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 Андреенков**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», аспирант, Россия, Иваново

**Елена Александровна Шуина**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий 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 позволяют сформировать упрощённую модель, отражающую нелинейность и инерционность объекта.

Необходимо предложить методы синтеза системы управления объектом с использованием упрощенной модели и исследовать её работоспособность.

**Методы и материалы**. Для синтеза алгоритмов управления концентрацией в химическом реакторе использован метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) с применением нелинейной модели статики объекта и линейной модели, характеризующей инерционность. Проблема наличия точки экстремума на статической характеристике решалась введением кусочно-постоянной функции в алгоритмы управления.

**Результаты.** Синтезированы три алгоритма управления, отличающихся наличием интегральной составляющей и структурой. Показана работоспособность всех трёх алгоритмов.

**Выводы.** В работе 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.

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

**Alexander Nikolaevich Labutin**

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

**Anatoly Alekseevich Andreenkov**

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo

**Elena Alexandrovna Shuina**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM\_ISPU@mail.ru

**Synergetic synthesis of control algorithms for extreme systems**

**Abstract**

**Background.** The problem of synthesizing control algorithms for nonlinear technological objects, such as a chemical reactor, is often due to the absence or limitation of information about the object's dynamics. 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 object's nonlinearity and inertia.

It is necessary to propose methods for synthesizing a control system using a simplified model and to investigate its performance.

**Materials and methods.** The synthesis of control algorithms for concentration regulation in a chemical reactor was carried out using the Analytical Design of Aggregated Regulators (ADAR) method, applying a nonlinear static model of the object and a linear model characterizing inertia. The issue of the extremum point on the static characteristic was addressed by introducing a piecewise-constant function into the control algorithms.

**Results.** Three control algorithms were synthesized, differing in the presence of an integral component and structure. The operability of all three algorithms was demonstrated.

**Conclusions.** The problem of synthesizing control algorithms for an extreme nonlinear system — a liquid-phase chemical reactor with a consecutive-parallel reaction — has been addressed in this study under conditions of incomplete mathematical modeling and the availability of only an extreme static characteristic in the control channel.

**Key words:** extreme system, chemical reactor, static characteristic, Analytical Design of Aggregated Regulators (ADAR), nonlinear control algorithm, Inertial element, piecewise-constant function.

DOI:

**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 её 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 следует, что основной задачей СУ является задача управления концентрацией.

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

(*х1*) (*х2*) (*х3*) (*х4*)

; , (1)

где *Р*1 – целевой продукт реакции, *хi* – концентрации соответствующих компонентов; *А*, *В* – исходные реагенты, которые подаются в реактор раздельными потоками с расходами *v*1 и *v*2 соответственно; , *i* = 1, 2 – температурная зависимость констант скоростей; *Ei* – энергия активации, *R* – универсальная газовая постоянная, *t* – температура смеси в реакторе. Экспериментальным способом были определены режимно-технологические параметры объекта, обеспечивающие максимальное значение концентрации *х3* при заданной нагрузке по реагенту *А* и фиксированной температуре. Статическая характеристика по каналу регулирования Δ*v*2→*х3* представлена на рис. 1.

Ставится задача синтеза алгоритма управления концентрацией *х3* методом АКАР при следующих условиях: отсутствует полная математическая модель динамики объекта, измеряется в реальном времени только *х3*; заданы статическая характеристика объекта по каналу управления и уравнение исполнительного механизма

;

, (2)

где *u* – управляющий сигнал контроллера; *Т*ИМ, *k*ИМ – постоянная времени и коэффициент передачи исполнительного механизма.

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

, (3)

где *a*0 = 3.808, *a*1 = -0.57, *a*2 = -5.96.

