

**Заключение диссертационного совета ИПМАШ 2.3.1.
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук**

Решение диссертационного совета от «14» ноября 2023 г. № 1.

О присуждении **Гущину Павлу Александровичу** ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Управление с гарантией заданного качества регулирования в установившемся и переходном режимах» по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» принята к защите 14 августа 2023 г. (протокол заседания № 2/23) диссертационным советом ИПМАШ 2.3.1.

Соискатель Гущин Павел Александрович, 1983 года рождения, в 2005 г. с отличием окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Плазменно-каталитические превращения углекислого газа и метана в условиях СВЧ-разряда» защитил в 2008 г. в диссертационном совете Д212.200.04, созданном на базе РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Окончил аспирантуру при РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина в 2008 г.

Соискатель работает старшим научным сотрудником лаборатории «Адаптивное и интеллектуальное управление сетевыми и распределенными системами» (АдИн) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН).

Диссертация выполнена в лабораториях «Управление сложными системами» и «Адаптивное и интеллектуальное управление сетевыми и распределенными системами» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН).

Научный консультант – Фуртат Игорь Борисович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН).

Официальные оппоненты:

Пакшин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, АПИ НГТУ;

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

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Гавриловым Дмитрием Александровичем, доктором технических наук, директором Физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий (ФРКТ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» и утвержденном Баганом Виталием Анатольевичем, кандидатом физико-математических наук, проректором по научной работе, указала, что актуальность темы диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора технических, не вызывает сомнений. Задачи управления в условиях запаздывания, возмущений, помех измерения, неопределенности параметров модели объекта – одни из самых сложных и актуальных задач современной кибернетики и робототехники.

Соискатель имеет 110 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 50 работ, из них 44 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете ИПМАШ 2.3.1.: 1 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).

Перечень наиболее значимых публикаций П.А. Гущина:

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. 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.

3. 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.

4. Фуртат И.Б., Гущин 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.

5. Фуртат И.Б., Нехороших А.Н., Гущин П.А., Чугина Ю.В. Синхронизация электроэнергетической сети в условиях высокочастотных помех измерения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Том 21. – №10. – С. 584-594.

6. Фуртат И.Б., Нехороших А.Н., Гущин 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.

7. Фуртат И.Б., Гущин П.А. Дискретное по пространственной переменной управление скалярными линейными распределенными объектами параболического и гиперболического типов // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 3. – С. 77-97.

8. Фуртат И.Б., Гущин 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.

9. 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. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2017.8255164>.

10. 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. DOI:10.1016/j.jfranklin.2019.03.013.

11. 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>.

12. 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>.

13. Furtat I., Gushchin P., Konovalov D., Vrazhevsky S. Compensation of Mismatched Disturbances for Nonlinear Plants with Distributed Timedelay // Proc. of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (INSTICC2019). Prague, Czech Republic, 29-31 July, 2019. – P. 269-275. <https://doi.org/10.5220/0007915202690275>.

14. 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>.

15. 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>.

16. 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. <https://doi.org/10.1109/MED48518.2020.9183156>.

17. 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>.
18. 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>.
19. 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>.
20. 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>.
21. 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>.
22. 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>.
23. 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>.
24. 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. (Proc of the Baltic Forum: Neuroscience, Artificial Intelligent and Complex Systems (BF-NAICS 2022), September 14-16, 2022, Kaliningrad, Russia). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.337>.
25. 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>.
26. 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>.
27. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93076-9_12.

Подготовка основных публикаций проводилась совместно с соавторами, при этом вклад П.А. Гущина был основным.

Результаты первой главы диссертации опубликованы в работах [1, 5, 14, 15, 16, 17, 33] (здесь и далее список работ, опубликованных автором по теме диссертации, стр. 28-36 автореферата диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук П.А. Гущина). Здесь П.А. Гущиным предложены предикторные и субпредикторные схемы управления. Им проведены доказательства всех утверждений и теорем. Совместно с соавторами осуществлено численное моделирование.

