

УДК: 66.011:681.51

Александр Николаевич Лабутин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматики, Россия, Иваново, e-mail: lan@isuct.ru

Анатолий Алексеевич Андреевков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 32-72-26

Елена Александровна Шуина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, e-mail: HM_ISPU@mail.ru

Синергетический синтез алгоритмов управления экстремальными объектами

Авторское резюме

Состояние вопроса. Проблема синтеза алгоритмов управления нелинейными технологическими объектами, такими как химический реактор, часто обусловлена отсутствием или ограниченностью информации о динамике объекта. Вместе с тем статическая характеристика объекта по каналу регулирования задана и имеет экстремальный характер. Информация о виде статической характеристики и о структуре потоков переноса вещества в реакторе позволяет сформировать упрощенную модель, отражающую нелинейность и инерционность объекта. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов синтеза системы управления объектом с использованием упрощенной модели и исследование ее работоспособности.

Материалы и методы. Для синтеза алгоритмов управления концентрацией целевого продукта в химическом реакторе использован метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов с применением нелинейной модели статики объекта и линейной модели, характеризующей инерционность. Проблема наличия точки экстремума на статической характеристике решена введением кусочно-постоянной функции в алгоритмы управления.

Результаты. Синтезированы три алгоритма управления, отличающиеся наличием интегральной составляющей и структурой. Показана работоспособность всех трех алгоритмов. Решена задача синтеза алгоритмов управления экстремальным нелинейным объектом – жидкофазным химическим реактором с последовательно-параллельной реакцией – при отсутствии полной математической модели объекта и наличии только экстремальной статической характеристики по каналу регулирования.

Выводы. Предложенный оригинальный подход к синтезу САУ экстремальными объектами (на примере химического реактора), предусматривающий формирование упрощенной динамической модели объекта и аналитический синтез алгоритмов управления методами АКАР, показал работоспособность САУ. Предложенный способ синтеза рекомендуется для решения задач разработки САУ аналогичными объектами различной физической природы при ограниченной информации о динамике объекта.

Ключевые слова: экстремальный объект, химический реактор, статическая характеристика объекта управления, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, нелинейный алгоритм управления, инерционное звено, кусочно-постоянная функция

Alexander Nikolaevich Labutin

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Technical Cybernetics and Automation Department, Russia, Ivanovo, e-mail: lan@isuct.ru

Anatoly Alekseevich Andreenkov

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 32-72-26

Elena Alexandrovna Shuina

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM_ISPU@mail.ru

Synergetic synthesis of control algorithms for extreme objects

Abstract

Background. Due to the absence or limited information about the dynamics of the object, the problem of synthesizing control algorithms of nonlinear technological objects, such as a chemical reactor occurs. At the same time, the static characteristic of the object in the control channel is given and has an extreme nature. Information about the form of the static characteristic and the structure of substance transfer flows in the reactor makes it possible to develop a simplified model that reflects the nonlinearity and inertia of the object. Thus, it is necessary to develop methods of synthesizing a control system using a simplified model and to study its performance.

Materials and methods. To synthesize algorithms for controlling the concentration of the target product in a chemical reactor, the authors have used Analytical Design of Aggregated Regulators method, applying a nonlinear static model of the object and a linear model characterizing the inertia. The issue of the extremum point on the static characteristic has been addressed by introducing a piecewise-constant function into the control algorithms.

Results. Three control algorithms have been synthesized. They differ in having an integral component and structure. The performance of all three algorithms has been demonstrated. The authors have synthesized control algorithms for an extreme nonlinear system – a liquid-phase chemical reactor with a consecutive-parallel reaction. The problem has been addressed under conditions of incomplete mathematical modeling and the availability of only an extreme static characteristic in the control channel.

Conclusions. An unconventional approach to the synthesis of control systems for extreme objects (using a chemical reactor as an example) has been proposed. It provides a simplified dynamic model of the object and analytical synthesis of control algorithms using Analytical Design of Aggregated Regulators method. The performance of control system is shown. The proposed synthesis method is recommended to solve problems of control systems development for similar objects of different physical nature with limited information on the dynamics of the object.

