, поскольку полученные на их основе оценки будут смещенными. Измерения выходов по каждому каналу выполнить практически невозможно. Поэтому для оценки значения выхода нестационарного канала (как правило, основного) по измеренным сигналам $\mathbf{u} = [u^{[1]}, \dots, u^{[r]}]$, $\mathbf{f} = [f^{[1]}, \dots, f^{[w]}]$ производится расчет значений выходов

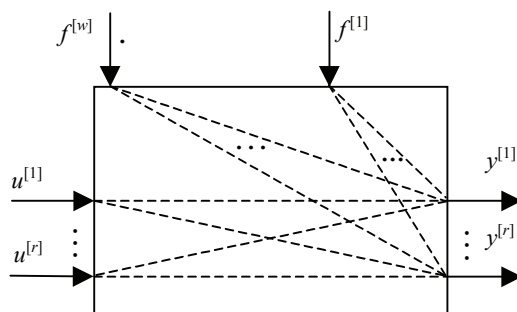


Рис. 1 Структурная схема r -мерного ОУ при наличии w возмущений

соответствующих каналов с использованием уравнений (1), а затем рассчитываются выходные значения сигналов по идентифицируемым (основным) каналам

$$y_i^{[j][j]} = y_i^{[j]} - \sum_{k=1, k \neq j}^r y_i^{u[k][j]} - \sum_{k=1}^w y_i^{f[k][j]}, \quad (17)$$

где $y_i^{[j][j]}$, $y_i^{u[k][j]}$, $y_i^{f[k][j]}$ – выходы по основным, перекрестным ($k \neq j$) и каналам возмущений на i -ом такте квантования; $y_i^{[j]}$ – измеряемое значение выхода ОУ; $j = \overline{1, r}$.

Одним из этапов текущей идентификации является оценка получаемых результатов путем сравнения частных производных критерия со своим пороговым значением

$$\Phi'(\theta_n) \leq \varepsilon_{\theta_n}, \quad (18)$$

где $\varepsilon_{\theta_n} = [\varepsilon_{\theta_{n[1]}}, \dots, \varepsilon_{\theta_{n[m_n]}}]_{m_n}^T$ – вектор пороговых значений частных производных по каждому идентифицируемому параметру, характеризующих точность получаемых оценок параметров.

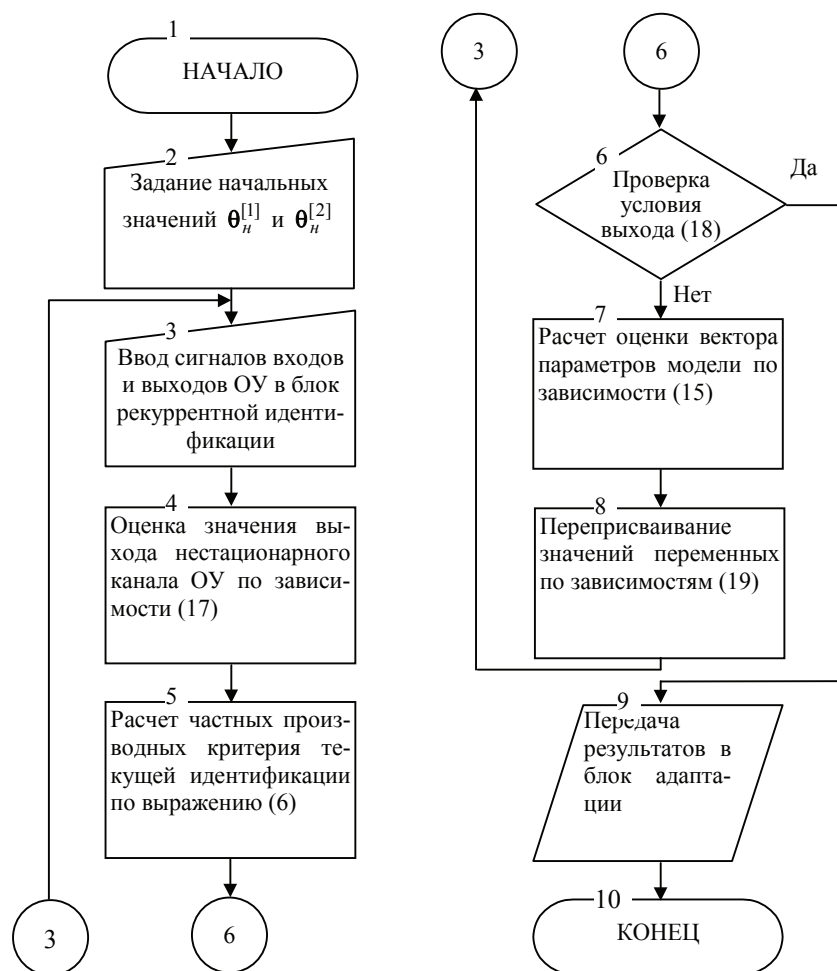
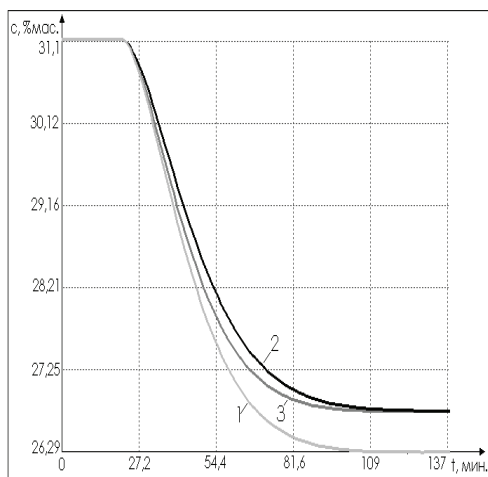
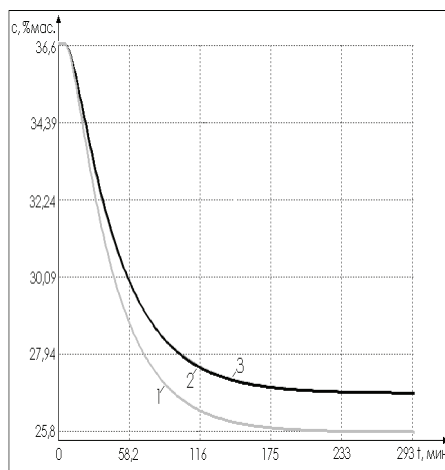


