

**СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ**

Андреенков А.А., Лабутин А.Н., Самарский А.А.

Андреенков Анатолий Алексеевич, Лабутин Александр Николаевич, Самарский Александр Александрович
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 нелинейных астатических алгоритмов управления плохо формализуемым объектом на основе известной статической характеристики по каналу регулирования и модели исполнительного механизма. Синтез алгоритмов управления осуществлен методами аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

Предложены два подхода к синтезу алгоритмов. В первом объект управления рассматривается как пропорциональное звено с нелинейной статической характеристикой, во втором – как последовательное соединение нелинейного статического и линейного динамического звеньев, учитывается инерционность объекта. Для обеспечения устойчивости системы управления вблизи экстремума статической характеристики введена кусочно-постоянная Сигнум-функция, которая позволяет адаптировать закон управления к изменению знака коэффициента передачи.

Работоспособность синтезированных алгоритмов показана путем вычислительного эксперимента на примере жидкокристаллического химического реактора. Сравнительный анализ показал, что алгоритм, полученный с учетом инерционности объекта, обеспечивает меньшее время переходного процесса и меньшую динамическую ошибку.

Предложенный подход может быть эффективно применен при синтезе систем управления сложными нелинейными, многомерными и многосвязными технологическими объектами, особенно на ранних этапах проектирования.

Ключевые слова: аналитическое конструирование агрегированных регуляторов (АКАР), синергетическая теория управления, алгоритм управления, математическая модель, Сигнум-функция

**SYNTHESIS OF NONLINEAR CONTROL ALGORITHMS
FOR POORLY FORMALIZABLE TECHNOLOGICAL OBJECTS**

Andreenkov A.A., Labutin A.N., Samarsky A.A.

Andreenkov Anatoly Alekseevich, Labutin Alexander Nikolaevich, Samarsky Aleksandr Alexandrovich
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 synthesizing nonlinear astatic control algorithms for a poorly formalizable object based on a known static characteristic of the control channel and a model of the actuator. The control algorithms were developed using the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR).

Two approaches to algorithm synthesis are proposed. In the first approach, the controlled object is considered as a proportional element with a nonlinear static characteristic. In the second approach, the object is represented as a series connection of a nonlinear static element and a linear dynamic element, taking into account the object's inertia. To ensure system stability near the extremum of the static characteristic, a piecewise-constant signum function is introduced, which allows the control law to adapt to changes in the sign of the object's transfer coefficient.

Инженерно-технические науки – машиностроение и технологии

The operability of the synthesized algorithms was demonstrated through computational experiments on a liquid-phase chemical reactor. Comparative analysis showed that the algorithm accounting for the object's inertia provides a shorter transient response and lower dynamic error.

The proposed approach can be effectively applied to the synthesis of control systems for complex nonlinear, multidimensional, and interconnected technological objects, particularly at the early stages of design.

Keywords: analytical design of aggregated regulators (ACAR), synergetic control theory, control algorithm, mathematical model, Signum function

Для цитирования:

Андреенков А.А., Лабутин А.Н., Самарский А.А. Синтез нелинейных алгоритмов управления плохо формализуемым технологическим объектом. *Современные научно-исследовательские технологии. Региональное приложение*. 2025. № 4. С. 88-94. DOI: 10.6060/snt.20258404.00012.

For citation:

Andreenkov A.A., Labutin A.N., Samarsky A.A. Synthesis of nonlinear control algorithms for a poorly formalized technological object. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 4. P. 88-94. DOI: 10.6060/snt.20258404.00012.

Методология интегрированного проектирования технологических процессов и систем автоматического управления (САУ) предполагает решение задач оптимального синтеза аппаратурно-технологического оформления процесса и разработки структуры и алгоритмов управления режимами их функционирования [1-3].

Информация о физико-химических законахомерностях проектируемого технологического процесса позволяет четко сформулировать назначение и цель его функционирования, создать математическую модель статики технологического процесса, используемую для оптимального расчета конструктивных и технологических параметров.

