

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Андреенков А.А., Лабутин А.Н., Волкова Г.В.

Андреенков Анатолий Алексеевич, Лабутин Александр Николаевич, Волкова Галина Витальевна
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.
E-mail: lan@isuct.ru

В статье представлены результаты решения задачи синтеза алгоритмов управления экстремальным нелинейным объектом (на примере жидкофазного химического реактора непрерывного действия с перемешиванием) в условиях ограниченной информации о динамике объекта. Статическая характеристика объекта по каналу регулирования задана в виде квадратичной зависимости. Синтез безынерционного и астатического алгоритмов управления осуществлен методами аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Для сравнительного анализа алгоритмов проведен каскадный синтез закона управления в предположении, что динамическая модель объекта задана. Моделирование системы управления показало работоспособность синтезированных алгоритмов: устойчивость переходных процессов управления, отсутствие статической ошибки. Предложенный подход к разработке системы управления может быть распространен и на случаи нелинейных статических характеристик, отличных от квадратичной формы.

Ключевые слова: синергетическая теория управления, алгоритм управления, математическая модель, химический реактор, система управления

SYNTHESIS AND SIMULATION OF CONTROL SYSTEMS FOR AN OBJECT WITH EXTREME STATIC CHARACTERISTICS

Andreenkov A.A., Labutin A.N., Volkova G.V.

Andreenkov Anatoly Alekseevich, Labutin Alexander Nikolaevich, Volkova Galina Vitalievna
Ivanovo State University of Chemistry and Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.
E-mail: lan@isuct.ru

The paper presents the results of solving the problem of synthesizing control algorithms for an extreme nonlinear system, exemplified by a continuous stirred-tank liquid-phase chemical reactor (CSTR), under conditions of limited information about the system dynamics. The system's static characteristic in the control channel is given as a quadratic dependence. The synthesis of inertia-free and astatic control algorithms was carried out using the method of analytical design of aggregated regulators. For comparative analysis of the algorithms, a cascade-based control law synthesis was performed under the assumption that the dynamic model of the system is known. Simulation of the control system demonstrated the operability of the synthesized algorithms, ensuring stable transient responses and the absence of steady-state error. The proposed approach to control system development can be extended to cases with nonlinear static characteristics other than the quadratic form.

Keywords: synergetic control theory, control algorithm, mathematical model, chemical reactor (CSTR), control system

Проблема синтеза нелинейных систем автоматического управления (САУ) сложна и многообразна в силу многообразия объектов управления по характеру протекающих в них физико-химических процессов, по назначению и цели

функционирования. Общий комплекс свойств сложных объектов, порождающих проблему синтеза алгоритмов управления – это многомерность, многосвязность, нелинейность, отсутствие возможности полного измерения вектора состояния в

режиме реального времени, неопределённость информации о структуре и параметрах математической модели [1]. Анализ состояния современной прикладной теории управления показывает, что в общем виде данная проблема не решена [2-4].

Следует отметить, что существенным прорывом в становлении современной прикладной теории управления является создание и развитие синергетической теории управления (СТУ) [5-6]. Методология СТУ изначально ориентирована на нелинейные и многосвязные математические модели динамики объекта, что позволило успешно решать задачи синтеза систем управления (СУ) объектами различной природы [7-11].

Большой класс образуют нелинейные объекты, статическая характеристика которых по каналу управления имеет немонотонный экстремальный характер [12-13]. Это объекты, в которых протекают процессы, ведущие к противоположным результатам. Такие объекты называют экстремальными [12]. В точке экстремума или в малой окрестности её расположена рабочая точка. Особенность объекта заключается в том, что в точке экстремума знак коэффициента передачи меняется на противоположный, что необходимо учитывать при синтезе САУ. К сожалению, в литературе мало работ, посвященных синтезу САУ экстремальными объектами. Исключением являются работы по синтезу систем адаптивного экстремального регулирования (СЭР) [12-14], которые исторически являются первыми системами адаптивного типа. При синтезе СЭР в соответствии с решаемой задачей системы, инерционностью экстремального объекта пренебрегают – используют модель в форме уравнений безынерционного экстремального объекта регулирования [12]. Ярким примером экстремального объекта является химический реактор.

