УДК 519.654 DOI: http://doi.org/10.25728/pu.2021.3.7

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБНОВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

М.А. Работников

Аннотация. Рассмотрена проблема деградации многомерных моделей, описывающих поведение управляемых непрерывных технологических процессов. Предложен метод решения задачи нелинейного программирования для целевой функции, сформированной с помощью метода наименьших квадратов по данным эксплуатации объекта. В основу разработанного метода заложены алгоритмы моделирования динамических процессов, базирующиеся на методе наложения переходных характеристик процесса. Преимущество предлагаемого метода заключается в возможности использования данных пассивного эксперимента для построения актуальной многоканальной модели объекта. Приведены результаты применения разработанного метода для обновления модели многопараметрического контроллера системы усовершенствованного управления технологическим процессом получения масляных альдегидов методом оксосинтеза. Применение разработанного метода для реальных управляемых технологических объектов позволяет повысить точность моделирования процесса и качество автоматического управления, снижая влияние человеческого фактора и повышая общую экономическую эффективность производственного процесса.

Ключевые слова: многомерный объект, передаточная функция, управление с прогнозирующей моделью, система усовершенствованного управления технологическим процессом.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для обеспечения максимальной эффективности производства на современных предприятиях активно внедряется множество высокотехнологичных решений, позволяющих оптимизировать процессы на всех этапах производства готовой товарной продукции, а также обеспечивающих высокую адаптивность производственного узла под текущие экономическую и технологическую ситуации [1—4]. Одно из таких решений — системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП, advanced process control) [5].

Концепция усовершенствованного управления непрерывными технологическими процессами в подавляющем числе случаев подразумевает применение динамических моделей, прогнозирующих поведение контролируемых параметров процесса. На основании полученных расчетов реализуются алгоритмы предиктивного управления, позволяющие стабилизировать технологический процесс, компенсируя влияние возмущающих воздействий на контролируемые параметры, и вывести установку на оптимальный режим по экономическому критерию в рамках заданных технологических ограничений [6—8].

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Ключевым требованием, предъявляемым к системам многомерного управления, является точность проводимой структурной и параметрической идентификации задействованных в управлении каналов передачи [9, 10]. Классическим методом для описания исследуемой динамики является система линейных дифференциальных уравнений, за-

писанная в форме матричной передаточной функции размерности $p \times q$, где p — количество контролируемых параметров процесса, q — суммарное количество управляющих параметров и наблюдаемых возмущающих воздействий. Входными сигналами модели служат управляющие параметры процесса (Manipulated Variables, MV) и регистрируемые возмущающие воздействия (Disturbance Variables, DV), на выходе модель прогнозирует поведение контролируемых параметров процесса (Controlled Variables, CV). В общем случае такая модель имеет вид:

$$W(s) = \frac{A(s)}{B(s)} e^{-\tau s} = \\ = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \ldots + b_1 s + b_0} e^{-\tau s}, \qquad (1)$$

где s — оператор Лапласа; $A(s)$ — полиномиальная запись числителя; $B(s)$ — полиномиальная запись знаменателя; n — степень полинома $A(s)$; m — степень полинома $B(s)$; $n \le m$ — условие физической реализуемости.

Одной из проблем приведенного выше подхода к описанию управляемого объекта является деградация используемой многомерной модели объекта (1), вызванная нелинейностью протекающего физико-химического процесса [11]. По этой причине модели, задействованные в задачах управления непрерывными технологическими процессами, нуждаются в периодической подстройке под текущий технологический режим [12]. Типовым решением для этого является проведение активного эксперимента (пошагового тестирования) с целью снятия переходных характеристик процесса и построения актуальной версии многоканальной модели управляемого объекта. Один из недостатков такого подхода заключается в применении сильных управляющих воздействий на непрерывно функционирующий объект, способных нарушить устойчивость технологического режима, а также вывести контролируемые параметры процесса и ключевые показатели качества выпускаемой продукции за допустимые регламентные пределы.

2. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

С учетом сформированной проблематики для решения задачи обновления многомерной динамической модели разработан метод, основанный на анализе данных пассивного эксперимента. В основе предлагаемого метода лежит задача нелинейного программирования для целевой функции, сформированной с помощью метода наименьших квадратов по данным эксплуатации объекта:

$$\min_{k,\, a,\, b,\, \tau} \sum_{i=1}^{N} (y_i^e - y_i^{ap}(k,\, a,\, b,\, \tau))^2 \to k^0,\, a^0,\, b^0,\, \tau^0, \quad (2)$$

где N — объем выборки исходных данных; y_i^e — реальные значения контролируемого параметра; $y_i^{ap}(k,\, a,\, b,\, \tau)$ — прогнозируемые моделью значения; k — матрица коэффициентов усиления размерности $1 \times q$; a — матрица коэффициентов полинома $A(s)$ размерности $n \times q$; b — матрица коэффициентов полинома $B(s)$ размерности $m \times q$; τ — матрица временного запаздывания размерности $1 \times q$; k^0, a^0, b^0, τ^0 — оценки параметров рассматриваемой передаточной функции.

Расчет прогнозного значения осуществляется с применением метода наложения переходных характеристик процесса:

$$y_i^{ap} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta x_j^{\mathrm{T}} h(\Delta T[i-j]) + y_1^e, \quad i = \overline{2, N},$$

где $\Delta x = x_j - x_{j-1}$ — матрица ступенчатых воздействий входных сигналов размерности $q \times 1$; $h(t)$ — переходные характеристики исследуемых каналов передачи; ΔT — период дискретизации рассматриваемой выборки.

Согласно теореме о вычетах переходная характеристика исследуемого канала имеет вид:

$$h(t) = \sum_{r=1}^{n} \mathrm{Res}_{s=s_r} [W(s_r) e^{s_r t}],$$

где s_r — полюс функции $W(s)$.

В общем случае для n простых полюсов, отличных от нуля (передаточная функция имеет один нулевой полюс и n простых полюсов), переходная характеристика может быть рассчитана, как

$$h(t) = \frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{r=1}^{n} \frac{B(s_r) e^{s_r t}}{s_r A'(s_r)}, \qquad (3)$$

где $A'(s_r)$ — производная от характеристического полинома $A(s)$, вычисленная для полюса r [13].

В рамках решения задачи усовершенствованного управления технологическим процессом для описания динамики исследуемых каналов передачи достаточным является ограничение дифференциальным уравнением второго порядка, описываемым передаточной функцией [14]

$$W(s) = k \frac{a_1 s + 1}{b_2 s^2 + b_1 s + 1} e^{-\tau s}. \qquad (4)$$

Для рассматриваемого случая (4) формула для расчета переходной характеристики исследуемого процесса (3) преобразуется к виду:

$$h(t) = k\left(1 + \frac{(c_1 - a_1)e^{-\frac{t-\tau}{c_1}} - (c_2 - a_1)e^{-\frac{t-\tau}{c_2}}}{c_2 - c_1}\right),$$

где $c_1 = -s_1^{-1}$, $c_2 = -s_2^{-1}$, $s_{1,2}$ — полюса передаточной функции (4).

Конечный вид задачи нелинейного программирования (2) по результатам преобразования целевой функции будет таким:

$$\min_{k,\, a_1,\, c_1,\, c_2,\, \tau} \sum_{i=2}^{N} \left(y_i^e - y_1^e - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta x_j^{\mathrm{T}} h(\Delta T[i-j])\right)^2 \rightarrow$$

$$\rightarrow k^0,\ a_1^0,\ c_1^0,\ c_2^0,\ \tau^0, \qquad (5)$$

где $h_r(\Delta T[i-j]) =$

$$= k_r\left(1 + \frac{(c_{1r} - a_{1r})e^{-\frac{\Delta T(i-j)-\tau_r}{c_{1r}}} - (c_{2r} - a_{1r})e^{-\frac{\Delta T(i-j)-\tau_r}{c_{2r}}}}{c_{2r} - c_{1r}}\right),$$

$r = \overline{(1, q)}$.

