

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.073.04

на базе федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН) по диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 28 октября 2019 №10

О присуждении Даник Юлии Эдуардовне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления» по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)» принята к защите 17 июня 2019 г., протокол №2, диссертационным советом Д 002.073.04 на базе федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 747/нк от 22 июня 2016 г.

Соискатель Даник Юлия Эдуардовна, 1991 года рождения, занимает должность младшего научного сотрудника ФИЦ ИУ РАН.

В 2012 году соискатель получила степень бакалавра на факультете Бизнес-информатика НИУ ВШЭ по направлению «Бизнес-информатика», а в 2014 году окончила с отличием магистратуру НИУ ВШЭ по направлению подготовки «Бизнес-информатика». С 12.11.2014 по 11.11.2018 обучалась в очной аспирантуре ФИЦ ИУ РАН и сдала кандидатские экзамены по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации». С марта 2015 по настоящее время работает в ФИЦ ИУ РАН, с февраля 2018 года состоит в должности младшего научного сотрудника Отдела 71 «Интеллектуальные динамические си-

стемы и когнитивные исследования» Отделения 7 «Искусственный интеллект и принятие решений» ФИЦ ИУ РАН.

Диссертация выполнена в Отделе 71 «Интеллектуальные динамические системы и когнитивные исследования» Отделения 7 «Искусственный интеллект и принятие решений» ФИЦ ИУ РАН.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор, Дмитриев Михаил Геннадьевич, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН.

Официальные оппоненты:

1. Афанасьев Валерий Николаевич, доктор технических наук, Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», ординарный профессор департамента прикладной математики.

Отзыв оппонента положительный, имеются замечания по диссертации:

1. **Стр. 5.** «Особенностью подхода является использование формальной структуры оптимального управления в линейно-квадратичной задаче. При этом получаемый регулятор зачастую оказывается достаточно близким к соответствующему оптимальному управлению». В каком смысле «...достаточно близким...»?
2. **Стр. 36.** «Наиболее простым подходом к конструированию регулятора в нелинейных системах является построение линейного регулятора (LQR) для соответствующей, полученной после линеаризации, стационарной системы с квадратичным критерием качества, который в нелинейных системах уже не является оптимальным и не всегда обеспечивает стабилизацию». Следовало бы сделать замечание по поводу эффективности управлений, синтезированных по «первому приближению».
3. **Стр. 37.** «Система (2.1) может быть неединственным образом преобразована в систему, линейную по состоянию и управлению, с коэффициентами, нелинейными по состоянию и зависящими от некоторого положительного параметра...». Скалярный параметр μ можно рассматривать как некоторое параметрическое возмущение? Проблема определения структурной управ-

ляемости системы (2.2) усиливается присутствием в обеих матрицах параметра μ . Модель (2.2) управляемой система (2.1) может оказаться неуправляемой.

4. **Стр. 38.** Задача (2.2)-(2.3). В этой задаче в функционале (2.3) матрица $Q(x, \mu)$ должна быть положительно определенной.
5. **Стр. 40.** «...где $Q_0 \geq 0$ – постоянная матрица...». Матрица Q_0 должна быть в рассматриваемой задаче ($T = \infty$) положительно определенной, т.е. $Q_0 > 0$.
6. **Стр. 44.** Лемма 2 «...дискретное алгебраическое уравнение Риккати (2.9) имеет единственное положительно определенное решение...». Решение уравнения (2.9) дает две матрицы $P_0 > 0$ и $P_0 < 0$. Как обосновать выбор $P_0 > 0$?
7. **Стр. 51.** «Алгоритм построения стабилизирующего регулятора...5. Подбираются $Q_j(x) \geq 0, j = 1, \dots, k$, так, что ...». На стр. 44 указано, что «III. Пусть существуют $Q_j(x) > 0$ такие, что – положительно определенные матрицы $C_j(x) > 0, j = 1, \dots, k$...». Что же правильно «подбирается $Q_j(x) > 0$ или $Q_j(x) \geq 0$ »?

2. Расина Ирина Викторовна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт программных систем имени А.К. Айламазяна Российской академии наук, главный научный сотрудник Исследовательского центра Системного анализа ИПС РАН.

