

На правах рукописи



Куликов Владимир Валерьевич

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО
РЕГУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: **Куцый Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор-консультант Института информационных технологий и анализа данных, сотрудник Лаборатории сетевых систем и ИТ-инфраструктуры ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Воевода Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации, факультет автоматизации и вычислительной техники ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Шатов Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 7 «Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина» ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ангарский государственный технический университет», г. Ангарск, Иркутской обл.

Защита диссертации состоится 24.12.2026 в 12-00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.002.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803, тел. 8 (3952) 63-83-94, e-mail: diss_sovet@irgups.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» и на сайте <https://www.irgups.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Л.В. Аршинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время автоматические системы с переменной структурой (СПС) находят применения в энергетике, химическом производстве и других отраслях промышленности. Основные достоинства систем с переменной структурой перед непрерывными системами определяются снижением чувствительности автоматической системы по качеству управления, скорости протекания переходного процесса без использования операции дифференцирования в выходной координате регулятора при сохранении одного из свойств линейных систем – принципа суперпозиции. Большой вклад в изучение таких систем внесли Емельянов С.В., Петров Б.Н., Позняк А.С., Уткин В.И., Шигин Е.Г., Коровин С.К., Таран В.А., Старикова М.В., Жильцов К.К., Шидловский С.В., Говоров А.А. и другие.

При проектировании и эксплуатации автоматических систем важным является обеспечение оптимального её функционирования по выбранному критерию качества. В промышленной практике реализация повышенных требований к характеристикам системам автоматического управления (далее САУ) может быть достигнуто за счёт использования интегральных критериев со штрафными функциями. Однако их применение беспойсковым способом оптимизации в автоматических системах с переменной структурой сопряжено с определёнными трудностями, которые преодолеваются численным подходом на основе градиентной процедуры.

Одним из способов повышения качества работы регуляторов в автоматических системах управления инерционными объектами с транспортным запаздыванием является применение методов теории систем с переменной структурой, которые позволяют повысить скорость протекания переходного процесса за счёт реализации переключения параметров типового пропорционально-интегрального регулятора (далее ПИ-регулятор) на основе нелинейных элементов типа «ключ» (далее РПС). Существуют различные модификации классического ПИ-регулятора (пропорционально-интегрального) для управления объектами такого типа (далее ПИ-РПС). Среди таких модификаций выделяется ПИ-регулятор с переменной структурой, предложенный Шигиным Е.Г. Для линейного объекта применение РПС позволяет сохранить принцип суперпозиции в автоматических системах, что позволяет, как известно, для разных задающих воздействий получать семейство переходных процессов с одинаковым временем окончания.

Анализ публикаций по методам параметрической оптимизации такого класса регуляторов позволяет сделать вывод о распространении методов последовательных приближений и гармонической линеаризации. Одной из задач данной работы является расширения спектра методов настройки ПИ-регулятора в классе систем с переменной структурой для автоматической системы управления объектом, содержащим транспортное запаздывание, с учётом снижения чувствительности по качеству управления в данной системе.

Для современных автоматических систем необходимо выбирать оптимальные настраиваемые параметры, удовлетворяющие техническим требованиям. Под техническими требованиями в работе понимаются критерии оценки переходного процесса: перерегулирование, время окончания переходного процес-

са и другие. Поэтому необходимо создание программного обеспечения, позволяющего находить оптимальные настраиваемые параметры на основе методов численной параметрической оптимизации (далее алгоритм автоматической параметрической оптимизации – АПО), которые преодолевают трудности аналитического решения дифференциальных уравнений с разрывами в правой части и содержащими запаздывающий аргумент. В настоящее время есть возможность широкого использования средств вычислительной техники для поддержания параметров технологических процессов в различных областях промышленности с возможностью модификации серийных непрерывных ПИ-регуляторов. Достоинства непрерывных систем состоят в простоте эксплуатации, накопленном исследовательском материале и применении при малом периоде квантования методов параметрической оптимизации непрерывных ПИ-регуляторов к их цифровым реализациям. Большой вклад в изучение теоретических вопросов непрерывных систем внесли В.Я. Ротач, Я.З. Цыпкин, Воронов А.А., В.А. Бесекерский, Е.П. Стефани, Е.И. Юревич, А.А. Красовский, Е.П. Попов, А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский, В.В. Солодовников и многие другие.

В качестве базы для формирования алгоритмов численной параметрической оптимизации в настоящей работе выбраны достаточно хорошо зарекомендовавшие себя методы параметрической чувствительности, позволяющие посредством моделирования беспойсковым способом получать значения составляющих градиента интегрального квадратичного критерия с различными по смыслу составными элементами с целью снижения чувствительности автоматической системы по качеству управления: производные ошибки системы, штрафные функции, производные интегрального квадратичного критерия по параметрам объекта и др. Существенный вклад в развитии теории чувствительности сделан М.Л. Быховским, Р. Томовичом, М. Вукобратовичем, П.В. Кокотовичем, Р.С. Рутманом, Е.Н. Розенвассером, Р.М. Юсуповым, А.И. Рубаном, Р.О. Омором, В.И. Костюк, Л.А. Широковым и другими.

Целью диссертационного исследования является снижение чувствительности автоматических систем по качеству управления, содержащих транспортное запаздывание, при использовании ПИ-регулятора с переменной структурой за счёт сформированного алгоритма беспойсковой параметрической оптимизации с ограничением на перерегулирование.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) провести анализ интегральных критериев оптимизации, позволяющих минимизировать перерегулирование в автоматической системе управления с регулятором с переменной структурой при наличии транспортного запаздывания;
- 2) формализовать общий вид регулятора с переменной структурой на основе стандартного пропорционального-интегрального регулятора;
- 3) формализовать задачу параметрической оптимизации регулятора с переменной структурой на основе градиентного алгоритма; представить методику выбора параметров штрафной функции, учитывающей ограничения на перерегулирование при параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой по интегральному квадратичному критерию для получения переходных процессов с относительно большим временем затухания;

4) провести апробацию созданного алгоритмического и программного обеспечения задачи параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой для модели автоматической системы управления температурой туннельной печи обжига кирпича в условиях действия возмущения.

Объектом исследования являются проблемно-ориентированные системы управления техническими объектами, содержащими регулятор с переменной структурой, для которых сформированы алгоритмы численной параметрической оптимизации.

Предметом исследования является разработка проблемно-ориентированных моделей систем управления на основе анализа параметрической чувствительностью и алгоритмы численной параметрической оптимизации.

Научную новизну диссертации представляют следующие основные результаты, которые выносятся на защиту:

1) разработка моделей описания параметрической чувствительности регулятора с переключаемыми параметрами при пропорциональной и интегральной компоненте для автоматических систем управления с транспортным запаздыванием;

2) разработка алгоритма адаптации по задающему воздействию, обеспечивающего сохранения принципа суперпозиции в системах с переменной структурой при использовании импульсного элемента с широтно-импульсной модуляцией для линейного объекта;

3) разработка алгоритма решения задачи параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой в автоматических системах управления объектом с транспортным запаздыванием;

4) разработка специального математического и алгоритмического обеспечения параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой с целью снижения чувствительности автоматических систем по качеству управления объектом с транспортным запаздыванием.

Практическая значимость работы заключается в том, что

1) разработан алгоритм настройки реального дифференцирующего звена в контуре регулятора с переменной структурой;

2) разработан алгоритм адаптации по задающему воздействию, позволяющий сохранить принцип суперпозиции в импульсных автоматических системах с ПИ-РСП для линейного объекта;

3) разработан беспоисковый алгоритм параметрической оптимизации на основе анализа чувствительности ПИ-регулятора с переменной структурой, учитывающей ограничения на промежуточную координату автоматической системы; применены косвенные критерии сходимости алгоритма оптимизации на основе зоны притяжения, реализуемой через операцию усреднения критерия оптимизации, и функции Ляпунова;

4) компьютерное моделирование автоматической системы управления температурой туннельной печи для обжига кирпича показало, что ПИ-регулятор с переменной структурой позволил получить переходные процессы нагрева туннельной печи с минимальным перерегулированием и уменьшить расход объёма топлива для печи на 8,1% в сравнении с типовым ПИ-регулятором. При действии максимального 25% возмущения $f(t)$ использование

ПИ-РПС позволяет снизить объём топлива для промышленной печи для обжига кирпича в среднем на 17,3 % меньше, чем стандартный ПИ-регулятор в тех же условиях. При +10% параметрическом несоответствии модели объекта и действии 25% возмущающего воздействия расход топлива для ПИ-регулятора увеличился на 12,5%, а для ПИ-РПС при тех же условиях расход топлива увеличился на 9,6%. Для ПИ-РПС снижение чувствительности автоматической системы по качеству управления температурой туннельной печи для обжига кирпича при действии 25% возмущающего воздействия и +10% параметрическом несоответствии модели объекта составило 20,1% в сравнении с использованием ПИ-регулятора.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, используются в учебном процессе в рамках дисциплин «Теория оптимального управления» и «Методы оптимизации» при подготовке обучающихся по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» профиль «Автоматизированные системы обработки информации и управления» института Информационных технологий и анализа данных ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Тематика работы соответствует пунктам паспорта специальности 2.3.1.: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».