При необходимости от полюсов c_1, c_2 не сложно перейти к искомым первоначально коэффициентам полинома $B(s)$:

$$b_{1r} = c_{1r} + c_{2r}, \quad b_{2r} = c_{1r}c_{2r}, \quad r = \overline{(1, q)}.$$

Начальной точкой для идентификации объекта может служить как текущая параметрическая конфигурация используемой многоканальной модели, так и заданный набор параметров, сформированный исходя из аппроприации данных пассивного эксперимента.

С учетом объема требуемых вычислений и параметрической размерности целевой функции для решения поставленной задачи (5) необходимо применять методы, обладающие высокой скоростью сходимости. В частности, выбран класс квазиньютоновских методов с вычислением гессиана по схеме BFGS (англ. *Broyden — Fletcher — Goldfarb — Shanno algorithm*) [15].

Практическая реализация метода предполагает как автоматическую подстройку модели объекта по заданному количественному критерию, так и ручную по запросу обслуживающего технологического персонала.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Разработанный метод обновления многомерной модели управляемого объекта протестирован на реальном технологическом объекте — отделении получения масляных альдегидов методом оксосинтеза производства бутиловых спиртов. Отделение запроектировано по непрерывной схеме; его ключевым узлом является блок гидроформилирования, предназначенный для получения нормальномасляного и изомасляного альдегидов из пропилена и синтез-газа в присутствии гидрокарбонила кобальта в последовательных реакторах Р-3, Р-4 с предварительным приготовлением катализатора из 2-этилгексаната кобальта и синтез-газа в реакторе Р-1. Полученная на выходе каталитическая смесь проходит очистку в сепараторах высокого и низкого давления (Е-1 и Е-2 соответственно) от топливных газов и поступает в узел окислительной декобальтизации для дальнейшей переработки ключевых компонентов катализата.

Управление производством бутиловых спиртов реализовано с использованием системы усовершенствованного управления технологическим процессом, фрагмент которой для рассматриваемого блока гидроформилирования с указанием задействованных параметров процесса представлен на общей технологической схеме узла (рис. 1, табл. 1).

Для рассматриваемой части контроллера СУУТП блока гидроформилирования с применением разработанного метода проведена идентификация его многоканальной модели с целью актуализации ее параметрической и структурной конфигурации под текущий технологический режим. В табл. 2 представлены результаты обновления динамической модели контроллера.

Таблица 1

Описание параметров контроллера СУУТП

Тэг	Описание
	1. Контролируемые параметры
cv1	Конверсия пропилена
cv2	Потери пропилена в сдувках
	2. Управляющие параметры
mv1	Расход пропан-пропиленовой фракции
mv2	Температура в реакторе Р-3
mv3	Температура в реакторе Р-4
mv4	Давление газа в сепараторе высокого давления Е-1
mv5	Расход каталитической смеси
mv6	Давление газа в сепараторе низкого давления Е-2
	3. Возмущающие воздействия
dv1	Содержание окиси углерода CO в синтез-газе
dv2	Концентрация водорода в синтез-газе

