

На правах рукописи



Гущин Павел Александрович

**УПРАВЛЕНИЕ С ГАРАНТИЕЙ ЗАДАННОГО
КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ В
УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ
РЕЖИМАХ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН).

Научный консультант:

Фуртат Игорь Борисович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Адаптивное и интеллектуальное управление сетевыми и распределенными системами», ИПМаш РАН.

Официальные оппоненты:

Пакшин Павел Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, ФГБОУ ВО НГТУ Арзамасский политехнический институт (филиал).

Путов Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматического управления, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Уткин Антон Викторович

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории № 37 «Систем с разрывными управлениями», ИПУ РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится 14 ноября 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ИПМаш 2.3.1. в ИПМаш РАН по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61 и на сайте <https://ipme.ru>.

Автореферат разослан « »

2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
ИПМАШ 2.3.1.,

доктор технических наук, профессор

Фуртат Игорь Борисович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Задачи управления в условиях запаздывания, возмущений, помех измерения, неопределенности параметров модели объекта – одни из самых сложных и в то же время актуальных задач современной кибернетики и робототехники. С появлением новых технологий, развитием теории и практики автоматического управления появляются все более сложные и актуальные задачи. Несмотря на большое количество литературы в данной области, существует ряд задач, решения которых могут быть улучшены, а для некоторых задач и вовсе отсутствуют решения.

Первые работы по управлению в условиях параметрической неопределенности и возмущений привели к созданию эффективных схем адаптивного управления (Б.Р. Андриевский, В.М. Глумов, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, А.Л. Фрадков, А.М. Цыкунов, Я.З. Цыпкин, A. Annaswamy, K. Narendra, R. Ortega и др.). Дальнейшее развитие данных методов и создание новых было посвящено как упрощению реализации схем управления (уменьшение динамического порядка регулятора, уменьшение количества настраиваемых параметров, получение новых критериев по настройке параметров и т.д.), так и управлению новыми классами объектов, описываемых более сложными моделями. В работе рассмотрены некоторые типы моделей объектов, которые являются актуальными на сегодняшний день.

К первому классу таких объектов относятся системы с существенным запаздыванием в канале управления. Такие задачи встречаются при управлении удаленными объектами, при управлении через цифровые каналы связи, при управлении сетевыми системами с наличием коммуникационного запаздывания между агентами сети и т.п. Для управления такими объектами предложен ряд решений с применением предиктора Смита и его модификаций (А.М. Цыкунов, P. Albertos, O.J.M. Smith и др.), а также схемы управления, основанные на точном решении дифференциального уравнения исследуемой системы (А.А. Бобцов, Д.А. Герасимов, В.О. Никифоров, А.А. Пыркин, А.Л. Фрадков, И.Б. Фуртат, В.Л. Харитонов, M. Krstic, A. Manitius, V. Mischel, S. Mondie, A. Olbrot и др.). Однако в условиях больших

по амплитуде возмущений предложенные решения могут терять свою эффективность. В работе предложен многошаговый метод прогнозирования регулируемой величины и возмущений с принципом компенсации возмущений, который позволяет улучшить качество регулирования в условиях больших по амплитуде возмущений.

Далее предложенный метод распространяется на объекты, которые подвержены не только возмущению, но и у которых присутствуют помехи (или ошибки) в измерениях. Для управления такими объектами существует ряд решений (А.Е. Барабанов, О.Н. Граничин, С.А. Краснова, Б.Т. Поляк, В.В. Путов, А.В. Уткин, В.А. Уткин, В.Н. Фомин, М.В. Хлебников, A. Isidori, H. Khalil, R. Marino, P. Tomei и др.), основанных на принципе подавления возмущений и помех измерения. В работе предложен новый метод компенсации возмущений и помех измерения, позволяющий улучшить качество регулирования.

Результаты, полученные для систем с сосредоточенными параметрами, распространяются на распределенные системы параболического и гиперболического типов при наличии параметрической интервальной неопределенности и внешних ограниченных возмущений. Такие системы рассматривались в работах Б.Р. Андриевского, М.В. Долгополика, М. Крстича, Ю.В. Орлова, А.Л. Фрадкова, Э. Фридман и др., где распространенным считалось использование кусочно-постоянного закона управления. В работе предложено использовать нелинейный закон управления, который позволит реализовать локальные управления с меньшими затратами ресурсов на регулирование, что важно в инженерной практике.

Все вышеописанные методы гарантируют заданное качество регулирования только в установившемся режиме. Хорошо известно, что во многих практических задачах значение регулируемой переменной в переходных процессах может играть решающую роль в работоспособности системы. Например, при управлении электроэнергетическими сетями важно не допускать выход частоты тока и напряжения из заданных пределов для безопасной работы сети и потребителей в ней. Однако существующие регуляторы не гарантируют заданного качества регулирования в переходных

режимах, что может привести к отключению участка сети при выходе величин из заданных значений, даже если система управления не теряла свою работоспособность. Для решения таких задач предложенные методы развиты для гарантии нахождения регулирующих и регулируемых переменных в заданных разработчиком множествах в любые моменты времени.

В работе предложены новые дивергентные методы исследования устойчивости динамических систем, которые позволяют анализировать устойчивость замкнутых систем, наряду с использованием метода функций Ляпунова и обобщающие работы В.П. Жукова и А. Rantzer. Подобные методы успешно применялись для исследования устойчивости динамических систем в работах В.П. Жукова, П.В. Пакшина, А. Rantzer, Е. Rodgers и др.

Таким образом, в работе разработаны новые методы и алгоритмы управления сосредоточенными, сетевыми и распределенными системами с наличием запаздывания, возмущений, помех измерения и параметрической неопределенности с гарантией заданного качества регулирования в установившемся и переходном режимах. Некоторые разработанные методы применены для управления электроэнергетическими сетями.

Целью данной работы является разработка новых методов и алгоритмов управления, гарантирующих заданное качество регулирования в установившемся и переходном режимах в условиях неопределенности.

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

1. Разработать методы управления, гарантирующие заданное качество регулирования в установившемся режиме.
2. Обобщить полученные методы на задачи управления с гарантией заданного качества регулирования в любой момент времени.
3. Разработать методы управления электроэнергетическими сетями.

Объектами исследования являются динамические системы с возможным наличием запаздывания во входном сигнале, параметрической интер-

вальной неопределенности, возмущений, помех измерения, а также сетевые, распределенные и нелинейные системы.

Предметом исследования является разработка новых методов и алгоритмов управления, гарантирующих заданное качество регулирования в установившемся и переходном режимах.

Методы исследования. Метод многошагового прогнозирования (субпредикторный метод), методы подавления возмущений, методы компенсации возмущений, методы функций Ляпунова и функционалов Ляпунова-Красовского, методы решений линейных матричных неравенств, методы линейной алгебры и матричного анализа, методы математического, функционального и векторного анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы и алгоритмы управления на базе предикторов и субпредикторов для систем с запаздыванием в канале управления при наличии ограниченных возмущений.
2. Методы и алгоритмы управления системами, подверженными воздействию ограниченных возмущений и помех измерения.
3. Методы и алгоритмы управления с гарантией нахождения входных и выходных сигналов в заданном разработчиком множестве при наличии параметрической неопределенности и ограниченных возмущений.
4. Методы и алгоритмы управления скалярными системами параболического и гиперболического типов в условиях параметрической неопределенности и ограниченных возмущений.
5. Методы и алгоритмы управления электроэнергетическими сетями при наличии параметрической неопределенности, ограниченных возмущений и ошибок измерений.