Методы исследования: оптимизации, теории чувствительности автоматических систем, расширенных частотных характеристик. Для реализации алгоритма параметрической оптимизации задействована среда Delphi. Вспомогательное программное обеспечение: VisSim 8.0, MathCad 14.

Степень достоверности результатов работы. Подтверждением адекватности используемого математического аппарата является корректное использование методов теории автоматического управления, теории чувствительности автоматических систем и теории систем с переменной структурой, сравнением полученных результатов с результатами других исследователей. Корректность модельных исследований основывается на апробированной международным научным сообществом компьютерной среды VisSim и результатами работы разработанного программного обеспечения в среде Delphi. Практическая значимость подтверждается Актом о частичном использовании результатов в ООО «Спецстройинвест» при оптимизации и улучшении электрических параметров рудовосстановительных электропечей мощностью 16 МВт.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- 1) модели описания параметрической чувствительности регулятора с переключаемыми параметрами при пропорциональной и интегральной компоненте для автоматических систем управления с транспортным запаздыванием;
- 2) алгоритм адаптации по задающему воздействию, обеспечивающий сохранения принципа суперпозиции в системах с переменной структурой при ис-

пользовании импульсного элемента с широтно-импульсной модуляцией для линейного объекта;

3) алгоритм решения задачи параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой в автоматических системах управления объектом с транспортным запаздыванием;

4) снижение чувствительности автоматических систем по качеству управления объектом с транспортным запаздыванием при использовании интегрального квадратичного критерия с ограничением на перерегулирование при параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой.

Реализация результатов работы подтверждена Актом об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе ФГБОУ ВО ИРНИТУ, Актом о частичном использовании результатов в ООО «Спецстройинвест» при оптимизации и улучшении электрических параметров рудовосстановительных электропечей мощностью 16 МВт.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: Байкальская Всероссийская конференция с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении», г. Иркутск, 2008-2010 гг., 2013 г., 2018-2024 гг.; Всероссийская конференция «Винеровские чтения», г. Иркутск, 2009 г., 2011 г.; XI Международная научно-практическая конференция «Транспортная инфраструктура сибирского региона», г. Иркутск, 2020 г.; VI Международная научная конференция «Нелокальные краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики», Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, 2021 г.; XXII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, г. Новосибирск, 2021 г.; XXII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, г. Алушта, 2021 г.; XVI Международная конференция «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого), Москва, 2022 г.; Международная научная конференция «Теория оптимального управления и её приложения (ОСТА 2022)» (спутниковая конференция Международного конгресса математиков, ICM 2022), Екатеринбург, 2022 г.; XIII Международная научно-практическая конференция «Транспортная инфраструктура сибирского региона», г. Иркутск, 2022 г.; Международная (54-я Всероссийская) молодёжная школа-конференция «Современные проблемы математики и её приложений», г. Екатеринбург, 2023 г.; 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, г. Москва, 2023 г.; V Всероссийская молодёжная конференция с международным участием «Системные исследования в энергетике», г. Иркутск, 2024 г.

Проводились обсуждения на следующих семинарах: общероссийский семинар «Информатика, управление и системный анализ» при ФИЦ «Информатика и Управление» РАН, ФИЦ «Информационных и Вычислительных Технологий», факультете Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте проблем управления РАН имени В.А. Трапезникова, 2021 г., 2022 г.; общероссийский семинар «Теория автоматического управления» при лаборатории № 7 им. Я.З. Цыпкина Института проблем управления РАН имени В.А. Трапезникова, 2021 г.; региональный семинар «Цифровые тех-

нологии в науке, образовании и производстве» при ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», 2022 г.; научный семинар с международным участием имени А. С. Апарцина «Неустойчивые задачи вычислительной математики» при ИСЭМ СО РАН, 2024 г.

Личный вклад соискателя в диссертацию и совместных публикациях состоит в решении рассматриваемых задач, формулировании и обосновании теоретических положений диссертации, разработке алгоритмов и программного обеспечения, проведении численных экспериментов. Научному руководителю д.т.н., проф. Куцему Н. Н. принадлежат постановки задач, выбор методов их решения, общая схема исследований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 3 публикации – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 публикации, индексируемые в международной базе Scopus; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660448, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665367; 12 публикаций в других изданиях. В работах с соавторами соискателю в среднем принадлежит 50 % результатов.

Структура и объём работы. Диссертационное исследование состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, имеющего 107 наименований, и девяти приложений на 21 листе. Общий объём диссертационного исследования составляет 172 страницы.

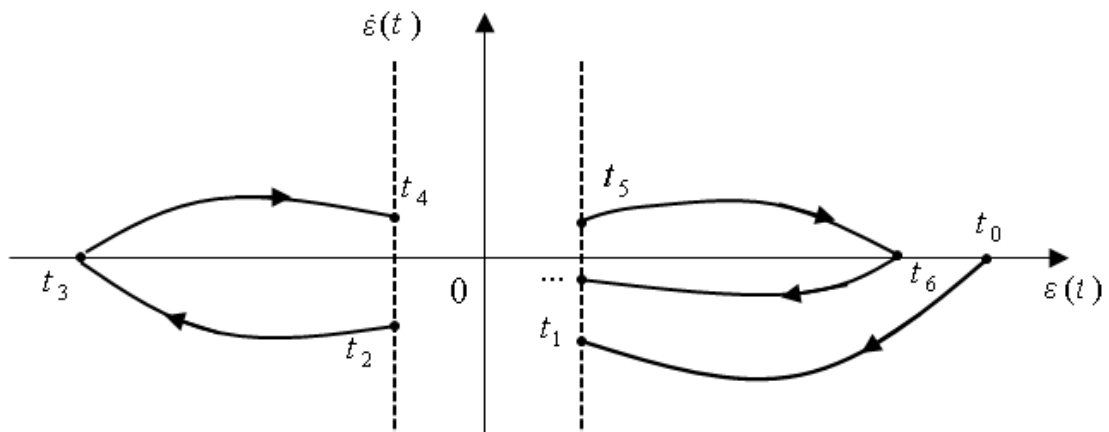
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Здесь отражена новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведён анализ интегральных квадратичных критериев с целью реализации ограничения на перерегулирование в заданной автоматической системе управления с запаздыванием через использование эталонной модели, штрафной функции, производной по ошибке автоматической системы, производных по параметрам объекта управления, ограничений на настраиваемые параметры регулятора, веса переходного процесса. Добавление штрафной функции к базовому интегральному квадратичному критерию позволяет получить после процедуры оптимизации семейство переходных процессов с минимальным перерегулированием при естественном отдалении от экстремума интегрального квадратичного критерия. Приведены результаты выполненного обзора класса регуляторов с переменной структурой, при этом выделяется ПИ-регулятор с полупостоянным интегрированием (по определенному закону обнуляется коэффициент в подынтегральном выражении), который отличается таким преимуществом, как реализация переключения его структур без использования дополнительных параметров. Такой регулятор является основой для построения исследуемого ПИ-регулятора с переменной структурой. На рис. 1 представлен фазовый портрет автоматической системы с таким регулятором в

режиме конечных переключений. Для этого регулятора могут быть применены способы повышения качества его работы в автоматической системе: увеличение количества структур регулятора, добавление настраиваемых параметров в эти структуры. Описываются регуляторы, ориентированные на действия в системах с запаздыванием.

Формулируется с общих позиций задача параметрической оптимизации АСР. Приводятся соображения, с учётом которых для формирования алгоритмов АПО систем с РПС выбран градиентный метод, предполагающий использование методов теории чувствительности и моделирования при получении соответствующих составляющих градиента критерия качества управления.