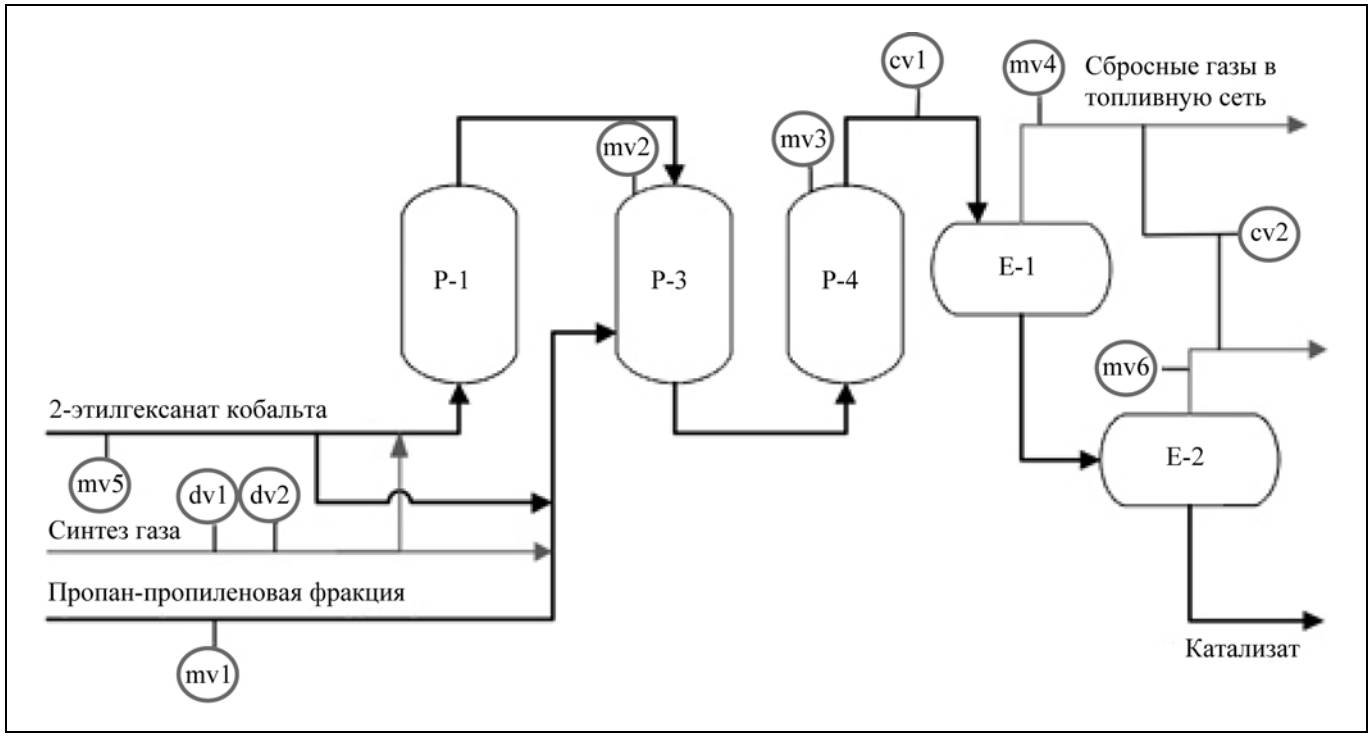

Рис. 1. Блок гидроформилирования

Таблица 2

Обновление динамической модели блока гидроформилирования

		Модель до обновления		Обновленная модель	
		Выходной сигнал			
		cv1	cv2	cv1	cv2
Входной сигнал	mv1	$0{,}0353\frac{1}{20s+1}$	$8{,}82\frac{1}{20s+1}$	$0{,}0353\frac{1}{20s+1}$	$12{,}36\frac{1}{18{,}93s+1}$
	mv2	$0{,}0678\frac{1}{15s+1}$	$-13\frac{0{,}51s+1}{3{,}89s^2+2{,}36s+1}$	$0{,}0348\frac{1}{18{,}82s+1}$	$-4{,}5\frac{1{,}41s+1}{3{,}76s^2+1{,}54s+1}$
	mv3	$0{,}0025\frac{1}{15s+1}e^{-4s}$	$-15{,}3\frac{1}{130s^2+22{,}8s+1}$	$0{,}0016\frac{1}{11{,}34s+1}e^{-6s}$	$-7{,}01\frac{0{,}21s+1}{130s^2+23s+1}$
	mv4	$0{,}007\frac{1}{5s+1}e^{-3s}$	—	$0{,}009\frac{1}{5s+1}e^{-3s}$	—
	mv5	$0{,}021\frac{1}{6{,}25s^2+5s+1}$	$-68{,}2\frac{1}{10{,}1s+1}e^{-6s}$	$0{,}021\frac{1}{6{,}25s^2+5s+1}$	$-68{,}2\frac{1}{10{,}1s+1}e^{-6s}$
	mv6	—	$-86{,}1\frac{1}{15s+1}$	—	$-83\frac{1}{15s+1}$
	dv1	$0{,}0021\frac{1}{12s+1}e^{-2s}$	$19{,}4\frac{1}{22{,}4s+1}e^{-24s}$	$0{,}0021\frac{1}{12s+1}e^{-2s}$	$19{,}19\frac{1}{22{,}4s+1}e^{-23s}$
	dv2	$0{,}01\frac{2{,}57s+1}{9{,}22s^2+6{,}72s+1}$	$0{,}659\frac{1}{12s+1}e^{-2s}$	$0{,}01\frac{2{,}57s+1}{9{,}22s^2+6{,}72s+1}$	$1{,}132\frac{1}{12s+1}e^{-2s}$

