

На правах рукописи

Степанов Павел Сергеевич

Сделано

**СИНТЕЗ СИСТЕМ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ
РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПРОЦЕССА
ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление техно-
логическими процессами и производствами*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Яковис Леонид Моисеевич

кандидат технических наук, доцент

Ремизова Ольга Александровна

Официальные оппоненты:

Подвальный Семен Леонидович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», кафедра автоматизированных и вычислительных систем, профессор;

Горобченко Станислав Львович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», кафедра автоматизации технологических процессов и производств, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные системы управления играют ключевую роль в обеспечении стабильной и эффективной работы технологических процессов. Повышенные требования к их надёжности требуют решений, устойчивых к значительным неопределённостям — как параметрическим, так и внешним. Эти неопределённости обусловлены изменением свойств сырья и неконтролируемыми возмущениями, которые становятся нормой. Большинство процессов, особенно в нефтехимии, связаны с переработкой сырья, качество которого ухудшается со временем, что вызывает параметрические возмущения. Это требует от систем управления адаптации к изменяющимся характеристикам при сохранении качества продукции. Особенно сложные процессы переработки нефти, как, например, в установке ЭЛОУ-АВТ. Здесь на каждом этапе — от подготовки и подогрева до ректификации — важна точность управления. Сложная динамика, многосвязность, запаздывания, высокая чувствительность к составу и режимам делают задачу управления крайне непростой. Малейшие отклонения могут привести к снижению качества продукции.

В таких условиях необходимы робастные регуляторы, обеспечивающие стабильное управление не только в номинальных, но и в неопределённых условиях. В отличие от классических методов, робастный синтез учитывает диапазоны параметров, заранее обеспечивая устойчивость и приемлемое качество регулирования во всём рабочем диапазоне.

Степень разработанности темы исследования. Развитием отрасли нефтехимии занимались такие выдающиеся ученые, как Менделеев Д.И., Бейльштейн Ф.Ф., Марковников В.В., Энглер К.

В настоящее время данный вопрос нашел отражения в научных работах Павлова С.Ю, Gates В.С., Тюреева И.Я. В 1868-1876 гг. была разработана общая теория регуляторов в работах И. Вышнеградского и Д. Максвелла, которая в дальнейшем стала называться теорией автоматического управления. Впоследствии теорией автоматического управления занимались такие ученые, как А.М. Ляпунов, А. Пуанкаре, Н. Винер, Е.П. Попов, Г. Бодэ, Л. Максвелл, А.А. Вавилов, А.А. Первозванский, Л. Понтрягин, Е.Н. Розенвассер, П. Франк и другие. В их работах были сформулированы математические методы для управления различными про-

цессами, в том числе и химическими. Также их работы посвящены оптимизации, оптимальному управлению, управлению колебательными и инерционными процессами.

Несмотря на большое количество публикаций, многие из разработанных в теории методов не учитывают специфику непрерывных технологических процессов.

Объект исследования – технологические процессы ректификации в нефтехимической отрасли, подлежащие автоматизации в условиях параметрической неопределенности.

Предмет исследования – методы робастного и робастно-адаптивного управления для объектов в условиях параметрической неопределенности.

Цель работы – повышение устойчивости функционирования ректификационной колонны в условиях параметрической неопределенности.

Идея работы заключается в применении системы робастного управления ректификационными колоннами на основе компенсационного и комбинированного методов, что позволяет определить параметры настроек робастных регуляторов, обеспечивающих устойчивость систем регулирования и качество регулирования по основному показателю качества - интегральному квадратичному критерию в критических точках, и сократить процедуры поиска.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследование характеристик ректификационной колонны как объекта управления с параметрической неопределенностью.
2. Разработка методики робастных настроек для сложных объектов.
3. Модификация методики для робастно-адаптивного управления.
4. Разработка программного обеспечения для моделирования систем управления.

Научная новизна работы:

1. Предложен метод робастной настройки регуляторов для сложных систем, обеспечивающий устойчивость при параметрической неопределенности объекта управления. Метод позволяет сохранять работоспособность системы во всем диапазоне изменения параметров.
2. Предложен модифицированный робастно-адаптивный подход,

обеспечивающий не только устойчивость, но и адаптацию к текущим изменениям характеристик объекта.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам: 3. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовки производства (АСТПП) и т.д.; 4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложен новый практический реализуемый метод робастной настройки регуляторов для ректификационных колонн, позволяющий сохранять устойчивость в условиях неопределенности.

2. Предложена модификация робастного метода в виде робастно-адаптивной настройки регуляторов для ректификационных колонн.

3. Предложенные методы позволяют находить настройки для ректификационных колонн (включая одномерные подсистемы) с учетом изменения параметров модели.

4. Применение робастно-адаптивного подхода позволяет улучшить результаты робастного метода за счет динамического выбора промежуточных настроек, которые адаптируются к текущим изменениям параметров объекта. За счет комбинирования робастных настроек и традиционных настроек достигается баланс между устойчивостью и качеством управления.

5. Предложенные методы позволяют оценивать качество управления с использованием типовых критериев, что делает подходы универсальными для различных применений.

6. Сокращение задач поиска обеспечивает ускорение процесса нахождения оптимальных настроек, что способствует достижению заданного качества управления и позволяет снизить сложность поиска настроек.

7. Результаты диссертационных исследований, а именно методика расчета настроек робастных и адаптивно-робастных регуляторов внедрены в деятельности ООО «Комита Автоматизация» (акт внедрения от 5 мая 2025 года).

Методология и методы исследования. Для достижения поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, методы математического моделирования, численного решения дифференциальных уравнений, аппроксимации. Численное решение задач осуществлялось на основе методов математического и компьютерного моделирования. При программной реализации применялись методы функционального программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод настройки регуляторов для одномерных подсистем управления ректификационной колонны сочетает аналитический (беспоисковый) подход и анализ максимальной чувствительности в критических точках, позволяет понизить до 5 раз значение основного показателя качества интегрального квадратичного критерия для граничных значений по сравнению с традиционными методами.

2. Метод робастного управления многомерными системами управления ректификационных колонн, сочетающий аппроксимацию звеном запаздывания и минимаксную оптимизацию за счет интеграции регуляторов, учитывающих перекрестные связи в объекте, обеспечивает улучшение показателей устойчивости и основного показателя интегрального квадратичного критерия до 3 раз для граничных значений по стандартным критериям по сравнению с традиционными подходами.

3. Комбинированный алгоритм настройки параметров регуляторов ректификационной колонны, сочетающий классические и робастные методы с динамической оптимизацией, позволяет за счет адаптивного регулирования весового коэффициента увеличить преимущества перед робастными подходами по основному показателю интегрального квадратичного критерия до 2 раз.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена проведенным имитационным моделированием и экспериментальными исследованиями и подкреплена апробацией основных теоретических положений в статьях и докладах на научных конференциях. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат данным, представленным в литературе и полученным ранее другими авторами.