Научная новизна состоит в разработке методов и алгоритмов управления, гарантирующих заданное качество регулирования в условиях возмущений и параметрической неопределенности в установившемся и/или переходном режимах, а именно:

1. Предложены методы и алгоритмы управления на базе предикторов и субпредикторов для динамических систем с запаздыванием в канале управления при наличии ограниченных возмущений.
2. Разработаны методы и алгоритмы управления системами, подверженными воздействию ограниченных возмущений и помех измерения.
3. Получены методы и алгоритмы управления с гарантией входных и выходных сигналов в заданном разработчиком множестве при наличии параметрической неопределенности и ограниченных возмущений.
4. Предложены методы и алгоритмы управления скалярными системами параболического и гиперболического типов в условиях параметрической неопределенности и ограниченных возмущений.
5. Разработаны методы и алгоритмы управления электроэнергетическими сетями при наличии параметрической неопределенности, ограниченных возмущений и ошибок измерений.

Обоснованность научных положений, выводов, теоретических и практических рекомендаций основана на доказательствах соответствующих утверждений и теорем. Применение полученных результатов продемонстрировано на численных исследованиях в Matlab и экспериментальных исследованиях на стенде по изучению алгоритмов управления электроэнергетическими сетями.

Научная значимость состоит в полученных новых методах и алгоритмах управления, гарантирующих заданное качество регулирования в условиях неопределенности для сложных моделей технических и технологических процессов, которые описываются линейными и некоторыми типами нелинейных систем, в том числе сетевыми и распределенными системами.

Практическая значимость состоит в возможности применения полученных методов и алгоритмов для разработки алгоритмического обеспечения для широкого круга технических и технологических задач, в том числе при управлении электроэнергетическими сетями, колебательными системами, электромеханическими системами, управления в нефтегазодобывающей промышленности и т.п.

Результаты диссертации **получены при выполнении следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:**

- Грант РФФИ № 18-79-10104 «Управление сетевыми системами в условиях неопределенностей и запаздывания с применением к управлению электроэнергетическими сетями».
- Грант РФФИ № 19-08-00246 «Разработка методов и алгоритмов оптимального управления системами большой размерности в условиях неопределенностей с применением к управлению процессом ректификации».
- Грант РФФИ № 20-08-00610 «Методы управления через зашумленные каналы приема-передачи данных с неконтролируемой задержкой».
- Мегагрант (в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 220), соглашение № 075-15-2021-573 от «31» мая 2021 г. «Теоретические основы цифровизации анализа и синтеза сложных механических систем, сетей и сред».
- Государственное задание в сфере науки «Адаптивное и интеллектуальное управление сетевыми и распределенными системами» (реализуемое в рамках национального проекта «Наука и университеты» и по результатам конкурса Минобрнауки России о создании молодежных лабораторий на базе НОЦ).
- Мегагрант (в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 218), НИОКТР «Разработка типоразмерного ряда универ-

сальных многофункциональных мехатронных модулей, обеспечивающих функционирование исполнительных систем трансформируемых конструкций объектов авиационно-космической техники» по договору № 000000S407521QM80002/РИМС-12-1130/ИПМаш от «10» июня 2022 г.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на международных и российских конференциях:

- 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2017, November 6 - 8, Munich, Germany.
- IEEE 2019 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Paris, France, April 23-26, 2019.
- 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (INSTICC2019), Prague, Czech Republic, 29-31 July, 2019.
- XIII Всероссийское совещание по проблемам управления, 17-20 июня, 2019, Москва, Россия.
- 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ -2019», 22 - 25 апреля, 2019, Москва, Россия.
- 21st International Federation on Automatic Control World Congress (WC IFAC 2020), Berlin, Germany, 12-17 July, 2020.
- 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 15-18 September, 2020, Saint-Raphael, France.
- XIV Всероссийская мультikonференция по проблемам управления МКПУ-2021, 27 сентября - 02 октября 2021 г., с. Дивноморское, г. Геленджик, Краснодарский край, Россия.
- Baltic Forum: Neuroscience, Artificial Intelligent and Complex Systems (BF-NAICS 2022), 14-16 September, 2022, Kaliningrad, Russia.

- 30th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2022, June 28 - July 1, 2022, Athens, Greece.
- 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (WC IFAC 2023), 9 July - 14 July, 2023, Yokohama, Japan.

Личный вклад. Положения, выносимые на защиту, разработаны автором лично. Автор принимал участие в разработке, доказательстве и апробации схем управления:

- основанных на использовании субпредикторов;
- в условиях возмущений и помех измерения;
- гарантирующих заданное качество в заданных множествах в любой момент времени по входным и выходным сигналам;
- скалярными системами параболического и гиперболического типов в условиях параметрической неопределенности и возмущений;
- с использованием дивергентных методов;
- электроэнергетическими сетями при наличии параметрической неопределенности, возмущений и ошибок измерений.

Подготовка публикаций по теме диссертации проводилась совместно с соавторами, при этом вклад П.А. Гущина основной. Результаты первой главы опубликованы в работах [1, 5, 14, 15, 16, 17, 33]. В них П.А. Гущиным предложены предикторные и субпредикторные схемы управления, проведены доказательства всех утверждений и теорем. Совместно с соавторами осуществлено численное моделирование. Результаты второй главы опубликованы в работах [1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 13, 20, 24, 25, 32, 50]. В них П.А. Гущиным предложены алгоритмы компенсации возмущений и помех измерения, а также проведено доказательство их работоспособности. Совместно с соавторами проведены численные исследования. Результаты третьей главы опубликованы в работах [1, 12, 18, 22, 29, 35]. В них П.А. Гущиным предложен

метод нелинейного управления с гарантией нахождения входных и выходных сигналов заданных множествах, проведены доказательства работоспособности предложенных алгоритмов управления. Совместно с соавторами проведены численные исследования. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [1, 10, 11, 26, 34, 37, 38, 39, 41, 42, 44, 45, 49]. В них П.А. Гущиным предложен дискретный по пространственной переменной нелинейный закон управления, проведены доказательства работоспособности предложенных алгоритмов управления. Совместно с соавторами проведены численные исследования. Результаты пятой главы опубликованы в работах [1, 19, 21, 23, 30, 31], где П.А. Гущиным предложен метод дивергентного исследования устойчивости динамических систем и методы дивергентного управления, проведены доказательства утверждений и теорем. Совместно с соавторами проведены численные исследования. Результаты шестой главы опубликованы в работах [1, 8, 27, 28, 36, 40, 43, 46, 47, 48]. В них П.А. Гущиным предложен метод управления электроэнергетическими сетями в условиях возмущений, помех измерения и ограничений, проведены доказательства всех утверждений и теорем. Совместно с соавторами проведены численные исследования.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 50 печатных изданиях, 1 из которых монография, 11 – в журналах, рекомендованных ВАК, 19 – в журналах и докладах конференций, которые индексируются международными наукометрическими базами Scopus и Web of Science, 5 – в тезисах докладов. Зарегистрировано 14 программы для ЭВМ (получены свидетельства о государственной регистрации).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 299 страницы с 59 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 237 наименования.

Основное содержание работы

Во введении изложена актуальность темы исследования, определены

цель и задачи, показаны научная новизна, практическая и научная значимость работы.

Глава 1 посвящена синтезу алгоритмов управления линейными объектами с запаздывающим входным сигналом при наличии внешних возмущений. Рассматриваются объекты с запаздыванием в канале управления, которые описываются следующим уравнением:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - h) + Bf(t), \\ t &\geq 0, \quad u(s) = 0, \quad s < 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – измеряемый вектор состояния, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ – сигнал управления, $f(t) \in \mathbb{R}^m$ – внешнее возмущение с ограниченными $(r + 3)$ производными, $r \geq 0$ – параметр, который будет использоваться при синтезе алгоритма управления, $h > 0$ – известное время запаздывания, A и B – известные матрицы соответствующих размерностей, пара (A, B) управляема, и выполнено условие $B^+B = I_m$.

Алгоритмы А.Л. Фрадкова, И.Б. Фуртат, В.Л. Харитонов, М. Krstic, A. Manitius, V. Mischel, S. Mondie, A. Olbrot и др. обеспечивают устойчивость (1) по вход-состоянию и выполнение условия

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |x(t)| \leq \delta, \tag{2}$$

где $\delta = O\left(\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |f(t)|\right)$, $O(\chi)$ для $\chi \in \mathbb{R}$ означает, что $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{O(\chi)}{\chi} = \text{const.}$ Точность регулирования в установившемся режиме зависит от сигнала возмущения.