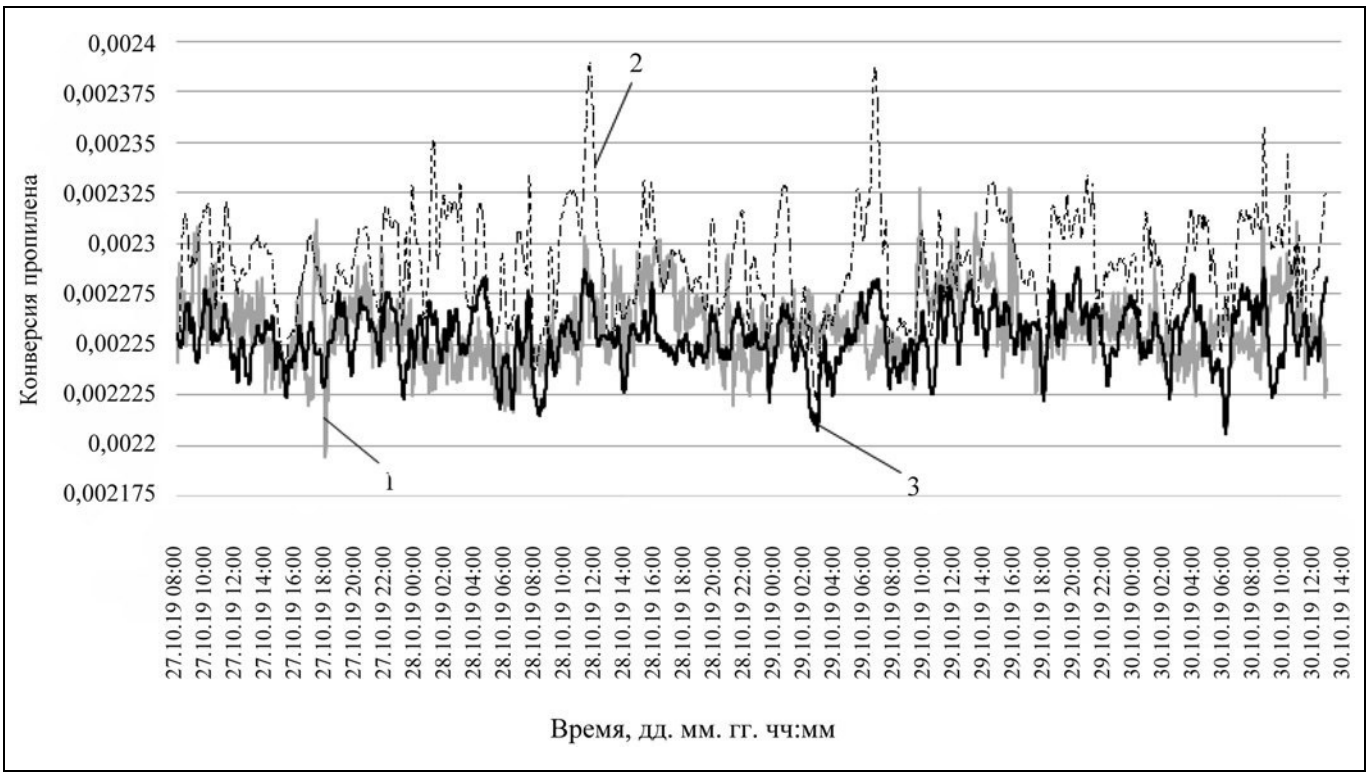

Рис. 2. Конверсия пропилена: *1* — реальные значения, *2* — модель до обновления, *3* — обновленная модель