Апробация результатов диссертации. За последние 3 года принято участие в 8 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ» (24–28 октября

2022 г., Минск; 29 мая–02 июня 2023г., Нижний Новгород; 23–27 октября 2023 г., Минск; 03–07 июня 2024 г., Казань); XIII научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2023» (11–13 апреля 2023 г., Санкт-Петербург); Всероссийская конференция «Неделя науки ФИЗМЕХ» (03–07 апреля 2023 г., 01–05 апреля 2024 г., Санкт-Петербург); Всероссийское совещание по проблемам управления (17–20 июня 2024 г., Москва).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, программной реализацией разработанных методов и алгоритмов.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени докторанаук (далее – Перечень ВАК). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и подана 1 заявка на патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 79 наименований, и содержит 11 приложений. Диссертация изложена на 218 страницах машинописного текста, содержит 359 рисунков и 76 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность за ценные советы, профессиональное руководство и всестороннюю поддержку в процессе научной работы своему первому научному руководителю - доктору технических наук, профессору Яковису Леониду Моисеевичу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках настоящей диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ методов управления нефтехимическими объектами в условиях неопределенности. Рассматриваются особенности автоматизации технологических процессов, исследуются модели

типичных промышленных объектов и их аппроксимации. На основе полученных данных сформулированы задачи по разработке устойчивых систем управления и программного обеспечения для настройки регуляторов. Используются математические модели динамических звеньев с запаздыванием для учета инерционных свойств объектов.

Во второй главе предлагается метод робастного управления для одномерных подсистем управления ректификационной колонны. Беспойсковый подход позволяет использовать стандартные аналитические выражения для настройки коэффициента усиления интегрального регулятора, адаптируя их к параметрам объекта управления. Анализ чувствительности основан на учете самых чувствительных точек зоны неопределенности, что позволяет обеспечить устойчивость и заданное качество регулирования объектов управления.

В третьей главе рассмотренный ранее метод адаптирован для применения к многомерным объектам управления. В основе подхода лежит линейная комбинация двух компонент, позволяющая решать минимаксную оптимизационную задачу, что гарантирует устойчивость системы и достижение требуемого качества регулирования.

В четвертой главе предлагает комбинированный алгоритм настроек параметров регулятора, который представляет собой модификацию робастного метода. Данный алгоритм осуществляет адаптивный подбор весового коэффициента, что позволяет динамически корректировать настройки регулятора в соответствии с текущими характеристиками объекта.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Метод настройки регуляторов для одномерных подсистем управления ректификационной колонны сочетает аналитический (беспойсковый) подход и анализ максимальной чувствительности в критических точках, позволяет понизить до 5 раз значение основного показателя качества интегрального квадратичного критерия для граничных значений по сравнению с традиционными методами.

Для описания поведения ОУ ограничимся линейными дифференциальными уравнениями второго порядка (1):

$$\alpha \ddot{x}(t) + \beta \dot{x}(t) + \gamma x(t) = u(t - \tau), \quad (1)$$

где u – управляющее воздействие, x – выходная переменная.

Обычно характеристическое уравнение ОУ (1) $\alpha p^2 + \beta p + \gamma = 0$ может, в зависимости от коэффициентов, иметь либо два вещественных, либо два комплексно-сопряженных корня. В первом случае передаточная функция ОУ (1) может быть записана в виде (2):

$$x = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} u, \quad (2)$$

где при $T_1 \geq 0, T_2 \geq 0$ – разгонная характеристика ОУ (2) имеет монотонный апериодический характер, а постоянные времени T_1 и T_2 являются параметрами двух последовательных инерционных звеньев первого порядка.

В случае комплексно-сопряженных корней модель (1) может быть представлена в виде (3):

$$x = \frac{ke^{-p\tau}}{p^2 + bp + c} u, \quad (3)$$

где при $\frac{b}{\sqrt{c}} \leq 2, b \geq 0, c > 0$ разгонная характеристика ОУ (3) будет иметь колебательный характер.

Рассмотрим систему управления, описываемую вектором параметров объекта управления (ОУ) $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ и вектором параметров регулятора $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$. Предположим, что задан показатель качества управления, например, интегральный квадратичный критерий (ИКК). Этот показатель обозначим как $J = \varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A})$. Также предположим, что область возможных значений параметров ОУ ограничена областью $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$, которая может представлять собой интервалы возможных значений для каждого параметра модели объекта. Робастные параметры регулятора \mathbf{A}_{rob} находятся через решение минимаксной задачи (4):

$$J_{\min \max} = \min_{\mathbf{A}} \max_{\mathbf{Z} \in \mathbf{G}} \varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A}) \quad (4)$$

В частном случае, когда речь идет о настройке И-регулятора, вектор параметров регулятора \mathbf{A} имеет вид скаляра k_i . Причем, как показывает компьютерное моделирование, для наиболее часто применяемых показателей качества управления (ИКК, интегральный модульный критерий (ИМК), критерий максимального быстродействия ($t_{пер}$)) целевая функция имеет сходное поведение, а именно: для любого фиксированного \mathbf{Z} при изменении коэффициента усиления k_i от

0 до ∞ функция $\varphi(\mathbf{Z}, k_i)$ монотонно убывает до достижения глобального минимума при некотором $k_i^{(opt)}(\mathbf{Z})$, а затем при дальнейшем увеличении k_i возрастает до бесконечности.

Пусть в условиях неопределенности найдено (5):

$$\tilde{k}_i = \min_{\mathbf{Z} \in \mathbf{G}} \{k_i^{(opt)}(\mathbf{Z})\} \quad (5)$$

Для приближенного решения задачи (4) предлагается принять (6):

$$k_i^{(rob)} = \tilde{k}_i. \quad (6)$$

Необходимым условием работоспособности системы управления является ее устойчивость. Поскольку неустойчивость замкнутой системы с параметрами ОУ \mathbf{Z} может иметь место лишь при $k_i > k_i^{(opt)}(\mathbf{Z})$, то ясно, что достаточным условием устойчивости замкнутой системы при всех $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$ является выполнение неравенства $k_i^{(rob)} \leq \tilde{k}_i$. С другой стороны, строгое выполнение неравенства $k_i^{(rob)} < \tilde{k}_i$ явно не рационально, так как в этом случае в силу монотонного убывания по k_i функции $\varphi(\mathbf{Z}, k_i)$ на интервале $(0, \tilde{k}_i)$ условия $\varphi(\mathbf{Z}, k_i^{(rob)}) > \varphi(\mathbf{Z}, \tilde{k}_i)$ будут выполняться при всех $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$. Отсюда следует, что для гарантии устойчивости и вместе с тем обеспечения приемлемого качества управления имеет смысл формировать настройки И-регулятора по правилу (5), (6), причем это правило относится как к колебательным, так и к апериодическим объектам.

