

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора федерального  
государственного учреждения

«Федеральный исследовательский  
центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук»

М.А. Посыпкин



2024 г.

### Заключение

Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук»

Диссертация Шмалько Елизаветы Юрьевны «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» в отделе №55 «Управление робототехническими устройствами», отделения №5 «Информационные, управляющие и телекоммуникационные системы и информационная безопасность».

Шмалько Е.Ю. получила степень магистра техники и технологии (диплом с отличием) Российского университета дружбы народов в 2007 году и поступила в аспирантуру на кафедре Кибернетики и мехатроники. В 2009 году на диссертационном совете ВЦ РАН им. А.А. Дородницына защитила кандидатскую диссертацию на тему "Разработка и исследование метода сетевого оператора в задаче синтеза системы управления спуском космического аппарата" под научным руководством профессора, д.т.н. А.И. Дивеева. С 2010 года поступила на работу в Вычислительный центр Российской академии наук им. А.А. Дородницына (ныне в составе Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук), где работает по настоящее время в должности старшего научного сотрудника. Дополнительно осуществляет педагогическую деятельность на кафедре СМ-7 «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Баумана в должности доцента. Шмалько Е.Ю. является научным руководителем 3 аспирантов ФИЦ ИУ РАН, ежегодно участвует с докладами на международных и всероссийских конференциях, имеет благодарности ФИЦ ИУ РАН.

В период подготовки диссертации Шмалько Елизавета Юрьевна работала в ФИЦ ИУ РАН в должности старшего научного сотрудника, участвовала в качестве исполнителя в работах по гранту Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 075-15-2024-544.

Диссертация Шмалько Е.Ю. «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» была рассмотрена на расширенном заседании отдела №55 ФИЦ ИУ РАН 28 мая 2024 года. По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

1. Диссертационная работа Шмалько Е.Ю. «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» соответствует специальности 2.3.1. – «Системный анализ управление и обработка информации, статистика» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертационным работам, выдвигаемым на соискание степени доктора технических наук.
2. Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы создания новых подходов к решению практической проблемы оптимального управления и получению реализуемых на практике оптимальных управлений робототехническими системами в автоматизированном режиме с помощью методов машинного обучения управлению.
3. Представленная диссертация является самостоятельно выполненной законченной научно-исследовательской работой.
4. Научные результаты, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно, являются новыми и представляют научный и практический интерес. Проведенные автором исследования выполнены на высоком научном уровне. Научные положения и выводы подтверждены большим количеством экспериментов.
5. В диссертации получены следующие новые научные результаты:
  - предложен новый принцип синтезированного оптимального управления, согласно которому решение задачи оптимального управления производится для объекта стабилизированного относительно точки равновесия в пространстве состояний. Разработанный принцип синтезированного оптимального управления позволяет автоматизировать процесс создания систем управления за счет внедрения универсальных технологий машинного обучения при использовании классических формулировок задач управления.
  - разработана новая методика двухэтапного построения системы управления на основе принципа синтезированного оптимального управления. Предложено первоначально решать задачу синтеза управления, обеспечивающего устойчивость объекта относительно некоторой точки в пространстве состояний, а затем решать задачу оптимального управления с введенной на первом этапе системой стабилизации. Оптимальное управление реализуется за счет оптимального изменения положения устойчивой точки равновесия. Продемонстрирована универсальность предлагаемого подхода и его применимость к различным задачам оптимального управления и различным объектам управления.