Как правило задачей оптимального синтеза химического реактора является определение режимно-технологических и конструктивных параметров, обеспечивающих максимальное значение концентрации целевого продукта или минимальное значение побочного [15-18]. Отсюда следует, что основной задачей СУ реактором является задача управления концентрацией целевого продукта.

Постановка задачи. В жидкофазном химическом реакторе емкостного типа реализуется двухстадийная экзотермическая химическая реакция: $A + B \xrightarrow{k_1} P_1, A + P_1 \xrightarrow{k_2} P_2$, где А и В – исходные реагенты; P1 – целевой продукт; P2 – побочный продукт; k1, k2 – константы скоростей стадий.

В реактор объемом V подаются исходные компоненты отдельными потоками. Смесь из реактора забирается насосом. Для отвода теплоты и стабилизации температуры в реакторе аппарат снабжен рубашкой, в которую поступает хладагент. В соответствии с целью функционирования объекта основной задачей системы автоматизации и управления (САиУ) является задача управления концентрацией компонента P₁ в реакционной смеси путём изменения расхода входного потока одного из исходных реагентов. Для решения задачи синтеза алгоритмов управления концентрацией предлагается использовать модель химической подсистемы в предположении постоянства температуры процесса.

В предположении, что имеется информация о кинетических закономерностях реакции, математическая модель возбужденного движения химической подсистемы запишется:

$$\frac{dx_1}{d\tau} = f_1 + d_1 \Delta v_2, \frac{dx_2}{d\tau} = f_2 + d_2 \Delta v_2, \frac{dx_3}{d\tau} = f_3 + d_3 \Delta v_2, \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta v_2}{d\tau} = \frac{1}{T_{ИМ}} (k_{ИМ} u - \Delta v_2), \quad (2)$$

где

$$f_1 = \frac{1}{V} [v_1 C_{Aex} - (v_1 + v_2^0) x_1 + V(-k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3)],$$

$$d_1 = -\frac{x_1}{V};$$

$$f_2 = \frac{1}{V} [v_2 C_{Bex} - (v_1 + v_2^0) x_2 + V(-k_1 x_1 x_2)],$$

$$d_2 = \frac{C_{Bex} - x_2}{V};$$

$$f_3 = \frac{1}{V} [-(v_1 + v_2^0) x_3 + V(k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3)],$$

$$d_3 = -\frac{x_3}{V};$$

Δv_2 – изменение расхода относительно значения в статике – регулирующее воздействие, u – управляющий сигнал контроллера, $T_{ИМ}$, $k_{ИМ}$ – постоянная времени и коэффициент передачи исполнительного механизма соответственно, v_1 , v_2 – расходы потоков исходных компонентов; $C_{Aвх}$, $C_{Bвх}$ – концентрации исходных компонентов во входных потоках; v – расход смеси на выходе из реактора; x_4 – температура смеси в реакторе; x_1 , x_2 , x_3 – концентрации веществ А, В, P₁; V – объем смеси в реакторе, $k_i = k_{i0} \exp(-E_i / R(273 + x_4))$, $i = 1, 2$ – температурная зависимость констант скоростей; E_i – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная.

Значения режимно-технологических и конструктивных параметров процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта (в изотермическом режиме $x_4 = 80^\circ\text{C}$) следующие: $V = 10 \text{ м}^3$; $v_1 = 0.3 \text{ м}^3/\text{мин}$; $v_2 = 0.7 \text{ м}^3/\text{мин}$; $C_{\text{АВХ}} = 20 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $C_{\text{ВВХ}} = 10 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $k_{10} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})$; $k_{20} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})$; $E_i = 66520 \text{ кДж}/\text{кмоль}$; $x_1^0 = 0.829 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $x_2^0 = 2.51 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $x_3^0 = 3.808 \text{ кмоль}/\text{м}^3$.