Для решения оптимизационной задачи (5) рассмотрим область неопределенности \mathbf{G} , заданную интервалами возможных значений параметров динамической модели. Применительно к модели (2) будем считать заданными интервалы для параметров k, τ, T_1, T_2 . Тогда с учетом (5) и (6) робастная настройка И-регулятора находится путем решения задачи (7):

$$k_i^{(rob)} = \min \left\{ \frac{r}{k(\tau + T_1 + T_2)} \mid \underline{k} \leq k \leq \bar{k}, \underline{\tau} \leq \tau \leq \bar{\tau}, \underline{T}_1 \leq T_1 \leq \bar{T}_1, \underline{T}_2 \leq T_2 \leq \bar{T}_2 \right\} \quad (7)$$

где r – эталонный коэффициент.

Решение этой задачи (7) дает (8):

$$k_i^{(rob)} = \frac{r}{\bar{k}(\bar{\tau} + \bar{T}_1 + \bar{T}_2)} \quad (8)$$

Применительно к модели (3) будем считать заданными интервалы для параметров k, τ, b, c . Робастная настройка И-регулятора $k_i^{(rob)}$ находится путем решения задачи (9):

$$k_i^{(rob)} = \min\left\{\frac{rc}{k(\tau + \pi/\sqrt{c-b^2/4})} \mid k \leq k \leq \bar{k}, \underline{\tau} \leq \tau \leq \bar{\tau}, \underline{c} \leq c \leq \bar{c}, \underline{b} \leq b \leq \bar{b}\right\}. \quad (9)$$

Учитывая, что минимизируемая функция монотонно убывает по k, τ, b и монотонно возрастает по c , получим (10):

$$k_i^{(rob)} = \frac{r\bar{c}}{\bar{k}(\bar{\tau} + \pi/\sqrt{\bar{c}-\bar{b}^2/4})} \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим процесс управления температурой (200 °С) отбора боковой фракции (дизель) в атмосферной ректификационной колонне (рисунок 1). Боковая фракция отбирается с определенной тарелки. Управление ведется подачей жидкости в змеевик или теплообменник на уровне отбора. Если предположить, что все остальные показатели являются константами, то такой процесс можно описать апериодическим звеном первого порядка с параметрами $k = 1, T = 3, \tau = 6$. Зону неопределенности приняли равной 50 %, что соответствует диапазону 180-220 °С. Воспользуемся формулой (8), в частности, для ИКК – $r = 0.739$. Тогда, подставив все известные параметры, получим $k_i^{(rob)} = 0.0365$. Используя найденное значение коэффициента, рассчитаем ИКК для каждой из 27 точек ($n = 3^3$) возможных сочетаний параметров ОУ и решим задачу (4). Для расчета регулятора и перебора параметров было разработано приложение. Во всех точках ОУ остается устойчивым, что говорит о том, что данный регулятор можно считать робастным. Сравним полученный регулятор с ПИ-регулятором, рассчитанным на середину зоны неопределенности по компенсационному методу, а также со стандартным ПИ-регулятором, полученным в MATLAB (рисунок 2). На исходном ОУ предлагаемый регулятор выигрывает по ИКК у номинального (17 %) и у классического (12 %), но проигрывает по $t_{рег}$. При увеличении запаздывания наш регулятор обеспечивает устойчивость, а другие – нет.

Вернемся к задаче (4). Эта задача является сложной, особенно для многомерных объектов, поэтому рассмотрим приближенное решение. Пусть выполнена дискретизация области неопределенности \mathbf{G} в виде набора точек \mathbf{Z}_i , где $i = \overline{1, L}$. Вначале определяются N ($1 \leq N \leq L$) наиболее чувствительных точек \mathbf{Z}_{r_k} , где $k = \overline{1, N}$, для которых показатель ка-

чества управления J имеет максимальное значение. Для найденных точек каким-либо методом рассчитываются соответствующие им настройки регулятора $A_{r_k} = F(Z_{r_k})$, где $k = \overline{1, N}$. Далее, путем решения задачи (4) среди регуляторов A_{r_k} ищем робастный, что вполне возможно при сравнительно небольших значениях L и N . Наиболее простой вариант данного метода предполагает $N = 1$ и интервальную область неопределенности параметров ОУ (11):

$$\underline{Z} \leq Z \leq \overline{Z} \quad (11)$$

или в проекциях (12):

$$z_i \leq z_i \leq \overline{z}_i, i = \overline{1, n} \quad (12)$$

Если предположить, что максимум чувствительности к отклонениям модели ОУ, то есть (13):

$$\max_Z \{ \varphi(Z, A_{nom}) - \varphi(Z_r, A_{nom}) | Z \in G \} \quad (13)$$

достигается при значениях Z , максимально удаленных от номинальных расчетных значений Z_r , то ясно, что при интервальной неопределенности точками максимальной чувствительности могут быть лишь точки Z , лежащие на границах области неопределенности (12). Число таких точек составляет 2^n . Для одномерных ОУ, представленных в виде инерционного звена с запаздыванием, передаточная функция которых содержит 3 параметра ($Z = [k, T, \tau]$), $2^3 = 8$, задача (13) может быть решена перебором 8 вершин параллелепипеда (12) в пространстве (k, T, τ) . Вместе с тем для многомерных ОУ число возможных вариантов резко возрастает. Например, для многомерного ОУ 2×2 , передаточная матрица которого представлена 4 передаточными функциями, общее число параметров модели составляет $3 \times 4 = 12$, и поиск наиболее чувствительной точки требует перебора $2^{12} = 4096$ вариантов. С учетом этого обстоятельства имеет смысл упростить решение задачи (13).