Результаты второй главы диссертации опубликованы в работах [1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 13, 20, 24, 25, 32, 50]. Здесь П.А. Гушиным 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]. Здесь П.А. Гушиным предложен метод нелинейного управления с гарантией нахождения входных и выходных сигналов заданных множествах. Им же 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]. Здесь П.А. Гушиным предложен дискретный по пространственной переменной нелинейный закон управления. Им же проведены доказательства работоспособности предложенных алгоритмов управления. Совместно с соавторами проведены численные исследования.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [1, 19, 21, 23, 30, 31]. Здесь П.А. Гушиным предложен метод дивергентного исследования устойчивости динамических систем и методы дивергентного управления. Им же проведены доказательства всех 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]. Здесь П.А. Гушиным предложен метод управления электроэнергетическими сетями в условиях возмущений, помех измерения и ограничений. Им же проведены доказательства всех утверждений и теорем. Совместно с соавторами проведены численные исследования.

Личный вклад соискателя состоит в:

- непосредственном участии в формулировке и постановке целей и задач диссертационного исследования;
- разработке, доказательстве и апробации схем управления, основанных на использовании предикторов и субпредикторов;
- разработке, доказательстве и апробации схем управления со снижением уровня влияния помех измерения в условиях возмущений;
- разработке, доказательстве и апробации схем управления, гарантирующих заданное качество в заданных множествах в любой момент времени по входным и выходным сигналам;
- разработке, доказательстве и апробации схем управления скалярными системами параболического и гиперболического типов в условиях параметрической неопределенности и возмущений;

- непосредственном участии в разработке, доказательстве и апробации схем управления с использованием дивергентных методов;
- непосредственном участии в разработке и апробации схем управления электроэнергетическими сетями при наличии параметрической неопределенности, возмущений и ошибок измерений;
- непосредственном участии в обработке результатов экспериментов на экспериментальном стенде,
- непосредственном участии в подготовке всех публикаций и результатов интеллектуальной деятельности по представленной диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Синтезированы алгоритмы управления линейными объектами с запаздывающим входным сигналом при наличии внешних возмущений. Первый алгоритм основан на использовании предикторов регулируемой величины и возмущения, второй базируется на использовании субпредикторов регулируемой величины и возмущения. Отличительной особенностью применяемых методов является, использование принципа компенсации возмущений, который позволяет существенно уменьшить влияние возмущений на качество переходных процессов по сравнению с методами подавления возмущений. Получены достаточные условия устойчивости замкнутой системы в виде разрешимости линейных матричных неравенств, для предикторного и субпредикторного алгоритмов. Полученные результаты обобщены на задачу слежения за эталонным сигналом и задачу синхронизации сетевых систем с коммуникационным запаздыванием. Численное моделирование разработанных алгоритмов показало эффективность использования разработанных алгоритмов по сравнению с существующими схемами.

Предложен алгоритм управления с обратной связью по выходу с компенсацией возмущений и помех измерения в нелинейных системах с несколькими входами и выходами. В отличие от существующих решений, размерность помехи может быть равна размерности выхода объекта, помехи и возмущения не зависимы, а закон управления имеет единственный настраиваемый параметр. Получены достаточные условия устойчивости замкнутой системы, сформулированные в терминах линейных матричных неравенств. Доказано, что точность в установившемся режиме зависит от возмущения, одной составляющей помехи и ее первой производной. Численное моделирование показало эффективность предложенного метода при наличии гладких и случайных помех и возмущений.

Разработан робастный закон управления при наличии параметрической интервальной неопределенности, внешних ограниченных возмущений и высокочастотных помех в измерениях. В отличие от последних результатов А. Исидори, Л. Маркони и др. по расширенной версии наблюдателя в условиях высокочастотных помех измерения, полученное решение позволяет независимо влиять на качество фильтрации помехи и качество ошибки стабилизации. Результаты моделирования показали эффективность разработанного алгоритма по сравнению с классическим наблюдателем с большим коэффициентом усиления и расширенным наблюдателем с большим коэффициентом усиления в условиях помех измерения.

Получен новый метод управления динамическими системами, который в отличие от методов адаптивного и робастного управления, позволяет гарантировать нахождение выходной переменной объекта управления в заданном множестве. Предложена замена координат, позволяющая свести исходную задачу с ограничениями к задаче исследования на устойчивость по вход-состоянию новой расширенной динамической системы без ограничений. Приведены варианты замены координат и алгоритмы управления линейными объектами и динамическими системами с секторной нелинейностью. Метод развит на динамические системы с произвольным соотношением числа управлений и выходных сигналов и гарантией их нахождения в заданных множествах. Разработанный метод применен 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 линейных матричных неравенств.