Методами СТУ необходимо синтезировать алгоритм управления концентрацией целевого компонента x_3 при следующих условиях:

- отсутствует модель динамики непосредственно объекта - (1): в работе она приведена с целью проведения вычислительного эксперимента для построения статической характеристики по каналу: $\Delta v_2 \rightarrow x_3$ и для анализа работоспособности алгоритма управления;

- переменные состояния x_1 и x_2 не измеряются в реальном масштабе времени, измеряются значения x_3 и Δv_2 .

Таким образом, в указанных условиях необходимо синтезировать алгоритм (регулятор) пониженного порядка [19].

СИНТЕЗ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Путём натурального или как в нашем случае вычислительного эксперимента получена статическая характеристика по каналу управления (рис.

1) Аппроксимируем статическую характеристику в окрестности экстремума квадратичной зависимостью:

$$x_3 = a_0 + a_1 \Delta v_2 + a_2 \Delta v_2^2 \quad (3)$$

Рабочая точка расположена вблизи точки экстремума.

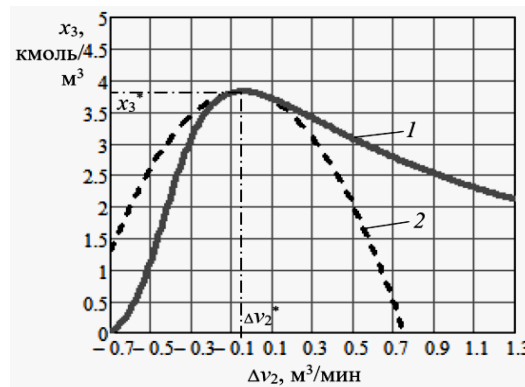


Рис. 1. Аппроксимация статической характеристики объекта, 1 – статическая характеристика объекта, 2 – аппроксимация квадратичной зависимостью, $a_0 = 3.808$, $a_1 = -0.57$, $a_2 = -5.96$

Fig. 1. Approximation of the static characteristic of the object, 1 – static characteristic of the object, 2 – approximation by quadratic function, $a_0 = 3.808$, $a_1 = -0.57$, $a_2 = -5.96$

Зададим инвариантное многообразие (ИМ) в виде $\psi = x_3 - \bar{x}_3 = 0$ ($\bar{x}_3$ – заданное значение регулируемой переменной). Основное функциональное уравнение (ОФУ) в развёрнутом виде запишется:

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{T}(x_3 - \bar{x}_3). \quad (4)$$

Определим производную x_3 из уравнения статической характеристики (3):

$$\dot{x}_3 = (a_1 + 2a_2 \Delta v_2) \Delta \dot{v}_2.$$

С учётом уравнения модели (2) соотношение (4) запишется:

$$(a_1 + 2a_2 \Delta v_2) \left(\frac{1}{T_{ИМ}} [k_{ИМ} u - \Delta v_2] \right) = -\frac{1}{T} (x_3 - \bar{x}_3)$$

Отсюда получим:

$$k_{ИМ} u = \Delta v_2 - \frac{T_{ИМ} (x_3 - \bar{x}_3)}{T(a_1 + 2a_2 \Delta v_2)}, \quad (5)$$

где $T > 0$ – настроечный параметр алгоритма.

Введя в рассмотрение дополнительную переменную состояния z , подчиняющуюся уравнению $dz/d\tau = x_3 - \bar{x}_3$, и макропеременную

$\psi = x_3 - \bar{x}_3 + \gamma z$, получим астатический алгоритм управления:

$$(a_1 + 2a_2 \Delta v_2) \left(\frac{1}{T_{ИМ}} [k_{ИМ} u - \Delta v_2] \right) + \gamma (x_3 - \bar{x}_3) = -\frac{1}{T} (x_3 - \bar{x}_3 + \gamma z),$$

$$k_{ИМ} u = \Delta v_2 - \frac{T_{ИМ}}{(a_1 + 2a_2 \Delta v_2)} K_{II} (x_3 - \bar{x}_3) - \frac{T_{ИМ}}{(a_1 + 2a_2 \Delta v_2)} K_{I\gamma} z, \quad (6)$$

где $K_{II} = \frac{1}{T} + \gamma$, $K_{II} = \frac{\gamma}{T}$.