В диссертационной работе цель управления состоит в разработке алгоритма управления, который обеспечит $\delta = O\left(h^{r+1} \overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |f^{(r+1)}(t)|\right)$. В отличие от существующих результатов, предложенный алгоритм позволит компенсировать большие по амплитуде возмущения.

Структурная схема системы управления изображена на рисунке 1.

Принцип работы схемы управления заключается в следующем: сигнал u представим в виде:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t). \tag{3}$$

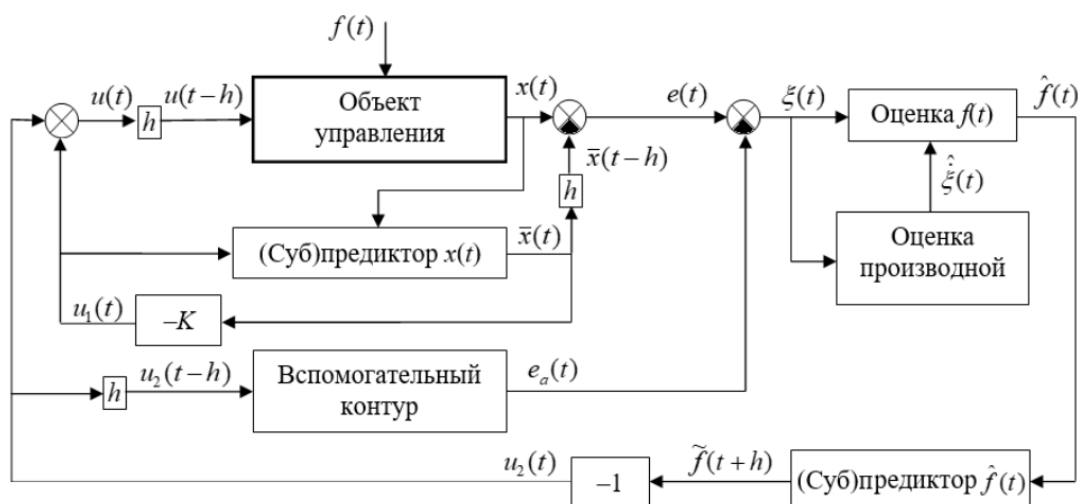


Рисунок 1 — Структурная схема системы управления объектами с входным запаздыванием.

С помощью сигнала u_1 будем обеспечивать устойчивость замкнутой системы, а с помощью сигнала u_2 компенсацию возмущения f . Формируется предиктор регулируемой величины для синтеза u_1 («Предиктор $x(t)$ » на рисунке 1). Затем формируется оценка возмущения $\hat{f}$ с использованием вспомогательного контура и алгоритма оценки производной. Для прогноза оценки возмущения $\hat{f}$ используется предиктор возмущения («Предиктор $\hat{f}(t)$ » на рис. 1). После формируется сигнал компенсации возмущения u_2 .

Предложено обобщение данных результатов для управления объектами с бóльшим временем запаздывания. Дополнительно новый алгоритм позволит существенно сократить время прогноза возмущения. Для решения данной задачи синтезированы субпредикторы регулируемой величины и возмущения. Структурная схема такой системы управления подобна схеме, представленной на рисунке 1, где вместо предикторов используются соответствующие субпредикторы.

Получены достаточные условия устойчивости замкнутой системы в виде разрешимости линейных матричных неравенств (ЛМН). Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенной схемы по сравнению с некоторыми существующими, где показано, что принцип компенсации возмущений позволяет существенно улучшить качество регулирования в установившемся режиме, по сравнению с существую-

щими схемами подавления возмущений. В свою очередь, субпредикторная схема позволяет рассматривать объекты с большим запаздыванием во входном канале, чем схемы А.Л. Фрадкова, И.Б. Фуртата, В.Л. Харитонов, М. Krstic, A. Manitius, V. Mischel, S. Mondie, A. Olbrot и др.

В главе 2 предложен алгоритм стабилизации нелинейных систем со снижением уровня влияния помех измерения, параметрической неопределенности и внешних возмущений. Рассматриваются модели объектов в виде:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Df(x, u, t), \quad y = Lx, \quad (4)$$

$$z = y + \xi, \quad (5)$$

где $x = x(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния, $u = u(t) \in \mathbb{R}^l$ – управляющий сигнал, $y = y(t) \in \mathbb{R}^m$ – неизмеренный выходной сигнал ($m \geq 2$), сигнал $z = z(t) \in \mathbb{R}^m$ доступен для измерения, $\xi = \xi(t) = [\xi_1(t), \dots, \xi_m(t)]^T$ – ограниченный шум с ограниченным $\dot{\xi}_r$, $r \in \{1, 2, \dots, m\}$. Обозначим $\chi_1 = \limsup_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |\xi_r(t)|$ и $\chi_2 = \limsup_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |\dot{\xi}_r(t)|$. Неизвестная функция $f = f(x, u, t) \in \mathbb{R}^g$ включает в себя неизвестную нелинейность $\psi(x, t)$, управление $u(t)$ с неизвестным параметром и внешнее возмущение $\varphi(t)$ в виде $f = \psi(x, t) + c_0 Gu(t) + \varphi(t)$, где $|\psi| \leq \alpha_1 |x|$, $\|\psi'_x\| \leq \alpha_2$, $|\psi'_t| \leq \alpha_3 |x|$, $\chi_3 = \limsup_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |\varphi|$ и $\chi_4 = \limsup_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |\dot{\varphi}|$. Коэффициент c_0 неизвестен, но $c_0 \in [c_{\min}, c_{\max}]$, где $c_{\min}$ и $c_{\max}$ известны. Матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times l}$, $D \in \mathbb{R}^{n \times g}$, $L \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $G \in \mathbb{R}^{g \times l}$ известны, а A гурвицева.

Разработан алгоритм, обеспечивающий устойчивость от входа к состоянию (4) с выполнением оценки

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |y(t)| \leq \delta, \quad (6)$$

где $\delta = \Theta(\sum_{i=1}^4 \chi_i)$. Таким образом, точность в установившемся режиме зависит от возмущения φ , r -й компоненты вектора помехи и их первых производных. В работах авторов С.А. Красновой, Б.Т. Поляка, В.В. Путова, А.В. Уткина, В.А. Уткина, М.В. Хлебникова, А. Isidori, Н. Khalil, R. Marino, Р. Tomei и др. точность δ зависит от возмущения φ , всех компонент вектора помехи и его производных.

Рассмотрим основные этапы проектирования схемы управления. Уравнения объекта (4), (5) содержат два независимых неизвестных сигнала f и ξ , поэтому для одновременной компенсации f и ξ требуется не менее двух независимых измерений выхода объекта, следовательно, $m \geq 2$. Таким образом, разработка алгоритма состоит из двух шагов. На первом шаге оценивается новый вектор помехи без r -й компоненты $\tilde{\xi} = [\xi_1, \dots, \xi_{r-1}, \xi_{r+1}, \dots, \xi_m]^T$. С этой целью разработан алгоритм оценивания $\tilde{\xi}$. В результате на точность оценки помехи влияет только компонента ξ_r , а не весь вектор ξ . На втором шаге с использованием информации о $\hat{\xi}$ неизвестная функция f оценивается и компенсируется с помощью закона управления (см. «Компенсатор возмущений» на рисунке 2).