$t_0, t_1, \dots$ – моменты переключения структур регулятора

$\varepsilon(t)$ – ошибка автоматической системы

Рис. 1. Фазовый портрет автоматической системы с ПИ-регулятором с переменной структурой в режиме конечных переключений

Во второй главе работы строится модель чувствительности для вычисления функции чувствительности исследуемого класса ПИ-регуляторов с переменной структурой, из-за наличия переключений такие модели чувствительности называются анализаторами чувствительности. Приводится описание элементов сформированного алгоритма автоматической параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменной структурой.

Представим достаточно общее описание одномерного ПИ-регулятора с переменной структурой без конкретизации закона (функции) переключения:

$$u(t, \mathbf{q}) = \varepsilon(t, \mathbf{q}) \left(\sum_{i=0}^{n-1} q_{2i+1} \phi_{i+1}(t) \right) + \frac{\varepsilon(t, \mathbf{q})}{p} \left(\sum_{i=1}^n q_{2i} \phi_i(t) \right), \quad (1)$$

где $\mathbf{q} = (\mathbf{q}^{(1)}(q_1, q_2), \mathbf{q}^{(2)}(q_3, q_4), \mathbf{q}^{(3)}(q_5, q_6))$ – вектор настраиваемых параметров ПИ-РПС; $q_5 = 0, q_6 = 0$ – параметры для зоны нечувствительности регулятора (не оптимизируются); $\phi_1(t), \dots, \phi_n(t)$ – функции включения, принимающие значение «0» или «1», исходя из условия соответствующей функции переключения $\Psi_j(t) (j = 1, \dots, m)$; n – определяется в настоящей работе как количество структур ПИ-регулятора с переменной структурой, при $n=1$ выражение (1) описывает выходной сигнал типового ПИ-регулятора, в настоящей работе рассматривают-

ся ПИ-регуляторы с переменной структурой при $n=3$; $1/p$ – оператор интегрирования; t – текущее время действия автоматической системы.

Рассмотрим распространённую на производстве САУ, структурная схема которой в достаточно общем виде представлена на рис. 2.

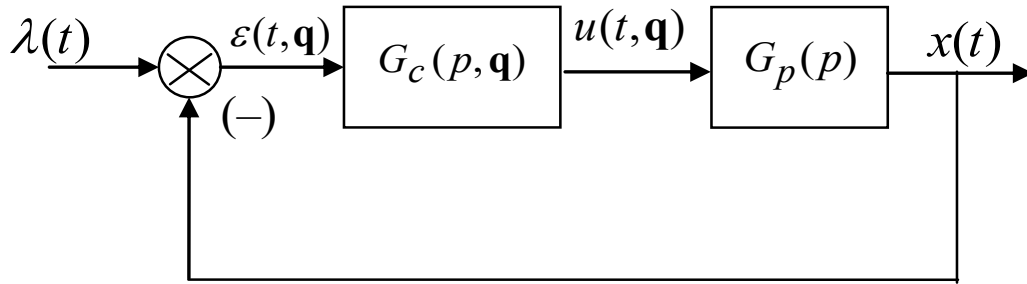


Рис. 2. Структурная схема автоматической системы управления

Описание процессов в исследуемой автоматической системе при заданном ПИ-регуляторе с зоной нечувствительности представим ниже:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \mathbf{q}) &= \lambda(t) - x(t), \\ u(t, \mathbf{q}) &= G_c(p, \mathbf{q}^{(j)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), (j = 1, 2, 3), \\ u(t, \mathbf{q}) &= \begin{cases} u_1(t, \mathbf{q}) = G_c(p, \mathbf{q}^{(1)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), ((\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q})) > 0) \vee (0 < t < t_{ob})) \wedge (|\varepsilon(t, \mathbf{q})| > \alpha\lambda(t)); \\ u_2(t, \mathbf{q}) = G_c(p, \mathbf{q}^{(2)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), (\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q})) < 0) \wedge (|\varepsilon(t, \mathbf{q})| > \alpha\lambda(t)); \\ u_3(t, \mathbf{q}) = G_c(p, \mathbf{q}^{(3)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), |\varepsilon(t, \mathbf{q})| < \alpha\lambda(t); \end{cases} \\ x(t) &= G_p(p)u(t, \mathbf{q}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon(t, \mathbf{q})$ – ошибка автоматической системы; $\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q})) = \varepsilon(t, \mathbf{q}) \frac{p\varepsilon(t, \mathbf{q})}{T_f p + 1}$ –

функция переключения; T_f – параметр реального дифференцирующего звена; α – зона нечувствительности регулятора, которая обеспечивает режим с конечным количеством переключений структур регулятора; $\lambda(t)$ – задающее воздействие; $u(t, \mathbf{q})$ – выходная координата ПИ-РПС; $x(t)$ – управляемая выходная координата автоматической системы; $G_p(p)$ – оператор объекта; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; $\wedge$ – логическая операция умножения; $\vee$ – логическая операция сложения.

При использовании в автоматической системе (2) G_{im} импульсного элемента с широтно-импульсной модуляцией 1-ого рода, с целью повышения помехозащищённости автоматической системы (2), в настоящей работе предлагается использовать адаптацию по задающему воздействию для сохранения принципа суперпозиции ПИ-РПС (рис. 3):

$$\begin{aligned}\varepsilon(t, \mathbf{q}) &= \lambda(t) - x(t), \\ \chi(t) &= G_{im}\left(\left|\frac{\varepsilon(t, \mathbf{q})}{\lambda(t)}\right|\right) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(\varepsilon(t, \mathbf{q})), \left|\frac{\varepsilon(t, \mathbf{q})}{\lambda(t)}\right| > \delta(t); \\ 0, \left|\frac{\varepsilon(t, \mathbf{q})}{\lambda(t)}\right| < \delta(t); \end{cases}, \\ u(t, \mathbf{q}) &= G_c(p, \mathbf{q}^{(j)})(\chi(t)\lambda(t)), (j=1,2,3), \\ x(t) &= G_p(p)u(t, \mathbf{q}).\end{aligned}\quad (3)$$

где $\delta(t)$ – функция, реализующая пилообразные импульсы.

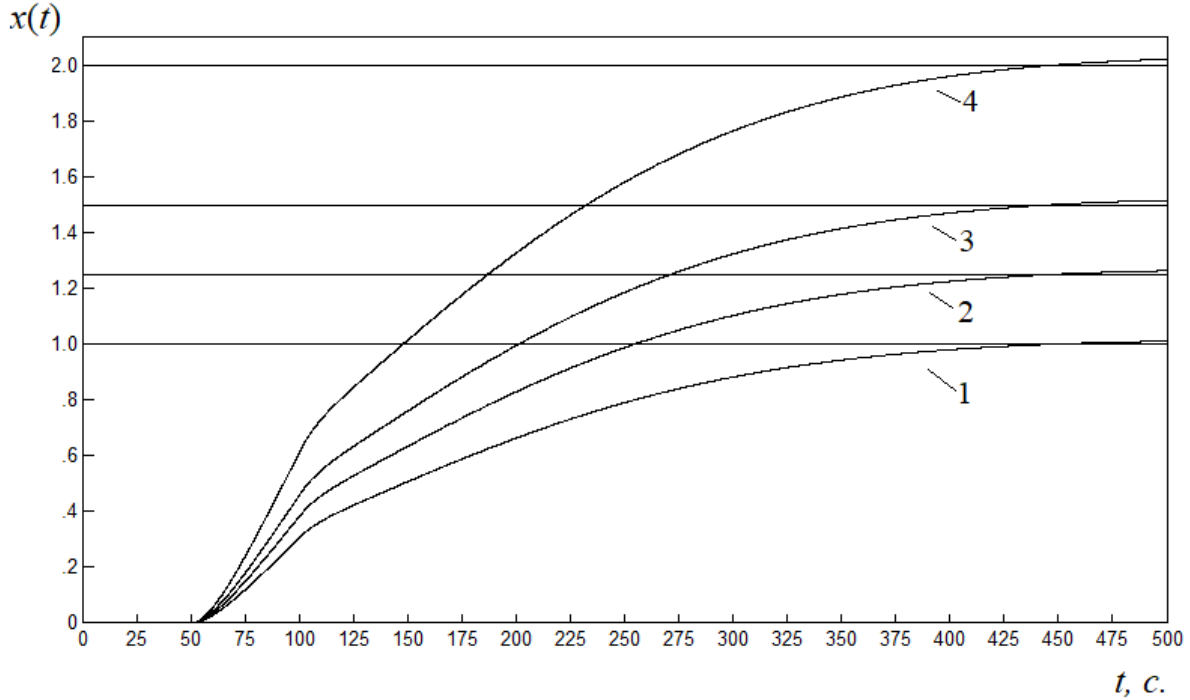


Рис. 3. Переходные процессы $x(t)$ в автоматической системе (3) для разных значений задающего воздействия (1 - $\lambda(t)=1.0$; 2 - $\lambda(t)=1.25$; 3 - $\lambda(t)=1.5$; 4 - $\lambda(t)=2.0$)

В исследовательской работе определено, что адаптация по задающему воздействию (3) сохраняет свою работоспособность для широтно-импульсной модуляции 2, 3, 4, 5 рода, так как не зависит от закона формирования импульсов в таких импульсных элементах.

