

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК» (СПб ФИЦ РАН)

14 линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178
Телефон: (812) 328-34-11, факс: (812) 328-44-50, E-mail: info@spcras.ru, https://spcras.ru/
ОКПО 04683303, ОГРН 1027800514411, ИНН/КПП 7801003920/780101001

УТВЕРЖДАЮ

И. о. директора СПб ФИЦ РАН

Профессор РАН

_____ А.Л. Ронжин

01 декабря 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)
по диссертации Крестовникова Константина Дмитриевича «Алгоритмы и
программная система управления группой наземных роботов с
перераспределением энергетических ресурсов», представленной на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных
систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)**

Диссертация «Алгоритмы и программная система управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов» выполнена в лаборатории автономных робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук».

Крестовников К.Д. в 2019 году окончил магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по направлению подготовки 15.04.06 – «Мехатроника и робототехника».

Соискатель Крестовников К.Д. окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» по специальности 05.13.11 - Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей. Диплом об окончании аспирантуры 107805 0002215, выдан 21 июля 2023 года.

Научный руководитель — Савельев Антон Игоревич, кандидат технических наук, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук».

По результатам рассмотрения диссертации «Алгоритмы и программная система управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов» принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы:

В работе в результате решения актуальной научной задачи разработки моделей процессов, алгоритмов и средств управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов получен ряд значимых научных результатов. Разработаны математическая модель и алгоритмы функционирования группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов. Разработанная математическая модель отличается введением новых параметров, описывающих энергетические характеристики роботов, задач и среды функционирования, а также учитывает возможность энергетического обмена между роботами посредством БСПЭ. Модель описывает принципы функционирования роботов-рабочих и роботов-заряжающих и их взаимодействия. Разработано аппаратное и алгоритмическое обеспечение, реализующее обмен энергетическими ресурсами между роботами. Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять управление и мониторинг параметров двунаправленной БСПЭ. Предложенные алгоритмы реализуют функции защиты, которые учитывают специфику разработанных схмотехнических решений. В экспериментальной части работы проведено сравнение между группой, функционирующей с традиционными принципами и на основе разработанного авторского обеспечения. Имитационное моделирование проведено в среде Gazebo. Результаты проведенного моделирования, вычислительных и практических экспериментов подтверждают работоспособность и эффективность разработанного обеспечения. Использование разработанного алгоритмического и аппаратного обеспечения позволяет значительно расширить область функционирования группы наземных роботов и использовать ее для потенциально более энергоемких задач, а также снизить затраты времени за счет оптимального распределения функций и задач между роботами.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации:

Автором лично разработаны математическая модель и алгоритмы функционирования группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов, разработаны аппаратное и алгоритмическое обеспечение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии. Публикация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем Савельевым А.И., причем вклад диссертанта был существенным.

Степень достоверности результатов проведенных исследований:

Достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации подтверждается анализом состояния исследований в данной области, согласованностью теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки алгоритмов, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных и российских научных специализированных конференциях: «Современные проблемы робототехники 2019» (Москва, МГТУ имени Н.Э. Баумана 26.03.2019), «18th International Conference on Smart Technologies» (IEEE EUROCON 2019, Novi Sad, Serbia, 1-4 июля 2019), «International Conference on Interactive Collaborative Robotics» (ICR-2019, Istanbul, Turkey, 20-25 Августа 2019), «International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"» (ER(ZR)-2019, Курск, 17-19 апреля 2019), International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2021, Санкт-Петербург, 14-17 апреля 2021), «СПИСОК-2023: Всероссийская научно-практическая конференция» (Санкт-Петербург, 26-28 апреля 2023), Донецкий международный круглый стол «Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение» в рамках IX Международного Научного форума Донецкой Народной Республики (24 мая 2023), МКПУ-2023 XVI-я всероссийская мультikonференция по проблемам управления (11-15 сентября 2023).

Научную новизну работы составляют:

1. Математическая модель управления группой наземных роботов, отличающаяся новыми условиями решения задачи, учитывающая перераспределение энергетических ресурсов между роботами и оптимизирующая выполнение целевых задач.
2. Комплекс алгоритмов группового централизованного управления наземными роботами, отличающийся совокупностью правил и реализующий перераспределение энергетических ресурсов на маршрутах между точками местоположения целевых задач при передвижении на открытом пространстве с переменным рельефом, обеспечивающий уменьшение общего времени выполнения целевых задач.
3. Архитектура программной системы управления группой наземных роботов, отличающаяся применением нескольких шин данных, осуществляющих соединение модулей системы управления группой роботов, модулей отдельного наземного робота и информационный обмен между ними; наличием модуля определения координат точек энергетического обмена между рабочим и заряжающим роботом.