Key words: extreme system, chemical reactor, control object static characteristic, Analytical Design of Aggregated Regulators, nonlinear control algorithm, inertial element, piecewise-constant function

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.086-092

Введение. Как правило, технические и технологические объекты управления (ТОУ) являются нелинейными. Проблема синтеза систем автоматического управления (САУ) такими объектами решается в настоящее время с использованием двух основных подходов.

Первый предполагает линеаризацию исходной модели в окрестности рабочей точки и синтез одноканальных или многоканальных систем управления (СУ) на базе регулятора состояния методами модального управления [1]. При этом основное внимание уделяется обеспечению робастности СУ [1–3].

Второй подход предполагает синтез САУ с использованием исходной нелинейной многомерной модели объекта. Анализ состояния современной прикладной теории управления показывает, что в общем виде данная проблема не решена [4–7]. Необходимо отметить существенный прогресс в развитии современной прикладной теории управления, обусловленный созданием и развитием синергетической теории управления [8, 9], методология которой изначально ориентирована на синтез САУ нелинейными, многосвязными, многомерными объектами методами аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [10–14].

Большой (особый) класс образуют нелинейные объекты, статическая характеристика которых по каналу управлению имеет немонотонный экстремальный характер, так называемые экстремальные объекты [15, 16]. Как правило, рабочая точка объекта расположена в малой окрестности точки экстремума, так как ее положение определяется в результате решения задачи оптимизации процесса функционирования объекта.

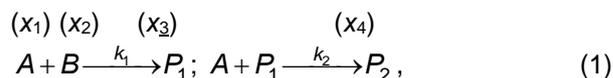
В литературе практически отсутствуют работы, посвященные синтезу СУ экстремальными объектами, за исключением систем адаптивного экстремального регулирования (СЭР) [15–17]. При синтезе СЭР инерционностью объекта управления пренебрегают, используется модель в форме уравнений безынерционного экстремального нелинейного звена [15–17].

Примером экстремального объекта является химический реактор, целью функционирования которого является обеспечение максимального значения концентрации (выхода) целевого продукта или минимального значения концентрации побочного продукта [18].

Не редка ситуация, когда статическая характеристика и рабочая точка на ней определяются экспериментальным способом при отсутствии полной математической модели объекта.

Исходя из цели функционирования реактора, основной задачей СУ является задача управления концентрацией целевого продукта реакции.

Постановка задачи. Объектом управления является жидкофазный химический реактор емкостного типа, в котором реализуется последовательно-параллельная реакция:



где P_1 – целевой продукт реакции; x_i – концентрации соответствующих компонентов; A , B – исходные реагенты, которые подаются в реактор отдельными потоками с расходами v_1 и v_2 соответственно; $k_i = k_{i0} \exp(-E_i / (R(273 + t)))$, $i = 1, 2$, – температурная зависимость констант скоростей; E_i – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; t – температура смеси в реакторе.

Экспериментальным способом были определены режимно-технологические параметры объекта, обеспечивающие максимальное значение концентрации x_3 при заданной нагрузке по реагенту A и фиксированной температуре. Статическая характеристика по каналу регулирования $\Delta v_2 \rightarrow x_3$ представлена на рис. 1.

Ставится задача синтеза алгоритма управления концентрацией x_3 методом АКАР при следующих условиях: отсутствует полная математическая модель динамики объекта, измеряется в реальном времени только x_3 ; заданы статическая характеристика объекта по каналу управления и уравнение исполнительного механизма:

$$\hat{x}_3 = f(\Delta v_2);$$

$$T_{\text{ИМ}} \frac{d\Delta v_2}{d\tau} = -\Delta v_2 + k_{\text{ИМ}} u, \quad (2)$$

где u – управляющий сигнал контроллера; $T_{\text{ИМ}}$, $k_{\text{ИМ}}$ – постоянная времени и коэффициент передачи исполнительного механизма.