В знаменателе выражений (5) и (6) присутствует производная $dx_3 / d\Delta v_2$, которая равна нулю в точке экстремума статической характеристики $\{\Delta v_2^*, x_3^*\}$. Алгоритм становится неработоспособным. Для решения проблемы предлагается использовать в алгоритме кусочно-постоянную функцию, имеющую точку разрыва первого рода, например, точку скачка в окрестности значения $\Delta v_2 = \Delta v_2^*$:

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

$$k_{II}u = \Delta v_2 - \delta \frac{T_{II}}{T(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)}(x_3 - \bar{x}_3) = \Delta v_2 - \delta \frac{K_{II}T_{II}}{(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)}(x_3 - \bar{x}_3), \quad (7)$$

$$k_{II}u = \Delta v_2 - \delta \frac{T_{II}}{(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)}(K_{II}(x_3 - \bar{x}_3) - K_{II}z). \quad (8)$$

Для сравнительного анализа проведён каскадный синтез алгоритма управления с использованием последовательной совокупности ИМ $\psi_1 = \Delta v_2 + v(x_3) = 0$ и $\psi_2 = x_3 - \bar{x}_3 + \gamma z$

В предположении, что модель (1) задана, ОФУ имеют вид: $T\dot{\psi}_i + \psi_i = 0$, $i = 1, 2$. Окончательное выражение для алгоритма управления запишется:

$$k_{II}u(\Delta v_2, x_3) = \Delta v_2 - \frac{T_{II}}{T_1} \left(\Delta v_2 - \frac{1}{d_3} [-\delta(K_{II}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{II}z) - f_3(x_3)] \right). \quad (9)$$

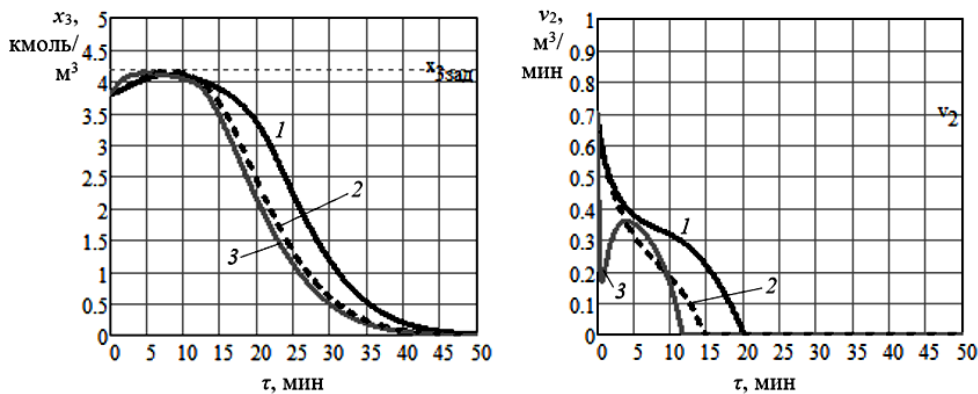


Рис. 3. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta \bar{x}_3 = 0.1 \bar{x}_3^0$, полученные без применения функции δ в алгоритмах (7), (8), (9)

Fig. 3. Transient control processes for set point change $\Delta \bar{x}_3 = 0.1 \bar{x}_3^0$ obtained without using the δ -function in algorithms (7), (8), (9)

В полученном алгоритме принято упрощение $\psi(x_3) = 0$. Анализ работоспособности алгоритмов проведён путём моделирования системы управления с использованием модели объекта (1), (2) при значениях настроечных параметров: $K_{II} = 0.6$, $K_{II} = 0.04$, $K_{II2} = 0.4$, $T_1 = 0.2$, $T_{II} = 0.2$, $k_{II} = 1$.

Предполагается возможность измерения только концентрации x_3 и расхода Δv_2 .