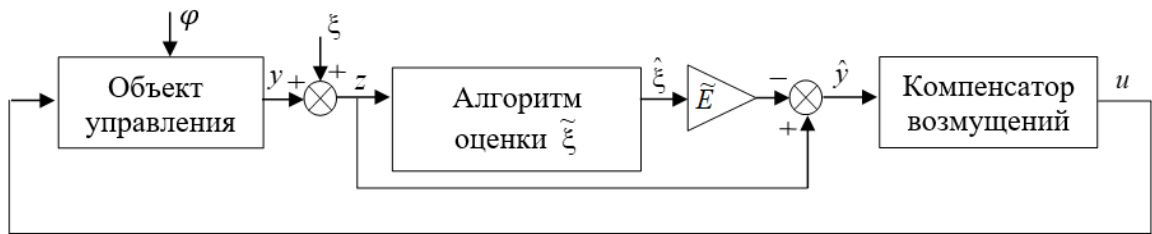


Рисунок 2 — Структура схемы управления при наличии возмущений и помех измерения.

Таким образом, рассмотрены объекты с помехами измерения, размерность которых совпадает с размерностью вектора состояния объекта. Параметрическая неопределенность и внешние возмущения могут присутствовать в любом уравнении модели объекта. Получены условия расчета параметров алгоритма в виде разрешимости ЛМН. Численные примеры демонстрируют эффективность предложенной схемы.

В главе 2 также рассмотрено решение задачи робастной стабилизации линейных динамических объектов с неизвестными параметрами, принадлежащими известному компактному множеству, ограниченными внешними возмущениями и ограниченными высокочастотными помехами измерения. Синтез алгоритма управления разбивается на два этапа. На первом этапе синтезируется алгоритм фильтрации, позволяющий уменьшить влияние

помехи измерения на выходную переменную объекта. Для случая, когда помеху измерения можно представить в виде суммы синусоидальных сигналов, предложены конструктивные условия выбора параметров в алгоритме фильтрации. На втором этапе синтезируется алгоритм управления с подавлением влияния параметрической неопределенности и внешних возмущений. Данный алгоритм базируется на использовании конечных разностей в непрерывном времени, что позволяет избежать использования динамических наблюдателей, увеличивающих размерность замкнутой системы. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность разработанного алгоритма по сравнению с некоторыми существующими аналогами. Сравнительный анализ с результатами D. Astolfi, L. Marconi, A. Isidori и др. показал, что используемый алгоритм управления, имея меньший динамический порядок, гарантирует более высокую точность регулирования по выходному сигналу и его производным. В отличие от результатов D. Astolfi, L. Marconi, A. Isidori и др., в предложенном алгоритме настройка параметров проще за счет независимой настройки фильтра и закона управления, тогда как настройка параметров в регуляторе D. Astolfi, L. Marconi, A. Isidori и др. осуществляется одновременно для всего алгоритма.

В главе 3 предложен метод управления динамическими системами, позволяющий гарантировать нахождение выходного сигнала объекта в заданном множестве в любой момент времени, что обобщает предложенные результаты в первых двух главах. Для решения задачи используется специальная замена координат, позволяющая свести исходную задачу с ограничениями к задаче исследования на устойчивость по вход-состоянию новой расширенной системы без ограничений. Приведены примеры замены координат и синтезированы алгоритмы управления линейными объектами и системами с секторной нелинейностью при наличии параметрической неопределенности и возмущений.

Рассматриваются динамические системы в общем виде

$$\begin{aligned}\dot{x} &= F(x, u, t), \\ y &= h(x),\end{aligned}\tag{7}$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния, $u \in U \subset \mathbb{R}^m$ – сигнал управления, $y = \text{col}\{y_1, \dots, y_v\}$ – выходной сигнал, вектор-функция F определена для всех x , u и t , кусочно-непрерывна и ограничена по t , $h(x)$ – непрерывно-дифференцируемая функция по x . Объект управления (7) – управляемый и наблюдаемый для любого $x \in \mathbb{R}^n$.

Разработан ряд законов управления, которые обеспечивают нахождение выходного сигнала объекта $y(t)$ в следующем множестве:

$$\mathcal{Y} = \left\{ y \in \mathbb{R}^v : \underline{g}_i(t) < y_i(t) < \bar{g}_i(t), i = 1, \dots, v \right\}\tag{8}$$

для любых $t \geq 0$, где $\underline{g}_i(t)$ и $\bar{g}_i(t)$ – ограниченные функции вместе со своими первыми производными по времени. Данные функции выбираются разработчиком, исходя из требований работы системы. Например, при управлении электрическим генератором требуется поддержание частоты $w(t)$ и выходного напряжения $V(t)$ в заданных пределах: $\underline{w} < w(t) < \bar{w}$ и $\underline{V} < V(t) < \bar{V}$.

Общая идея решения данной задачи состоит в следующем. Положим, что $y \in \mathbb{R}$ в (7) и $\underline{g}(t) < y(t) < \bar{g}(t)$ в (8). Выберем произвольное значение $t = t_1$ и обозначим интервал $A_1 B_1 = (\underline{g}(t_1); \bar{g}(t_1))$ (см. рисунок 3). Введем новую систему координат с $\varepsilon \in \mathbb{R}$ и рассмотрим в ней вертикальную прямую α_1 в момент времени t_1 . Интервал $A_1 B_1$ и прямая α_1 являются эквивалентными множествами в том смысле, что между их элементами можно установить взаимнооднозначное соответствие вида $y(t_1) = \Phi(\varepsilon(t_1), t_1)$ и $\varepsilon(t_1) = \Phi^{-1}(y(t_1), t_1)$. Поскольку значение t_1 произвольно, то можно ввести замену координат, устанавливающую взаимнооднозначное соответствие для любого момента времени. В результате исходная задача с ограничениями на выходной сигнал будет преобразована к новой задаче без ограничений в новом пространстве, где для обеспечения устойчивости новой системы могут быть использованы любые существующие методы управле-

ния. Упрощенная иллюстрация метода замены координат представлена на рисунке 3.

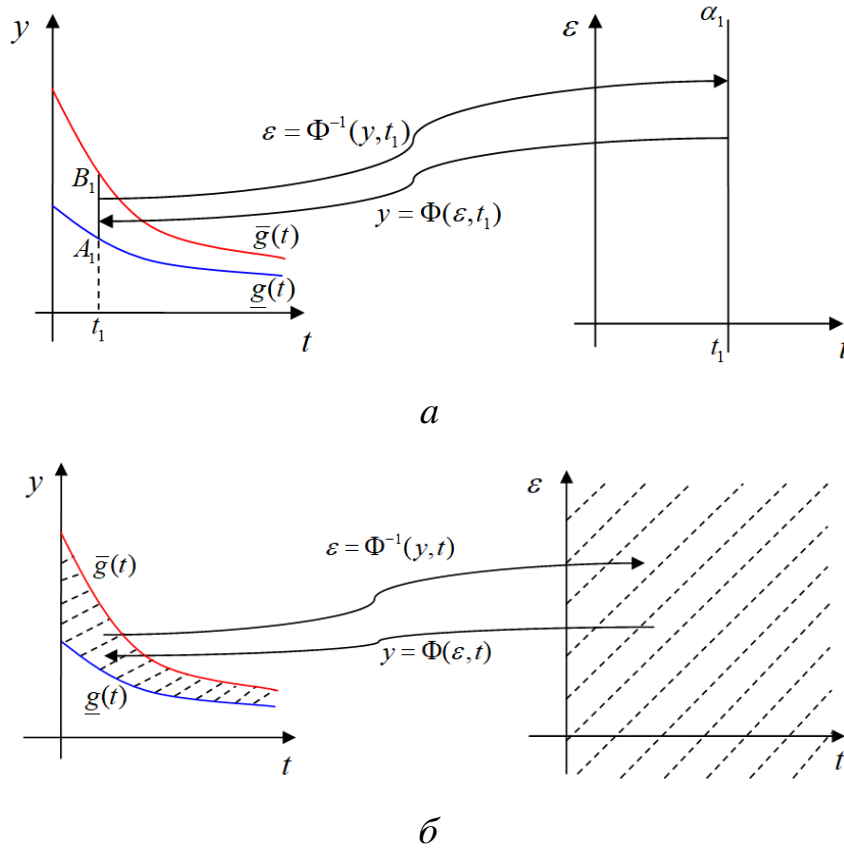


Рисунок 3 — Упрощенная иллюстрация метода замены координат.