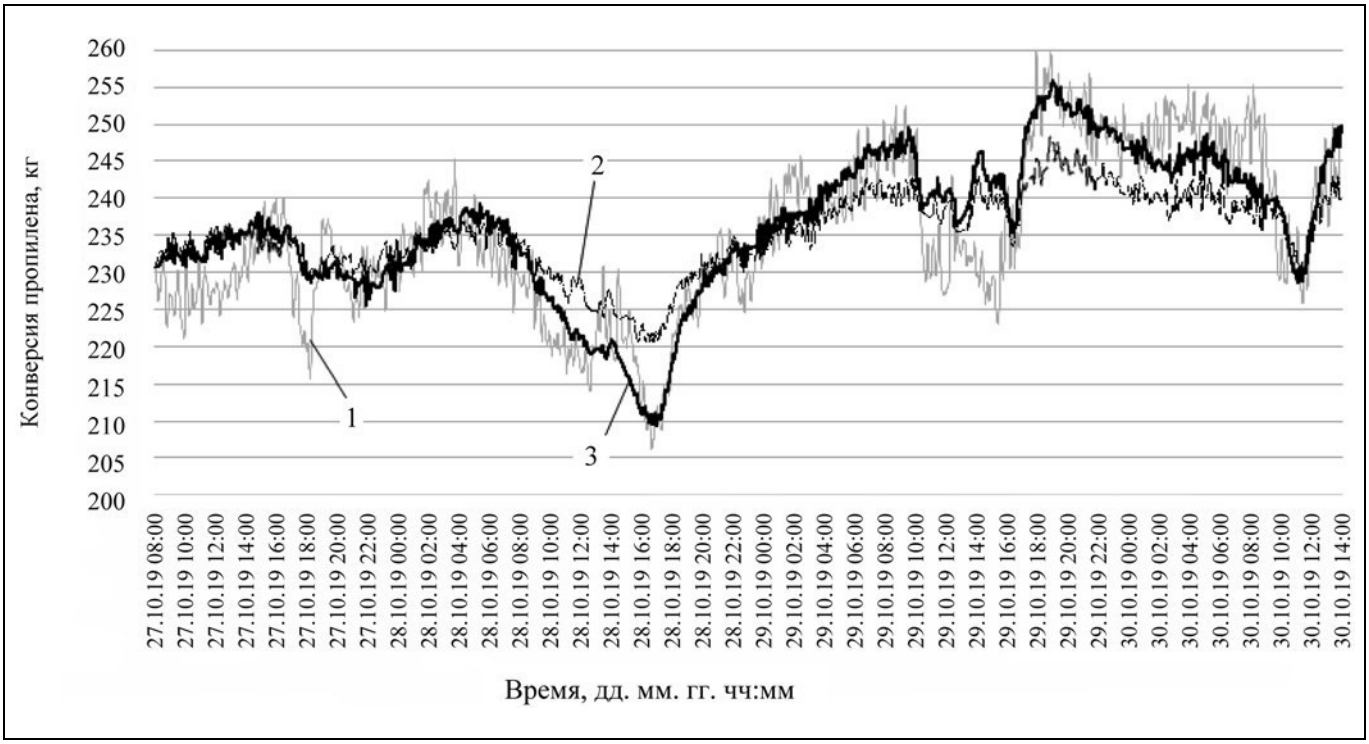

Рис. 3. Потери пропилена в сдувках: *1* — реальные значения, *2* — модель до обновления, *3* — обновленная модель

Для оценки эффектов проведенной идентификации рассматриваемая модель проверена на тестовой выборке исторических данных технологического процесса. По результатам модельных испытаний получены тренды конверсии пропилена (рис. 2) и потери пропилена в сдувках (рис. 3), прогнозируемые моделью до и после ее обновления на одинаковом наборе исходных данных.

По результатам обновления модели среднее квадратичное отклонение значений, прогнозируемых моделью, от соответствующих им реальных значений снизилось для конверсии пропилена с $4{,}159 \times 10^{-5}$ до $2{,}045 \times 10^{-5}$, для потери пропилена в сдувках — с 6,483 до 5,112 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки метода обновления многоканальной динамической модели управляемого технологического объекта. Предложенный метод предполагает решение задачи нелинейного программирования для целевой функции, сформированной с помощью метода наименьших квадратов. Отличительной особенностью разработанного метода является возможность построить актуальные модели переходных процессов исследуемых каналов передачи, основываясь на предыдущей структурной и параметрической идентификации. Преимущество метода заключается в отсутствии потребности в проведении активного эксперимента на технологическом объекте: для обновления модели используются исторические данные технологического процесса.

