

УТВЕРЖДАЮ



Ректор ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»,  
доктор технических наук, профессор

А.Л. Шестаков

*августа* 2020 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Диссертация «Моделирование состояния подвижных объектов в условиях неопределённости с разработкой численного метода полиэдральной аппроксимации» выполнена на кафедре систем автоматического управления.

В период подготовки диссертации соискатель Подивилова Елена Олеговна работала в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в следующих должностях: программист вычислительного центра с 01.07.2011г. по 03.02.2020г.; лаборант-исследователь управления научной и инновационной деятельности с 01.10.2012г. по 31.12.2012г.; инженер кафедры систем автоматического управления с 01.04.2013г. по 01.11.2019г.; младший научный сотрудник кафедры систем автоматического управления с 01.11.2019г. по 31.03.2020г., с 01.06.2020г. по настоящее время; заместитель начальника управления информатизации с 03.02.2020г. по настоящее время.

В 2011г. окончила государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» по специальности «Прикладная математика и информатика».

Обучалась в очной аспирантуре при Южно-Уральском государственном университете с 10.10.2011г. по 09.10.2014г.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2019г. в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – Ширяев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Тема диссертации утверждена советом Высшей школы электроники и компьютерных наук ЮУрГУ 23.09.2019, протокол № 1.

По результатам рассмотрения диссертации «Моделирование состояния подвижных объектов в условиях неопределённости с разработкой численного метода полиэдральной аппроксимации» принято следующее **заключение:**

*Актуальность темы и направленность исследования*

Диссертация Подвильовой Е.О. является законченным самостоятельно выполненным научным исследованием. Диссертация посвящена актуальной задаче гарантированного оценивания вектора состояния подвижных объектов, которая возникает в различных технических приложениях, таких как системы управления летательными аппаратами, системы слежения и обнаружения целей, автоматизированные системы управления технологическими процессами и пр. В настоящее время широкое применение в задаче оценивания состояния подвижных объектов находит фильтр Калмана, при использовании которого предполагается, что возмущения, помехи и начальное состояние системы являются случайными величинами с известными функциями распределения. При этом в реальных условиях, как правило, статистическая информация о них отсутствует, но известны только множества их возможных значений, что приводит к необходимости решения задач гарантированного оценивания вектора состояния подвижных объектов.



### *Личное участие автора в полученных научных результатах*

В ходе диссертационного исследования Поддивиловой Е.О. были получены следующие основные результаты:

В рамках развития качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей:

1. Качественно исследованы гарантированные оценки состояния подвижных объектов и возмущений при наличии дополнительной информации о характере возмущений. Разработан численный метод оценки параметров модели возмущений в случае при разложении возмущений по системе функций.
2. Исследованы гарантированные оценки состояния подвижных объектов при аномальных измерениях. Получена оценка величины выброса помехи из априорно заданного множества при аномальном измерении, который гарантированно может быть обнаружен.

В рамках разработки, обоснования и тестирования эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий:

3. Численный метод полиэдральной аппроксимации информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния подвижных объектов с использованием математической модели информационных множеств в виде неявного задания вектора состояния подвижного объекта системами линейных уравнений и неравенств.

В рамках реализации эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ, для проведения вычислительного эксперимента:

4. Программный комплекс для построения гарантированных оценок вектора состояния, возмущений и помех методом полиэдральной аппроксимации.
5. Вычислительные и натурные эксперименты, проведенные для математических моделей различных подвижных объектов, демонстрирующие увеличение точности по сравнению с

эллипсоидальным и интервальным подходами, увеличение быстродействия по сравнению с гарантированным оцениванием методом эллипсоидов.

#### *Степень достоверности результатов проведенных исследований*

Степень достоверности полученных результатов подтверждается строгостью математической постановки задачи исследования, корректным использованием математического аппарата, вычислительными и натурными экспериментами, а также тестированием разработанного программного комплекса на различных математических моделях подвижных объектов.

#### *Научная новизна результатов*

В области математического моделирования:

1. Разработан метод моделирования гарантированных оценок вектора состояния подвижного объекта с учётом дополнительной информации о характере возмущений в виде ограничения на среднее значение и разложения возмущения по системе функций с постоянными неизвестными коэффициентами. Полученные алгоритмы позволяют повысить точность гарантированных оценок состояния за счет включения в математическую модель описания информационного множества дополнительной информации о модели и характере возмущений.

2. Разработан метод моделирования гарантированных оценок возмущений и помех на основе неявного задания на некотором временном отрезке вектора состояния подвижного объекта системами линейных уравнений и неравенств, что может быть в дальнейшем использовано для разработки адаптивных алгоритмов оценивания и управления, прогнозирования состояния системы и построения множеств достижимости.