Введем замену выходной переменной y в общем виде

$$y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t), \quad (9)$$

где $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}^v$ — непрерывно-дифференцируемая вектор-функция по t , функция $\Phi(\varepsilon, t) = \text{col}\{\Phi_1(\varepsilon, t), \dots, \Phi_v(\varepsilon, t)\}$ удовлетворяет следующим условиям:

- (а) $\underline{g}_i(t) < \Phi_i(\varepsilon, t) < \bar{g}_i(t)$, $i = 1, \dots, v$ для всех $t \geq 0$ и $\varepsilon \in \mathbb{R}^v$;
- (б) существует обратное отображение $\varepsilon = \Phi^{-1}(y, t)$ для всех $y \in \mathcal{Y}$ и $t \geq 0$;
- (в) функция $\Phi(\varepsilon, t)$ непрерывно-дифференцируемая по ε и t , а также $\det \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right) \neq 0$ для всех $y \in \mathcal{Y}$ и $t \geq 0$;

(г) функция $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t}$ ограничена по $t \geq 0$ для всех $\varepsilon \in \mathbb{R}^v$.

Определим динамику по переменной ε для исследования устойчивости замкнутой системы. Для этого найдем полную производную по времени от (9) в виде $\dot{y} = \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t}$. Так как $\det \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right) \neq 0$ (см. условие (в)), то перепишем последнее равенство как

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \left(\dot{y} - \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right). \quad (10)$$

Выражение (10) содержит сигнал управления $u(t)$, так как $\dot{y} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} F(x, u, t)$ из (7).

Основной результат главы 3: пусть для преобразования (9) выполнены условия (а)-(г). Если существует такой закон управления $u(t) \subset U$, что решения (10) ограничены, то $y(t) \in \mathcal{Y}_\alpha \subset \mathcal{Y}$. Если при выбранном законе управления решения (10) неограниченны, то $y(t) \in \mathcal{Y}$.

Полученный результат применяется для построения законов управления с измеряемым вектором состояния и измеряемым выходным сигналом. Затем полученные результаты обобщаются на задачи с заданными ограничениями на входные и выходные сигналы.

В главе 4 предложен дискретный по пространственной переменной закон управления некоторым классом скалярных линейных дифференциальных уравнений параболического и гиперболического типа с неизвестными параметрами и возмущениями.

Первый класс исследуемых объектов описывается скалярным линейным дифференциальным уравнением параболического типа

$$\begin{aligned} z_t(x, t) = & a_1 z_{xx}(x, t) + a_2 z_x(x, t) + \\ & + \phi z(x, t) + u(x, t) + f(x, t), \\ & x \in [0, l], \quad l > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

с граничными условиями Дирихле

$$z(0, t) = z(l, t) = 0 \quad (12)$$

или смешанными граничными условиями

$$z_x(0, t) = v z(0, t), \quad z(l, t) = 0, \quad v \geq 0. \quad (13)$$

Здесь $z : [0, l] \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ – состояние объекта, $u(x, t)$ – сигнал управления, $f(x, t)$ – возмущение класса $\mathcal{C}^1$. Коэффициенты a_1, a_2, ϕ и функция $f(x, t)$ неизвестны, но известны границы интервалов, которым они принадлежат: $0 < \underline{a}_1 \leq a_1, \underline{a}_2 \leq a_2 \leq \bar{a}_2, \underline{\phi} \leq \phi \leq \bar{\phi}, |f(x, t)| \leq \bar{f}$. Величина v в (13) может быть неизвестной.

Второй класс исследуемых объектов описывается скалярным линейным дифференциальным уравнением гиперболического типа в виде

$$\begin{aligned} z_{tt}(x, t) = & a_1 z_{xx}(x, t) + a_2 z_x(x, t) + \phi z(x, t) - bz_t(x, t) \\ & + u(x, t) + f(x, t), \\ & x \in [0, l], \end{aligned} \quad (14)$$

с граничными условиями Дирихле (12) или смешанными граничными условиями (13). В (14) $\bar{b} > b > \underline{b} > 0$, где вершины $\bar{b}$ и $\underline{b}$ известны. Остальные константы и функции в (14) принимают те же значения, что и в (11).

Для решения задачи разобьем отрезок $[0, l]$ на N подынтервалов не обязательно равной длины и обозначим

$$\begin{aligned} 0 = x_0 < x_1 < \dots < x_N = l, \quad \Delta \geq x_{j+1} - x_j, \\ j = 0, \dots, N - 1. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь Δ – известная константа. Предположим, что N сенсоров расположены внутри данных подынтервалов, т.е. доступны измерению только сигналы $z(\bar{x}_j, t)$, где $\bar{x}_j \in (x_j, x_{j+1})$, $j = 0, \dots, N - 1$.

Цель управления состоит в разработке дискретного по пространственной переменной x закона управления, который обеспечит экспоненциальную устойчивость замкнутой системы для (11) и (14).

Закон управления формируется в виде

$$\begin{aligned} u(x, t) = & -KF^j(z(\bar{x}_j, t), x, t), \quad x \in [x_j, x_{j+1}), \\ & \bar{x}_j \in (x_j, x_{j+1}), \quad j = 0, \dots, N - 1, \end{aligned} \quad (16)$$

где $K > 0$, функция $F^j(z(\bar{x}_j, t), x, t)$ удовлетворяет следующим условиям:

- (а) $F^j(z(\bar{x}_j, t), x, t)$ из класса $\mathcal{C}^1$ для любых $t \geq 0$ и $x \in [0, l]$;

(б) производная $F_x^j(z(\bar{x}_j, t), x, t)$ ограничена для любых $t \geq 0$ и $x \in [0, l]$;

(в) $F^j(z(\bar{x}_j, t), \bar{x}_j, t) = z(\bar{x}_j, t)$, $\bar{x}_j \in (x_j, x_{j+1})$, $j = 0, \dots, N - 1$.

Для реализации закона управления доступно конечное множество дискретных измерений (по пространственной переменной) состояния объекта, что делает схему управления технически реализуемой. Закон управления зависит от функции, которая зависит от пространственной переменной и от конечного набора измерений состояния объекта. Вид регулирующего сигнала зависит от данной функции. Приведены примеры функций, позволяющих реализовать управляющий сигнал лишь на отдельных интервалах по пространственной переменной и обеспечивающих меньшие затраты на управление по сравнению с некоторыми другими аналогами. Доказана экспоненциальная устойчивость замкнутой системы и робастность по отношению к интервально неопределенным параметрам объекта и внешним ограниченными возмущениям. Численные примеры моделирования подтвердили результаты расчетов и показали эффективность предложенного алгоритма по сравнению с некоторыми существующими аналогами Ю. Орлова, Э. Фридман, М. Krstic и др.

В главе 5 предложен метод исследования экспоненциальной устойчивости динамических систем с использованием свойств потока и дивергенции вектора фазовой скорости. Установлена связь между методом функций Ляпунова и предложенным методом. На базе полученных результатов приведен синтез закона управления с обратной связью по состоянию для стабилизации динамических систем, который сводится к решению дифференциального неравенства относительно искомой функции управления. Рассмотрены примеры, показывающие применимость предложенного метода. Полученные методы можно успешно применять для анализа устойчивости динамических систем, исследуемых в диссертационной работе и во многих других работах, а также для синтеза новых законов управления.

В главе 6 рассмотрена задача робастной синхронизации электроэнер-

гетической сети с неизвестными параметрами. Измерению доступны зашумленные углы нагрузки каждого генератора, где шум в измерениях обусловлен влиянием вибраций со стороны генераторов на датчики и самим классом точности датчиков. Синтезирован алгоритм, позволяющий уменьшить влияние помехи на сигналы измерения и обеспечить синхронизацию сети в нормальном режиме работы и аварийных ситуациях, связанных с внезапным изменением проводимости линий электропередач. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность разработанного алгоритма.