Разработанный метод применен для многоканальной модели СУУТП блока гидроформилирования отделения получения масляных альдегидов методом оксосинтеза производства бутиловых спиртов. Актуализация модели позволила снизить среднее квадратичное отклонение значений, выдаваемых моделью, от реальных значений более чем в 2,033 и 1,268 раз для конверсии пропилена и потери пропилена в сдувках соответственно.

Предложенный метод позволяет повысить точность моделирования протекающего физико-химического процесса. В задачах усовершенствованного управления это позволяет улучшить качество автоматического управления технологическим процессом, стабилизируя ключевые контролируемые параметры процесса и снижая разброс показаний лабораторного анализа, тем самым повышая общую экономическую эффективность производства и уменьшая влияние человеческого фактора на управление производственным процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Владов Р.А.*, *Дозорцев В.М.*, *Шайдуллин Р.А.* и др. Практические аспекты четвертой промышленной революции // Автоматизация в промышленности. — 2017. — № 7. — С. 7—13. [*Vladov*, *R.A.*, *Dozortsev*, *V.M.*, *Shaidullin R.A.*, et al. Practical Aspects of the Fourth Industrial Revolution // Automation in Industry. — 2017. — No. 7. — P. 7—13. (In Russian)]
2. *Kueppers*, *S.*, *Haider*, *M.* Process Analytical Chemistry — Future Trends in Industry // Analytical and Bioanalytical Chemistry. — 2003. — Vol. 376. — P. 313—315.
3. *Бахтадзе Н.Н.*, *Лотоцкий В.А.* Современные методы управления производственными процессами // Проблемы управления. — 2009. — № 3. — С. 56—63. [*Bakhtadze*, *N.N.*, *Lototskii*, *V.A.* Contemporary Methods of Production Process Control // Control Sciences. — 2009. — No. 3. — P. 56—63. (In Russian)]
4. *Селезнев А.Ю.* Возможные внедрения на НПЗ для повышения операционной эффективности // Нефть. Газ. Новации. — 2020. — № 4. — С. 35—42. [*Seleznev*, *A.Yu.* Vozmozhnye vnedreniia na NPZ dlia povysheniia operatsionnoi effektivnosti // Neft'. Gaz. Novatsii. — 2020. — No. 3. — P. 35—42. (In Russian)]
5. *Lehman*, *K.A.* Implement Advanced Process Control // Chemical Engineering Progress. — 2018. — Vol. 114, no. 1. — P. 60—66.
6. *Домбровский В.В.*, *Пашинская Т.Ю.* Прогнозирующее управление стохастическими нелинейными системами с сериально коррелированными параметрами при ограничениях // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2018. — № 42. — С. 4—11. [*Dombrovskii*, *V.V.*, *Pashinskaya*, *T.Yu.* Model Predictive Control for Nonlinear Stochastic Systems with Serially Correlated Parameters under Constraints // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. — 2018. — No. 42. — P. 4—11. (In Russian)]
7. *Торгашов А.Ю.*, *Гончаров А.А.*, *Самотылова С.А.* Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами // Вестник Дальневосточного отделения РАН. — 2016. — № 4 (133). — С. 102—107. [*Torgashov*, *A.Yu.*, *Goncharov*, *A.A.*, *Samotylova*, *S.A.* Modern Methods of Evaluation of Advanced Process Control Systems // Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. — 2016. — No. 4 (133). — P. 102—107. (In Russian)]
8. *Работников М.А.*, *Вялых И.А.*, *Немтин А.М.* Техническое проектирование системы усовершенствованного управления установки каталитического риформинга // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2019. — № 2. — С. 119—132. [*Rabotnikov*, *M.A.*, *Vialykh*, *I.A.*, *Nemtin*, *A.M.* Technical Design Advanced Control System of the Catalytic Reforming Unit // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University Electrotechnics, Information Technologies, Control Systems. — 2019. — No. 2. — P. 119—132. (In Russian)]
9. *Berlik*, *S.*, *Nasiri*, *M.* An Adaptive Fuzzy Model Predictive Control System for the Textile Fiber Industry // Communications in Computer and Information Science. — 2010. — Vol. 81. — P. 729—736.
10. *Pan*, *J.*, *Jiang*, *X.*, *Wan*, *X.K.*, et al. A Filtering Based Multi-Innovation Extended Stochastic Gradient Algorithm for Multivariable Control System // International Journal of Control Automation and Systems. — 2017. — Vol. 15, no. 3. — P. 1189—1197.
11. *Cannon*, *M.*, *Kouvaritakis*, *B.* Continuous-Time Predictive Control of Constrained Nonlinear Systems // Progress in Systems and Control Theory. — 2000. — Vol. 26. — P. 205—215.