Пусть $Z_{top}^{(k)} = [Z_{top1}^{(k)}, Z_{top2}^{(k)}, \dots, Z_{topn}^{(k)}]^T$ — одна из 2^n крайних точек интервальной области неопределенности (11), так что получим $Z_{topi}^{(k)} = \overline{z}_i, i = \overline{1, n}$. Тогда в качестве приближенного решения задачи нахождения точки максимальной чувствительности \tilde{Z} может быть принято: $\tilde{Z} = [\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_n]^T$,

$$\text{где } \tilde{z}_i = \begin{cases} \underline{z}_i, & \text{если } \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \underline{z}_i, \dots, z_{rn}, A_{nom}) > \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \overline{z}_i, \dots, z_{rn}, A_{nom}), \\ \overline{z}_i, & \text{если } \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \overline{z}_i, \dots, z_{rn}, A_{nom}) \geq \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \underline{z}_i, \dots, z_{rn}, A_{nom}) \end{cases}$$

Таким образом, для определения координат наиболее чувствительной к отклонениям модели ОУ точки \bar{Z} достаточно для каждого из параметров модели z_i определить два показателя частной чувствительности $\varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, z_i, \dots, z_{rn}, A_{nom})$ и $\varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \bar{z}_i, \dots, z_{rn}, A_{nom})$ и сравнить их. Рассматриваются значения показателя качества управления в системе, замкнутой регулятором A_{nom} с настройками, вычисленными на середину зоны неопределенности, ОУ которой отличается от расчетного лишь одним i -м параметром, причем этот параметр принимает либо наибольшее значение \bar{z}_i , либо наименьшее значение \underline{z}_i . При таком способе нахождения наиболее чувствительной точки достаточно смоделировать $2n$ переходных процессов. В то же время при полном поиске необходим перебор 2^n переходных процессов.

В качестве примера возьмем тот же ОУ, использованный ранее. Алгоритм метода максимальной чувствительности заключается в следующем: 1. Определить чувствительности параметров ОУ в зоне неопределенности; 2. Сформировать «подозрительный на робастность ОУ» из чувствительных точек; 3. Проверить устойчивость с регулятором на средних значениях; 4. Рассчитать регулятор для «подозрительного ОУ».

Определена степень чувствительности каждого параметра к потенциальным отклонениям. По полученным результатам составлен «кандидат» в наиболее чувствительные точки пространства: $\bar{k} = 1.5$; $\underline{T} = 1.5$; $\bar{\tau} = 9$. Для полученного объекта рассчитан регулятор. Чтобы убедиться, что найденный регулятор можно называть робастным, проверим устойчивость во всех 27 точках зоны неопределенности. В каждой точке ОУ остается устойчивым, что говорит о том, что данный регулятор можно считать робастным. Продемонстрируем сравнение регуляторов на графиках (рисунок 3). Сначала применим 3 регулятора к исходному ОУ, затем увеличим запаздывание. Сравним по ИКК результаты на исходном ОУ. В данном случае система регулирования с регулятором, рассчитанным методом максимальной чувствительности, выигрывает у номинального на 10 % по ИКК и на 12 % по $t_{пер}$. При увеличении запаздывания только наш регулятор выигрывает у номинального и классического, поскольку только он обеспечивает устойчивость переходного процесса.

2. Метод робастного управления многомерными системами управления ректификационных колонн, сочетающий аппроксимацию звеном запаздывания и минимаксную оптимизацию за счет интеграции регуляторов, учитывающих перекрестные связи в объекте, обеспечивает улучшение показателей устойчивости и основного показателя интегрального квадратичного критерия до 3 раз для граничных значений по стандартным критериям по сравнению с традиционными подходами.

Прежде всего, необходимо выполнить проверку управляемости. При $n = 0$ в установившемся режиме должно выполняться условие: $Ku = y^*$, где $K = H(0)$ – матрица статических коэффициентов усиления динамического объекта $H(p)$.

Применительно к задачам рассматриваемого типа для управляемости требуется, чтобы матрица статических коэффициентов усиления была неособенной, то есть должно выполняться условие: $\Delta_K = \det K \neq 0$ для всех $K \in G_k$. В ходе исследований был обоснован следующий алгоритм проверки робастной управляемости:

1. Осуществлен расчет значений определителя матрицы статических коэффициентов K во всех вершинах l^2 -мерного параллелепипеда (14):

$$\underline{k}_{ij} \leq k_{ij} \leq \overline{k}_{ij}, \quad i, j = \overline{1, l}, \quad (14)$$

то есть реализуется перебор всех 2^{l^2} вариантов, для каждого из которых k_{ij} находятся на нижней или верхней границе неравенств (14).

2. Осуществлен поиск минимального $\underline{\Delta}_K$ и максимального $\overline{\Delta}_K$ значений определителя Δ_K ; 3. Если $\underline{\Delta}_K$ и $\overline{\Delta}_K$ одного знака, то условия робастной управляемости выполняются. Иначе настройки для перехода в требуемый режим не гарантируются.

В качестве примера возьмем ректификационную колонну К-2 (рисунок 1). Колонна К-2 предназначена для разделения нефтяного сырья на фракции. Процесс управления температурой верха (130 °С) и низа (360 °С) колонны можно описать передаточной матрицей размером 2×2 . Управление температурой критически важно для обеспечения качества разделения нефти на фракции. Недиагональные элементы указывают на сильные перекрестные связи, проявляющиеся с запаздыванием. Поэтому

для эффективного управления применяются робастные алгоритмы. В результате исследования было выявлено, что при относительно малой зоне неопределенности (15 %) условия управляемости выполняются, однако при 30 % эти условия нарушаются. Поэтому необходимо определить размер зоны неопределенности, при которой выполняются условия управляемости в статике. Введем параметр δ , определяющий размер зоны неопределенности. Тогда применительно к ОУ получим $\bar{\Delta}_K(\delta) = -k_{11}|k_{22}|(1 - \delta)^2 + k_{21}|k_{12}|(1 + \delta)^2$, $\underline{\Delta}_K(\delta) = -k_{11}|k_{22}|(1 + \delta)^2 + k_{21}|k_{12}|(1 - \delta)^2$.

После дифференцирования получим (15) и (16):

$$\frac{d\bar{\Delta}_K(\delta)}{d\delta} = 2[k_{11}|k_{22}|(1 - \delta) + k_{21}|k_{12}|(1 + \delta)], \quad (15)$$

$$\frac{d\underline{\Delta}_K(\delta)}{d\delta} = -2[k_{11}|k_{22}|(1 + \delta) + k_{21}|k_{12}|(1 - \delta)] \quad (16)$$

Поскольку при $0 \leq \delta < 1$, как следует из (15), $\frac{d\bar{\Delta}_K(\delta)}{d\delta} > 0$, то функция $\bar{\Delta}_K(\delta)$ монотонно возрастает. Из (16) следует также, что $\frac{d\underline{\Delta}_K(\delta)}{d\delta} < 0$, а значит, функция $\underline{\Delta}_K(\delta)$ монотонно убывает. Отсюда ясно, что значение δ , при превышении которого нарушится условие управляемости, может быть найдено из уравнения $\bar{\Delta}_K(\delta^*) = 0$. Это уравнение имеет вид $\bar{\Delta}_K(\delta^*) = -k_{11}|k_{22}|(1 - \delta^*)^2 + k_{21}|k_{12}|(1 + \delta^*)^2 = 0$. Решив уравнение, получим значение радиуса робастной управляемости (17):

$$\delta^* = \frac{\sqrt{k_{11}|k_{22}|} - \sqrt{k_{21}|k_{12}|}}{\sqrt{k_{11}|k_{22}|} + \sqrt{k_{21}|k_{12}|}} \quad (17)$$

Применяя (17) к номинальным значениям коэффициентов k_{ij} ОУ К2, получим $\delta^* = 0.17$. Это значит, что для ОУ зона неопределенности элементов матрицы статических коэффициентов усиления не должна превышать 17 %.