Как известно, задача параметрической оптимизации заключается в определении алгоритмом АПО таких значений настраиваемых параметров $\mathbf{q}$ регулятора, которые обеспечивают экстремум принятого критерия качества I САУ и удовлетворяют наложенным ограничениям:

$$I = \int_0^{\infty} \varepsilon(t, \mathbf{q})^2 dt. \quad (4)$$

Проведены исследования, относящиеся к описанию задачи параметрической оптимизации, для оператора, с помощью которого можно описать достаточное число реальных промышленных объектов:

$$G_p(p) = \frac{k_{ob}}{\prod_{i=1}^m (T_{obi}p + 1)} e^{-\tau_{ob}p}, \quad (5)$$

где k_{ob} – статический коэффициент усиления; T_{obi} – постоянные времени; τ_{ob} – время транспортного запаздывания.

В процессе параметрической оптимизации значения вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}$ изменяются в соответствии с алгоритмами АПО на основе градиентной процедуры. Для формирования и исследования алгоритмов АПО в настоящей работе выбраны достаточно хорошо зарекомендовавшие себя методы теории чувствительности, которые позволяют изучать влияние изменения тех или иных параметров на качество функционирования автоматической системы. Основу этих методов составляют функции чувствительности – в настоящей работе это частные производные от выходной величины автоматической системы по настраиваемым параметрам ПИ-РПС $\mathbf{q}$:

$$\xi_i(t) = \frac{\partial x(t, \mathbf{q})}{\partial q_i} = G_p(p) \frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_i}, i = 1, \dots, n., \quad (6)$$

Производные (6) в настоящей работе вычисляются с помощью структурного моделирования операторным способом. В работе Широкова Л.А.¹ для линейного ПИ-регулятора получен компакт чувствительности – линейный оператор, связывающий значения соответствующих функций чувствительности.

Для случая ПИ-регулятора из класса регуляторов с переменной структурой в настоящей работе получены компакты чувствительности, которые формируют псевдофункции чувствительности, отличные от исходных, но при этом сохраняют логику итерационной последовательности критерия оптимизации I градиентного алгоритма (рис. 4):

$$\hat{\xi}_2(t) = \frac{1}{p} \xi_1(t), \hat{\xi}_4(t) = \frac{1}{p} \xi_3(t). \quad (7)$$

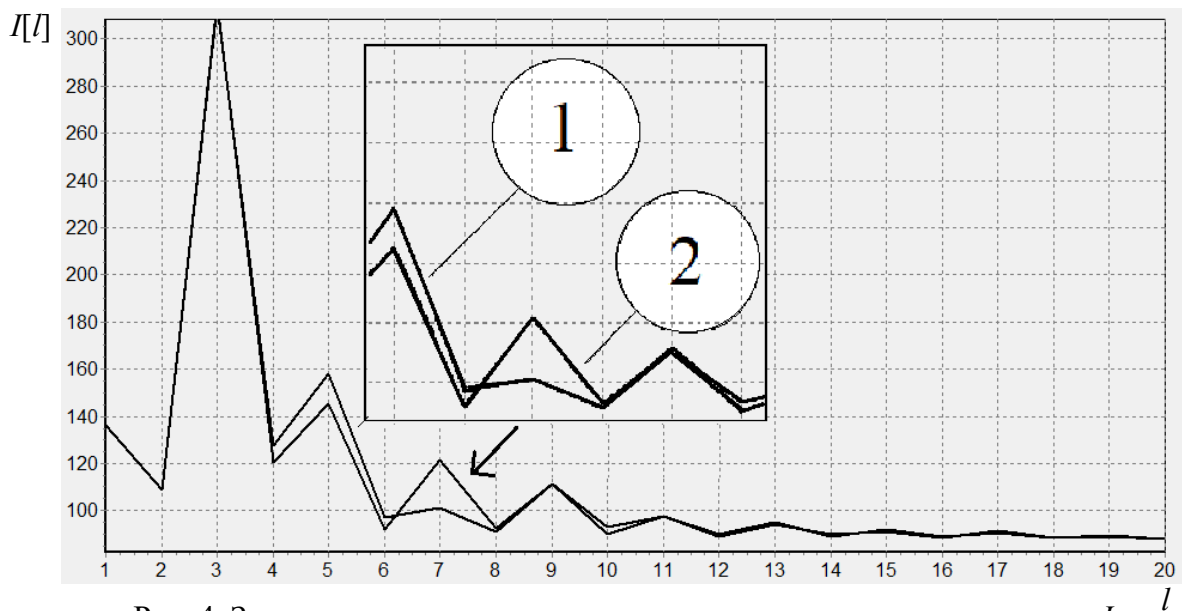


Рис. 4. Значения интегрального квадратичного критерия оптимизации I в ходе работы алгоритма АПО (l – номер шага алгоритма):

1 – без использования компактов чувствительности для вычисления составляющих градиента критерия оптимизации I ; 2 – с использованием компактов чувствительности для вычисления составляющих градиента критерия оптимизации I

¹ Костюк, В.И. Автоматическая параметрическая оптимизация систем регулирования / В.И. Костюк, Л.А. Широков. – М.: Энергоиздат, 1981. – 96 с.

При реализации ПИ-регулятора с переменной структурой возникает задача реализации операции дифференцирования в функции переключения. Один из вариантов решения этой задачи является использование реального дифференцирующего звена. Сложность выбора параметров такого звена обусловлена тем, что такое звено увеличивает время протекания переходного процесса. Но так как в исследуемых системах с переменной структурой используется только знак производной, это позволяет уменьшить количество настраиваемых параметров реального дифференцирующего звена до одного – времени инерционного звена (параметр фильтра). В данной работе используется алгоритм на основе подхода Емельянова С.В., Тарана В.А.², который заключается в том, что параметр фильтра увеличивается до тех пор, пока выбранный критерий оценки переходного процесса не изменится (рис. 5). Стоит отметить, что эта методика применима к другим классам систем с переменной структурой: многоконтурные, многосвязные.

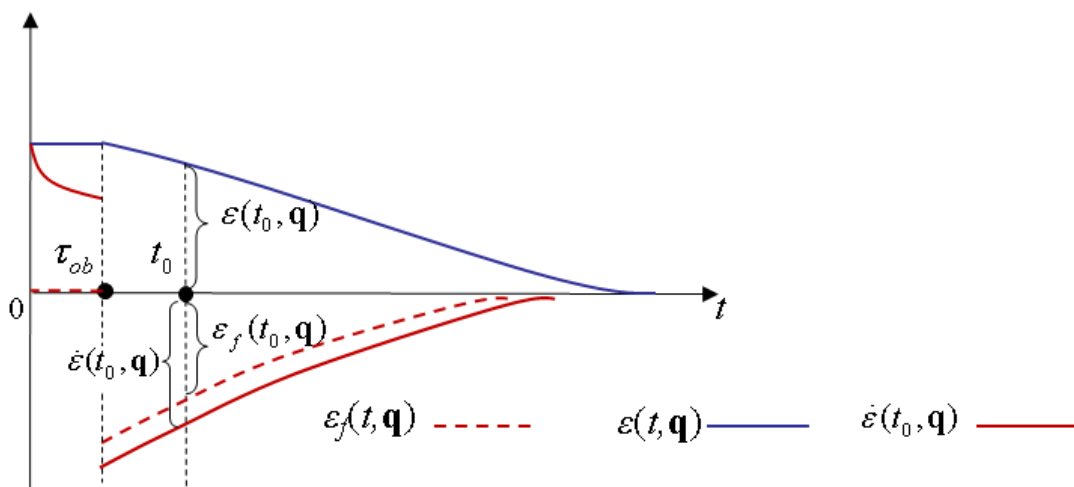


Рис. 5. Выбор параметра фильтра в функции переключения ПИ-РПС

Такой выбор параметра фильтра является субоптимальным и, как следствие, не изменяется значения критерия $I(4)$ при включённом реальном дифференцирующем звене.