12. *Le Lann*, *M.V.*, *Cabassud*, *M.*, *Casamatta*, *G.* Adaptive Model Predictive Control // NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences). — 1995. — Vol. 293. — P. 427—457.
13. *Коновалов Б.И.*, *Лебедев М.Ю.* Теория автоматического управления. — Томск: ТУСУР, 2011. — 162 с. [*Konovalov*, *B.I.*, *Lebedev*, *M.Iu.* Theory of Automatic Control. — Tomsk: TUSUR, 2011. — 162 s. (In Russian)]
14. *Tyatyushkin*, *A.I.*, *Zarodnyuk*, *T.S.*, *Gornov*, *A.Yu.* Algorithms for Nonlinear Optimal Control Problems Based on the First and Second Order Necessary Conditions // Journal of Mathematical Sciences. — 2019. — Vol. 239. — P. 185—196.
15. *Захарова Е.М.*, *Минашина И.К.* Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. — 2014. — Т. 14, № 3. — С. 256—274. [*Zakharova*, *E.M.*, *Minashina*, *I.K.* Review of Multidimensional Optimization Techniques // Information Processes. — 2019. — Vol. 14, no. 3. — P. 256—274. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Поступила в редакцию 11.01.2021, после доработки 09.02.2021. Принята к публикации 10.03.2021.

Работников Михаил Алексеевич — ООО «ЗапСибНефтехим», г. Тобольск, ✉ rabotnikovma@tobolsk.sibur.ru.

AN UPDATING METHOD FOR THE DYNAMIC MIMO MODEL OF A CONTROLLED TECHNOLOGICAL OBJECT

M.A. Rabotnikov

OOO ZapSibNeftekhim, Tobolsk, Russia
✉ rabotnikovma@tobolsk.sibur.ru

Abstract. This paper considers the degradation of MIMO models of controlled industrial processes. We propose a method for solving a nonlinear programming problem with an objective function formed by the least squares method according to technological object data. The method involves dynamic process modeling algorithms based on the imposition of the step response of the process. The advantage of this method is the possibility of using passive experiment data to construct an appropriate multichannel model of a technological object. The method is applied to update the multiparameter controller model for the Advanced Process Control system of butyraldehydes oxo synthesis. For real controlled technological objects, this method allows improving the accuracy of process modeling and the performance of automatic control, reducing the human factor, and increasing the overall economic efficiency of the production process.

Keywords: MIMO system, transfer function, Model Predictive Control, Advanced Process Control.

КОНКУРСЫ НА СОИСКАНИЕ ЗОЛОТЫХ МЕДАЛЕЙ И ПРЕМИЙ ИМЕНИ ВЫДАЮЩИХСЯ УЧЕНЫХ, ПРОВОДИМЫЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИЕЙ НАУК В 2022 году

В целях поощрения ученых за научные труды, научные открытия и изобретения, имеющие важное значение для науки и практики, Российская академия наук присуждает золотые медали и премии имени выдающихся ученых.

Золотые медали присуждаются за выдающиеся научные работы, открытия и изобретения или по совокупности работ большого научного и практического значения.

Премии присуждаются за отдельные выдающиеся научные работы, открытия, изобретения, а также за серии научных работ по единой тематике.

На соискание премий могут быть представлены работы или серии работ единой тематики, как правило, отдельных авторов. При представлении работ выдвигаются лишь ведущие авторы, причем не более трех человек.

Справки по телефону: (499) 237-99-33

Подробная информация, в том числе сроки приема заявок на каждый конкурс, размещена на сайте Российской академии наук http://www.ras.ru.