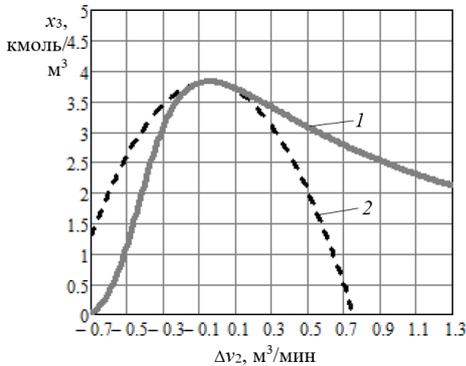


Рис. 1. Статическая характеристика объекта по каналу управления: 1 – полученная экспериментально; 2 – аппроксимация квадратичной зависимостью

Синтез алгоритма управления. Аппроксимируем статическую характеристику в окрестности рабочей точки квадратичной зависимостью

$$\hat{x}_3 = f(\Delta v_2) = a_0 + a_1 \Delta v_2 + a_2 \Delta v_2^2, \quad (3)$$

где $a_0 = 3,808$; $a_1 = -0,57$; $a_2 = -5,96$.

Соотношение (3) – это, по существу, нелинейная модель статике по каналу регулирования. Скорость изменения регулируемой переменной в окрестности статической характеристики будет иметь вид

$$\frac{d\hat{x}_3}{d\tau} = (a_1 + 2a_2 \Delta v_2) \frac{d\Delta v_2}{d\tau}.$$

Однако это уравнение не характеризует инерционность объекта. Предлагается представить объект по каналу регулирования в виде последовательного соединения двух звеньев: статического звена с нелинейной характеристикой, которая позволяет определить значение концентрации \hat{x}_3 при заданном значении регулирующего воздействия Δv_2 в установившемся режиме, и линейного звена, характеризующего инерционность объекта. В предположении, что в реакторе реализуется режим идеального перемешивания жидкости, инерционность процесса изменения концентрации x_3 предлагается характеризовать аperiodическим звеном первого порядка:

$$T_{\text{об}} \frac{dx_3}{d\tau} + x_3 = \hat{x}_3, \quad (4)$$

где $T_{\text{об}} = V / (v_1 + v_2)$ – постоянная времени звена; V – объем реактора; $(v_1 + v_2)$ – расходы потоков в статике.



Рис. 2. Структура модели объекта управления

Описанный прием разработки нелинейной модели объекта управления успешно применялся в [19] при синтезе СУ процессом экстракции фосфорной кислоты. Структура математической модели объекта представлена на рис. 2.

Полная модель объекта управления имеет следующий вид:

$$\frac{d\Delta v_2}{d\tau} = \frac{1}{T_{\text{ИМ}}} (-\Delta v_2 + k_{\text{ИМ}} u);$$

$$\hat{x}_3 = f(\Delta v_2) = a_0 + a_1 \Delta v_2 + a_2 \Delta v_2^2; \quad (4)$$

$$\frac{dx_3}{d\tau} = \frac{1}{T_{\text{об}}} (-x_3 + \hat{x}_3).$$

Синтез алгоритма управления нелинейным объектом (4) предлагается проводить методом АКАР с использованием процедуры последовательного введения в рассмотрение совокупности инвариантных многообразий [8, 9]. Поскольку канал управления задан (рис. 2), будем использовать «обратную» последовательность инвариантных многообразий (ИМ).

На первом этапе необходимо определить внутреннее управление $\hat{x}_3 = \bar{x}_3$, обеспечивающее технологическое требование к системе управления ($x_3 = \bar{x}_3$), где \bar{x}_3 – заданное значение концентрации. ИМ зададим в виде

$$\psi_1 = (x_3 - \bar{x}_3) = 0. \quad (5)$$

Записав основное функциональное уравнение (ОФУ) $T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$ в развернутом виде, в силу третьего уравнения из (4) получим

$$\bar{x}_3 = x_3 - \frac{T_{\text{об}}}{T_1} (x_3 - \bar{x}_3), \quad (6)$$

где $T_1 > 0$ – настроечный параметр.