В первую очередь была проведена проверка работоспособности алгоритмов без функции $\delta(\Delta v_2)$. Результаты моделирования, представленные на рис. 3, показывают, что процессы управле-

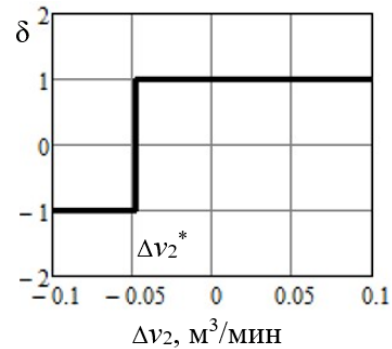
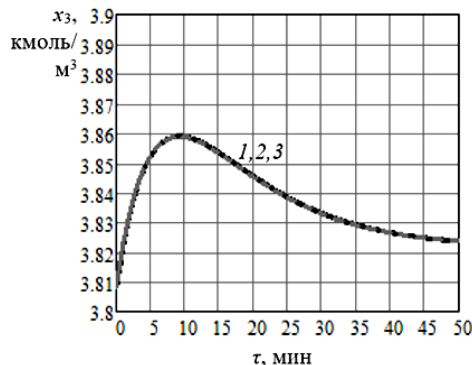


Рис. 2. График функции δ с точкой разрыва первого рода
Fig. 2. Graph of the function δ with a discontinuity point of the first kind

При этом в формулах (5) и (6) следует использовать величину $\Delta v_2 = |\Delta v_2|$. Таким образом, конечные выражения безынерционного и астатического алгоритмов соответственно примут вид:

ния неустойчивы. Объяснить это можно следующим образом: если задание по концентрации $\bar{x}_3 = \bar{x}_3^0 + 0.1\bar{x}_3^0$ превышает её значение в экстремуме x_3^* , то знак коэффициента передачи изменится на противоположный, и значение расхода Δv_2 (регулирующее воздействие) уменьшается до нуля



– реакция прекращается; аналогично при действии внешних возмущений $C_{A_{BX}}, C_{B_{BX}}, v_1$, смещающих статическую характеристику ниже заданного значения $\bar{x}_3^0$. На всех рисунках, представленных ниже, показаны результаты, полученные с применением δ в алгоритмах (7), (8) и (9).

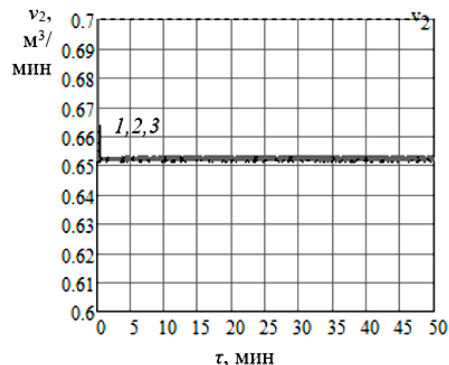


Рис. 4. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta\bar{x}_3 = 0.1\bar{x}_3^0$; алгоритмы (7), (8), (9)

Fig. 4. Transient control processes for set point change $\Delta\bar{x}_3 = 0.1\bar{x}_3^0$; algorithms (7), (8), (9)

На рис. 4 процесс управления устойчивый, но так как заданное значение $\bar{x}_3 = \bar{x}_3^0 + 0.1\bar{x}_3^0$ превышает возможное (рис. 1), алгоритмы не изменяют значение v_2 после достижения точки экстремума статической характеристики. Задание $\bar{x}_3$ недостижимо при существующих параметрах модели и заданных входных потоках. Аналогичная ситуация наблюдается при уменьшении $C_{A_{BX}}, C_{B_{BX}}, v_1, t$ (рис. 7), когда смещение статической характеристики также приводит к физической недостижимости заданного значения $\bar{x}_3$. Таким образом, в указанных случаях наличие δ -функции в алгоритмах обеспечивает устойчивый процесс управления и минимально возможную статическую ошибку.