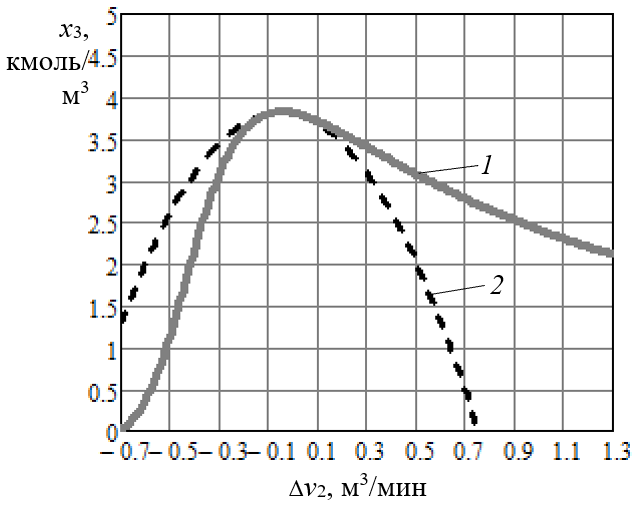


Рисунок 1. Статическая характеристика объекта по каналу управления, 1 – полученная экспериментально, 2 – аппроксимация квадратичной зависимостью

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

.

Однако это уравнение не характеризует инерционность объекта. Предлагается представить объект по каналу регулирования в виде последовательного соединения двух звеньев: статическое звено с нелинейной характеристикой, которая позволяет определить значение концентрации  при заданном значении регулирующего воздействия Δ*v*2 в установившемся режиме, и линейного звена, характеризующего инерционность объекта. В предположении, что в реакторе реализуется режим идеального перемешивания жидкости, инерционность процесса изменения концентрации *х3* предлагается характеризовать апериодическим звеном первого порядка:

, (4)

где *Т*об =*V* /(*v*1+*v*2) - постоянная времени звена, *V* – объём реактора, (*v*1+*v*2) – расходы потоков в статике.

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



Рисунок 2. Структура модели объекта управления

Полная модель объекта управления запишется

,

, (4)

.

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 , обеспечивающее технологическое требование к системе управления (), где  - заданное значение концентрации. ИМ зададим в виде

. (5)

Записав основное функциональное уравнение (ОФУ)  в развёрнутом виде в силу третьего уравнения из (4), получим

, (6)

где *T*1 > 0 – настроечный параметр.

На втором этапе необходимо определить внешнее управление *u*, обеспечивающее равенство . Сформируем ИМ в форме

. (7)

ОФУ  в развёрнутом виде в силу первых двух уравнений модели (4) примет вид

, т.е.



.

Из данного соотношения с учётом (3) получим



, , (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 задаётся в виде , где . Выражение для астатического алгоритма примет вид:



, (9)

где , .

В знаменателе уравнений (8) и (9) присутствует производная , которая равна нулю в точке экстремума статической характеристики . Алгоритм становится неработоспособным.

Для решения проблемы предлагается использовать в алгоритме кусочно-постоянную функцию, имеющую точку разрыва первого рода, например, точку скачка в окрестности значения :

.

**Моделирование системы управления.** С целью оценки работоспособности СУ путём моделирования была создана математическая модель химического реактора, в котором реализуется реакция (1). При заданной нагрузке на аппарат по исходному реагенту *А* (*v*1·*C*Aвх), заданной температуре были определены режимно-технологические параметры процесса.

Математическая модель возбужденного движения химической подсистемы запишется:



,

,

,

, (10)

где *СА*вх, *СВ*вх – 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 ℃) следующие: *V* = 10 м3; *v*1 = 0.3 м3/мин; *v*2 = 0.7 м3/мин; *С*Авх = 20 кмоль/м3; *С*Ввх = 10 кмоль/м3; *k*10 = 1,5·109 м3/(кмоль·мин); *k*20 = 1,5·108 м3/(кмоль·мин); *Ei* = 66520 кДж/кмоль; *x*10 = 0.829 кмоль/м3; *x*20 = 2.51 кмоль/м3; *x*30 = 3.808 кмоль/м3. Значениях настроечных параметров: *К*П = 0.6, *К*И = 0.09, *Т*1 = 0.2, *Т*ИМ = 0.2, *k*ИМ = 1, *Т*2 = 1.67.