- Впервые приведено обоснование применения принципа синтезированного управления для получения решения задачи оптимального управления, обладающего свойством реализуемости, которое обеспечивает уменьшение расхождений между реальным объектом и его моделью за счет системы стабилизации.
  - Впервые разработаны новые численные методы машинного обучения управлению, позволяющие автоматизировать создание систем управления, согласно разработанному принципу. На первом этапе двухэтапного подхода для решения задачи синтеза системы стабилизации разработаны уникальные численные методы машинного обучения на основе символьной регрессии, которые позволяют находить и структуру, и параметры математического выражения функции управления, в отличие от известных подходов, когда структура функции задана и определяются только параметры. Согласно подходу, синтезированная функция управления имеет набор параметров, влияющих на положение точки равновесия, которые на втором этапе оптимизируются по критерию задачи оптимального управления.
  - Впервые разработаны программные комплексы, реализующие представленные в диссертационном исследовании методы машинного обучения для решения задач в рамках двухэтапного подхода на основе принципа синтезированного оптимального управления для робототехнических объектов.
6. Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается тем, что разработанный принцип к созданию систем управления и разработанные в рамках диссертационного исследования методы реализации предлагаемого двухэтапного подхода на основе принципа синтезированного оптимального управления были реализованы в виде программных модулей и используются в исследованиях, проводимых в Роботоцентре ФИЦ ИУ РАН, и других организаций, что подтверждается актами о внедрении.
  7. Достоверность результатов диссертации подтверждается экспериментами, проводимыми как на математических моделях, так и на опытных образцах Роботоцентра ФИЦ ИУ РАН, а также экспертизой научных статей, опубликованных в ведущих научных изданиях, основана на апробации и обсуждении результатов на международных и российских научных конференциях и семинарах.
  8. Основное содержание диссертации опубликовано автором достаточно полно в 90 научных публикациях в рецензируемых изданиях, из них 1 монография, 11 публикаций в рецензируемых научных изданиях, отнесенных к категориям К-1 или К-2 из Перечня ВАК, 34 публикации в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web

of Science. В рамках работы по диссертации получены 15 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Наиболее значимые публикации:

- *Diveev A., Shmalko E. Machine Learning Control by Symbolic Regression.* Springer, Cham, 2021. – 155 p. (Scopus).
- *Шмалько Е.Ю. Машинно синтезированное управление нелинейным динамическим объектом на основе оптимального расположения точек равновесия // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). – 2023. – Т. 22. – № 1. – С. 87-109. (K-1, RSCI).*
- *Шмалько Е.Ю. Машинное обучение систем управления с обратной связью на базе принципа синтезированного оптимального управления // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 3 (43). – С. 38-49. (K-1).*
- *Shmalko E. Computational Approach to Optimal Control in Applied Robotics // In: Ronzhin, A., Pshikhopov, V. (eds) Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer, Singapore – 2023. – vol. 329. – pp. 387-401. (Scopus).*
- *Shmalko E., Diveev A. Machine Learning Control Synthesis by Symbolic Regression for Avoidance of Arbitrary Positioned Obstacles // 2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Rome, Italy – 2023. – pp. 668-673. (Scopus).*
- *Diveev, A., Shmalko, E. Adaptive Synthesized Control for Solving the Optimal Control Problem // Mathematics. – 2023. – 11, 4035. (Scopus, WoS).*
- *Shmalko E., Diveev A. Additional Requirement in the Formulation of the Optimal Control Problem for Applied Technical Systems. // Engineering Proceedings. – 2023. – 33(1):7. (Scopus).*
- *Diveev A. I., Shmalko E. Y. Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming. // IEEE Transactions on Cybernetics. – July 2022. – vol. 52. – no. 7. – pp. 6627-6637. (Scopus, WoS)*
- *Shmalko E., Diveev A. Extended Statement of the Optimal Control Problem and Machine Learning Approach to Its Solution // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – vol. 2022. – Article ID 1932520. (Scopus, WoS).*
- *Diveev A., Shmalko E. Machine Learning Feedback Control Approach Based on Symbolic Regression for Robotic Systems // Mathematics. – 2022. – 10(21), 4100. (Scopus, WoS).*
- *Shmalko E. Feasibility of Synthesized Optimal Control Approach on Model of Robotic System with Uncertainties. // In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies. – Springer, Singapore. – 2022. – vol 232. – pp.131-143. (Scopus).*
- *Shmalko E., Diveev A. Synthesized Optimal Control for Mecanum-wheeled Robot // Proceedings 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2022, Istanbul, Turkey. – 2022. – pp. 599-604. (Scopus, WoS).*