На рис. 5-7 представлены результаты моделирования системы управления при снижении задания по отношению к базовой величине $\bar{x}_3 < \bar{x}_3^0$ и увеличении входной концентрации одного из реагентов $C_{A_{BX}} = C_{A_{BX}}^0 + \Delta C_{A_{BX}}$, то есть увеличении потока исходного реагента. Все алгоритмы показали работоспособность – статическая ошибка отсутствует, но переходный процесс управления характеризуется различной величиной перерегулирования и временем регулирования.

Переходные процессы управления, полученные с использованием алгоритмов (7) и (8), характеризуются большей величиной перерегулирования и временем регулирования по сравнению с алгоритмом (9). Вместе с тем эти показатели качества лежат в допустимых пределах.

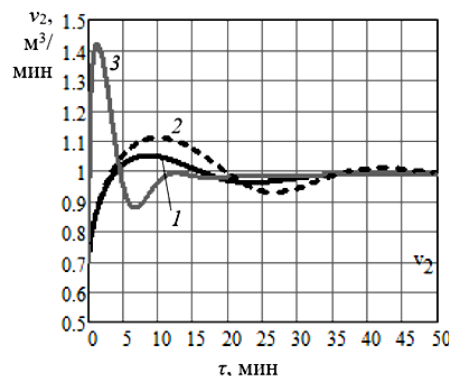
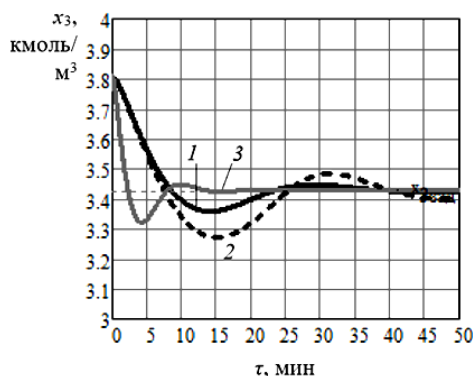


Рис. 5. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta\bar{x}_3 = -0.1\bar{x}_3^0$; алгоритмы (7), (8), (9)

Fig. 5. Transient control processes for set point change $\Delta\bar{x}_3 = -0.1\bar{x}_3^0$; algorithms (7), (8), (9)

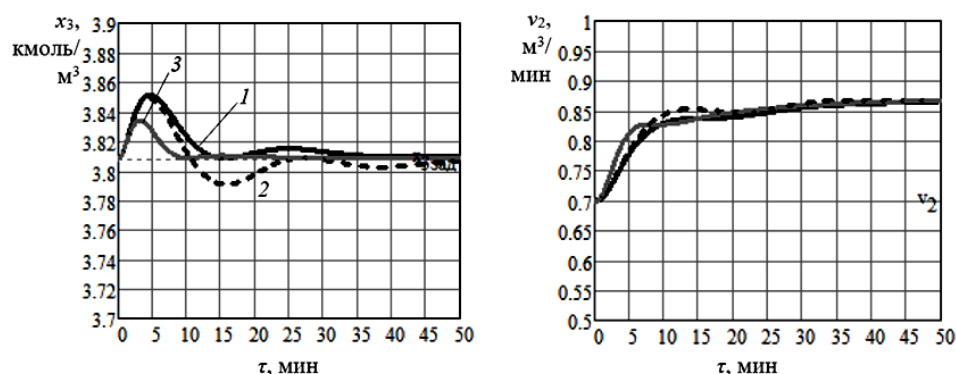


Рис. 6. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{Aex} = 0.1C_{Aex}^0$; алгоритмы (7), (8), (9)

Fig. 6. Transient control processes with a stepwise change in the input concentration $\Delta C_{Aex} = 0.1C_{Aex}^0$; algorithms (7), (8), (9)