С целью проведения сравнительного анализа получен алгоритм управления (13) с использованием последовательной совокупности ИМ ,  и модели объекта (10), а также ОФУ в виде: . В полученном алгоритме принято упрощение , введена *δ*-функция.

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



, (11)



, (12)

, (13)

.

Анализ работоспособности проведён путём моделирования системы управления с использованием модели объекта (10). Предполагается возможность измерения только концентрации *х*3 и расхода *v*2.

На всех представленных ниже графиках показаны результаты, полученные с применением *δ* в алгоритмах (11), (12) и (13). Далее алгоритмы-1, 2 и 3 соответственно.

На рис. 3 процесс управления устойчивый, но так как заданное значение  превышает возможное (см. рис. 1), алгоритмы не изменяют значение *v*2 после достижения точки экстремума статической характеристики. Задание  недостижимо при существующих параметрах модели. Аналогичная ситуация при уменьшении *C*Aвх (рис. 6), *C*Ввх, *v*1, *t*. Таким образом, в указанных случаях наличие *δ-*функции в алгоритмах обеспечивает устойчивый процесс управления и наименьшую статическую ошибку.

При уменьшении задания (рис. 4) или увеличении *C*Aвх (рис. 5) система управления обеспечивает равенство . Все алгоритмы показали работоспособность, статическая ошибка отсутствует.

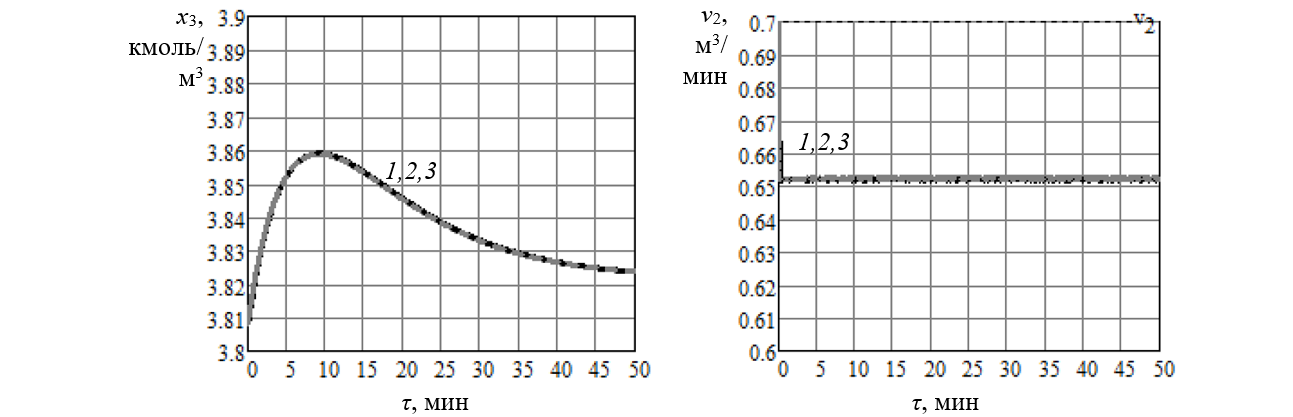


Рисунок 3. Переходные процессы управления при изменении задания ; алгоритмы-1, 2 и 3