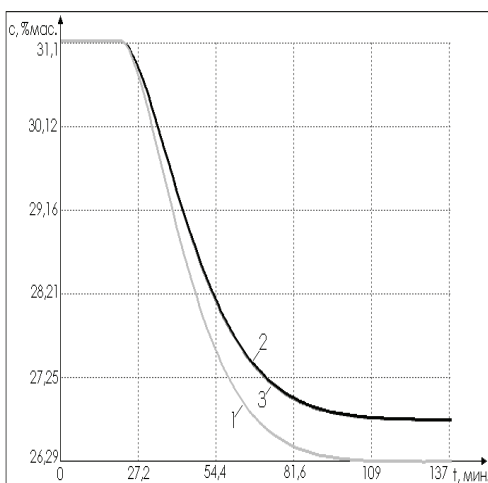
Рис. 2 Схема алгоритма текущей идентификации



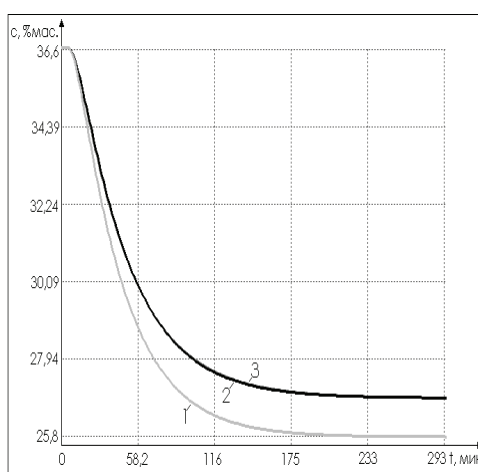
Расход флегмы (увеличение на 1 т/ч) – концентрация (с) дивинила на в.к.т. (РМНК)



Расход теплоносителя в куб колонны (увеличение на 1 т/ч) – концентрация (с) бутадиена на н.к.т. (РМНК)



Расход флегмы (увеличение на 1 т/ч) – концентрация (с) дивинила на в.к.т. (ПА)



Расход теплоносителя в куб колонны (увеличение на 1 т/ч) – концентрация (с) бутадиена на н.к.т. (ПА)

Рис. 3 Графики переходных характеристик основных каналов управления при исходных – 1, измененных – 2 и адаптивных – 3 параметрах моделей ОУ

При невыполнении условия (18) полученные оценки параметров используются на следующей итерации для вычисления нового приближения к точке экстремума. Для этого осуществляется переприсваивание:

$$\theta_{\text{H}}^{[1]} = \theta_{\text{H}}^{[2]}, \quad \theta_{\text{H}}^{[2]} = \theta_{\text{H}}^* . \quad (19)$$

Снижение порогового значения позволяет повысить точность расчета параметров модели идентифицируемого канала, но приводит к увеличению времени текущей идентификации. Итерационная процедура позволяет получить числовую последовательность, сходящуюся к истинным значениям параметров. Схема разработанного алгоритма представлена на рис. 2. В качестве примера показано его применение для процесса ректификации.