В третьей главе представлено исследование работоспособности алгоритмов АПО с ПИ-РПС. С точки зрения математики проверка достоверности значений настраиваемых параметров $\mathbf{q}^*$, вычисленных алгоритмом АПО, связана с обращением к гессиану критерия оптимизации. Что требует после выполнения алгоритма АПО запуск процедуры вычисления гессиана.

С учётом ориентированности настоящей работы на методы теории чувствительности, вычисление квадратной матрицы Гессе, состоящей из вторых производных от интегрального квадратичного критерия I по настраиваемым параметрам $\mathbf{q}$, осуществляется с помощью функций чувствительности второго порядка, полученных в настоящем исследовании:

² Емельянов, С.В. К вопросу использования инерционных звеньев для построения одного класса систем автоматического регулирования с переменной структурой. I / С.В. Емельянов, В.А. Таран // Автоматика и телемеханика. – 1963. – том 24, № 1. – С. 33–46.

$$H(I) = \begin{bmatrix} \xi_{11}(t) & \xi_{12}(t) & \xi_{13}(t) & \xi_{14}(t) \\ \xi_{21}(t) & \xi_{22}(t) & \xi_{23}(t) & \xi_{24}(t) \\ \xi_{31}(t) & \xi_{32}(t) & \xi_{33}(t) & \xi_{34}(t) \\ \xi_{41}(t) & \xi_{42}(t) & \xi_{43}(t) & \xi_{44}(t) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В связи с этим рассматривается метод построения соответствующих моделей для систем с ПИ-РПС.

Второй метод Ляпунова используется при обосновании сходимости итерационных процессов. Если значения функции Ляпунова на последовательных итерациях $\mathbf{q}[l]$ монотонно убывают $V(t, \mathbf{q}[l]) - V(t, \mathbf{q}[l-1]) \rightarrow 0$ и ограничены снизу, то при предположении о выпуклости критерия оптимизации $I(4)$ следует сходимость алгоритма АПО³. Это соответствует неравенству $V(t, \mathbf{q}^0) > V(t, \mathbf{q}^*)$ (рис. 6).

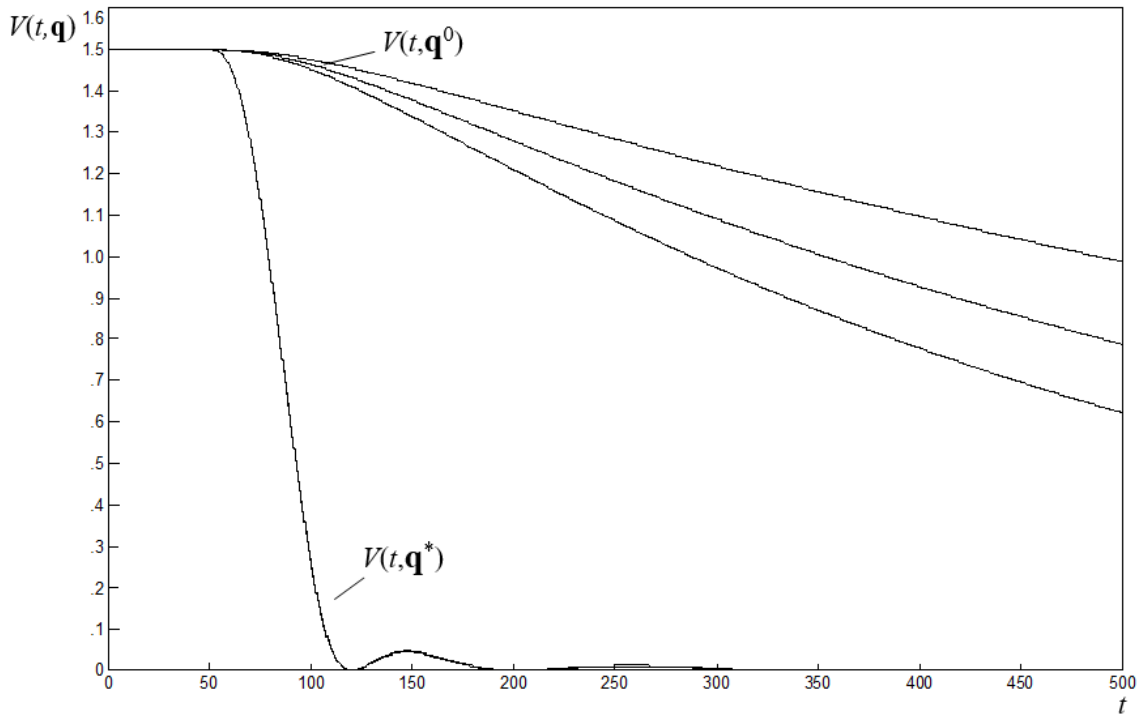


Рис. 6 Функция $V(t)$ Ляпунова для начальных и конечных значений вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}$ ПИ-РПС: 1- $V(t, \mathbf{q}^0)$, 2- $V(t, \mathbf{q}^*)$ при использовании критерия (4) после серии запусков алгоритма АПО

Для рассматриваемого оператора объекта (4) по алгоритму Е.А. Барбашина получена функция Ляпунова и её производная:

$$V(t, \mathbf{q}) = 1.5\varepsilon(t, \mathbf{q})^2 + \dot{\varepsilon}(t, \mathbf{q})\varepsilon(t, \mathbf{q}) + 2\dot{\varepsilon}(t, \mathbf{q})^2 + \\ + 0.5\left(\frac{1}{T_{ob1}T_{ob2}}\varepsilon(t, \mathbf{q}) + \frac{(T_{ob1} + T_{ob2})}{T_{ob1}T_{ob2}}\dot{\varepsilon}(t, \mathbf{q})\right)^2. \quad (9)$$

При разработке и внедрении систем управления технологическими процессами к ним предъявляются требования, определяющие качество производимой продукции. Одним из таких требований может являться отсутствие перерегулирования или минимальное перерегулирование в контурах автоматической

³ Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию: Безусловная минимизация. Условная минимизация. Прикладной аспект / Б.Т. Поляк. – М.: URSS, 2023. – 404 с.

системы. Работы, посвящённые разработке подходов к синтезу регуляторов, обеспечивающих для автоматических систем как некоторое минимально допустимое значение перерегулирования, так и его нулевое значение, в основе которых лежат как алгебраические критерии, так и частотные, применимые к системам, содержащим переключения параметров, только при использовании линеаризации, которая ведёт к увеличению погрешности результатов параметрической оптимизации.

Для реализации ограничения на перерегулирование в критерии оптимизации I (4) предлагается применять штрафную функцию на основе подхода Широкова Л.А., что позволяет избежать линеаризации элементов с переключением параметров. Исходя из своего внутреннего принципа, данный подход не усиливает овражность критерия оптимизации.

Представим оптимизируемый интегральный критерий с использованием штрафной функции $y(t)$ для учета ограничения на перерегулирование:

$$I_s = \int_0^{\infty} (\varepsilon(t, \mathbf{q})^2 + y(t)) dt,$$

$$y(t) = \begin{cases} (u(t, \mathbf{q}) - \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}), & \text{при } u(t, q) > \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \\ 0, & \text{при } u(t, q) \leq \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}. \end{cases} \quad (10)$$

Согласно приведенному выше условию, штрафная функция $y(t)$ увеличивает значение интегрального квадратичного критерия при выходе сигнала ПИ-РПС $u(t, \mathbf{q})$ за $\frac{\lambda(t)}{k_{ob}}$ на величину выброса.

Для гарантированного отсутствия перерегулирования у результирующего переходного процесса на этапе оптимизации в систему (2) вводится ограничение на выходную координату ПИ-РПС:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \mathbf{q}) &= \lambda(t) - x(t), \\ u(t, \mathbf{q}) &= G_c(p, \mathbf{q}) \varepsilon(t, q), \\ u_l(t) &= \begin{cases} \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}, & \text{при } u(t, \mathbf{q}) > \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \\ u(t, \mathbf{q}), & \text{при } u(t, \mathbf{q}) \leq \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}. \end{cases}, \\ x(t) &= G_p(p) u_l(t, \mathbf{q}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $u_l(t, \mathbf{q})$ – выходной сигнал ПИ-РПС с ограничением.