В области численных методов:

3. Предложен алгоритм построения полиэдральной аппроксимации информационного множества без выполнения вычислительно затратных операций суммы Минковского и пересечения множеств на основе неявного описания информационного множества системами линейных неравенств и уравнений. Оценка информационного множества строится в виде



описания информационного множества системами линейных неравенств и уравнений. Оценка информационного множества строится в виде многогранника заданной формы, что позволяет повысить точность оценивания по сравнению с существующими алгоритмами аппроксимации эллипсоидами и параллелепипедами. Для повышения точности аппроксимации предложен выбор направлений аппроксимирующего многогранника на основе модели подвижного объекта и ограничений на множества возмущений и помех.

В области комплексов программ:

4. Разработан программный комплекс для построения гарантированных оценок вектора состояния, возмущения и помех методом полиэдральной аппроксимации информационных множеств для подвижных объектов с геометрическими ограничениями. Данный комплекс позволяет на этапе проектирования системы управления подвижным объектом оценить время вычисления оценок, точность оценивания, анализировать гарантированные оценки вектора состояния объекта при различных составах измерительных систем, характеристиках точности измерительных приборов и датчиков, реализациях возмущений и помех, параметрах математической модели движения объекта.

#### *Практическая значимость полученных результатов*

Практическая значимость полученных результатов заключается в применимости разработанных алгоритмов гарантированного оценивания вектора состояния в задачах управления летательными аппаратами, фильтрации в бесплатформенных инерциальных навигационных системах, динамических измерений и др. Создан программный комплекс, реализующий разработанные алгоритмы и позволяющий на этапе проектирования систем управления исследовать точность и время вычисления оценок вектора состояния подвижных объектов, полученных при различных условиях функционирования объекта, например, при различных параметрах модели, реализациях возмущений и помех, ограничениях на начальное состояние, возмущения и помехи и позволяющий и на основе этих исследований



подбирать параметры измерительных систем. На программный комплекс получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615448 от 16.05.2017.

Предложенные алгоритмы применялись в научно-исследовательской работе АО «НПО автоматики» (г. Екатеринбург) "Разработка алгоритмов обработки измерительной информации и анализ точности волоконно-оптического гироскопа ВОГК-2 и его модификаций" (номер темы: ОКБ/103-11 2011058). Разработанные алгоритмы гарантированного оценивания могут быть применены для повышения эффективности, надежности и качества систем управления, разрабатываемых в ООО «ДСТ-УРАЛ» (г. Челябинск). Получены акты об использовании результатов диссертационного исследования в АО «НПО автоматики» (г. Екатеринбург) и ООО «ДСТ-УРАЛ» (г. Челябинск).

#### *Ценность научных работ соискателя*

Ценность научных работ соискателя заключается в разработке нового подхода к моделированию состояния подвижных объектов, функционирующих в условиях неопределённости. Предложенные алгоритмы позволяют получать не только гарантированные оценки вектора состояния, но и множества прогнозов вектора состояния, гарантированные оценки реализовавшихся возмущений и помех, действующих на подвижный объект, что может быть в дальнейшем использовано для разработки адаптивных алгоритмов оценивания и управления, а также прогнозирования состояния объекта. Кроме того, гарантированные оценки могут быть использованы для синтеза управления, когда качество функционирования подвижного объекта оценивается принадлежностью вектора состояния некоторому множеству, и требуется управлять трубкой траекторий.

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем.



**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:**

1. Подивилова, Е.О. Сравнение минимаксного и калмановского алгоритмов оценивания векторов состояния динамических систем / Е.О.Подивилова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып.17. – № 35(294). – С. 135–138.
2. Подивилова, Е.О. Сравнение оценок минимаксного фильтра и фильтра Калмана / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2012. – Вып. 14. – №40(299). – С. 182–186.
3. Фокин, Л.А. Об анализе погрешностей интегрированной навигационной системы и методах их оценивания / Л.А. Фокин, В.И. Ширяев, Е.О. Подивилова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып.17. –№35(294). – С. 127–134.
4. Подивилова, Е.О. О подходе к оцениванию состояния динамических систем как к решению системы линейных неравенств / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т.13. – №3. – С. 133–136.
5. Фокин, Л.А. Об использовании калмановского и минимаксного алгоритмов оценивания погрешностей интегрированной навигационной системы / Л.А. Фокин, В.И. Ширяев, Е.О. Подивилова // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2013. –№3. – С. 65–79.
6. Ширяев, В.И. Аппроксимация информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния динамических систем в условиях неопределенности / В.И. Ширяев, Е.О. Подивилова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №7(160). – С. 10–16.