Экспериментальное исследование полученных алгоритмов управления проведено на «Энергетическом стенде ЭС-1», разработанном и расположенном в ИПМаш РАН. Функциональная схема стенда представлена на рисунке 4. Экспериментальный стенд является уникальной установкой по изучению и исследованию систем управления электроэнергетической сетью. Данный стенд позволяет исследовать существующие алгоритмы управления сетью электрических генераторов в штатном режиме их работы и аварийных ситуациях, связанных с внезапным изменением нагрузки в сети. Объектами управления являются три электрических генератора (модель 371.3701), каждый из которых имеет прямую механическую связь с электрическим двигателем (модель 5АИЕ 71 В2) для приведения генератора в движение, обмотку возбуждения ротора для управления вырабатываемой генератором энергии, 3 фазы выходного тока для снятия нагрузки.

Роль источника механического воздействия на генераторы играют электрические двигатели переменного тока, питающиеся от сети 220 В. Вал двигателя и генератора соединен гибкой муфтой, на которой закреплен диск для работы оптического энкодера. Энкодер служит для получения данных о скорости вращения вала генератора. Полученные данные передаются напрямую в плату управления.

На рисунке 5 приведены результаты переходных процессов по частоте вращения роторов генераторов при различных изменениях нагрузки в сети с использованием балластных реостатов. Видно, что разработанные алгоритмы обеспечивают синхронизацию сети из трех генераторов в усло-

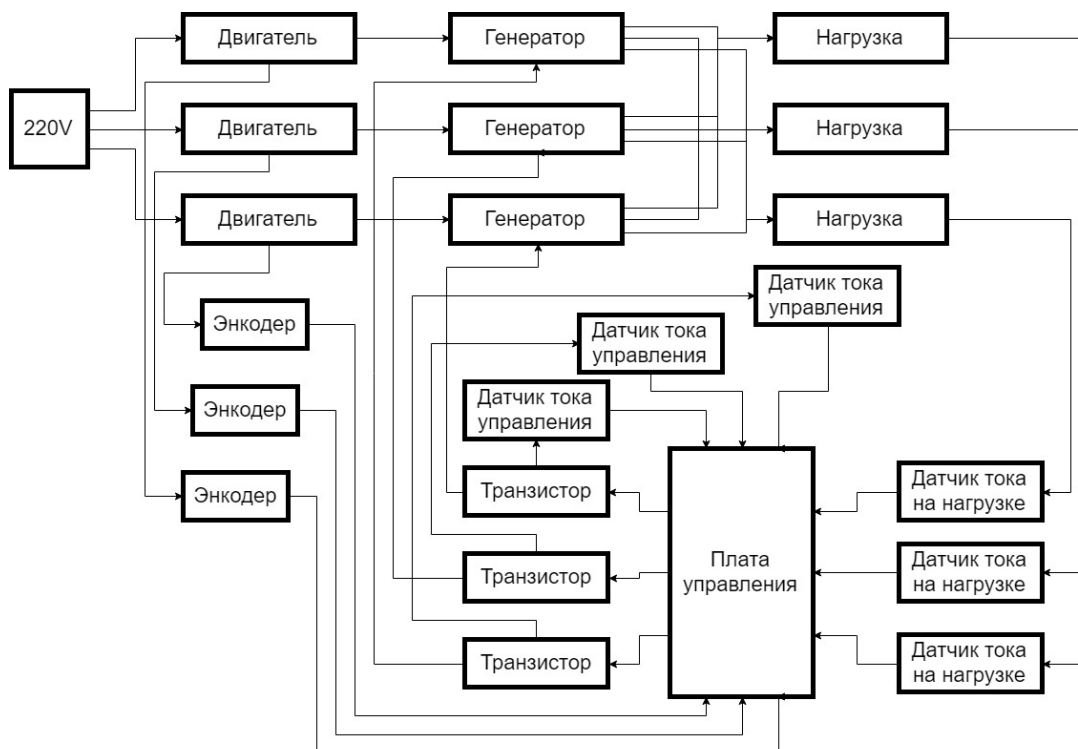


Рисунок 4 — Функциональная схема «Энергетического стенда ЭС-1».

виях параметрической неопределенности, внешних возмущений и помех измерения.

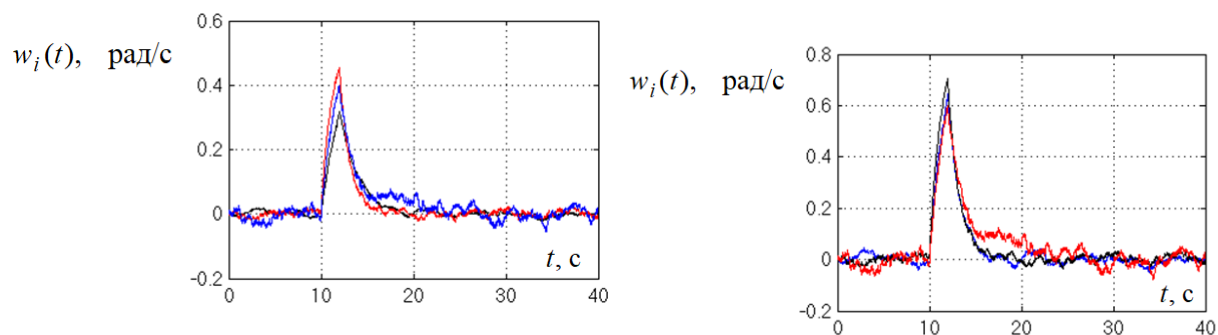


Рисунок 5 — Переходные процессы по частоте вращения роторов генераторов при различных изменениях нагрузки в сети.

Заключение

В диссертационной работе решена крупная научная проблема, связанная с разработкой новых методов и алгоритмов управления, гарантирующих заданное качество регулирования в установившемся и переходном

режимах в условии неопределенности. Решены три крупные взаимосвязанные задачи, а именно:

1. Разработаны методы и алгоритмы управления, гарантирующие заданное качество регулирования в установившемся режиме.
2. Полученные методы и алгоритмы развиты на задачи с гарантией заданного качества регулирования в любой момент времени.
3. Разработаны методы и алгоритмы управления электроэнергетическими сетями.

При решении задач получены следующие результаты:

1. Синтезированы алгоритмы управления линейными объектами с запаздывающим входным сигналом при наличии внешних возмущений. Первый алгоритм основан на использовании предикторов регулируемой величины и возмущения. Второй алгоритм базируется на использовании субпредикторов регулируемой величины и возмущения. Показано, что использование принципа компенсации возмущений позволяет существенно уменьшить влияние возмущений на качество переходных процессов по сравнению с методами подавления возмущений. Получены достаточные условия устойчивости замкнутой системы в виде разрешимости ЛМН.
2. Разработан алгоритм управления с обратной связью по выходу с компенсацией возмущений и помех измерения в нелинейных системах с несколькими входами и выходами. Размерность помехи может быть равна размерности выхода объекта, помехи и возмущения независимы, а закон управления имеет только один настраиваемый параметр μ . Достаточные условия, сформулированные в терминах линейных матричных неравенств, обеспечивают устойчивость замкнутой системы. Точность в установившемся режиме зависит от возмущения, одной составляющей помехи и ее первой производной. Численные примеры демонстрируют эффективность предложенного метода при наличии гладких и случайных помех и возмущений.