Рассчитаем беспоисковым способом регулятор, который был обоснован ранее для одномерного ОУ. В ходе исследования были получены формулы для: И-регулятора $\mathbf{W}^{(p\delta\delta)}(p) = \frac{\alpha}{p} \tilde{\mathbf{K}}^{-1}$, ПИ-регулятора - $\mathbf{W}^{(p\delta\delta)}(p) = (\beta + \frac{\alpha}{p}) \tilde{\mathbf{K}}^{-1}$, ПИД-регулятора - $\mathbf{W}^{(p\delta\delta)}(p) = (\beta + \frac{\alpha}{p} + \eta p) \tilde{\mathbf{K}}^{-1}$.

Примем, что зона неопределённости $\omega = 0.14$ (температура низа: 353-367 °С, верха: 123-137 °С). Рассчитаем по формуле ПИ-регулятор, где $\beta = \frac{rT_{min}}{\tau_{max}}$, $\alpha = \frac{r}{\tau_{max}}$. Причем T_{min} и τ_{max} возьмем с учётом зоны неопределённости. Таким образом, регулятор имеет вид (18):

$$W(p) = \begin{bmatrix} 0.1363 & -0.1327 \\ 0.04636 & -0.0899 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0145 & -0.01416 \\ 0.00494 & -0.00959 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p} \quad (18)$$

Чтобы улучшить качество робастного управления, определим настройки ПИ-регулятора, используя поисковый комбинированный метод $W_{comb}(p) = \rho W_{aut}(p) + (1 - \rho)W_{car}(p)$. Здесь $W_{aut}(p)$ – передаточная функция ПИ-регулятора, не учитывающая перекрестных связей (но учитывающая неопределённость параметров ОУ), а $W_{car}(p)$ – передаточная функция ПИ-регулятора, рассчитанная ранее. При этом весовой коэффициент ρ , который определяет вклад каждого из регуляторов, определяется при помощи поиска, и итоговый регулятор имеет вид (19):

$$W_{comb}(p) = \begin{bmatrix} 0.2539 & -0.0769 \\ 0.0269 & -0.1029 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.02706 & -0.00821 \\ 0.00287 & -0.00967 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p} \quad (19)$$

Продемонстрируем работу методов. Применим регуляторы к исходному многомерному ОУ и к ОУ, у которого по каждому каналу управления было увеличено время запаздывания в 2 раза (рисунок 4). На исходном ОУ беспойсковый метод значительно проигрывает (> 100 %) и по ИКК, и по $t_{рег}$. В то же время поисковый метод превосходит по $t_{рег}$ классический метод на 26 %. При увеличении запаздывания беспойсковый и поисковый методы значительно (> 100 %) стали превосходить номинальный и классические варианты ПИ-регулятора по ИКК и по $t_{рег}$. Для объектов большей размерности, например, 3x3 методика остается такой же, но из-за увеличения количества параметров вывести точные формулы для определения зоны неопределённости не представляется возможным. Поэтому для определения зоны неопределённости статических коэффициентов используется перебор всех параметров и расчет всех определителей, варьируя зоной неопределённости до тех пор, пока не будет нарушено условие ($\underline{\Delta}_K > 0 \wedge \overline{\Delta}_K > 0$) или ($\underline{\Delta}_K < 0 \wedge \overline{\Delta}_K < 0$).

В данном случае гарантируется, что в пределах 17 % будет найден устойчивый робастный регулятор, но что если зона неопределённости будет больше. Тогда можно воспользоваться методом максимальной чувствительности, методика которого была описана ранее. Согласно этой методике, для данного ОУ с зоной неопределённости $\omega = 0.40$

(температура низа: 340-380 °С, верх: 110-150 °С) получены устойчивые переходные процессы во всех 4096 точек.

Сравним полученный регулятор с номинальным и классическим (рисунок 5). В данном случае для исходного ОУ метод проигрывает двум другим (в 2 раза) по ИКК и по $t_{\text{рег}}$. При увеличении времени запаздывания в 3 раза в каждом из каналов только регулятор, рассчитанный по методу максимальной чувствительности, демонстрирует устойчивый переходный процесс. На рисунке 6 отдельно показан переходный процесс по данному методу с увеличенным запаздыванием.

3. Комбинированный алгоритм настройки параметров регуляторов ректификационной колонны, сочетающий классические и робастные методы с динамической оптимизацией, позволяет за счет адаптивного регулирования весового коэффициента увеличить преимущества перед робастными подходами по основному показателю интегрального квадратичного критерия до 2 раз.

ОУ характеризуется вектором параметров модели \mathbf{Z} и вектором параметров регулятора \mathbf{A} . Показатель качества управления задан как $J = \phi(\mathbf{Z}, \mathbf{A})$, а также область параметров ОУ $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$. При «традиционном» подходе к расчету регуляторов в рамках одной из известных методик \mathbf{A}_{tr} рассчитывается в зависимости от параметров расчетной модели управляемого объекта \mathbf{Z}_r , то есть $\mathbf{A}_{tr} = \mathbf{F}(\mathbf{Z}_r)$, причем в условиях неопределенности \mathbf{Z}_r может отличаться от \mathbf{Z} . При «адаптивном» подходе, базирующемся на идентификации ОУ, «истинная модель» ОУ становится известна, и $\mathbf{A}_{ad} = \mathbf{F}(\mathbf{Z})$. При «робастном» подходе настройки регулятора \mathbf{A}_{rob} , обеспечивающие оптимальное (наименьшее) значение показателя J , могут быть найдены в результате решения задачи (4). Предлагаемый метод ориентирован на динамическую настройку параметров регулятора в условиях неопределенности модели ОУ. «Традиционные» настройки, основанные на фиксированной настройке для центральной точки \mathbf{Z}_n области неопределенности \mathbf{G} , показывают хорошую эффективность, если реальная модель \mathbf{Z} мало отклоняется от центра \mathbf{Z}_n . Однако при значительном отклонении такие настройки могут привести к ухудшению качества управления, а в крайних случаях – к потере устойчивости. Для предотвращения этого используются робастные настройки, рассчитанные на наихудшие возможные условия работы системы. Однако вместо использования фиксированных параметров