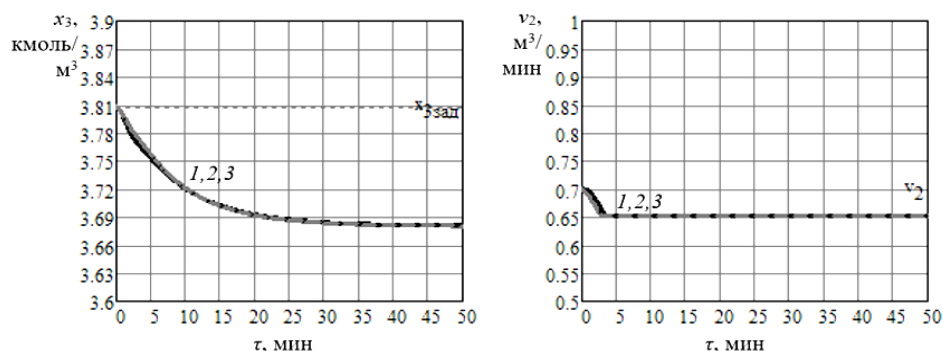


Рис. 7. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{Aex} = -0.1C_{Aex}^0$; алгоритмы (7), (8), (9)

Fig. 7. Transient control processes with a stepwise change in the input concentration $\Delta C_{Aex} = -0.1C_{Aex}^0$; algorithms (7), (8), (9)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к синтезу алгоритмов управления экстремальными объектами в условиях отсутствия полной модели динамики объекта и наличия статической характеристики экстремального вида по каналу регулирования, полученной экспериментально. Безынерционный и астатический алгоритмы, синтезированные методами СТУ, показали удовлетворительную работоспособность: устойчивость и отсутствие статической ошибки.

По таким показателям качества, как перерегулирование и время регулирования, предпочтение

следует отдать безынерционному алгоритму (7). Предложенный подход к синтезу систем управления нелинейными объектами можно рекомендовать при наличии статической характеристики произвольного вида (не только экстремального) по каналу регулирования и отсутствии математической модели динамики.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников А.А. Проблемы теории аналитического конструирования нелинейных регуляторов (с. 35-129). Синергетика и проблемы теории управления. Под ред. А.А. Колесникова. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
2. Красовский А.А. Развитие и становление современной теории управления (с. 13-34). Синергетика и проблемы теории управления. Под ред. А.А. Колесникова. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебник и практикум для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2021. 441 с.

REFERENCES

1. Kolesnikov A.A. Problems of the Theory of Analytical Design of Nonlinear Regulators (P. 35–129). Synergetics and Problems of Control Theory Ed. by A.A. Kolesnikov. Moscow: Fizmatlit, 2004. 504 p.
2. Krasovsky A.A. Development and Formation of Modern Control Theory (P. 13–34). Synergetics and Problems of Control Theory Ed. by A.A. Kolesnikov. Moscow: Fizmatlit, 2004. 504 p.
3. Kim D.P. Theory of Automatic Control. Multidimensional, Nonlinear, Optimal, and Adaptive Systems: Textbook and Workbook for Universities. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Yurait Publishing, 2021. 441 p.