3. Синтезирован робастный алгоритм управления в условиях параметрической неопределенности, внешних ограниченных возмущений и высокочастотных помех в измерениях выходной переменной. Для синтеза системы управления используется подход, позволяющий независимо управлять качеством фильтрации помехи и качеством ошибки стабилизации выходной переменной. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность разработанного алгоритма по сравнению с наблюдателем с большим коэффициентом усиления и наблюдателем с большим коэффициентом усиления в условиях помех измерения.
4. Разработан новый метод управления динамическими системами, позволяющий гарантировать нахождение выходной переменной объекта управления в заданном множестве. Для решения задачи предложена замена координат, позволяющая свести исходную задачу с ограничениями к задаче исследования на устойчивость по вход-состоянию новой расширенной динамической системы без ограничений. Приведены примеры замены координат и алгоритмы управления линейными объектами и динамическими системами с секторной нелинейностью. Полученные результаты сопровождаются моделированием, демонстрирующим эффективность предложенного метода и подтверждающим аналитические выводы.
5. Далее метод развит на динамические системы с произвольным соотношением числа управлений и выходных сигналов и гарантией их нахождения в заданных множествах. Разработанный метод применяется для решения задач управления по состоянию и по выходу линейными системами с учетом ограничений на сигнал управления и выходные переменные, где размерность регулируемых переменных больше размерности сигнала управления. Устойчивость замкнутой системы и синтез параметров регулятора сформулированы в терминах разрешимости ЛМН.
6. Предложен дискретный по пространственной переменной закон

управления скалярными линейными дифференциальными уравнениями параболического и гиперболического типов с интервально неопределенными параметрами и внешними ограниченными возмущениями. Для синтеза закона управления используется конечный набор измерений выходного сигнала. Закон управления зависит от функции, зависящей от пространственной координаты и текущего измерения. Данная функция позволяет достигать разных свойств, например, обеспечивать пониженные затраты на управление или реализовывать управление близкое к граничному. Доказана экспоненциальная устойчивость замкнутых систем и робастность по отношению к параметрам и внешним возмущениям. Численные примеры моделирования подтвердили результаты расчетов и показали эффективность предложенного алгоритма по сравнению с существующими результатами в том смысле, что при меньших затратах на управление можно достичь выше скорость сходимости решений и качество регулирования в установившемся режиме.

7. Предложен новый дивергентный метод для исследования экспоненциальной устойчивости автономных динамических систем. Свойство экспоненциальной устойчивости позволяет повысить устойчивость системы к некоторым видам возмущений и неопределенностей.
8. Достоинством предлагаемого дивергентного метода является то, что сформулированные необходимые и достаточные условия имеют вид уравнения неразрывности, что широко используется в механике и физике, а также в некоторых промышленных задачах.
9. Предложенные достаточные условия применяются для синтеза закона управления с обратной связью по состоянию. Показано, что закон управления находится как решение дифференциального неравенства, а закон управления, основанный на методе функций Ляпунова, находится как решение алгебраического неравенства.
10. Синтезированы робастные алгоритмы синхронизации электроэнер-

гетической сети в условиях параметрической неопределенности, высокочастотных помех в измерениях выходной переменной и неизвестном коммуникационном запаздывании. Предложенные подходы позволяют независимо управлять качеством фильтрации помехи и качеством ошибки синхронизации электроэнергетической сети. Приведены результаты моделирования и эксперимента, демонстрирующие эффективность разработанного алгоритма.

Работы, опубликованные автором по теме диссертации

Монография:

1. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Методы анализа и синтеза линейных и нелинейных систем управления при наличии возмущений и запаздывания. – Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2021. – 194 с.

В изданиях, рекомендованных ВАК:

2. Гущин П.А., Винокуров В.А., Фуртат И.Б. Робастное управление ректификационной колонной с компенсацией возмущений // Технологии нефти и газа. Научно-технологический журнал. – 2011. – № 3. – С. 36-40.
3. Викторов А.С., Гущин П.А., Фуртат И.Б. Адаптивное управление процессом адсорбции // Башкирский химический журнал. – 2011. – Том 18. – № 4. – С. 152-155.
4. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Перегудин А.А. Алгоритм управления по выходу нелинейными системами с компенсацией возмущений и помех измерения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 1. – С. 3-15.
5. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Алгоритм управления объектами с запаздывающим входным сигналом на базе субпредикторов регулируемой величины и возмущения // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 2. – С. 3-23 (переводная версия Furtat I.B., Gushchin P.A. A Control Algorithm for an Object with Delayed Input Signal Based on Subpredictors of the Controlled Variable and Disturbance // Automation and Remote Control. – 2019. – Vol. 80, no. 2 – P. 201-216).
6. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Алгоритм управления в условии насыщения сигнала управления и его производных // Управление большими системами. – 2019. – Т. 77. – С. 47-69.

7. Фуртат И.Б., Гушин П.А., Перегудин А.А. Подавление возмущений с минимизацией эллипсоидов, ограничивающих фазовые траектории системы в переходном и установившемся режимах // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Том 21. – № 4. – С. 195-199.
8. Фуртат И.Б., Нехороших А.Н., Гушин П.А., Чугина Ю.В. Синхронизация электроэнергетической сети в условиях высокочастотных помех измерения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Том 21. – №10. – С. 584-594.
9. Фуртат И.Б., Нехороших А.Н., Гушин П.А. Робастная стабилизация линейных объектов при наличии возмущений и высокочастотных помех измерения // Управление большими системами. Выпуск 86. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 32-54 (переводная версия Furtat I.B., Nekhoroshikh A.N., Gushchin P.A. Robust Stabilization of Linear Plants in the Presence of Disturbances and High-Frequency Measurement Noise // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82, no. 7. – P. 1248-1261).
10. Фуртат И.Б., Гушин П.А. Дискретное по пространственной переменной управление скалярными линейными распределенными объектами параболического и гиперболического типов // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 3. – С. 77-97 (переводная версия Furtat I.B., Gushchin P.A. Spatially Discrete Control of Scalar Linear Distributed Plants of Parabolic and Hyperbolic Types // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82, no. 3. – P. 433-448).
11. Фуртат И.Б., Гушин П.А. Дискретное по пространственной переменной управление скалярными линейными распределенными объектами параболического и гиперболического типов // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 3. – С. 77-97 (переводная версия Furtat I.B., Gushchin P.A. Spatially Discrete Control of Scalar Linear Distributed Plants of Parabolic and Hyperbolic Types // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82, no. 3. – P. 433-448).

12. Фуртат И.Б., Гушин П.А., Нгуен Ба Хю. Управление динамическими системами при ограничениях на входные и выходные сигналы // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 4. – С. 45-63.

В журналах и докладах конференций, которые индексируются международными наукометрическими базами Scopus и Web of Science:

13. Furtat I.B., Vrazevsky S.A., Kremlev A.S., P.A. Gushchin. Robust Control Algorithm under Mismatched Disturbances // Proc. of the 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2017. November 6 - 8, Munich, Germany. – P. 61-66.
14. Furtat I., Gushchin P. Tracking control algorithms for plants with input time-delays based on state and disturbance predictors and sub-predictors // Journal of the Franklin Institute. – 2019. – Vol. 356. – P. 4496–4512.
15. Furtat I.B., Gushchin P.A., Nekhoroshikh A.N., Vrazhevsky S.A., Tarasov M.S., Chugina J.V. Algorithms for Prediction of Smooth Bounded Signals // Proc. of the IEEE 2019 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Paris, France, April 23-26, 2019. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820421>
16. Furtat I.B., Gushchin P.A., Nekhoroshikh A.N., Vrazhevsky S.A., Chugina J.V. Modified Backstepping Algorithm for Plants under Mismatched Disturbances and Varying Time-Delay // Proc. of the IEEE 2019 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Paris, France, April 23-26, 2019. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820628>
17. Furtat I., Gushchin P., Konovalov D., Vrazhevsky S. Compensation of Mismatched Disturbances for Nonlinear Plants with Distributed Time-delay // Proc. of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (INSTICC2019). Prague, Czech Republic, 29-31 July, 2019. – P. 269-275