предложенный подход предлагает адаптивное смешивание «традиционных» и робастных настроек, что позволяет регулятору подстраиваться к текущему положению Z внутри области неопределенности G . Формально это выражается следующим образом (20):

$$A_{rob\,ad} = \alpha A_{rob} + (1 - \alpha) A_{tr} \quad (20)$$

где коэффициент α подбирается на основе минимизации функции качества управления (21):

$$J_{rob\,ad} = \min_{\alpha} \{ \phi(Z, A) | A = \alpha A_{rob} + (1 - \alpha) A_{tr} \} \quad (21)$$

Предложенный метод отличается вычислительной простотой, сводя поиск оптимального значения α к одномерной задаче, что обеспечивает высокую скорость даже при изменении параметров модели ОУ в реальном времени. Метод относится к робастно-адаптивным стратегиям управления (РАУ), сочетая адаптацию к состоянию системы и использование робастных параметров. Он эффективен при ограниченных вычислительных ресурсах, обеспечивая быстрый отклик на изменения модели ОУ, что важно для промышленных систем с высокими требованиями к надежности и быстродействию. Эффективность РАУ зависит от динамики точки Z в области неопределенности, требуя плавного изменения параметров ОУ или их скачкообразного переключение с длительным пребыванием в новых состояниях. Соблюдение этих условий необходимо для корректного функционирования процедуры оптимизации (20), (21), основанной на вычислении ИКК в режиме реального времени.

Рассмотрим пример. Для одномерного ОУ (ранее исследованного) рассчитаны робастные и традиционные настройки. С помощью разработанного приложения сделан поиск весового коэффициента α . При робастных настройках значение ИКК = 0.1980, а при РАУ – ИКК = 0.0904, что дает относительную разницу 119 % и подтверждает эффективность РАУ при определенной комбинации параметров.

Для модели 2x2 колонны К-2 с зоной неопределённости $\omega = 0.14$ получено, что максимальная разница по ИКК достигается при определенной комбинации параметров ОУ и при робастных настройках ИКК = 0.0438, а при РАУ – ИКК = 0.0379, что дает относительную разницу 16 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод настройки регуляторов для одномерных подсистем ректификационной колонны без поиска, позволяющий обеспе-

чить устойчивость и заданное качество регулирования в условиях параметрической неопределенности. В частности, улучшение по интегральному квадратичному критерию в 5 раз.

2. Расширена методика робастного управления на многомерные объекты. Предложен комбинированный подход к синтезу многомерных регуляторов, основанный на минимаксной оптимизации и аппроксимации модели с чистым запаздыванием. Показано, что применение этого подхода позволяет обеспечить требуемую устойчивость и качество управления даже при сильных перекрестных связях, а также позволяет добиться улучшения по интегральному квадратичному критерию в 3 раза по сравнению с классическими методами.

3. Введено понятие и реализован метод максимальной чувствительности, направленный на упрощение процедуры поиска устойчивых настроек. Метод позволяет сократить количество симуляций, фокусируясь на граничных и наихудших по качеству сценариях, что особенно актуально для объектов с высокой размерностью. Применение метода для одномерных подсистем позволило добиться улучшения по интегральному квадратичному критерию в 1.5 раза, а для многомерных систем - в 3 раза.

4. Разработан робастно-адаптивный метод настройки регуляторов, обеспечивающий динамическую корректировку параметров в процессе функционирования системы. За счет взвешенного комбинирования традиционных и робастных параметров с оптимизацией по типовым показателям управления достигается повышение точности и устойчивости управления.

5. В рамках дальнейших исследований планируется развитие предложенных методов с применением технологий машинного обучения, в частности, разработка алгоритмов для автоматического подбора оптимальных параметров регуляторов на основе накопленных данных о работе системы. Перспективным направлением является создание гибридных систем управления, сочетающих методы робастного управления с предиктивными моделями на основе машинного обучения, а также исследование возможностей глубокого обучения для прогнозирования наихудших сценариев и автоматической адаптации параметров регуляторов. Кроме того, предполагается разработка цифровых двойников ректификационных колонн для ускорения тестирования и верификации алгоритмов управления, а также оптимизация вычислительных процедур за счет методов реинформмент-обучения для динамической настройки регуляторов, что

позволит существенно расширить функциональные возможности предложенных методов и адаптировать их к работе в условиях высокой неопределенности и нестационарности технологических процессов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Яковис, Л.М. Робастная настройка типовых регуляторов методом максимальной чувствительности / Л.М. Яковис, П.Я. Стронгин, **П.С. Степанов** // Автоматизация в промышленности. - 2022. - №12. - С.47-54. DOI: 10.25728/avtprom.2022.12.10

2. Яковис, Л.М. Робастное и робастно-адаптивное управление для многосвязных объектов управления на основе условий робастной устойчивости / Я.М. Яковис, **П.С. Степанов**, О.А. Ремизова // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2025. - №72(98). - С. 101-105. DOI: 10.36807/1998-9849-2025-72-98-101-105.

3. **Степанов, П.С.** Синтез робастного многомерного ПИ-регулятора для многомерного объекта управления размерностью 3x3 / **П.С. Степанов**, О.А. Ремизова // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2025. - №72(98). - С.106-110. DOI: 10.36807/1998-9849-2025-72-98-106-110

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615215 Российская Федерация. Программный комплекс для синтеза робастно и робастно-адаптивного ПИ-регулятора. Заявка № 2025613337: заявл. 18.02.2025: опубл. 03.03.2025 / О.А. Ремизова, **П.С. Степанов**; правообладатель(и) О.А. Ремизова, П.С. Степанов. – 706 КБ.

5. Заявка на патент на изобретение № 2025106282. Способ синтеза настроек ПИ-регулятора робастной и робастно-адаптивной системы. Заявл. 17.03.25 / О.А. Ремизова, **П.С. Степанов**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). – 128 КБ.