Проведено сравнительное исследование предложенного алгоритма (ПА) текущей идентификации и РМНК, результаты которого представлены значениями параметров моделей основных каналов ОУ и критерия – суммы квадратов невязки (СКН) между динамическими характеристиками основных каналов при измененных и исходных, измененных и адаптивных параметрах моделей – в таблице, а также графиками кривых разгона ОУ, рассчитанных по модели при исходных – 1, измененных – 2 и адаптивных – 3 параметрах (рис. 3). В ходе машинных экспериментов в замкнутой связанной ЦСУ нестационарность объекта имитировалась путем скачкообразного изменения параметров непрерывных моделей по основным каналам управления на 10 % (увеличение постоянных времени и уменьшение коэффициента усиления). В качестве допущения принималась квазистационарность динамических характеристик по перекрестным каналам ОУ. Это объясняется их менее сильным влиянием на выходы по сравнению с основными каналами.

В качестве исходных данных использовались эмпирические кривые разгона по основным и перекрестным каналам: расход теплоносителя и флегмы – концентрации ключевых компонентов на нижней контрольной тарелке (н.к.т.) и верхней контрольной тарелке (в.к.т.) процесса экстрактивной ректификации бутилендивинильной фракции в производстве мономера синтетического каучука. В результате предварительной идентификации получены параметры непрерывных (T_1, T_2, k, τ) и дискретных (a_1, a_2, b, d) моделей при $T_0 = 1,2$ мин (табл. 1).

Таблица 1

Параметры модели ОУ и результаты текущей идентификации

Канал	Параметры	Значения параметров модели ОУ								СКН в сравнении с измененными
		Непрерывные				Дискретные				
		T_1 , мин	T_2 , мин	k , % мас / т/ч	τ , мин.	a_1	a_2	b , % мас / т/ч	d , такт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Расход флегмы – концентрация дивинила на в.к.т. ($W_o^{u[1][1]}$)	Исходные	12,61	12,61	-4,8	21,6	1,846	0,853	-0,034	18	66,215
	Измененные	13,88	13,88	-4,3	21,6	1,859	-0,865	-0,025	18	–
	Адаптивные (РМНК)	12,35	12,35	-4,3	21,6	1,847	-0,854	-0,031	18	2,185
	Адаптивные (ПА)	13,75	13,75	-4,3	21,6	1,858	-0,864	-0,026	18	0,013

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Расход теплоносителя в куб. колонны – концентрация бутиленов на н.к.т. ($W_0^{u[2][2]}$)	Исходные	5,96	36,77	-10,8	6	1,805	-0,81	-0,058	5	349,225
	Измененные	6,55	40,45	-9,73	6	1,82	-0,825	-0,044	5	–
	Адаптивные (РМНК)	5,86	41	-9,73	6	1,805	-0,81	-0,047	5	0,126
	Адаптивные (ПА)	5,93	41,1	-9,73	6	1,807	-0,812	-0,047	5	0,087

Анализ результатов показывает повышение точности оценок параметров модели ОУ при использовании предложенного алгоритма по сравнению с РМНК (см. табл.).

Список литературы

1. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
2. Битюков В.К. Моделирование и синтез систем цифрового управления многомерными технологическими объектами непрерывного действия / В.К. Битюков, В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев. – Воронеж: ВГТА, 2002. – 143 с.
3. Кудряшов В.С., Бобровников Н.Р., Битюков В.К., Алексеев М.В., Рязанцев С.В., Гридин Ю.Н., Яркин С.В. Синтез адаптивной цифровой связанной системы управления двумерным объектом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 12.

Algorithm of Current Identification at Synthesis of Adaptive Digital Systems of Control by Multi-Measuring Objects

V.S. Kudryashov, V.K. Bityukov, S.V. Ryazantsev

*Department of Information and Control Systems,
Voronezh State Technological Academy*

Key words and phrases: algorithm of models identification; discrete dynamic models; rectification control.

Abstract: Method of current identification of discrete dynamic models is offered. It is different from the known ones by the fact that in the process of obtaining evaluations digital notions of specific variables of the criterion by two notions of evaluations of object model parameters obtained at the preliminary stages are used. Comparative results of examination by recurrent method of the smallest number of squares are represented.

Algorithmus der laufenden Identifikation bei der Synthese der adaptiven Digitalssysteme der Steuerung von den Multidimensionalobjekten

Zusammenfassung: Es wird die Methode der laufenden Identifikation der diskontinuierlichen dynamischen Modelle vorgeschlagen. Ihre Unterschied besteht in

der Benutzung der zahlenmäßigen Werte der Einzelableitungen des Kriteriums nach zwei in Vorschritten erhaltenen Werten der Einschätzung von Parametern des Objektenmodells. Es werden die Vergleichergebnisse der Untersuchungen mit der Rekurrentmethode von Mindestquadraten angeführt.

Algorithme de l'identification en cours lors de la synthèses des systèmes numériques adaptatifs pour la commande des objets multidimensionnels

Résumé: Est proposée la méthode de l'identification en cours des modèles dynamiques discrets qui se distinguent des modèles connus par ce qu'en processus de l'obtention des évaluations on utilisent les nombres numériques des dérivées partielles du critérium par les deux grandeurs des évaluations des paramètres du modèle de l'objet, reçus sur des pas précédents. On cite les résultats comparatifs avec une méthode recurrenente des plus petits carrés.