- *Diveev A. Shmalko E.* Stability of the Optimal Control Problem Solution // Proceedings 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2022, Istanbul, Turkey. – 2022. – pp. 33-38. (Scopus, WoS).
- *Shmalko E., Diveev A.* Control Synthesis as Machine Learning Control by Symbolic Regression Methods // Applied Sciences. – 2021. – 11(12): 5468. (Scopus, WoS).
- *Diveev A, Shmalko E.* Research of Trajectory Optimization Approaches in Synthesized Optimal Control // Symmetry. – 2021. – 13(2): 336. (Scopus, WoS).
- *Diveev A., Shmalko E.* Synthesized optimal control based on machine learning // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 1727(1), 012006. (Scopus).
- *Diveev A., Shmalko E.* Comparative study of numerical solutions for the optimal control problem in the presence of uncertainties // Procedia Computer Science. – 2021. – 186. – pp. 279-286. (Scopus, WoS).
- *Diveev A., Shmalko E., Serebrenny V., Zentay P.* Fundamentals of synthesized optimal control // Mathematics. – 2021. – 9(1). – pp. 1-18. (Scopus, WoS).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю, Хуссейн О.* Синтезированное оптимальное управление групповым взаимодействием квадрокоптеров на основе многоточечной стабилизации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия Приборостроение. – 2020. – № 4. – Т.133. – С. 114-133. (K-1, RSCI).
- *Diveev A., Shmalko E.* Multi-point Stabilization Approach to the Optimal Control Problem with Uncertainties // Advances in Optimization and Applications. 11th International Conference, OPTIMA 2020 Moscow, Russia. – Springer Nature Switzerland AG, CCIS. – 2020. – 1340. – pp. 129-142. (Scopus).
- *Diveev A., Shmalko E.* Optimal Control Design for a Group of Mobile Robots with Uncertainties // Proceedings of 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – Kristiansand, Norway. – 2020. – pp.308-313. (Scopus, WoS).
- *Diveev A., Hussein O., Shmalko E., Sofronova E.* Synthesis of Control System for Quad-Rotor Helicopter by the Network Operator Method // Intelligent Systems and Applications Proceedings of the 2020 Intelligent Systems Conference (IntelliSys), Volume 1, Springer Nature Switzerland AG 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – 1250 AISC. – pp.246-263. (Scopus).
- *Diveev A., Shmalko E.* Optimal Feedback Control through Numerical Synthesis of Stabilization System // Proc. 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'20). Prague, Czech Republic, June 29 - July 2, 2020. – pp. 112-117. (Scopus, WoS).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю., Хуссейн О.* Управление квадрокоптером методом сетевого оператора на основе многоточечной стабилизации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 7. – Т.21. – С. 428-438. (K-1, RSCI).

- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Исследование синтезированного оптимального управления группой роботов при наличии неопределенностей // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2. – Т.30. – С. 10-18. (К-1)
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* К практической реализации решения задачи оптимального управления // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2. – Т.30. – С. 37-45. (К-1)
- *Diveev, A., Shmalko, E.* Comparison of Direct and Indirect Approaches for Numerical Solution of the Optimal Control Problem by Evolutionary Methods // In: Optimization and Applications. OPTIMA 2019. Communications in Computer and Information Science. – Springer, Cham. – 2020. – vol. 1145. (Scopus, WoS).
- *Diveev, A.I., Sofronova, E.A., Shmalko, E.Y.* Modified SOMA for Optimal Control Problem. 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). – 2019. – pp. 2894-2899. (Scopus, WoS).
- *Diveev A., Sofronova E., Shmalko E.* A solution of synthesized optimal control problem for interaction of robots by evolutionary computations // Proceedings of the 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA. – 2019. – 14. – pp. 756-761. (Scopus, WoS).
- *Diveev A.I., Shmalko E.Y., Sofronova E.A.* Theoretical fundamentals for unimodality estimation of an objective functional in the optimal control problem // 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019. – 6. – pp. 767-772. (Scopus, WoS).
- *Diveev A., Shmalko E.* Hybrid evolutionary algorithm for synthesized optimal control problem for group of interacting robots // 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019. – 6. – pp.876-881. (Scopus, WoS).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С.40-47. (К-1).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Численные методы синтеза синергетического управления групповым взаимодействием роботов // «Известия ЮФУ. Технические науки». – 2017. – № 9. – С.6-21. (К-2).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Эволюционные методы вычислений для синтеза управления группой роботов и поиска оптимальных траекторий их движения // Cloud of Science. – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 395-414. (К-1).
- *Diveev A.I., Shmalko E.Yu.* Evolutionary computations for synthesis of control system of group of robots and the optimum choice of trajectories for their movement // CEUR Workshop Proceedings of the VIII International Conference on Optimization and Applications (OPTIMA-2017), Petrovac, Montenegro, October 2-7, 2017. – pp. 158-165. (Scopus).
- *Diveev A., Shmalko E.* Complete binary variational analytic programming for synthesis of control at dynamic constraints // ITM Web of Conferences. – 2017. – Т. 10. – 02004. (Scopus, WoS).