При реализации критерия (10) применяются следующие зависимости:

$$y(t) \neq 0, \varepsilon(t, \mathbf{q}) = 0; \quad (12)$$

$$\varepsilon(t, \mathbf{q}) \neq 0, y(t) = 0. \quad (13)$$

Задача параметрической оптимизации при использовании критерия (10) имеет вид:

$$\min I_s(\mathbf{q}^*), \mathbf{q}^* \in Q \subset R^4, \int_0^\infty y(t, \mathbf{q}^*) dt = 0. \quad (14)$$

Эффективность применения выражения (10) напрямую связана с точностью идентификации коэффициента усиления объекта k_{ob} . Предлагаемый подход не требует увеличения настраиваемых параметров, но возникает задача проверки сходимости алгоритма оптимизации из-за наличия штрафной функции. Сходимость предлагаемого алгоритма проверена с помощью вычислительной процедуры на основе зоны притяжения рекордных значений критерия оптимизации.

При запуске алгоритма АПО с различных начальных значений вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}_k^{(0)} = (q_{1k}^{(0)}, q_{2k}^{(0)}, q_{3k}^{(0)}) (k = 1, 2, \dots)$ соответствующие итоговые значения в точке $\mathbf{q}_k^* = (q_{1k}^*, q_{2k}^*, q_{3k}^*)$, вычисленные алгоритмом АПО, должны удовлетворять следующим условиям:

$$I(\mathbf{q}_k^*) < I(\mathbf{q}_k^{(0)}), (k = 1, 2, \dots). \quad (15)$$

$$\Delta_i > 0 (i = 1, 2, \dots, n), \quad (16)$$

где Δ_i - угловые миноры матрицы Гессе $H(I_m(\mathbf{q}_k^*))$ (критерий Сильвестра) интегрального квадратичного критерия I_{et} следующего вида:

$$I_{m-et} = \int_0^\infty (x(t, \bar{\mathbf{q}}^*) - x(t, \mathbf{q}^*))^2 dt, \quad (17)$$

где $\bar{\mathbf{q}}^* = \frac{\mathbf{q}_1^* + \dots + \mathbf{q}_m^*}{m}$; m – количество запусков алгоритма АПО.

Рекордными значениями критерия оптимизации объявляются те минимальные значения критерия оптимизации I_s , которые найдены в каждом k -ом запуске алгоритма, а зона притяжения этих рекордных значений определяется положительно определённой матрицей Гессе критерия I_{m-et} . Согласно выражению (17) критерий I_{m-et} характеризует разность усреднённого (по ансамблю реализаций) переходного процесса и проверяемого переходного процесса.

В области синтеза малочувствительных систем с привлечением функций чувствительности используется интегральный квадратичный критерий с параметрами модели объекта J – функционал грубости (согласно терминологии Розенвассера Е.Н., Юсупова Р.М.), который в зависимости от постановки задачи может минимизироваться или служить в качестве ограничения. Представим один из вариантов реализации J с выбранной постановкой задачи параметрической оптимизации:

$$J = \int_0^L \left(\frac{\partial F(\varepsilon(t, \mathbf{q}))}{\partial k_{ob}} \right)^2 dt, \min_{\mathbf{q}} J \text{ при } I \leq I_0, \quad (18)$$

$$F = \varepsilon^2(t, \mathbf{q}). \quad (19)$$

Таблица № 1

10% (Δ) увеличение значения параметров объекта управления после запуска алгоритма АПО при использовании базового интегрального квадратичного критерия I

k	q_1^*	q_2^*	q_3^*	q_4^*	I	$I(\alpha + \Delta\alpha)$	$\Delta I, \%$	$\sigma(\alpha + \Delta\alpha), \%$
1.	0,00512	0,03725	-0,00019	-0,02107	87,5	105,6	+20	>15%
2.	0,00569	0,03744	-0,00897	-0,02126	87,5	105,9	+21	>15%
3.	0,00559	0,03725	0,00032	-0,02091	87,5	106,7	+21,9	>15%

Таблица № 2

10% (Δ) увеличение значения параметров объекта управления после запуска алгоритма АПО при использовании интегрального квадратичного критерия со штрафной функцией I_s

k	q_1^*	q_2^*	q_3^*	q_4^*	I	$I(\alpha + \Delta\alpha)$	$\Delta I, \%$	$\sigma(\alpha + \Delta\alpha), \%$
1.	0,00682	0,02305	-0,00106	-0,00352	96,2	103,2	+7,2	10%...15%
2.	0,00680	0,02276	-0,00087	-0,00253	96,7	104,7	+8,2	10%...15%
3.	0,00826	0,02302	-0,00095	-0,00360	96,8	103,5	+6,9	10%...15%

Таблица № 3

10% (Δ) увеличение значения параметров объекта управления после запуска алгоритма АПО при использовании интегрального квадратичного критерия J с параметром модели объекта

k	q_1^*	q_2^*	q_3^*	q_4^*	I	$I(\alpha + \Delta\alpha)$	$\Delta I, \%$	$\sigma(\alpha + \Delta\alpha), \%$
1.	0,00468	0,0294	-0,00059	-0,00927	91,1	102,6	+12,6	>15%
2.	0,00537	0,03070	-0,00934	-0,01106	90,2	102,5	+13,6	>15%
3.	0,00521	0,02953	-0,00008	-0,00969	90,9	101,9	+12,1	>15%

Мерой чувствительности автоматической системы по качеству управления в настоящей работе является относительная величина увеличения интегрального квадратичного критерия $I(4)$ при заданном параметрическом несоответствии модели объекта.

В ходе численных экспериментов (данные отражены в таблицах №№ 1, 2, 3) для объекта (5) с большим транспортным запаздыванием:

$$T_{ob1} = 10\text{с}, T_{ob2} = 40\text{с}, k_{ob} = 1, \tau_{ob} = 50\text{с}, \frac{\tau_{ob}}{\max(T_{ob1}, T_{ob2})} > 1, \quad (20)$$

установлено, что наименьшему значению увеличения критерия I (10) (при 10% увеличении значения параметров объекта управления) соответствует настраиваемые параметры ПИ-РПС q^* , которые получены с помощью алгоритма АПО на основе интегрального критерия со штрафной функцией I_s (10) в сравнении с критериями I (4) и J (18). Что является подтверждением снижения чувствительности автоматической системы с параметрами (20) по качеству управления при допустимом перерегулировании σ , в среднем на 13,46% в сравнении критерием оптимизации I (4) и в среднем на 5,33% в сравнении критерием оптимизации J (18).

В четвёртой главе результаты, полученные в предыдущих главах, использованы для параметрической оптимизации регулятора с переменной структурой для модели автоматической системы управления температурой туннельной печи для обжига кирпича

Объектом управления является туннельная печь⁴, у которой управляемой величиной является температура $x(t)$, а управляющим воздействием - линейное перемещение клапана $u(t)$, влияющее на количество подаваемого топлива в систему. Основным внешним возмущающим воздействием $f(t)$ является исходная влажность кирпича.

Оператор объекта автоматической системы, описывающей процесс нагрева или охлаждения туннельной печи для обжига кирпича, имеет следующий вид:

$$G_p(p) = \frac{k_{ob}}{T_{obl}T_{ob2}p^2 + (T_{obl} + T_{ob2})p + 1} e^{-\tau_{ob}p}, \quad (21)$$

где k_{ob} – статический коэффициент усиления; T_{obl} , T_{ob2} – постоянные времени; τ_{ob} – время запаздывания.

Параметры модели объекта⁵:

$$T_{obl} = 5,2\text{с}; T_{ob2} = 0,64\text{с}; k_{ob} = 0,75; \tau_{ob} = 1,8\text{с}. \quad (22)$$

При поступлении в туннельную печь сильно охлажденного кирпича отношение $\tau_{ob} / \max(T_{obl}, T_{ob2}) \rightarrow 1$, что является критической ситуацией при использовании типового ПИ-регулятора в автоматической системе управления температурой данной печи относительно устойчивости системы.

Для получения качественного продукта необходимо выполнить параметрическую оптимизацию регулятора, который поддерживает заданную температуру в туннельной печи конвейерного типа путём управления подачи топлива.