Таким образом, на первом этапе эскизного проектирования решаются следующие задачи:

- определение оптимальных значений режимно-технологических и конструктивных параметров реализации технологического процесса, то есть определение координат рабочей точки;
- выбор основной управляемой переменной состояния (или группы переменных) и соответствующего регулирующего воздействия;
- построение статической характеристики по каналу управления, которая, как правило, нелинейная;
- формулировка рекомендаций по функциональной структуре системы автоматического управления.

Вместе с тем на ранней стадии проектирования задача создания САУ решается в условиях неопределенности исходной информации о структуре и параметрах нелинейной математической модели динамики технологического процесса, о возможностях измерения координат состояния объекта управления.

До настоящего времени в большинстве случаев в качестве алгоритмов управления используются линейные ПИД-алгоритмы [4-7]. Это означает, что предполагается линейность объекта в окрестности рабочей точки, определенной при расчете установленного режима. Синтезированные таким образом линейные СУ имеют существенные недостатки: не обладают свойством робастности и даже могут терять устойчивость при существенном изменении входных переменных и действии возмущений.

Преодоление указанных недостатков возможно путем построения адаптивных и робастных систем управления [8-11]. Более мощным и работоспособным средством построения нелинейных систем управления в условиях неопределенности относительно моделей объектов являются методы аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), развитые в синергетической теории управления (СТУ) [8]. В рамках СТУ разработан способ построения робастных систем управления, использующий принцип интегральной адаптации [12-14]. Алгоритмы управления, синтезированные данным способом, компенсируют возмущения, входящие в правые части дифференциальных уравнений модели без их оперативной оценки. Такие возмущения возможно искусственно ввести в плохо формализуемые правые части дифференциальных уравнений с целью их аппроксимации. Так в работе [15] решена задача синтеза системы управления многомерным плохо формализуемым объектом, в дифференциальных уравнениях модели которого по управляемым переменным x_i не определены правые части $f_i(x)$. Эти функции аппроксимируются некоторыми переменными $z_i(x)$, подчиняющимися, например, уравнению $dz_i/dt = \Phi_i(x)$, действие которых компенсируется конструируемым регулятором.

В настоящей работе предлагается способ синтеза алгоритмов управления плохо формализуемым объектом методом АКАР, в максимальной степени учитывающий информацию о математических моделях элементов СУ, доступную на ранних стадиях проектирования.

Постановка задачи. Рассматривается многомерный объект управления, характеризующийся вектором переменных состояния $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ и вектором входных переменных $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_k)^T$. В соответствии с целью функционирования объекта управляемой является некоторая координата состояния $x \in R^n$, регулирующее воздействие v .

По результатам проектных расчетов технологического процесса определена статическая характеристика по каналу регулирования $v \rightarrow x$:

$$x = \varphi(v). \quad (1)$$

В результате эскизной разработки АСУТП выбран исполнительный механизм (ИМ), модель которого задана в виде:

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{1}{T_{IM}}(k_{IM}u - v), \quad (2)$$

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

Необходимо методом АКАР синтезировать алгоритм управления, обеспечивающий перевод объекта из некоторого начального состояния $\{x^0; v^0\}$ в заданное состояние $\{\bar{x}; v\}$.

Синтез алгоритмов управления. Первый способ синтеза. В условиях имеющейся информации о математической модели объекта – соотношения (1) и (2) – определим динамику изменения регулируемой переменной:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial v} \cdot \frac{dv}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial v} \left[\frac{1}{T_{IM}}(k_{IM}u - v) \right]. \quad (3)$$

Получим ОДУ с переменным коэффициентом в силу нелинейности функции $\varphi(v)$. Неопределенность структуры правой части уравнения (3) аппроксимируем некоторым воздействием $z(x)$:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial v} \left[\frac{1}{T_{IM}}(k_{IM}u - v) \right] + z(x). \quad (4)$$

Согласно принципу интегральной адаптации [12-14] изменение $z(x)$ во времени подчиняется уравнению:

$$dz / d\tau = \eta(x - \bar{x}), \quad (5)$$

где \bar{x} – заданное значение управляемой переменной.