- *Diveev A., Shmalko E.* Automatic approach to stabilization and control for multi robot teams by multilayer network operator // ITM Web of Conferences. – 2016. – Vol. 6. – 02004. (Scopus, WoS).
- *Diveev A.I., Shmalko E.Yu.* Optimal Motion Control for Multi-Robot System by Multilayer Network Operator // Proceedings of the 11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2016), 5 - 7 June 2016, Hefei, China. – pp. 2168-2173. (Scopus, WoS).
- *Diveev A. I., Shmalko E.Yu.* Optimal Control Synthesis for Group of Robots by Multilayer Network Operator // Proceedings of the International conference on Control, Decision and Information technologies 2016, CoDIT-2016, Malta, 6-8 April 2016. – pp.077-082. (Scopus, WoS).
- *Diveev A.I., Ibadulla S.I., Konyrbaev N.B., Shmalko E.Yu.* Variational Analytic Programming for Synthesis of Optimal Control for Flying Robot // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Volume 48. – Issue 19. – pp. 75-80. (Scopus, WoS).
- *Diveev A.I., Ibadulla S.I., Konyrbaev N.B., Shmalko* Variational Genetic Programming for Optimal Control System Synthesis of Mobile Robots // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Volume 48. – Issue 19. – pp. 106-111. (Scopus, WoS).
- *Diveev A. I., Shmalko E.Yu.* Self-adjusting Control for Multi Robot Team by the Network Operator Method // 2015 European Control Conference (ECC) – July 15-17, 2015. Linz, Austria. – pp. 709-714. (Scopus, WoS).
- *Diveev A. I., Shmalko E. Yu.* Automatic Synthesis of Control for Multi-Agent Systems with Dynamic Constraints // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Volume 48. – Issue 11. – pp. 384-389. (Scopus, WoS).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Численный синтез системы управления группой роботов методом символьной регрессии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10 (171). – С.29-45. (К-2).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Двухэтапный синтез системы управления методом сетевого оператора // Вестник Российского университета дружбы народов, серия Инженерные исследования. – 2015. – №1. – С.91-100. (К-3).
- *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Синтез системы автоматического управления мобильным роботом методом сетевого оператора и алгоритмом интеллектуальной эволюции // Нелинейный мир, ЗАО «Издательство «Радиотехника». – 2014. – №7. – т.12. – С.42-48. (К-2).
- *Diveev A., Khamadiyarov D., Shmalko E., Sofronova E.* Intellectual Evolution Method for Synthesis of Mobile Robot Control System // 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, June 20-23, Cancun, Mexico. – pp. 24-31. (Scopus, WoS).

Диссертация Шмалько Елизаветы Юрьевны «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» по специальности 2.3.1 «Системный анализ управление и обработка информации, статистика» представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, представляющую решение актуальной

современной научно-технической проблемы разработки автоматизированных методов создания систем управления робототехническими системами, оптимальных с точки зрения заданного критерия качества и реализуемых для практических объектов. Она выполнена автором самостоятельно и имеет большое теоретическое и практическое значение. Она полностью соответствует критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, и рекомендуется к защите на соискание автором степени доктора технических наук в диссертационный совет 24.1.224.01 при Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук».

Заключение принято единогласно на расширенном заседании отдела №55 ФИЦ ИУ РАН. Присутствовало на заседании 12 человек. Результаты голосования: «за» - 12 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол №1 от 28 мая 2024 года.

Председательствующий на заседании  
в.н.с., отдел № 55,  
д.т.н., профессор



Е.А. Воронин  
«28» мая 2024 г.

Секретарь заседания  
в.н.с., отдел № 55,  
к. ф.-м. н., доцент



А.Н. Дарьина  
«28» мая 2024 г.