Отзыв оппонента положительный, имеются следующие замечания по диссертации:

1. На стр. 13, 14 приведены две разные формы записи функции Понтрягина H ;
2. На стр. 28 в пункте 3 леммы Ляпунова использован женский род (симметричная) вместо среднего;
3. На стр. 48 повтор слова «теперь»;
4. Разумно было бы подчеркнуть для формулы (3.1), всегда ли возможно указанное представление;
5. Для строгости изложения в переходе от параметра ε к параметру μ следовало подчеркнуть малость последнего;

6. Для формулы (3. 22) разумно указать выбор эвристики, как это сделано ниже для (3.25);
7. На стр. 72 после формулы (3.6) использован не тот падеж, хотя ниже в той же ситуации для формулы (3.8) формулировка верная;
8. Следовало оговорить ситуацию с возможным обращением в нуль знаменателя Паде аппроксимации;
9. Ничего не сказано ни для дискретных, ни для непрерывных систем о возможном несуществовании решения уравнения Риккати.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, в своем положительном заключении, подписанном Задорожним Владимиром Григорьевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой системного анализа и управления факультета прикладной математики, информатики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», указал, что «диссертационная работа Даник Юлии Эдуардовны является завершенным научным исследованием, содержащим научно обоснованные численно-аналитические алгоритмы стабилизации слабонелинейных дискретных и непрерывных систем управления. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения по использованию асимптотических методов при решении матричного уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния. Содержание диссертации Даник Ю.Э. соответствует паспорту специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно- вычислительное обеспечение)» в пунктах: 1) Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 2) Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 3) Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 4) Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управ-

ления, принятия решений и обработки информации. Диссертация Даник Ю.Э. соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. Полученные соискателем теоретические и практические результаты и опубликованные работы позволяют сделать вывод о высокой квалификации автора, хорошем знании предмета своего исследования. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Таким образом, диссертационная работа Даник Юлии Эдуардовны «Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)». Отзыв одобрен на заседании кафедры системного анализа и управления факультета прикладной математики, информатики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», протокол № 0602-1 от 02.09.2019.

Замечания:

1. В диссертации рассматриваются автономные системы и не затрагиваются проблемы для неавтономных систем. Хотя неавтономные системы сводятся (с помощью замены переменных) к автономным, они имеют особенности и их можно было бы обсудить.
2. Имеются небольшие недостатки в оформлении работы. Например; На стр. 18 строка 4 сн. Используется обозначение R'' , а на стр. 17 строки 13,14 используется обозначение $R_{\prime\prime}$
3. Почему в алгоритмах выбрана аппроксимация Паде? Есть много других аппроксимаций.
4. Автор ограничивается конечномерным случаем. Во введении или заключении можно было бы указать, какие результаты переносятся на бесконечномерный случай или на системы, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных.

Соискатель имеет 17 опубликованных научных работ по теме диссертации, в том числе: 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 14 публикаций в сборниках трудов российских и международных научных конференций. Из этих публикаций 6 входят в РИНЦ, 5 – в международную базу цитирования Scopus, 4 – в Web of Science. Наиболее значительные работы:

1. Даник Ю.Э., Дмитриев М.Г. Магистральные траектории в экономике и сингулярные возмущения // Труды Института системного анализа РАН, том 65, №1. – 2015, С. 60-67.

2. Даник Ю.Э., Дмитриев М.Г., Макаров Д.А. Один алгоритм построения регуляторов для нелинейных систем с формальным малым параметром // Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2015. – С.35–44.

3. Емельянов С.В., Даник Ю.Э., Дмитриев М.Г., Макаров Д.А. Стабилизация нелинейных дискретных динамических систем с параметром и с коэффициентами, зависящими от состояния // Доклады академии наук, том 466, №3. – 2016, С. 282-284.

4. Danik Y. About the robustness of the middle stabilizing controller for quasi-linear state dependent coefficients discrete-time systems // Third International Conference on Analysis and Applied Mathematics (ICAAM 2016), Almaty, Kazakhstan. AIP Conf. Proc. 1759, 020013. 2016. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4959627>.

5. Danik Yu.E. LMI-based robustness analysis of the nonlinear regulator for discrete time nonlinear systems // Full papers E-Book 6th. World Congress on Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology (WCECIT 2016), Barcelona, Spain, September 8-10, 2016. – P. 96–101.

6. Danik Yu. E., Dmitriev M. G. Construction of Parametric Regulators for Nonlinear Control Systems Based on the Pade Approximations of the Matrix Riccati Equation Solution // IFAC-PapersOnLine. Vol. 51, Issue 32. — 2018. — P. 815-820. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.445.