**Публикации в изданиях, входящих в Scopus, Wos:**

7. Podivilova, E. Set-valued estimation of switching linear system: an application to an automotive throttle valve / E. Podivilova, A.N. Vargas, V. Shiryayev, L. Acho // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2015. – Vol. 29. – P. 755–762. – DOI:10.1002/jnm.2136, – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jnm.2136> (Дата обращения: 02.07.2020г).
8. Shiryayev, V.I. Set-valued Estimation of Linear Dynamical System State When Disturbance is Decomposed as a System of Functions / V.I. Shiryayev, E.O. Podivilova // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 252– 258. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.045. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039296?via%3Dihub> (Дата обращения: 02.07.2020г).
9. Shiryayev, V. Algorithm of set-valued state estimation for strapdown inertial navigation systems / V. Shiryayev, E. Podivilova // IEEE Xplore, 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, (ICIEAM) 2016, Chelyabinsk, Russia, 16-19 May 2016. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910917. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7910917> (Дата обращения: 02.07.2020г).
10. Podivilova, E. Set-valued linear dynamical system state estimation with anomalous measurement errors / E. Podivilova, V. Shiryayev // CEUR Workshop Proceedings. 3rd Russian Conference "Mathematical Modeling and Information Technologies", ММИТ 2016; Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg; Russian Federation; 16 November 2016.– Vol. 1825.– P. 80-87.
11. Podivilova, E. Comparison of set-valued dynamical system state estimates / E. Podivilova, V. Shiryayev, E.V. Gusev // IEEE Xplore. 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 16-19 Oct. 2017. – P. 58-63. – DOI:10.1109/URALCON.2017.8120687. – Режим



доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8120687> (Дата обращения: 02.07.2020г).

12. Podivilova, E. Application of model and process features in set-valued dynamical system state estimation / E. Podivilova, V. Shiryaev // IEEE Xplore. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 16-19 May 2017. – DOI:10.1109/ICIEAM.2017.8076144. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076144> (Дата обращения: 02.07.2020г).
13. Podivilova, E. Set-Valued Approach to Problem of Temperature Dynamic Measurements / E.Podivilova, V.Shiryaev // IEEE Xplore. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 18-22 May 2020. – DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111890. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9111890> (Дата обращения: 02.07.2020г)

#### **Свидетельство о регистрации программ**

14. Гарантированное оценивание вектора состояния линейных динамических систем методом полиэдральной аппроксимации: Свидетельство № 2017615448 / Подивилова Е.О.; Ширяев В.И. правообладатель ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)». – 2017610671; заявл. 25.01.2017; зарегистр. 16.05.2017, реестр программ для ЭВМ.

#### **Другие публикации:**

15. Ильин, Е.Д. Оценивание состояния динамической системы в условиях неопределенности / Е.Д. Ильин, Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Мехатроника и робототехника: сборник докладов международной молодёжной конференции / Санкт–Петербург: Изд-во «Политехника–сервис». – 2011. – С. 101-110.

16. Оценивание состояния динамической системы в условиях неопределённости / В.И. Ширяев, В.И. Долбенков, Е.Д. Ильин, Е.О. Подивилова // Экстремальная робототехника. Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2011. – С. 234-243.
17. Ильин, Е.Д. О применении минимаксного и калмановского фильтров в задаче оценивания / Е.Д. Ильин, Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Материалы конф. "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2012). – СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2012. – С. 586-595.
18. Подивилова, Е.О. Об алгоритмах гарантированного оценивания состояния измерительного устройства в условиях неопределённости // Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Измерения: состояние, перспективы развития: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф., г. Челябинск, 25-27 сент. – N. 1. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 196-198.
19. Подивилова, Е.О. Сравнение оценок минимаксного фильтра и фильтра Калмана / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Экстремальная робототехника. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – СПб: Изд-во «Политехника – сервис», 2012. – С. 173-181.
20. Подивилова, Е.О. О гарантированном оценивании вектора состояния динамических систем / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Физика и технические приложения волновых процессов: труды XI Междунар. науч.-техн. конференции / под общ. ред Ю.Е. Мительмана. – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2012. – С. 314-317.
21. Подивилова, Е.О. Об аппроксимации информационных множеств в задаче гарантированного оценивания / Е.О. Подивилова // Труды науч.-пр. конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – 2013. – С. 54-58.
22. Ширяев, В.И. Об аппроксимации информационных множеств в задаче минимаксной фильтрации / В.И. Ширяев, Е.О. Подивилова // ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА – робототехника для работы в