На втором этапе необходимо определить внешнее управление u , обеспечивающее равенство $\hat{x}_3 = \bar{x}_3$. Сформируем ИМ в форме

$$\psi_2 = (\hat{x}_3 - \bar{x}_3) = 0. \quad (7)$$

ОФУ $T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ в развернутом виде в силу первых двух уравнений модели (4) примет вид

$$\dot{\hat{x}}_3 = -\frac{1}{T_2} (\hat{x}_3 - \bar{x}_3), \text{ т.е.}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_3 &= \frac{\partial f}{\partial \Delta v_2} \Delta \dot{v}_2 = \frac{\partial f}{\partial \Delta v_2} \left[\frac{1}{T_{\text{ИМ}}} (-\Delta v_2 + k_{\text{ИМ}} u) \right] = \\ &= -\frac{1}{T_2} (\hat{x}_3 - \bar{x}_3). \end{aligned}$$

Из данного соотношения с учетом (3) получим

$$k_{ИМ}u = \Delta v_2 - \frac{T_{ИМ}}{T_2(a_1 + 2a_2\Delta v_2)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + \frac{T_{об}}{T_1} (x_3 - \bar{x}_3) \right], \quad \hat{x}_3 = a_0 + a_1\Delta v_2 + a_2\Delta v_2^2, \quad (8)$$

где $T_1 > 0$, $T_2 > 0$ – настроечные параметры.

Для повышения точности работы СУ в статике необходимо ввести в алгоритм интегральную составляющую от ошибки регулирования. Для этого на первом этапе синтеза ИМ задается в виде $\psi_1 = (x_3 - \bar{x}_3) + z = 0$, где $z = x_3 - \bar{x}_3$. Выражение для астатического алгоритма примет вид

$$k_{ИМ}u = \Delta v_2 - \frac{T_{ИМ}}{T_2(a_1 + 2a_2\Delta v_2)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + T_{об} (K_{П}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{И}z) \right], \quad (9)$$

где $K_{П} = \frac{1}{T_1} + \gamma$, $K_{И} = \frac{\gamma}{T_1}$.

В знаменателе уравнений (8) и (9) присутствует производная $dx_3/d\Delta v_2$, которая равна нулю в точке экстремума статической характеристики $\{\Delta v_2^*, x_{3max}\}$. Алгоритм становится неработоспособным.

Для решения проблемы предлагается использовать в алгоритме кусочно-постоянную функцию, имеющую точку разрыва первого рода, например точку скачка в окрестности значения $\Delta v_2 = \Delta v_2^*$:

$$\delta = \frac{\Delta v_2 - \Delta v_2^*}{|\Delta v_2 - \Delta v_2^*|}.$$

Моделирование системы управления.

Для оценки работоспособности СУ путем моделирования была создана математическая модель химического реактора, в котором реализуется реакция (1). При заданной нагрузке на аппарат по исходному реагенту А (v_1 , $C_{Авх}$), заданной температуре были определены режимно-технологические параметры процесса.

Математическая модель возбужденного движения химической подсистемы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= \frac{1}{V} \left[v_1 C_{Авх} - (v_1 + v_2^0)x_1 + V(-k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3) \right] - \\ &- \frac{x_1}{V} \Delta v_2; \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= \frac{1}{V} \left[v_2 C_{Бвх} - (v_1 + v_2^0)x_2 + V(-k_1x_1x_2) \right] + \\ &+ \frac{C_{Бвх} - x_2}{V} \Delta v_2; \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= f_3(\cdot) = \frac{1}{V} \left[-(v_1 + v_2^0)x_3 + V(k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3) \right] - \\ &- \frac{x_3}{V} \Delta v_2; \\ \frac{d\Delta v_2}{d\tau} &= \frac{1}{T_{ИМ}} (k_{ИМ}u - \Delta v_2), \end{aligned} \quad (10)$$

где $C_{Авх}$, $C_{Бвх}$ – концентрации исходных компонентов во входных потоках.