Эффективность введения ПИ-регулятора с переменной структурой и работы алгоритма АПО определяется переходными процессами при полученных настройках данного регулятора в сравнении с типовым ПИ-регулятором.

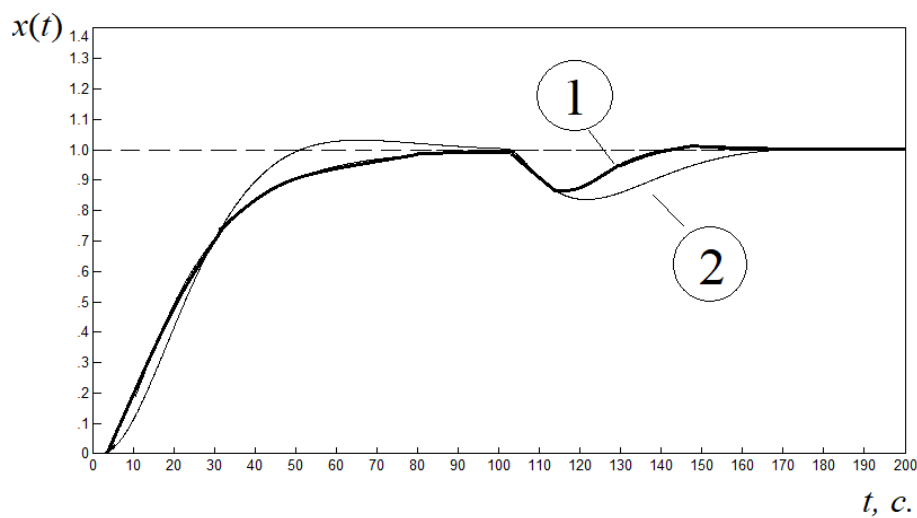


Рис. 7. Переходные процессы управления температурой (°C)

в автоматической системе управления температурой туннельной печи для обжига кирпича на временном интервале 0 с. ... 200 с. при единичном воздействии после этапа параметрической оптимизации с возмущающим воздействием $f(t)$ равным 25 % от необходимого установившегося значения выходного сигнала регулятора: 1 – используется ПИ-РПС; 2 – используется типовой ПИ-регулятор

⁴ Патент РФ №2187771 С2, кл. F27B9/0. Туннельная печь-сушилка. Авторы изобретения: Лапин Ю.А., Дуденкова Г.Я., Гудков Ю.В., Шелыганова Р.Н. Приоритет от 07.08.2000. Оpubл. 20.08.2002. Бюл. №12.

⁵ Tseligorov N.A. Investigation of the robust absolute stability of the tunnel kiln control system with delay / Tseligorov N.A., Chubukin A.V., Tseligorova E.N. // WSEAS Transactions on Systems. – 2021. – Т. 20. – pp. 25-30.

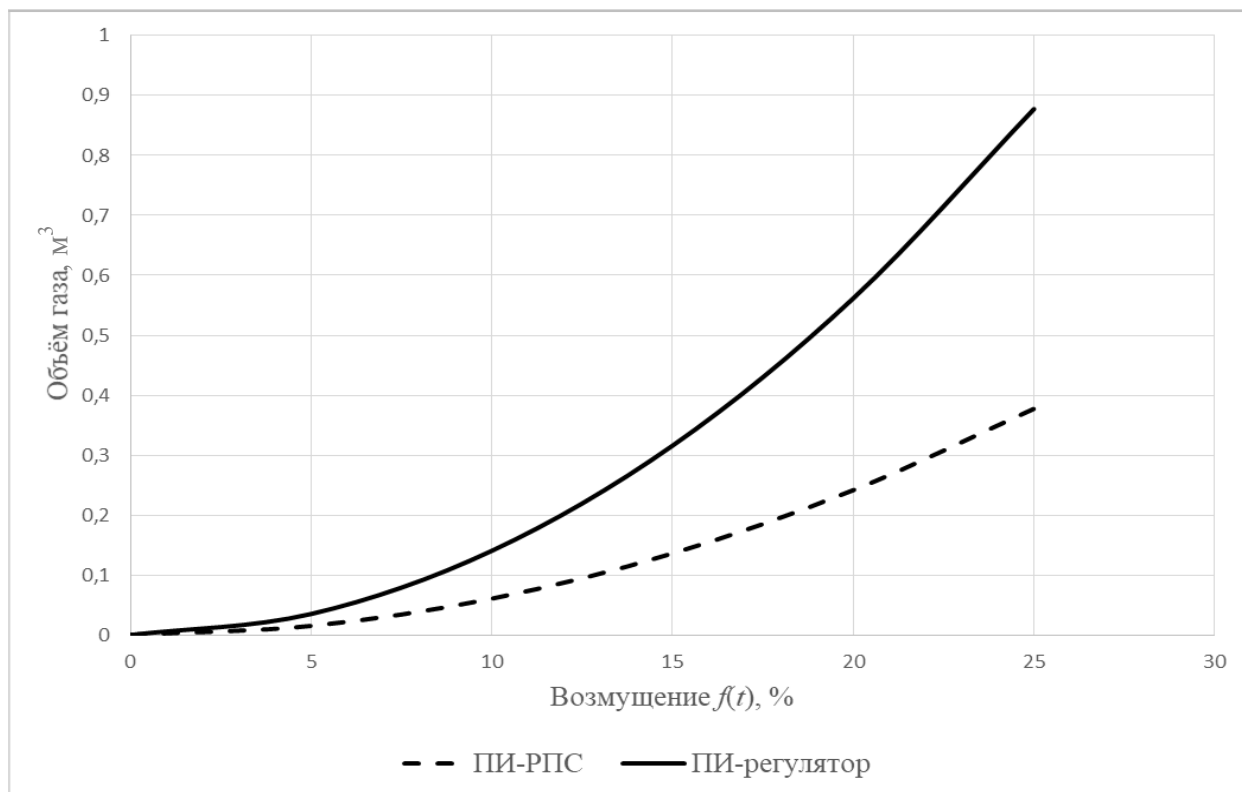


Рис. 8 Графики зависимости расхода объёма топлива для ПИ-регулятора и ПИ-РПС от возмущающего воздействия $f(t)$ при +10% параметрическом несоответствии модели объекта (22)

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что введение ПИ-регулятора с переменной структурой в автоматическую систему поддержания температуры туннельных печей для обжига кирпича и применение алгоритма АПО с критерием на основе штрафной функции позволяет гарантированно получить переходные процессы нагрева туннельной печи с минимальным перерегулированием и уменьшить расход объёма топлива для печи на 8,1% в сравнении с типовым ПИ-регулятором (рис. 7). При действии максимального 25% возмущения $f(t)$ использование ПИ-РПС позволяет снизить объём топлива для промышленной печи для обжига кирпича в среднем на 17,3 % меньше, чем стандартный ПИ-регулятор в тех же условиях. При +10% параметрическом несоответствии модели объекта и действии 25% возмущающего воздействия расход топлива для ПИ-регулятора увеличился на 12,5%, а для ПИ-РПС при тех же условия расход топлива увеличился на 9,6% (рис. 8). Для ПИ-РПС снижение чувствительности автоматической системы по качеству управления температурой туннельной печи для обжига кирпича при действии 25% возмущающего воздействия и +10% параметрическом несоответствии модели объекта составило 20,1% в сравнении с использованием ПИ-регулятора.

В заключении приводятся основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены теоретические и прикладные результаты, позволяющие решать научно-техническую задачу параметрической оптимизации автоматических систем с ПИ-регулятором с переменной структу-

рой. Результаты исследований сформированных алгоритмов АПО позволяют сделать вывод об их работоспособности.

Полученные результаты базируются на единой методологической основе – применении теории чувствительности для формирования методик и алгоритмов параметрической оптимизации, способствующих распространению систем с ПИ-РПС в практику автоматического поддержания температуры туннельной печи для обжига кирпича.

Основные результаты работы следующие:

1. Определены границы рассматриваемого класса регуляторов с переменной структурой, что позволило сформировать модели чувствительности для дальнейшего использования в алгоритме автоматической параметрической оптимизации таких регуляторов с использованием градиентной процедуры. Решена задача выбора параметров реально-дифференцирующего звена в функции переключения структур регулятора при использовании информации о знаке производной. Проведён анализ интегральных квадратичных критериев, позволяющих учитывать ограничение на перерегулирование в заданной автоматической системе с запаздыванием через использование эталонной модели, штрафной функции, вариацию амплитудного критерия, производной по ошибке автоматической системы, производных по параметрам модели объекта управления, ограничений на настраиваемые параметры регулятора, веса переходного процесса. Добавление штрафной функции к базовому интегральному квадратичному критерию позволяет получить после процедуры оптимизации семейство переходных процессов с минимальным перерегулированием.