Инвариантное многообразие (ИМ), в окрестность которого необходимо перевести объект, зададим в виде:

$$\psi(x, z) = (x - \bar{x}) + \gamma z = 0, \quad (6)$$

где $\gamma > 0$ – некоторый коэффициент. Согласно методу АКАР, под действием управления изменение макро-переменной $\psi(x, z)$ должно подчиняться основному функциональному уравнению

$$T\dot{\psi} + \psi = 0, \quad (7)$$

где $T > 0$ – некоторый параметр.

В развернутом виде ОФУ (7) в силу уравнений модели (2), (4), (5) запишется:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial v} \left[\frac{1}{T_{IM}}(k_{IM}u - v) \right] + z + \eta\gamma(x - \bar{x}) = -\frac{1}{T}(x - \bar{x}) - \frac{\gamma}{T}z.$$

Отсюда закон изменения управления примет вид:

$$k_{IM}u = v - \frac{T_{IM}}{\partial \varphi / \partial v} [K_P(x - \bar{x}) + K_Hz], \quad (8)$$

где $K_P = \frac{1}{T} + \eta\gamma$, $K_H = \frac{\gamma}{T} + 1$ – настроочные параметры алгоритма (5), (8).

Второй способ синтеза. Алгоритм (5), (8) разработан, по существу, для случая представления объекта управления пропорциональным звеном с нелинейной статической характеристикой без учета инерционности процесса изменения регулируемой переменной.

Для учета инерционности предлагается представить объект по каналу регулирования в виде последовательного соединения двух звеньев: статического с нелинейной характеристикой, которая позволяет определить значение регулируемой переменной x при заданном значении регулирующего воздействия v в установившемся режиме, и линейного динамического звена с единичным коэффициентом передачи, характеризующего инерционность объекта, то есть инерционность процесса изменения регулируемой переменной от произвольного значения \hat{x} до величины x :

$$T_{ob} \frac{d\hat{x}}{d\tau} + \hat{x} = x, \quad \hat{x}|_{\tau \rightarrow \infty} = x, \quad (9)$$

где T_{ob} – постоянная времени звена.

Описанный прием разработки нелинейной модели объекта управления успешно применялся в [16] при синтезе СУ процессом экстракции фосфорной кислоты. Структура математической модели объекта представлена на рис. 1.

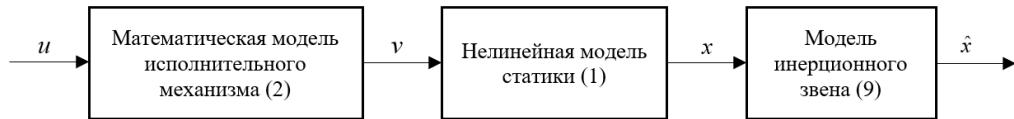


Рис. 1. Функциональная структура объекта
Fig. 1. Functional structure of the object

Неопределенность информации о структуре модели динамики предлагается учесть путем введения переменной $z(x)$ в правую часть уравнения (8). Модель объекта в этом случае примет вид:

$$\frac{d\hat{x}}{d\tau} = \frac{1}{T_{ob}}(x - \hat{x}) + z(x),$$

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial v} \left[\frac{1}{T_{IM}}(k_{IM}u - v) \right], \quad \frac{dz}{d\tau} = \eta(\hat{x} - \bar{x}). \quad (10)$$

В принятых обозначениях переменных (система (10)) целью управления является обеспечение равенства $\hat{x} = \bar{x}$, где \bar{x} – заданное значение.

Синтез алгоритма управления предлагается проводить методом АКАР с использованием процедуры последовательного введения в рассмотрение совокупности инвариантных многообразий [17]. Поскольку канал управления задан (рис. 2), будем использовать «обратную» последовательность инвариантных многообразий [18-19].