4. **Филиповский В.М.** Системы управления в пространстве состояний: Учебное пособие. СПб., 2022. 75 с.
5. **Колесников А.А.** Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
6. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ. Ч. II. 2000. 559 с.
7. **Веселов Г.Е., Синицын А.С.** Синтез системы управления адаптивной подвеской с учётом физических ограничений амортизатора. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №7 (168). С. 170-181.
8. **Колесников А.А., Кузьменко А.А.** Нелинейный синтез законов управления турбогенератором: интегральная адаптация. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012. №5. С. 84-89.
9. **Кузьменко А.А., Синицын А.С., Синицына А.А.** Адаптивное управление энергоустановкой с нелинейным наблюдателем состояния. *Информатика и системы управления*. 2016. №4. С. 103-114.
10. **Лабути А.Н., Невиницын В.Ю.** Аналитический синтез системы управления химическим реактором. Теор. осн. хим. технологии. 2014. т. 48, №3, С. 318-322.
11. **Лабути А.Н., Невиницын В.Ю., Зайцев В.А., Волкова Г.В.** Робастное управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2018. т. 61, вып. 12. С. 130-136.
12. **Александров А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1989. 263 с.
13. **Чураков Е.П.** Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.
14. **Растринин Л.А.** Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 270 с.
15. **Лабути 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.
16. **Невиницын В.Ю., Лабути А.Н., Хабибулин Н.М.** Симулятор системы контроля и управления теплообменником смешения. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 4(72). С. 40-46. DOI 10.6060/snt.20227204.0006.
17. **Невиницын В.Ю., Лабути А.Н., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В.** Оптимизация реакторного узла для проведения жидкофазных последовательно-параллельных реакций. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 1(73). С. 47-53. DOI 10.6060/snt.20237301.0007
18. **Блиничев В.Н., Лабути А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В.** Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt. 2023 6607.6845j
19. **Аполонский В.В., Тарарыкин С.В.** Методы синтеза редуцированных регуляторов состояния линейных динамических систем. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 6. С. 25-33.
4. **Filipovsky V.M.** Control Systems in State Space: Textbook. St. Petersburg, 2022. 75 p.
5. **Kolesnikov A.A.** Synergetic Control Theory. Taganrog: TRTU; Moscow: Energoatomizdat, 1994. 344 p.
6. Modern Applied Control Theory: Synergetic Approach in Control Theory / Ed. by A.A. Kolesnikov. Taganrog: TRTU Publishing. Part II, 2000. 559 p.
7. **Veslov G.E., Sinitsyn A.S.** Synthesis of an Adaptive Suspension Control System Considering Physical Constraints of the Damper. *Izvestiya SFU. Engineering Sciences*. 2015. N 7 (168). P. 170–181.
8. **Kolesnikov A.A., Kuzmenko A.A.** Nonlinear Synthesis of Control Laws for a Turbo Generator: Integral Adaptation. *Izvestiya SFU. Engineering Sciences*. 2012. N 5. P. 84–89.
9. **Kuzmenko A.A., Sinitsyn A.S., Sinitsyna A.A.** Adaptive Control of a Power Plant with a Nonlinear State Observer. *Informatics and Control Systems*. 2016. N 4. P. 103–114.
10. **Labutin A.N., Nevinityn V.Yu.** Analytical Synthesis of a Chemical Reactor Control System. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V 48. N 3. P. 318–322.
11. **Labutin A.N., Nevinityn V.Yu., Zaitsev V.A., Volkova G.V.** Robust Control of Target Product Concentration in a Chemical Reactor. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61, N 12. P. 130–136.
12. **Alexandrov A.G.** Optimal and Adaptive Systems: Textbook. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989. 263 p.
13. **Churakov E.P.** Optimal and Adaptive Systems: Textbook for Universities. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 256 p.
14. **Rastrigin L.A.** Extremal Control Systems. Moscow: Nauka, 1974. 270 p.
15. **Labutin A.N., Nevinityn V.Yu., Volkova G.V.** Analysis and Optimal Synthesis of a Chemical Reactor as a Control Object. *Chem. Ind.* 2018. Vol. 95, N 5. P. 241–248.
16. **Nevinityn V.Yu., Labutin A.N., Khabibulin N.M.** Simulator of the control and monitoring system of the mixing heat exchanger. *Modern high technologies. Regional application*. 2022. N 4(72). P. 40-46. (in Russian). DOI 10.6060/snt.20227204.0006.
17. **Nevinityn V.Yu., Labutin A.N., Devetyarov A.N., Volkova G.V.** Optimization of the reactor unit for conducting liquid-phase series-parallel reactions. *Modern high technologies. Regional application*. 2023. N 1(73). P. 47-53. DOI 10.6060/snt.20237301.0007
18. **Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G. N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu. N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V.** Problems of developing energy- and resource-saving processes, reactor systems and intensive equipment, modeling and optimal control. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. Issue. 7. P. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j
19. **Apolonsky V.V., Tararykin S.V.** Methods for Synthesizing Reduced State Regulators of Linear Dynamic Systems. *Izvestiya RAN. Theory and Control Systems*. 2014. N 6. P. 25–33.

Поступила в редакцию(Received) 08.03.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 05.04.2025