7. Danik Yu. E., Dmitriev M. G., Makarov D. A., Zarodnyuk T. A. Numerical-Analytical Algorithms for Nonlinear Optimal Control Problems on a Large Time

На автореферат поступило четыре положительных отзыва, которые подписали:

1. Светлана Анатольевна Краснова, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук. Замечания:

1. В формуле (1) не указано множество допустимых значений вектора состояний X .
2. В формулах (2), (5) обозначение для начального условия отличается от введенного в формуле (1).
3. При оценке робастности разработанного метода представлено сравнение только с линейным регулятором, не хватает сравнения с SDRE регулятором.

2. Кабанов Алексей Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Информатика и управление в технических системах» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Замечания:

1. По мнению автора отзыва не совсем удачно сформулированы задачи 1 и 4 в части описания рассматриваемой системы: «...системы управления с параметром и с коэффициентами, зависящими от состояния». Может сложиться понимание, что параметр тоже зависит от состояния системы.
2. В примере 1 не указано, из каких соображений взяты данные диапазоны неопределённостей. Кроме того, для лучшей информативности было бы полезно привести более детальный анализ результатов сравнения нелинейного регулятора с линейным регулятором. Почему существенные отличия начинают проявляться при начальном значении угла отклонения маятника более 1 (график на рис.1)? Вероятно, эта информация есть в самой диссертационной работе.

3. Киселев Юрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптимального управления на факультете Вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Замечания:

1. При проведении численных экспериментов были рассмотрены только примеры задач управления с механической интерпретацией.
 2. В дальнейшем было бы интересно подготовить учебное пособие с рассмотрением и подробным описанием результатов численных экспериментов для задач управления (не только механического содержания) с различными размерностями.
4. Петров Александр Пхоун Чжо, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Замечания:

1. Не описано, возрастает ли точность приближения при росте порядка разложения при построении Паде аппроксимации?
2. На стр. 21 автореферата приведено сравнение предлагаемого регулятора только с линейным, очевидно, что здесь не хватает сравнения с SDRE регулятором.
3. На странице 9 при описании регулятора не указаны члены при степенях ε выше первой, наличие которых, следует из логики изложения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области динамических систем, оптимального управления и асимптотических методов, что подтверждается направлениями их исследований и публикациями в высокорейтинговых научных журналах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработан алгоритм конструирования стабилизирующих регуляторов для дискретной слабонелинейной системы с коэффициентами, зависящими от состояния на основе асимптотики решения алгебраического уравнения Риккати при малых значениях параметра, **показано**, что построенный регулятор при выполнении ряда условий обладает свойством робастности относительно па-

раметрических неопределенностей в линейных частях системы. Также **построено** приближенное решение дискретных задач оптимального управления с малым шагом на основе прямой схемы метода пограничных функций. **Построены и обоснованы** матричные одноточечная и двухточечная Паде аппроксимации для решения матричного алгебраического уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния, в непрерывном случае. **Получено** параметрическое семейство Паде-регуляторов для непрерывных систем с параметром, принимающим как малые, так и большие положительные значения. На примерах **продемонстрировано** качество полученных приближений и эффективность построенных алгоритмов управления по сравнению с линейным и некоторыми другими регуляторами, **проведено** сравнение регуляторов по вычислительной сложности.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что была **доказана** локальная асимптотическая устойчивость положения равновесия дискретной слабонелинейной системы с коэффициентами, зависящими от состояния, при использовании построенного численно-аналитического регулятора. А также проведен **анализ** робастности построенного регулятора по отношению к интервальным параметрическим неопределенностям с использованием техники линейных матричных неравенств. Впервые **построен** матричный Паде-мост для решения алгебраического уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами и представлены условия его существования. Для одного класса систем **доказано, что построенный Паде-регулятор стабилизирует систему** при всех допустимых значениях параметра.

Практическая значимость полученных соискателем результатов исследования заключается в **возможности** применения разработанных численно-аналитических алгоритмов для анализа слабонелинейных дискретных систем, дискретных систем с малым шагом и широкого класса непрерывных нелинейных систем с параметром.

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается численными экспериментами, а также подтверждается строгими математическими

рассуждениями. Результаты работы прошли апробацию на профильных научных конференциях и семинарах.

Личный вклад соискателя состоит в:

- выводе формул, доказательстве утверждений,
- разработке алгоритмов численных расчетов,
- проведении и интерпретации результатов численных экспериментов.

На заседании 28 октября 2019 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, и принял решение присудить Даник Ю.Э. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 29 человек, из них 8 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 42 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени 29, против присуждения ученой степени 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя диссертационного совета Д 002.073.04

д.ф.-м.н., профессор

Г.С. Осипов

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.073.04

д.т.н., профессор

В.Н. Крутько

28 октября 2019 г.