На первом этапе необходимо определить «внутреннее» управление $x = \bar{x}$, обеспечивающее технологическое требование к системе управления ($\hat{x} = \bar{x}$). ИМ зададим в виде

$$\psi_1 = (\hat{x} - \bar{x}) + \gamma z = 0. \quad (11)$$

Записав ОФУ $T_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$ в развернутом виде в силу первого и третьего уравнения из (10), получим

$$\frac{1}{T_{ob}}(x - \hat{x}) + z + \gamma\eta(\hat{x} - \bar{x}) = -\frac{1}{T_1}((\hat{x} - \bar{x}) + \gamma z),$$

Отсюда выразим внутреннее управление, обозначив $x = \bar{x}$

$$\bar{x} = \hat{x} - T_{ob} \left[\left(\frac{1}{T_1} + \gamma\eta \right) (\hat{x} - \bar{x}) + \left(\frac{\gamma}{T_1} + 1 \right) z \right], \quad (12)$$

где $T_1 > 0$ – некоторый коэффициент.

На втором этапе необходимо определить внешнее управление u , обеспечивающее перевод значения переменной состояния статического звена x на значение \bar{x} , определяемое уравнением (12). Сформируем ИМ в форме

$$\psi_2 = (x - \bar{x}) = (\varphi(v) - \bar{x}) = 0. \quad (13)$$

ОФУ $T_2\dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ в развернутом виде в силу второго уравнения модели (10) примет вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial v} \left[\frac{1}{T_{IM}}(k_{IM}u - v) \right] = -\frac{1}{T_2}(\varphi(v) - \bar{x}).$$

Из данного соотношения с учетом (12) получим

$$k_{IM}u = v - \frac{T_{IM}}{T_2(\partial \varphi / \partial v)} [\varphi(v) - \bar{x}] =$$

$$= v - \frac{T_{IM}}{T_2(\partial \varphi / \partial v)} \left[(\varphi(v) - \hat{x}) + T_{ob} (K_P (\hat{x} - \bar{x}) + K_H z) \right], \quad (14)$$

где $K_P = \frac{1}{T_1} + \gamma\eta$, $K_H = \frac{\gamma}{T_1} + 1$ – настроочные параметры алгоритма совпадают с параметрами алгоритма (8). Отличие от (8) заключается в наличии настроочного параметра T_2 и постоянной времени объекта T_{ob} , а также отклонения текущего значения регулируемой переменной \hat{x} от переменной состояния статического звена $x = \varphi(v)$.

Анализ работоспособности алгоритмов. С целью проведения сравнительного анализа синтезированных алгоритмов путем моделирования системы выбран объект управления – жидкофазный химический реактор. Математическая модель, значения конструктивных и технологических параметров, вид статической характеристики были представлены в работе [20-21]. Показан нелинейный экстремальный характер статической характеристики по каналу регулирования, которую предложено аппроксимировать квадратичной зависимостью:

$$x = \varphi(v) = a_0 + a_1v + a_2v^2. \quad (15)$$

Производная $\partial \varphi / \partial v = a_1 + 2a_2v$, присутствующая в знаменателе уравнений (8) и (14), равна нулю в точке экстремума статической характеристики $\{v^*, x^*\}$. Алгоритм становится неработоспособным.

Для решения проблемы предлагается использовать в алгоритмах кусочно-постоянную Сигнум-функцию, имеющую точку скачка в окрестности значения $v = v^*$:

$$\delta = \operatorname{sgn}(\Delta v_2 - \Delta v_2^*) = \begin{cases} -1, & \Delta v_2 < \Delta v_2^* \\ 0, & \Delta v_2 = \Delta v_2^* \\ 1, & \Delta v_2 > \Delta v_2^* \end{cases}. \quad (16)$$

Моделирование системы управления проводилось с использованием полной модели объекта [19] и астатических алгоритмов (8), (14), которые с учетом (15) и (16) примут вид:

$$k_{IM} u = v - \delta(v) \frac{T_{IM}}{a_1 + 2a_2 |v|} [K_P(x - \bar{x}) + K_{H1}z], \quad (17)$$

$$k_{IM} u = v - \delta(v) \frac{T_{IM}}{T_2(a_1 + 2a_2 |v|)} \left[(\varphi(v) - \hat{x}) + T_{o\bar{o}} \left(K_P(\hat{x} - \bar{x}) + K_{H2}z \right) \right]. \quad (18)$$

Для определения управлений по соотношениям (17) и (18) предполагается измеримость регулирующего воздействия v и переменной состояния x в алгоритме (17) или \hat{x} в алгоритме (18). Оптимальные значения настроечных параметров определены путем предварительного моделирования: $K_{\Pi} = 1$, $K_{i1} = 0$, $K_{i2} = 0.2$, $T_2 = 0.2$. Также в алгоритмах присутствуют параметры $T_{iM} = 0.2$, $k_{iM} = 1$, $a_1 = -0.57$, $a_2 = -5.96$, $T_{ob} = 10$.