Значения режимно-технологических и конструктивных параметров процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта (в изотермическом режиме при температуре $t = 80$ °С) следующие: $V = 10$ м³; $v_1 = 0,3$ м³/мин; $v_2 = 0,7$ м³/мин; $C_{Авх} = 20$ кмоль/м³; $C_{Бвх} = 10$ кмоль/м³; $k_{10} = 1,5 \cdot 10^9$ м³/(кмоль·мин); $k_{20} = 1,5 \cdot 10^8$ м³/(кмоль·мин); $E_i = 66520$ кДж/кмоль; $x_1^0 = 0,829$ кмоль/м³; $x_2^0 = 2,51$ кмоль/м³; $x_3^0 = 3,808$ кмоль/м³, значения настроечных параметров – $K_{П} = 0,6$; $K_{И} = 0,09$; $T_1 = 0,2$; $T_{ИМ} = 0,2$; $k_{ИМ} = 1$; $T_2 = 1,67$.

В целях проведения сравнительного анализа получен алгоритм управления (13) с использованием последовательной совокупности ИМ $\psi_1 = \Delta v_2 + v(x_3) = 0$, $\psi_2 = x_3 - \bar{x}_3 + \gamma z$ и модели объекта (10), а также ОФУ в виде $T\dot{\psi}_i + \psi_i = 0$. В полученном алгоритме принято упрощение $\dot{v}(x_3) = 0$, введена δ -функция.

Модифицированные алгоритмы управления с использованием кусочно-постоянной функции δ будут выглядеть следующим образом:

$$k_{ИМ}u = \Delta v_2 - \delta \frac{T_{ИМ}}{T_2(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + K_{П}T_{об}(x_3 - \bar{x}_3) \right], \quad (11)$$