- условиях опасной окружающей среды. Труды 7-го международного симпозиума. – СПб: Изд-во «Политехника-сервис», 2013. – С. 454-459.
23. Ширяев, В.И. О построении информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния динамических систем в условиях неполной и неточной информации / В.И. Ширяев, Е.О. Поддивилова // Ракетно-космическая техника. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов: сборник статей по материалам XVIII Макеевских чтений, посвященных 95-летию со дня рождения ак. Н.А. Семихатова. – Т. 1. – Екатеринбург: НПОА, 2014. – С. 175-184.
24. Ширяев, В.И. Об аппроксимации информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния линейных динамических систем / В.И. Ширяев, Е.О. Поддивилова // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014г.: Труды. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2132-2141.
25. Ширяев, В.И. О гарантированных оценках состояния линейных динамических систем в условиях неопределенности / В.И. Ширяев, Е.О. Поддивилова // Известия высших учебных заведений. Уральский регион. – 2014. – № 2. – С. 52-59.
26. Ширяев, В.И. Об алгоритмах гарантированного оценивания вектора состояния большой размерности/ В.И. Ширяев, Е.О. Поддивилова // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. Сб. тезисов докл. Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР», Воронеж, 12-14 февраля 2014 г.– Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014. – С. 157-159.
27. Podivilova, E. Performance evaluation of a sliding mode controller in discrete time domain using polyhedral approximation method / E. Podivilova, L. Aho, Y. Vidal // Cybernetics and Physics. – 2014. – Vol. 3, № 4. – P. 174-179.

28. Pozo, F. Detection of structural changes through principal component analysis and multivariate statistical inference / F.Pozo, L.E. Mujica, M. Ruiz, I.Arruga, E.Podivilova// Structural Health Monitoring. – 2016.– Vol 15(2).– P. 127-142.

В работах 2-20, 22-26 В.И. Ширяеву принадлежит общая постановка задач, а Е.О. Подивиловой – все основные полученные результаты. Из остальных работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены только те результаты, которые были получены лично Е.О. Подивиловой и не затрагивают интересов других соавторов.

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным п. 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней. Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования.

*Специальность, которой соответствует диссертация*

В представленной диссертации исследованы методы моделирования состояния подвижных объектов, возмущений и помех, а также разработаны численные методы нахождения гарантированных оценок вектора состояния подвижных объектов, реализованные в виде комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов. Это позволяет сделать вывод о том, что работа содержит оригинальные результаты одновременно в трех областях – математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Предлагаемые методы могут быть использованы в различных предметных областях: теория управления, навигация, дифференциальные игры. Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

П.2 Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей.



П.3 Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

П.4 Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Диссертация «Моделирование состояния подвижных объектов в условиях неопределённости с разработкой численного метода полиэдральной аппроксимации» Подвильовой Елены Олеговны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании кафедры систем автоматического управления Южно-Уральского государственного университета.

#### **ПРИСУТСТВОВАЛИ:**

д.т.н., проф. Ширяев В.И., заведующий кафедрой; к.т.н., доц. Алёшин Е.А., доцент; к.т.н., доц. Брагина А.А., доцент; к.т.н., доц. Зырянов Г.В., доцент; к.т.н., доц. Коваленко В.В., доцент; к.т.н., доц. Левина Г.А., доцент; к.т.н., доц. Павловская О.О., доцент; к.т.н., доц. Плотникова Н.В., доцент; к.т.н., Садов В.Б., доцент; к.т.н., Чернецкий В.О. доцент; Щербаков В.П., ст. преподаватель; к.т.н., Кожеуров В.Н., инженер; Хаданович Д.В., младший научный сотрудник.

#### **ПРИГЛАШЕНЫ:**

д.т.н., профессор Шестаков А.Л., ректор ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ),  
д.т.н., старший научный сотрудник Мокеев В.В, профессор кафедры информационных технологий в экономике,  
д.ф.-м.н., профессор Панюков А.В., ведущий научный сотрудник кафедры системного программирования,  
д.т.н., профессор Панферов В.И., профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах,

д.т.н., профессор Рождественский Ю.В., декан автотракторного факультета,  
д.т.н., профессор Спиридонов Е.К., заведующий кафедрой гидравлики и  
гидропневмосистем.

Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0 чел.,  
«воздержались» – 0 чел., протокол № 9 от «02» июля 2020 г.

Доцент кафедры  
систем автоматического управления,  
к.т.н.

В.Б. Садов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)», Министерство науки и  
высшего образования Российской Федерации  
Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76,  
<https://www.susu.ru/>, телефон: +7 351 267-94-54.



Подпись Садова удостоверяю  
Начальник управления ИММ  
по работе с кадрами Н.С. Минакова