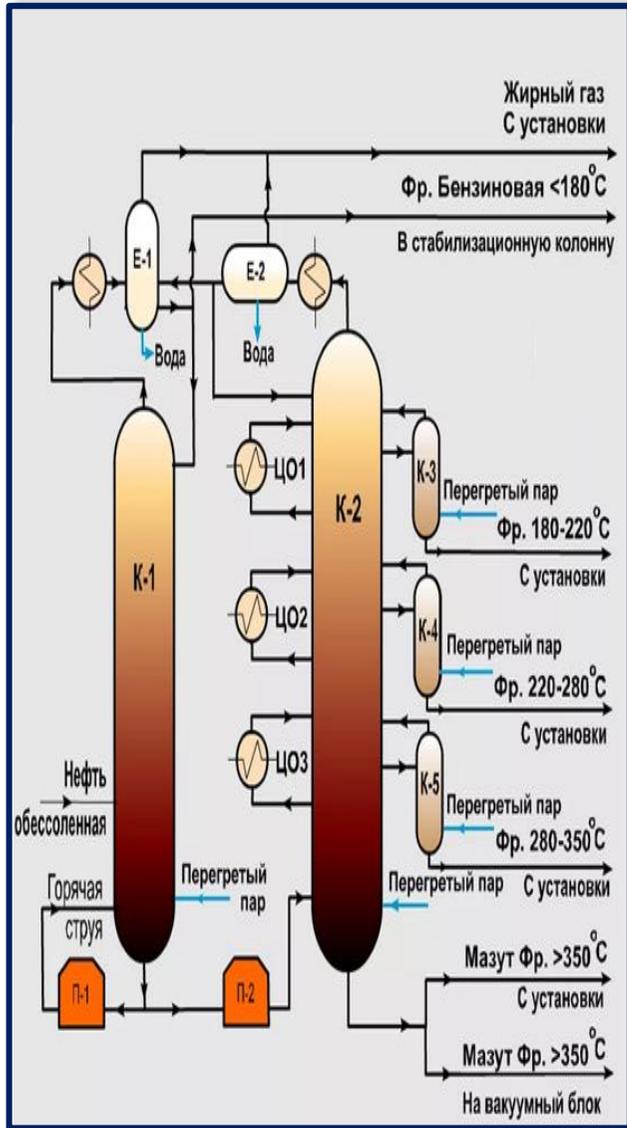


Рисунок 1 – Схема атмосферного блока

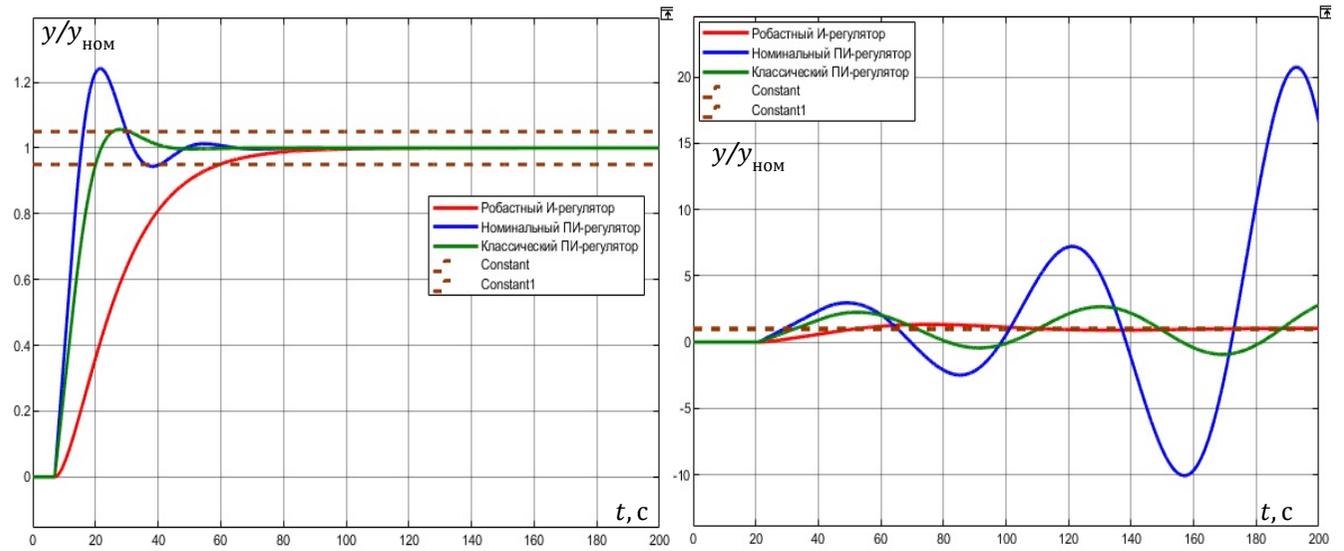


Рисунок 2 – Сравнение робастного И-регулятора с номинальным и классическим ПИ-регуляторами применимые к исходному аperiodическому ОУ и к ОУ с увеличенным запаздыванием

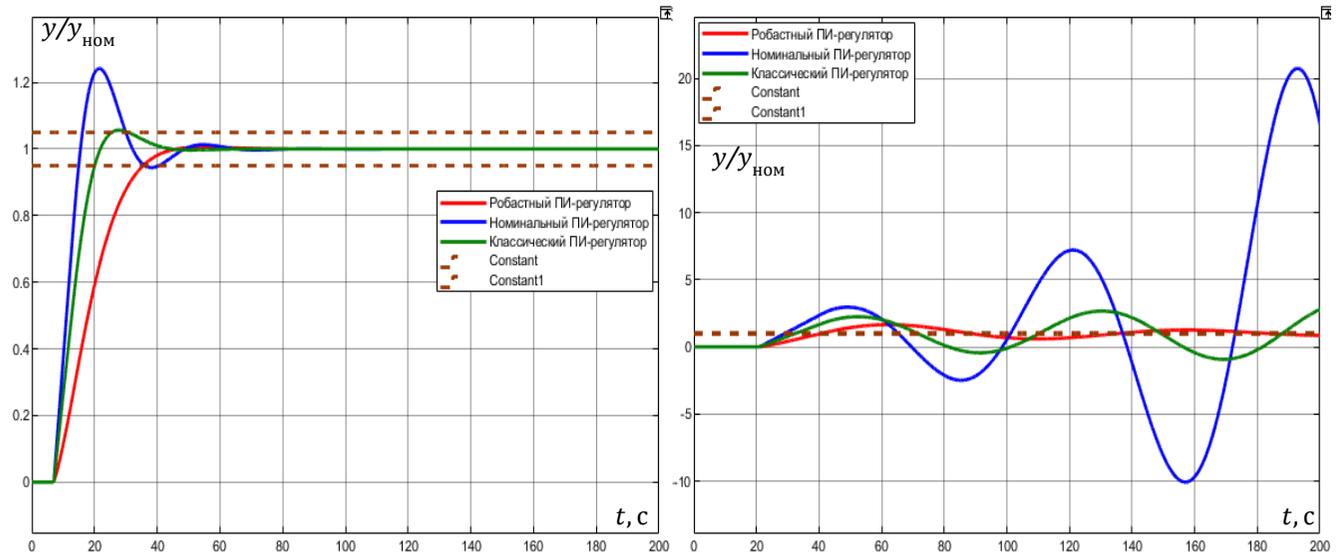


Рисунок 3 – Сравнение робастного ПИ-регулятора по методу максимальной чувствительности с номинальным и классическим ПИ-регуляторами применимые к исходному аperiodическому ОУ и к ОУ с увеличенным запаздыванием