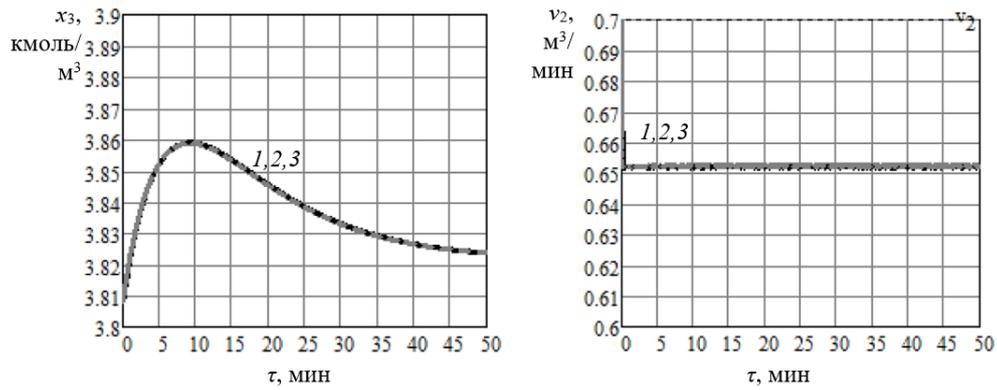
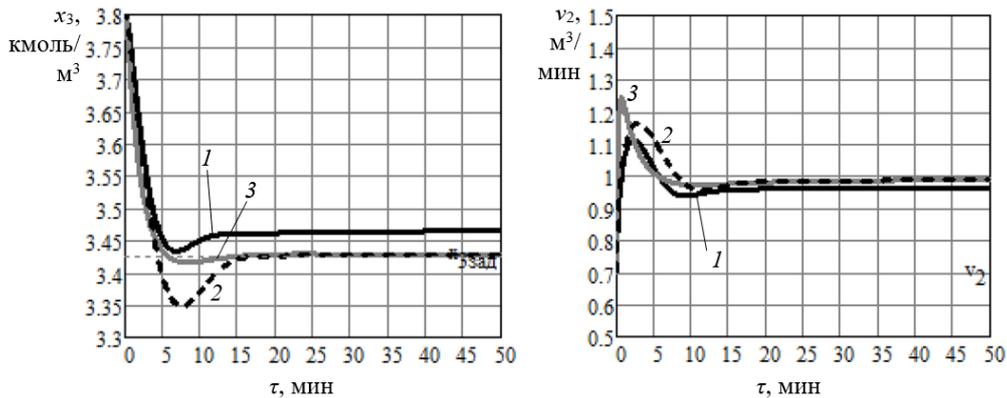
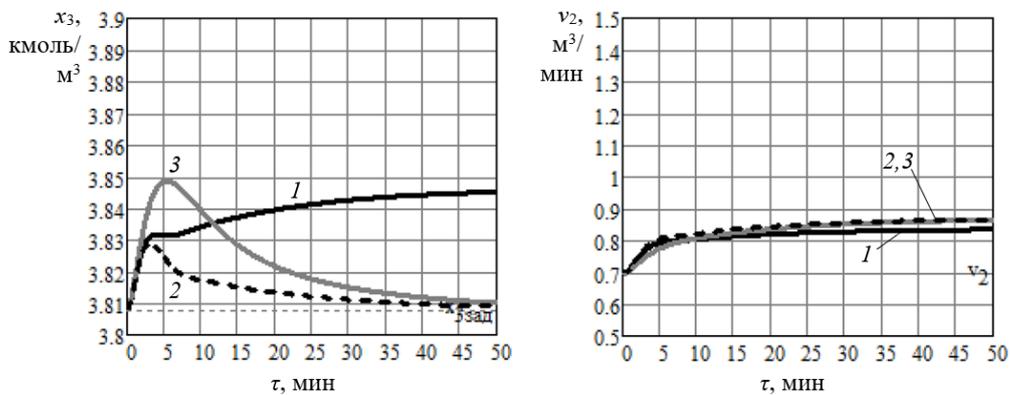
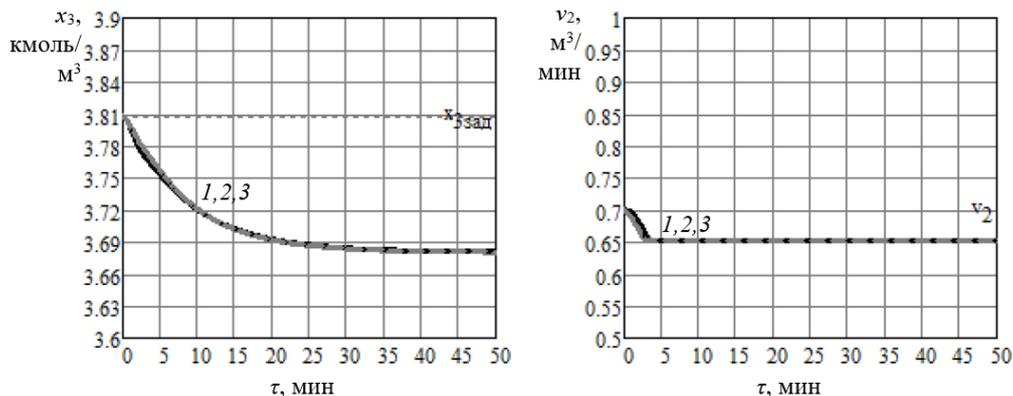
$$k_{ИМ}u = \Delta v_2 - \delta \frac{T_{ИМ}}{T_2(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + T_{об}(K_{П}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{И}z) \right], \quad (12)$$

$$k_{ИМ}u = \Delta v_2 - \frac{T_{ИМ}}{T_1} \left(\Delta v_2 - \frac{1}{d_3} \left[-\delta (K_{П}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{И}z) - f_3(x_3) \right] \right). \quad (13)$$

Анализ работоспособности проведен путем моделирования системы управления с использованием модели объекта (10). Предполагается возможность измерения только концентрации x_3 и расхода v_2 .

На всех представленных ниже графиках (рис. 3–6) показаны результаты, полученные с применением δ в алгоритмах (11), (12) и (13).