Анализ полученных переходных процессов управления показал устойчивость системы, ковариантность с заданием (рис. 2) и инвариантность к возмущениям (рис. 3). Для сравнения рассмотрены следующие показатели качества: время регулирования и перерегулирование. Наилучшие результаты получены с применением алгоритма (18), синтезированного с учетом инерционности объекта управления (см. рис. 1), так как ниже время регулирования и перерегулирование.

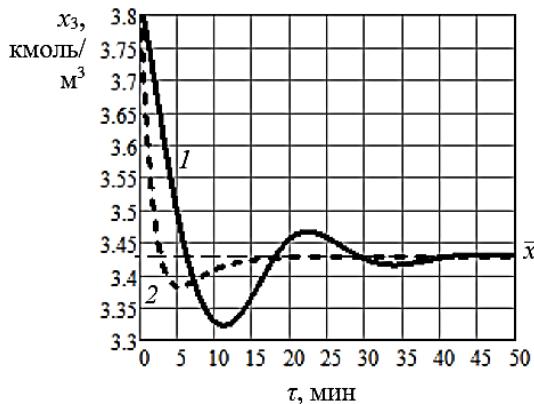


Рис. 2. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta \bar{x}_3 = -0.1 \bar{x}_3^0$; 1 - алгоритм (17), 2 - алгоритм (18)

Fig. 2. Transient control processes for set point change $\Delta \bar{x}_3 = -0.1 \bar{x}_3^0$; 1 - algorithm (17), 2 - algorithm (18)

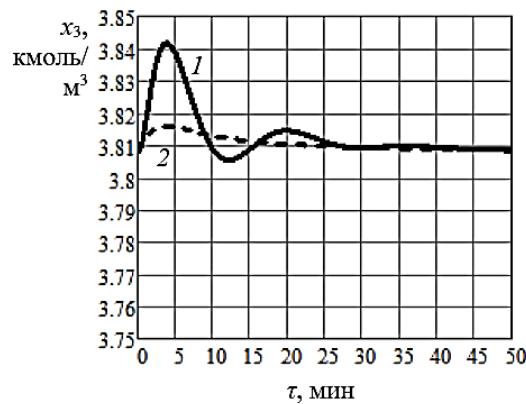
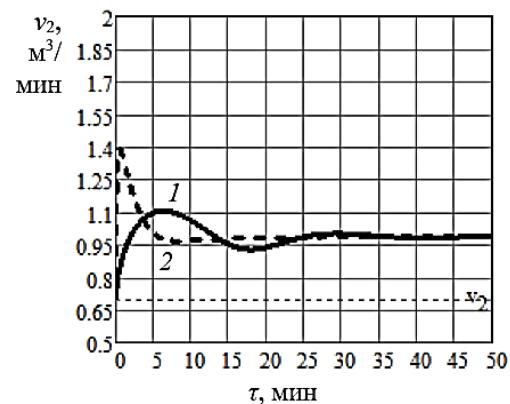


Рис. 3. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{Aex} = 0.1 C_{Aex}^0$; 1 - алгоритм (17), 2 - алгоритм (18)