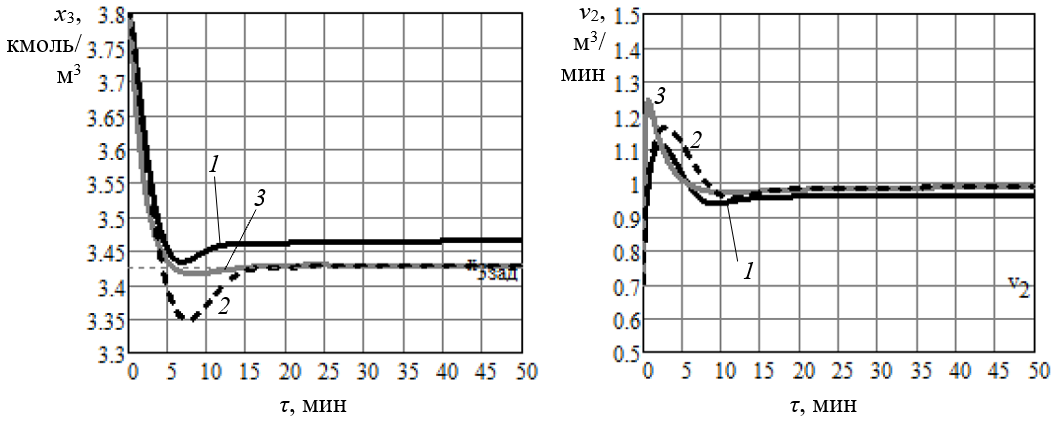


Рисунок 4. Переходные процессы управления при изменении задания ; алгоритмы-1, 2 и 3

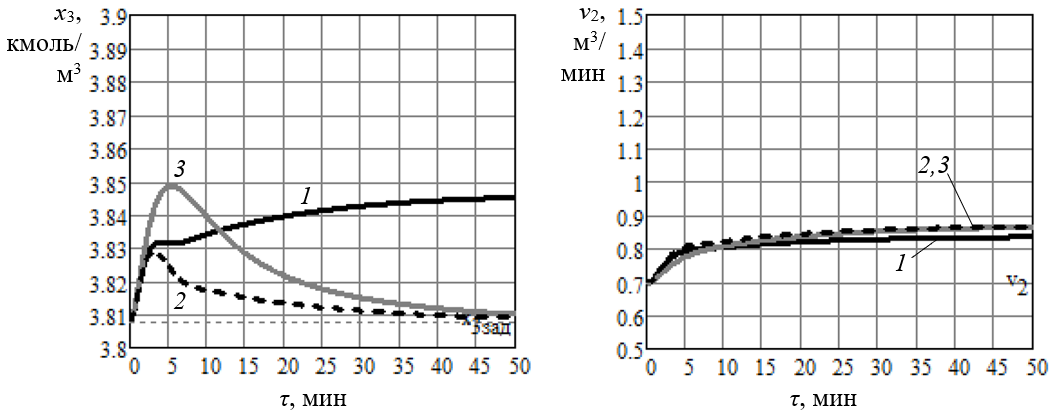


Рисунок 5. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации ; алгоритмы-1, 2 и 3

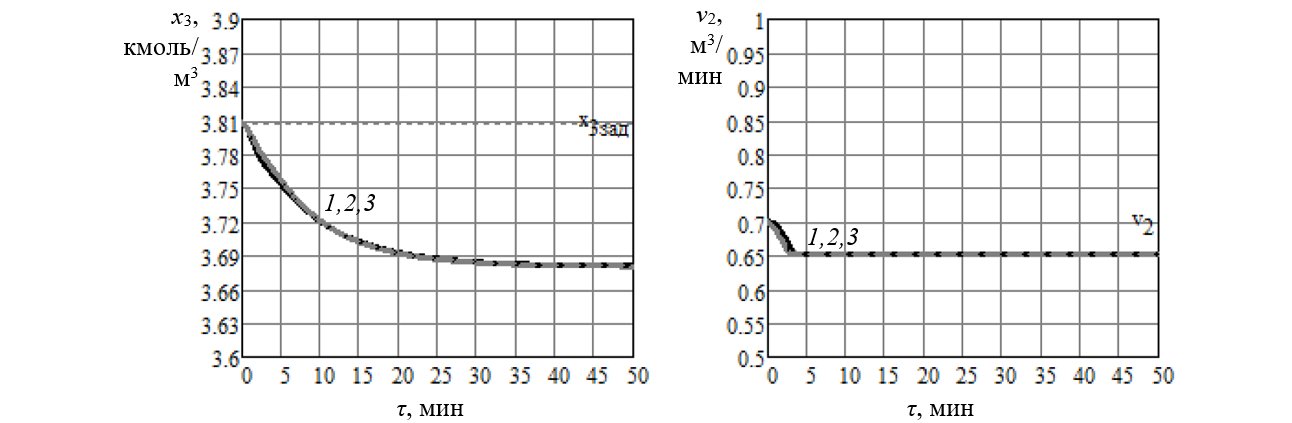


Рисунок 6. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации ; алгоритмы-1, 2 и 3