На рис. 3 процесс управления устойчивый, но так как заданное значение $\bar{x}_3 = x_3^0 + 0,1x_3^0$ превышает возможное (см. рис. 1), алгоритмы не изменяют значение v_2 после достижения точки экстремума статической характеристики. Задание \bar{x}_3 недостижимо при существующих параметрах модели. Аналогичная ситуация – при уменьшении $C_{Авх}$ (рис. 6), $C_{Бвх}$, v_1 , t . Таким образом, в указанных случаях наличие δ -функции в алгоритмах обеспечивает устойчивый процесс управления и наименьшую статическую ошибку.

Рис. 3. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta \bar{x}_3 = 0,1 \bar{x}_3^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)Рис. 4. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta \bar{x}_3 = -0,1 \bar{x}_3^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)Рис. 5. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{\text{Авх}} = 0,1 C_{\text{Авх}}^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)Рис. 6. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{\text{Авх}} = -0,1 C_{\text{Авх}}^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)

При уменьшении задания $\Delta \bar{x}_3 = -0,1 \bar{x}_3^0$ (рис. 4) или увеличении $C_{Двх}$ (рис. 5) система управления обеспечивает равенство $x_3 = \bar{x}_3$. Все алгоритмы показали работоспособность, статическая ошибка при этом отсутствует.

Выводы. Предложенный оригинальный подход к синтезу САУ экстремальными объектами (на примере химического реактора), предусматривающий формирование упрощенной динамической модели объекта и аналитический синтез алгоритмов управления методами АКАР, путем компьютерного моделирования СУ с использованием полной модели объекта показал работоспособность САУ, что позволяет рекомендовать предложенный способ синтеза для решения задач разработки САУ аналогичными объектами различной физической природы при ограниченной информации о динамике объекта.

Список литературы

1. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Новые структурные решения в области систем модального управления // Известия ТРТУ. – 2004. – № 2(37). – С. 102–111.
2. Тютиков В.В., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В. Условия параметрической грубости САУ с регуляторами состояния // Известия ТРТУ. – 2005. – № 1(45). – С. 53–62.
3. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.
4. Красовский А.А. Развитие и становление современной теории управления // Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 13–34.
5. Колесников А.А. Проблемы теории аналитического конструирования нелинейных регуляторов // Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 35–129.
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебник и практикум для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2021. – 441 с.
7. Филиповский В.М. Системы управления в пространстве состояний: учеб. пособие. – СПб., 2022. – 75 с.
8. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ; М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
9. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: МЭИ, 2016. – 280 с.
10. Веселов Г.Е., Сеницын А.С. Синтез системы управления адаптивной подвеской с учетом физических ограничений амортизатора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7(168). – С. 170–181.
11. Колесников А.А., Кузьменко А.А. Нелинейный синтез законов управления турбогенератором: интегральная адаптация // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 84–89.
12. Кузьменко А.А., Сеницын А.С., Сеницына А.А. Адаптивное управление энергоустановкой с

нелинейным наблюдателем состояния // Информатика и системы управления. – 2016. – № 4. – С. 103–114.

13. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Аналитический синтез системы управления химическим реактором // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 3. – С. 318–322.

14. Робастное управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе / А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, В.А. Зайцев, Г.В. Волкова // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61, вып. 12. – С. 130–136.

15. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.

16. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

17. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974. – 270 с.

18. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Анализ и оптимальный синтез химического реактора как объекта управления // Химическая промышленность. – 2018. – Т. 95, № 5. – С. 241–248.

19. Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства фосфорной кислоты / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков, В.В. Соколов и др. // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 7. – С. 24–29.