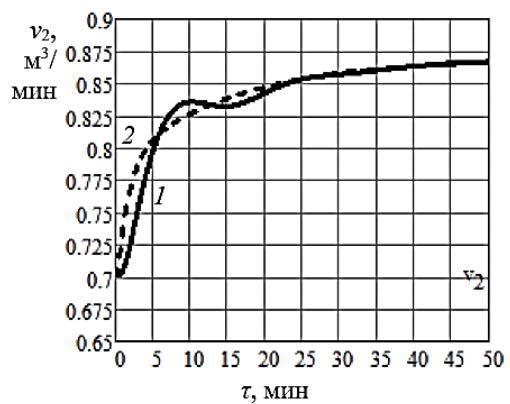


Fig. 3. Transient control processes with a stepwise change in the input concentration $\Delta C_{Aex} = 0.1 C_{Aex}^0$; 1 - algorithm (17), 2 - algorithm (18)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен способ построения нелинейной системы управления плохо формализуемым объектом с экстремальной статической характеристикой по каналу регулирования. Синтезированы нелинейные астатические алгоритмы управления методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов с применением математического описания объекта в виде последовательного соединения статического нелинейного звена и линейного динамического звена с единичным коэффициентом передачи.

Результаты вычислительного эксперимента подтвердили работоспособность разработанной

системы: обеспечиваются устойчивость переходных процессов, высокая точность слежения и стабилизации регулируемой переменной состояния.

Предложенный подход позволяет эффективно решать задачи синтеза алгоритмов управления сложными нелинейными технологическими объектами, отличающимися многомерностью и многосвязностью, и может быть использован на ранних стадиях проектирования технологических процессов и систем автоматического управления.

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

- Синергетика и проблемы теории управления. Под ред. А.А. Колесникова. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
- Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М. Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределенности. М.: Издательский дом «Спектр». 2012. 344 с.
- Блиничев В.Н., Лабутин 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., Натареев 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.20236607.6845j.
- Alshammari O., Mahyuddin M.N., Jerbi H. An Advanced PID Based Control Technique with Adaptive Parameter Scheduling for A Nonlinear CSTR Plant. *IEEE Access.* 2017. V. 9. N 3. P. 1260–1271.
- Sorcia-Vázquez F.D.J., Rumbo-Morales J.Y., Brizuela-Mendoza J.A., Ortiz-Torres G. Experimental Validation of Fractional PID Controllers Applied to a Two-Tank System. *Mathematics.* 2023. V. 11. N 2651. P. 1–17.
- Prabowo Y.A., Ashidiqi H., Fathammubina, Fahrizi A. The Implementation of Cascade Control Strategy for Liquid Temperature Control on Three Tank Systems Using PID Controller. *Jurnal E-Komtek.* 2022. V. 6. N 1. P. 1–14.
- Wosu C.O., Ezech E.M., Ojiong O.E. Development and Assessment of Manual and Automated PID Controllers for the Optimum Production of Ethylene Glycol in a CSTR. *Research Square.* 2024. V. 10. N 6. P. 37–64.
- Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с.
- Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: Wiley. 1995. 563 p.
- Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 550 с.
- Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. New York: Dover. 2012. 848 p.

REFERENCES

- Synergetics and Problems of Control Theory. Ed. by A.A. Kolesnikov. Moscow: Fizmatlit, 2004. 504 p.
- Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Ostrovsky G.M. New Approaches to the Design of Chemical Engineering Processes, Apparatus and Systems under Interval Uncertainty. Moscow: Spectrum Publishing House, 2012. 344 p.
- 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., Nevinitsyn V.Yu., Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of the development of energy- and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intense action, modeling and optimal management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.
- Alshammari O., Mahyuddin M.N., Jerbi H. An advanced PID-based control technique with adaptive parameter scheduling for a nonlinear CSTR plant. *IEEE Access.* 2017. V. 9. N 3. P. 1260–1271.
- Sorcia-Vázquez F.D.J., Rumbo-Morales J.Y., Brizuela-Mendoza J.A., Ortiz-Torres G. Experimental validation of fractional PID controllers applied to a two-tank system. *Mathematics.* 2023. V. 11. N 2651. P. 1–17.
- Prabowo Y.A., Ashidiqi H., Fathammubina, Fahrizi A. Implementation of cascade control strategy for liquid temperature control on three-tank systems using a PID controller. *Jurnal E-Komtek.* 2022. V. 6. N 1. P. 1–14.
- Wosu C.O., Ezech E.M., Ojiong O.E. Development and assessment of manual and automated PID controllers for the optimum production of ethylene glycol in a CSTR. *Research Square.* 2024. V. 10. N 6. P. 37–64.
- Kolesnikov A.A. Synergetic Control Theory. Taganrog: TRTU. Moscow: Energoatomizdat. 1994. 344 p.
- Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: Wiley. 1995. 563 p.
- Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Nonlinear and Adaptive Control of Complex Dynamical Systems. St. Petersburg: Nauka. 2000. 550 p.
- Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. New York: Dover. 2012. 848 p.
- Kolesnikov A.A. Synergetic Methods of Control of Complex Systems: Theory of System Synthesis. 2nd ed. Moscow: Librokom. 2012. 240 p.