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 показали эффективность предложенного алгоритма по сравнению с последними результатами проф. Э. Фридман (Тель-Авивский университет, Израиль) при меньших затратах на управление.

Разработан новый метод для исследования экспоненциальной устойчивости автономных динамических систем с использованием дивергентного метода. Получены новые необходимые и достаточные условия экспоненциальной устойчивости. Предложенный метод обобщен на исследование неавтономных систем. Сформулированные необходимые и достаточные условия имеют вид уравнения неразрывности, которые широко применяются в механике и физике, а также некоторых прикладных задачах. 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.

Синтезированы робастные алгоритмы синхронизации электроэнергетической сети в условиях параметрической неопределенности, высокочастотных помех в измерениях выходной переменной и неизвестном коммуникационном запаздывании, позволяющие независимо управлять качеством фильтрации помехи и качеством ошибки синхронизации электроэнергетической сети. Результаты моделирования и эксперимента показали эффективность разработанных алгоритмов по сравнению с использованием алгоритмов с компенсацией возмущений А.Л. Фрадкова и И.Б. Фуртата (Россия), адаптивного управления Д. Хилл (Австралия, Китай) и Р. Ортега (Мексика, Франция).

На диссертацию и автореферат поступило 6 дополнительных отзывов, все положительные:

1. Отзыв референта Департамента нефтегазового комплекса Минэнерго России, кандидата технических наук Кислинской Л.Ю.

2. Отзыв заведующего аналитическим центром энергетической политики и безопасности ИПНГ РАН, главного научного сотрудника, доктора технических наук Еремина Н.А.

3. Отзыв заместителя заведующего кафедрой «Физико-математические методы управления» физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доктора технических наук Филлимонова Н.Б.

4. Отзыв доцента Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Томского политехнического института, кандидата технических наук Езангиной Т.А.

5. Отзыв профессора кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета, доктора технических наук Юркевича В.Д.

6. Отзыв профессора кафедры «Автоматика и управление», Астраханского государственного технического университета, доктора технических наук Есауленко В.Н.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оппоненты являются компетентными и авторитетными учеными, и имеют публикации, соответствующие теме диссертации, в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет в области управления сосредоточенными, сетевыми и распределенными системами с наличием запаздывания, возмущений, помех измерения и параметрической неопределенности, а также проектирования и оптимизации систем управления.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что МФТИ является ведущим российским вузом, известным передовыми исследованиями в области теоретической, экспериментальной и прикладной физики, математики, информатики, теории оптимального управления, химии, биологии и смежных дисциплин, широко известным своими достижениями в областях управления динамическими системами в условиях неопределенности, и способен определить научную и практическую ценность диссертации. Работники ведущей организации имеют публикации, соответствующие теме диссертации, в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку: разработаны методы и алгоритмы управления, гарантирующие заданное качество регулирования в установившемся режиме; полученные методы и алгоритмы развиты на задачи с заданным качеством регулирования в любой момент времени; разработаны методы и алгоритмы управления электроэнергетическими сетями.

Диссертационная работа Гущина Павла Александровича «Управление с гарантией заданного качества регулирования в установившемся и переходном режимах», является законченной научно-квалификационной работой, полностью соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт Проблем Машиноведения Российской академии наук, а ее автор Гущин П.А. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

На заседании 14 ноября 2023 г. Диссертационный совет ИПМАШ 2.3.1. принял единогласное решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области управления динамическими системами с заданным качеством в условиях запаздывания, параметрической неопределенности, внешних ограниченных возмущений и помех измерения присудить Гущину Павлу Александровичу ученую степень доктора

технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 9 человек (в удаленном интерактивном режиме присутствовало 4 человека), из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 11 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение ученой степени - 9, против присуждения ученой степени - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель

диссертационного совета ИИМАН 2.3.1.
доктор технических наук, профессор
М.П.



Фрадков
Александр Львович

Ученый секретарь

диссертационного совета ИИМАН 2.3.1.
доктор технических наук, профессор

Фуртат
Игорь Борисович

Дата оформления заключения: 14.11.2023 г.