2. Предлагается использовать адаптацию по задающему воздействию для сохранения принципа суперпозиции в автоматических системах с регулятором с переменной структурой при использовании импульсных элементов с широтно-импульсной модуляцией. Предлагаемая схема сохранения принципа суперпозиции основывается на том, что получаемая последовательность импульсов нелинейного элемента не зависит от величины задающего воздействия $\lambda(t)$ и компенсируется соответствующим умножением и делением с использованием значения задающего воздействия $\lambda(t)$.

3. Разработан беспоисковый алгоритм параметрической оптимизации на основе анализа чувствительности ПИ-регулятора с переменной структурой, учитывающей ограничения на промежуточную координату автоматической системы. В работе рассмотрены косвенные критерии сходимости алгоритма оптимизации на основе зоны притяжения, реализуемой через операцию усреднения критерия оптимизации, и функции Ляпунова. Рассмотрены постановки задачи параметрической оптимизации при использовании интегрального квадратичного критерия J с параметрами модели объекта, которые рассматриваются относительно базового интегрального квадратичного критерия I . В результате проведенного анализа получена форма интегрального квадратичного критерия J на основе коэффициента усиления модели объекта. В ходе численных экспериментов установлено снижение чувствительности автоматической системы по качеству управления при критерии оптимизации на основе штрафной функции в среднем на 13,46%, чем при критерии оптимизации I и на 5,33%, чем при критерии оптимизации J и с допустимым коэффициентом перерегулирования.

4. Компьютерное моделирование автоматической системы поддержания температуры туннельной печи для обжига кирпича показало, что ПИ-регулятор с переменной структурой позволил получить переходные процессы нагрева туннельной печи с минимальным перерегулированием и уменьшить расход объёма топлива для печи на 8,1% в сравнении с типовым ПИ-регулятором. При действии максимального 25% возмущения $f(t)$ использование ПИ-РПС позволяет снизить объём топлива для промышленной печи для обжига кирпича в среднем на 17,3 % меньше, чем стандартный ПИ-регулятор в тех же условиях.

При +10% параметрическом несоответствии модели объекта и действии 25% возмущающего воздействия расход топлива для ПИ-регулятора увеличился на 12,5%, а для ПИ-РПС при тех же условия расход топлива увеличился на 9,6%. Для ПИ-РПС снижение чувствительности автоматической системы по качеству управления температурой туннельной печи для обжига кирпича при действии 25% возмущающего воздействия и +10% параметрическом несоответствии модели объекта составило 20,1% в сравнении с использованием ПИ-регулятора.

Разработанный алгоритм параметрической оптимизации пропорционально-интегрального регулятора с переменной структурой входит в рамки методов теории чувствительности автоматических систем управления и, как следствие, развивает практическую сторону данной теории. Исходя из представленных выше материалов, можно сделать вывод о том, что поставленная цель достигнута.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК по специальности диссертации

1. **Куликов, В.В.** Беспойсковый алгоритм параметрической оптимизации ПИ-регулятора с полупостоянным интегрированием / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Том 22, № 6 – С. 98-108.
2. **Kulikov V.V.** The Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimization of a Variable Structure PI Controller with Dead Band. / V.V. Kulikov, A.P. Kutsyi, N.N. Kutsyi // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2020. – 21(9). – pp. 530-534. <https://doi.org/10.17587/mau.21.530-534>
3. **Куликов, В.В.** Параметрическая оптимизация ПИД-регулятора с ограничением на основе метода сопряженных градиентов Полака-Поляка-Рибьера / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый, Е.А. Осипова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Том 24, № 5 – С. 240-248.

В изданиях, индексируемых в Scopus

4. **Kulikov V.V.** Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimization of Variable-Structure PI Controller When Using a Reference Model / V.V. Kulikov, N.N. Kutsyi, A.A. Podkorytov // Computational Methods in Systems and Software 2020, AISC 1295. – 2020. – pp. 938–949. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_87
5. **Kulikov V.V.** Formation of an algorithm of automatic parametric optimization of PI-controller with variable parameters while using Internal Model Control / V.V. Kulikov, A.P. Kutsyi, N.N. Kutsyi // 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1151 012031. – 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1151/1/012031>

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660448 от 03.06.2022 г. / Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Параметрическая оптимизация пропорционально-интегрального регулятора с полупостоянным интегрированием в одноконтурной автоматической системе с запаздыванием / **В.В. Куликов**, Н.Н. Куцый.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665367 от 14.07.2023 г. / Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Параметрическая оптимизация пропорционально-интегрального регулятора с переменными параметрами в одноконтурной автоматической системе с запаздыванием / **В.В. Куликов**, Н.Н. Куцый.

В других журналах и изданиях

8. **Куликов, В.В.** Применение метода расширенных частотных характеристик для параметрического синтеза предиктивного пропорционально-интегрального регулятора / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Современные концепции и парадигмы образования в условиях мирового эпидемиологического кризиса». – Издательство Южный университет (ИУБиП), ООО «Издательство ВВМ», 2020. – С. 24-30.
9. **Куликов, В.В.** Анализаторы чувствительности автоматических систем с пи-регулятором с переменными параметрами при использовании линии переключения / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – Вып. 19 – С. 57-64.
10. **Куликов, В.В.** Применение метода расширенных частотных характеристик для параметрического синтеза пропорционально-интегрального разностного регулятора / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – Вып. 21 – С. 36-42.
11. **Куликов, В.В.** Применение метода градиентного спуска и метода уступок для параметрической оптимизации ПИ-регулятора с переменными параметрами при использовании грубого интегрального квадратичного критерия / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2021. — С. 567-570.
12. **Куликов, В.В.** Градиентный алгоритм параметрической оптимизации-ПИД-регулятора при использовании фильтра / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый, Е.А. Осипова // Тезисы XXII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, 25–29 октября 2021 г., Новосибирск. — Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2021. — С. 42-43.
13. **Куликов, В.В.** Градиентный алгоритм параметрической оптимизации импульсного ПИ-регулятора / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый, Т.В. Маланова // Материалы VI Международной научной конференции «Нелокальные-

- краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики», 5–9 декабря 2021 г., Нальчик. — Нальчик: ИПМА КБНЦ РАН, 2021. — С. 117.
14. **Куликов, В.В.** Градиентный алгоритм параметрической оптимизации матричного ПИ-регулятора с полупостоянным интегрированием / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Материалы Международной научной конференции «Теория оптимального управления и её приложения (ОСТА 2022)», спутниковая конференция Международного конгресса математиков (ICM 2022), 27 июня – 1 июля 2022, Екатеринбург. — Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2022. – С. 123-126.
 15. **Куликов, В.В.** Параметрический синтез пропорционально-интегрального по предыстории регулятора методом расширенных частотных характеристик / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Материалы научно-практического семинара «Цифровые технологии в науке, образовании и производстве», 30 ноября 2022 г., г. Иркутск. — Изд-во Иркутский ГАУ, 2022. — С. 39-40.
 16. **Куликов, В.В.** Выбор критерия оптимизации при параметрическом синтезе различных дискретных регуляторов с интегральной составляющей и ограничением на перерегулирование / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Тезисы Международной (54-й Всероссийской) молодёжной школы-конференции «Современные проблемы математики и её приложений», г. Екатеринбург. — Екатеринбург: ИММ УрО РАН, Уральский федеральный университет, 2023. – С. 93
 17. **Куликов, В.В.** Параметрическая оптимизация регулятора с переменной структурой с использованием линейного интегрального критерия / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Актуальные вопросы аграрной науки. — 2024. — выпуск № 2 (51) – С. 60-72.
 18. **Куликов, В.В.** Использование компактов чувствительности при параметрическом синтезе регулятора с переменной структурой / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Неустойчивые задачи вычислительной математики: материалы семинара с международным участием им. А.С. Апарцина. Иркутск, 29 июля – 2 августа 2024 г., Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева, Иркут. гос. ун-т. — 2024. — С. 40-43.
 19. **Куликов, В.В.** Параметрический синтез регулятора с переменной структурой с использованием критерия со штрафной функцией на основе ошибки системы / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Актуальные вопросы аграрной науки. — 2024. — выпуск № 3 (52) – С. 62-72.