References

1. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. Novye strukturnye resheniya v oblasti sistem modal'nogo upravleniya [New Structural Solutions in Modal Control Systems]. *Izvestiya TRTU*, 2004, no. 2(37), pp. 102–111.
2. Tyutikov, V.V., Kotov, D.G., Tararykin, S.V. Usloviya parametricheskoy grubosti SAU s regulatorami sostoyaniya [Conditions of Parametric Robustness for Automatic Control Systems with State Regulators]. *Izvestiya TRTU*, 2005, no. 1(45), pp. 53–62.
3. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob'ektami* [Robust Modal Control of Technological Objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.
4. Krasovskiy, A.A. Razvitie i stanovlenie sovremennoy teorii upravleniya [Development and Formation of Modern Control Theory]. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and Problems of Control Theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 13–34.
5. Kolesnikov, A.A. Problemy teorii analiticheskogo konstruirovaniya nelineynykh regulatorov [Problems of the Theory of Analytical Design of Nonlinear Regulators]. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and Problems of Control Theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 35–129.
6. Kim, D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernye, nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Theory of Automatic Control. Multidimensional, Nonlinear, Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2021. 441 p.
7. Filipovskiy, V.M. *Sistemy upravleniya v prostanstve sostoyaniy* [Control Systems in State Space]. Saint-Petersburg, 2022. 75 p.
8. Kolesnikov, A.A. *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* [Synergetic Theory of Control]. Taganrog: TRTU; Moscow: Energoatomizdat, 1994. 344 p.
9. Kolesnikov, A.A., Veselov, G.E., Kuz'menko, A.A. *Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem*

upravleniya protsessami generirovaniya elektroenergii [New Technologies for Designing Modern Control Systems for Electricity Generation Processes]. Moscow: MPEI, 2016. 280 p.

10. Veselov, G.E., Sinitsyn, A.S. Sintez sistemy upravleniya adaptivnoy podveskoy s uchetom fizicheskikh ogranicheniy amortizatora [Synthesis of an Adaptive Suspension Control System Considering Physical Constraints of a Damper]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki*, 2015, no. 7(168), pp. 170–181.

11. Kolesnikov, A.A., Kuz'menko, A.A. Nelineynyy sintez zakonov upravleniya turbogeneratorom: integral'naya adaptatsiya [Nonlinear Synthesis of Turbo Generator Control Laws: Integral Adaptation]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2012, no. 5, pp. 84–89.

12. Kuz'menko, A.A., Sinitsyn, A.S., Sinitsyna, A.A. Adaptivnoe upravlenie energoustanovkoy s nelineynym nablyudatelem sostoyaniya [Adaptive Control of a Power Plant with a Nonlinear State Observer]. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2016, no. 4, pp. 103–114.

13. Labutin, A.N., Nevinityn, V.Yu. Analiticheskiy sintez sistemy upravleniya khimicheskim reaktorom [Analytical Synthesis of a Chemical Reactor Control System]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 318–322.

14. Labutin, A.N., Nevinityn, V.Yu., Zaytsev, V.A., Volkova, G.V. Robastnoe upravlenie kontsentratsiey tselovogo produkta v khimicheskoy reaktore [Robust Control of Target Product Concentration in a Chemical Reactor]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2018, vol. 61, issue 12, pp. 130–136.

15. Aleksandrov, A.G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989. 263 p.

16. Churakov, E.P. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 256 p.

17. Rastrigin, L.A. *Sistemy ekstremal'nogo upravleniya* [Extremal Control Systems]. Moscow: Nauka, 1974. 270 p.

18. Labutin, A.N., Nevinityn, V.Yu., Volkova, G.V. Analiz i optimal'nyy sintez khimicheskogo reaktora kak ob'ekta upravleniya [Analysis and Optimal Synthesis of a Chemical Reactor as a Control Object]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2018, vol. 95, no. 5, pp. 241–248.

19. Krivonosov, V.A., Babenkov, V.A., Sokolov, V.V., Shibanov, E.Yu., Perekrestov, V.P. Matematicheskaya model' protsessa ekstraktsii i fil'tratsii proizvodstva fosfor-noy kisloty [Mathematical Model of the Extraction and Filtration Process in Phosphoric Acid Production]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2013, no. 7, pp. 24–29.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 3

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 16.06.2025. Выход в свет 30.06.2025. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 11,35. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8