**Выводы**. В работе 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. Использован подход к построению модели объекта, содержащей нелинейную модель статики и линейную модель динамики – инерционного звена. Разработаны и исследованы три нелинейных алгоритма управления, отличающихся структурой и наличием интегральной составляющей. Для устранения проблемы, связанной с наличием точки экстремума на статической характеристике, в алгоритмы введена кусочно-постоянная функция *δ*, что позволило обеспечить работоспособность системы управления при различных значениях задания и возмущениях. Полученные результаты могут быть использованы при синтезе систем автоматического управления технологическими процессами экстремального типа 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: Изд. Ивановск. энергетического ун-та, 2006. - 256 с.

4. **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.

5. **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.

6. **Ким Д.П.** Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебник и практикум для вузов / Д.П. Ким. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2021. – 441 с.

7. **Филиповский В.М.** Системы управления в пространстве состояний: Учебное пособие / В.М. Филиповский. – 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 c.

10. **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.

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., Синицын А.С., Синицына 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. Теор. осн. хим. технологии, 2014, т. 48, №3, с. 318-322.

14. **Лабутин 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.

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. **Растригин 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. **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.

**References**

1. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. 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. 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. Robust Modal Control of Technological Objects. Ivanovo: Publishing House of Ivanovo State Power Engineering University, 2006. 256 p.

4. Krasovsky, A.A. Development and Formation of Modern Control Theory. In: Synergetics and Problems of Control Theory / Ed. by A.A. Kolesnikov. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 13–34.

5. Kolesnikov, A.A. Problems of the Theory of Analytical Design of Nonlinear Regulators. In: Synergetics and Problems of Control Theory / Ed. by A.A. Kolesnikov. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 35–129.

6. Kim, D.P. Theory of Automatic Control. Multidimensional, Nonlinear, Optimal and Adaptive Systems: Textbook and Practice Book for Universities. 3rd ed., rev. and enl. Moscow: Yurait Publishing, 2021. 441 p.

7. Filipovsky, V.M. Control Systems in State Space: A Textbook. St. Petersburg, 2022. 75 p.

8. Kolesnikov, A.A. Synergetic Theory of Control. Taganrog: TRTU; Moscow: Energoatomizdat, 1994. 344 p.

9. Kolesnikov, A.A., Veselov, G.E., Kuzmenko, A.A. New Technologies for Designing Modern Control Systems for Electricity Generation Processes. Moscow: MPEI, 2016. 280 p.

10. Veselov, G.E., Sinitsyn, A.S. Synthesis of an Adaptive Suspension Control System Considering Physical Constraints of a Damper. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2015, no. 7 (168), pp. 170–181.

11. Kolesnikov, A.A., Kuzmenko, A.A. Nonlinear Synthesis of Turbo Generator Control Laws: Integral Adaptation. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2012, no. 5, pp. 84–89.

12. 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, no. 4, pp. 103–114.

13. Labutin, A.N., Nevinitsyn, V.Yu. Analytical Synthesis of a Chemical Reactor Control System. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 318–322.

14. Labutin, A.N., Nevinitsyn, V.Yu., Zaitsev, V.A., Volkova, G.V. Robust Control of Target Product Concentration in a Chemical Reactor. Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 130–136.

15. Alexandrov, A.G. Optimal and Adaptive Systems: A Textbook. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989. 263 p.

16. Churakov, E.P. Optimal and Adaptive Systems: A University Textbook. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 256 p.

17. Rastrigin, L.A. Extremal Control Systems. Moscow: Nauka, 1974. 270 p.

18. Labutin, A.N., Nevinitsyn, V.Yu., Volkova, G.V. Analysis and Optimal Synthesis of a Chemical Reactor as a Control Object. Chemical Industry, 2018, vol. 95, no. 5, pp. 241–248.

19. 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, no. 1, pp. 24–29.