18. Furtat I., Gushchin P. Control of Dynamical Systems with Given Restrictions on Output Signal with Application to Linear Systems // Proc. of the 21st International Federation on Automatic Control World Congress (WC IFAC 2020), Berlin, Germany, 12-17 July 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1775>
19. Furtat I., Gushchin P. Divergence Conditions for Stability Study of Autonomous Nonlinear Systems // Proc. of the 21st International Federation on Automatic Control World Congress (WC IFAC 2020), Berlin, Germany, 12-17 July 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1758>
20. Furtat I., Gushchin P. Tracking Control of Nonlinear Systems under Input and Output Disturbances with Applications // Proc. of the 2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 15-18 September 2020, Saint-Raphael, France. DOI: 10.1109/MED48518.2020.9183156
21. Furtat I., Gushchin P. Stability study and control of nonautonomous dynamical systems based on divergence conditions // Journal of the Franklin Institute. December 2020. Vol. 357, no. 18. P. 13753-13765. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.10.025>
22. Furtat I., Gushchin P. Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>
23. Furtat I.B., Gushchin P.A. Stability/Instability Study and Control of Autonomous Dynamical Systems: Divergence Method // IEEE Access. – 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056942>
24. Furtat I., Gushchin P. Output feedback control with disturbance compensation in nonlinear MIMO systems under measurement noises // Journal of Control and Decision. – 2021. <https://doi.org/10.1080/23307706.2021.1906771>

25. Furtat I.B., Gushchin P.A. Observers of Disturbances and Measurement Noises for Sector-bound Nonlinear System // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. 1864(2021)012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012026>
26. Furtat I., Gushchin P. Sampled-data in space nonlinear control of scalar semilinear parabolic and hyperbolic systems // Journal of the Franklin Institute. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2021.11.010>
27. Furtat I., Nekhoroshikh A., Gushchin P. Synchronization of multi-machine power systems under disturbances and measurement errors // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2022. – Vol. 36, no. 6. – P. 1272-1284. <https://doi.org/10.1002/acs.3372>
28. Furtat I.B., Gushchin P.A., Huy N.B. Control of Electrical Generators Based on Low-pass Filter and Artificial Time-delay // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, no. 12. – P. 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.337> (Proc of the Baltic Forum: Neuroscience, Artificial Intelligent and Complex Systems (BF-NAICS 2022), September 14-16, 2022, Kaliningrad, Russia)
29. Furtat I., Gushchin P., Huy N.B. State feedback control with providing inputs and outputs in given sets // Proc. of the 30th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2022, June 28 – July 1, 2022, Athens, Greece. – P. 217-220. <https://doi.org/10.1109/MED54222.2022.9837181>
30. Furtat, I.B. Gushchin P.A. Divergence Method for Exponential Stability Study of Autonomous Dynamical Systems // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 49088-49094. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172415>
31. Furtat, I.B., Gushchin, P.A. Divergence Method for Stability Study and Control of Dynamical Systems // Advanced Structured Materials. – 2022. – Vol. 164. – P. 227-235.

Публикации в других изданиях:

32. Фуртат И.Б., Гушин П.А. Алгоритм управления нелинейными системами на базе наблюдателей входных и выходных возмущений // Труды XIII Всероссийского совещания по проблемам управления. – 2019. Москва, Россия. – С. 269-273.
33. Фуртат И.Б., Гушин П.А. Алгоритм управления сетевыми системами на базе субпредикторов регулируемой величины и возмущения // Труды XIII Всероссийского совещания по проблемам управления. – Москва, Россия, 17-20 июня 2019 г. – С. 674-678.
34. И.Б. Фуртат, П.А. Гушин, А.Н. Нехороших, Е.А. Тупичин, С.А. Вражевский, А.А. Перегудин, Ю.В. Чугина. Квантованное по пространственной переменной управление некоторым классом распределенных систем // Материалы докладов XIV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2021, 27 сентября - 02 октября 2021 г., с. Дивноморское, г. Геленджик, Краснодарский край. – С. 73-75.
35. И.Б. Фуртат, П.А. Гушин, А.Н. Нехороших, Е.А. Тупичин, С.А. Вражевский, А.А. Перегудин, Ю.В. Чугина. Управление динамическими системами с гарантией заданного качества регулирования в любой момент времени // Материалы докладов XIV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2021, 27 сентября - 02 октября 2021 г., с. Дивноморское, г. Геленджик, Краснодарский край. – С. 76-78.
36. Vrazhevsky S., Furtat I., Gushchin P. Power System Stabilization under Prespecied State-Space Bounds // Proc. of the 22st International Federation on Automatic Control World Congress (WC IFAC 2023), Yokohama, JAPAN, 9 July – 14 July 2023.

Результаты интеллектуальной деятельности (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ):

37. Фуртат И.Б., Гушин П.А., Вражевский С.А., Ананьевский М.С., Чугина Ю.В., Плотников С.А. Дискретное управление сетевыми систе-

мами с компенсацией возмущений, помех измерения и запаздывания // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2019616562. Дата регистрации: 24.05.2019. Номер и дата поступления заявки: 2019613501 02.04.2019. Дата публикации: 24.05.2019

38. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Вражевский С.А. Программа для оптимального управления ректификационной колонной как системой с распределенными параметрами // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2020660760. Дата регистрации: 10.09.2020. Номер и дата поступления заявки: 2020619960 03.09.2020. Дата публикации: 10.09.2020.
39. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Ананьевский М.С. Интеллектуальное управление распределенными системами при использовании цифровых каналов связи // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021665150. Дата регистрации: 21.09.2021. Номер и дата поступления заявки: 2021664417 15.09.2021. Дата публикации: 21.09.2021
40. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Адаптивно-робастное управление электроэнергетическими сетями через цифровые каналы связи // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2022668536. Дата регистрации: 07.10.2022. Номер и дата поступления заявки: 2022668025 03.10.2022. Дата публикации: 07.10.2022
41. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Нехороших А.Н. Программа для оптимального управления системами большой размерности в условиях неопределенностей и возмущений // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2020662771. Дата регистрации: 19.10.2020. Номер и дата поступления заявки: 2020619949 03.09.2020. Дата публикации: 19.10.2020.

42. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Программа для расчета наименьшего количества датчиков и управляющих устройств и их размещение при управлении распределенными системами // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2020660761. Дата регистрации: 10.09.2020. Номер и дата поступления заявки: 2020619958 03.09.2020. Дата публикации: 10.09.2020.
43. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Программа для интеллектуального управления комплексом энергомашин // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2020660734. Дата регистрации: 10.09.2020. Номер и дата поступления заявки: 2020619961 03.09.2020. Дата публикации: 10.09.2020.
44. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Ананьевский М.С. Программа для оптимального управления распределенными системами в условиях неопределенностей и возмущений // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2020660718. Дата регистрации: 10.09.2020. Номер и дата поступления заявки: 2020619970 03.09.2020. Дата публикации: 10.09.2020.
45. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Вражевский С.А. Интеллектуальное управление процессом ректификации с гарантией заданного качества выходных продуктов // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021665670. Дата регистрации: 30.09.2021. Номер и дата поступления заявки: 2021664407 15.09.2021. Дата публикации: 30.09.2021.
46. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Интеллектуальное управление электроэнергетической сетью при наличии больших возмущений // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021665520. Дата регистрации: 28.09.2021. Номер и дата поступления заявки: 2021664406 15.09.2021. Дата публикации: 28.09.2021.
47. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Нехороших А.Н. Цифровое управление

электроэнергетическими сетями // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021665151. Дата регистрации: 21.09.2021. Номер и дата поступления заявки: 2021664418 15.09.2021. Дата публикации: 21.09.2021.

48. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Цифровое управление сетевыми системами // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021665149. Дата регистрации: 21.09.2021. Номер и дата поступления заявки: 2021664416 15.09.2021. Дата публикации: 21.09.2021.
49. Фуртат И.Б., Гущин П.А., Вражевский С.А. Интеллектуальное управление распределенными системами с гарантией заданного качества регулирования в установившемся режиме // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2022668541. Дата регистрации: 07.10.2022. Номер и дата поступления заявки: 2022668024 03.10.2022. Дата публикации: 07.10.2022.
50. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Адаптивно-робастное управление сетевыми системами с гарантией заданного качества регулирования в условиях параметрической неопределенности и внешних возмущений // Государственная регистрация программ для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2022668535. Дата регистрации: 07.10.2022. Номер и дата поступления заявки: 2022668023 03.10.2022. Дата публикации: 07.10.2022.