Инженерно-технические науки – машиностроение и технологии

12. Колосников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. 2-е изд. М.: Либроком, 2012. 240 с.
13. Кузьменко А.А. Нелинейный синтез закона адаптивного управления частотой вращения гидротурбины: интегральная адаптация. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2015. № 1-2. С. 85-94.
14. Кузьменко А.А., Синицын А.С., Колосникович Д.А. Принцип интегральной адаптации в задаче адаптивного управления системой «гидротурбина - синхронный генератор». *Системы управления и информационные технологии*. 2014. Т. 56. № 2.1. С. 146-150.
15. Колосникова С.И. Алгоритм синтеза системы управления многомерным плохо формализуемым объектом. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №5. С. 211–220.
16. Кривоносов В.А., Бабенков В.А., Соколов В.В. и др. Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства фосфорной кислоты. *Автоматизация в промышленности*. 2013. № 1. С. 24-29.
17. Колосников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. М.: МЭИ, 2016. 280 с.
18. Лабутин А.Н., Андреенков А.А. Каскадный синтез нелинейных синергетических алгоритмов управления концентрацией вещества в химическом реакторе. *Информатика и системы управления*. 2025. № 3(85). С. 80-91.
19. Клюнтина А.Б., Гордина Н.Е., Прокофьев В.Ю. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 3. С. 73–77.
20. Ильин А.А., Ильин А.П., Смирнов Н.Н., Орлова М.В., Гордина Н.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2010. Т. 53. Вып. 5. С. 86–90.
21. Андреенков А.А., Лабутин А.Н., Волкова Г.В. Синтез и моделирование систем управления объектом с экстремальной статической характеристикой. *Современные научно-технические технологии. Региональное приложение*. 2025. № 2 (82). С. 52-58.
13. Kuzmenko A.A. Nonlinear synthesis of the adaptive control law for hydroturbine rotational speed: integral adaptation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki*. 2015. N 1-2. P. 85-94.
14. Kuzmenko A.A., Sinitsyn A.S., Kolesnichenko D.A. Principle of integral adaptation in adaptive control of a “hydroturbine-synchronous generator” system. *Control Systems and Information Technologies*. 2014. V. 56. N 2.1. P. 146–150.
15. Kolesnikova S.I. Algorithm for the synthesis of a control system for a multidimensional poorly formalized object. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2015. N 5. P. 211–220.
16. Krivonosov V.A., Babenkov V.A., Sokolov V.V. et al. Mathematical model of the extraction and filtration process in phosphoric acid production. *Automation in Industry*. 2013. N 1. P. 24–29.
17. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuzmenko A.A. New Technologies for Designing Modern Control Systems for Power Generation Processes. Moscow: MPEI. 2016. 280 p.
18. Labutin A.N., Andreenkov A.A. Cascade synthesis of nonlinear synergetic control algorithms for concentration control in a chemical reactor. *Informatics and Control Systems*. 2025. N 3(85). P. 80–91. DOI: 10.22250/18142400_2025_85_3_80.
19. Klyuntina A.B., Gordina N.E., Prokofiev V.Yu. // *Chem-ChemTech* [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2013. V. 56. N 3. P. 73–77.
20. Ilyin A.A., Ilyin A.P., Smirnov N.N., Orlova M.V., Gordina N.E. // *ChemChemTech* [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2010. V. 53. N 5. P. 86–90.
21. Andreenkov A.A., Labutin A.N., Volkova G.V. Synthesis and simulation of control systems for an object with an extremal static characteristic. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 2 (82). P. 52–58.

Поступила в редакцию(Received) 22.09.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 30.10.2025