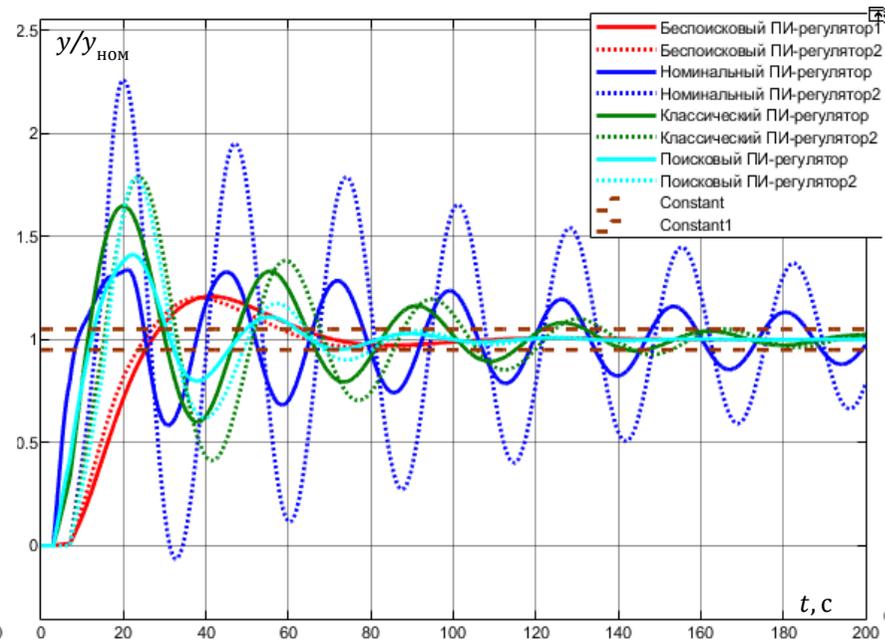
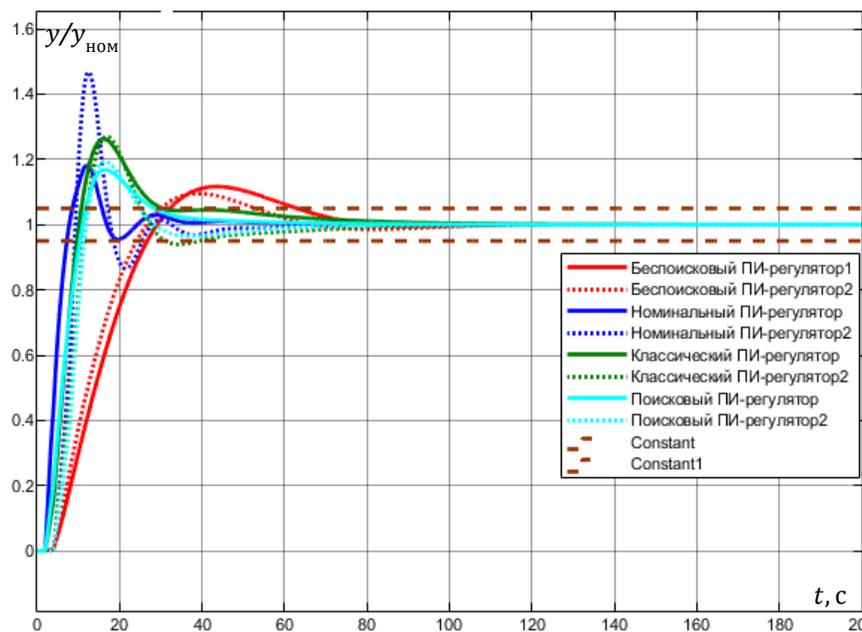


Рисунок 4 – Сравнение робастного ПИ-регулятора по беспoisковому и поисковому методу с номинальным и классическим ПИ-регуляторами применимые к исходному многомерному ОУ и к ОУ с увеличенным запаздыванием

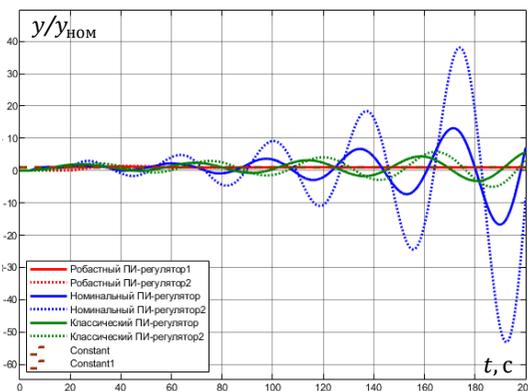
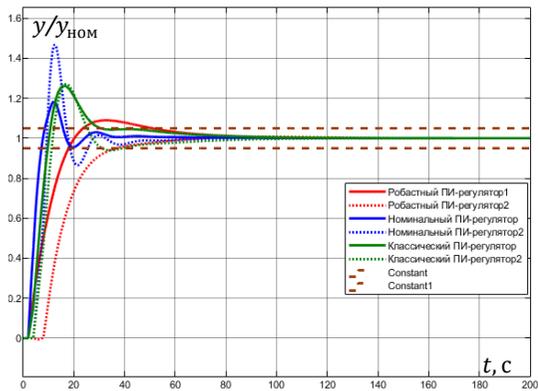


Рисунок 5 – Сравнение робастного ПИ-регулятора по методу максимальной чувствительности с номинальным и классическим ПИ-регуляторами применимые к исходному многомерному ОУ и к ОУ с увеличенным запаздыванием

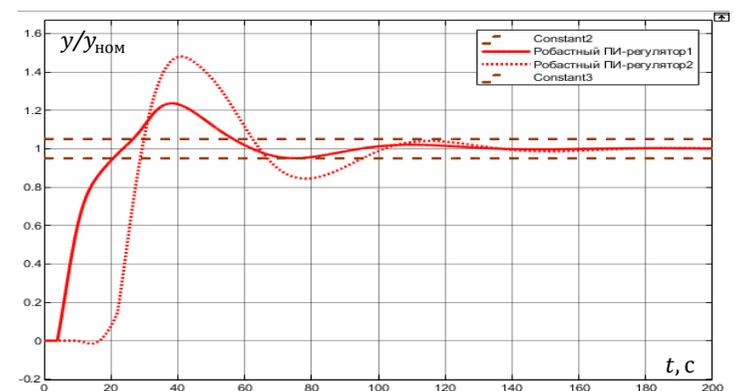


Рисунок 6 – Переходный процесс при робастном регуляторе по методу максимальной чувствительности применимый к многомерному ОУ с увеличенным запаздыванием