Теоретическая значимость полученных результатов:

В диссертационной работе решена актуальная научная задача разработки моделей процессов, алгоритмов и средств управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов. Решенная задача имеет важное

значение для совершенствования способов и технических средств группового управления роботами наземного и других сред базирования. Разработанное модельно-алгоритмическое и программно-аппаратное обеспечение группового управления роботами было использовано при проведении исследовательских работ СПб ФИЦ РАН, КБНЦ РАН, ООО «РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН», и в учебном процессе Калининградского государственного технического университета, получены соответствующие акты внедрения.

Специальность, которой соответствует диссертация

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», направленность (профиль) 2.3.5. – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации изложены в достаточной полноте в следующих 18 научных публикациях:

В рецензируемых журналах из «Перечня ВАК»:

1. Крестовников К.Д. Математическая модель и алгоритмы управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов / К.Д. Крестовников // Информационно-управляющие системы. 2023. № 6
2. Крестовников К.Д. Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной системой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных роботов / К.Д. Крестовников // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 9, С. 451-461. DOI: 10.17587/mau.24.481-488
3. Крестовников К.Д. Математическая модель роевой робототехнической системы с беспроводной двусторонней передачей энергии / К.Д. Крестовников, А.Р. Шабанова, А.Д. Ковалёв // Труды Научно-исследовательского института радио. 2020. № 1-2. С. 64-73. DOI: 10.34832/NIIR.2020.1.1.007
4. Крестовников К.Д. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами / А.А. Ерашов, К.В. Камынин, К.Д. Крестовников, А.И. Савельев, // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20(6), С.1279-1306. DOI: 10.15622/ia.20.6.4
5. Крестовников К. Д. Повышение эффективности работы беспроводной системы передачи энергии за счет применения синхронного выпрямителя / К.Д. Крестовников, Е.О. Черских, А.Р. Шабанова, А. Д. Ковалев // Датчики и системы. 2019. № 10, С. 38-42. DOI: 10.25728/datsys.2019.10.6.
6. Крестовников К. Д. Схемотехнические и конструктивные решения для беспроводной системы передачи энергии на основе синхронного выпрямителя / К.Д. Крестовников, Е.О. Черских, А.Р. Шабанова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 4. С. 11-12. DOI: 10.26102/2310 6018/2019.27.4.018

7. Крестовников К.Д. Структура и схемотехническое решение системы беспроводной передачи энергии для применения в мобильных РТК / К.Д. Крестовников, А.Н. Быков, А.А. Ерашов // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. № 9(3). С. 196-206. DOI: 10.31776/RTSJ.9305
8. Крестовников К.Д. Структура и схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии для роевых роботов / К.Д. Крестовников, А.В. Семенов, А.А. Ерашов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. №25(4), С. 84-103. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-84-103
9. Крестовников К.Д. Исследование эффективности беспроводной системы передачи энергии при эксплуатации в воде и растворах / К.Д. Крестовников, А.А. Ерашов // Датчики и системы. 2022. Т 2, № 2, С. 19-27. DOI: 10.25728/datsys.2022.2.3.
10. Крестовников К.Д. Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов / К.Д. Крестовников, А.А. Ерашов, А.И. Савельев // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4, часть 1, С. 144-155. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.036
В зарубежных изданиях, индексируемых в WoS/Scopus:
11. Krestovnikov K. Mathematical Model of a Swarm Robotic System with Wireless Bi-directional Energy Transfer / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, A. Ronzhin // Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Springer, Cham, 2020. P. 13-23. DOI: 10.1007/978-3-030-37841-7_2
12. Krestovnikov K. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, A. Bykov // Elektronika ir Elektrotechnika. 2020 №26(6), 17-24. DOI: 10.5755/j01.eie.26.6.2618.
13. Krestovnikov K. Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, N. Pavliuk // IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies. 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/EUROCON.2019.8861856
14. Krestovnikov K. Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, P. Smirnov // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2019. P. 193-203. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_19
15. Krestovnikov K. Comparative study of synchronous and non-synchronous rectifiers for use in the receiving part of a wireless charging system / K. Krestovnikov, A. Saveliev, A. Shabanova, I. Vatamaniuk // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, Singapore, 2020. P. 675-685. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_56
16. Krestovnikov K. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, A. Saveliev // Radioengineering. 2021.vol. 30, No. 1, P. 142-149. DOI: 10.13164/re.2021.0142
17. Krestovnikov K. D. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots / K.

Krestovnikov, E. Cherskikh // Serbian Journal of Electrical Engineering. 2021. vol. 18. No. 2. P. 171-192. DOI: 10.2298/SJEE2102171K

18. Krestovnikov K. Research of performance characteristics of WPT system associated with mutual arrangement of coils / K. Krestovnikov, A. Erashov // Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, Singapore. 2022. P. 359-369. DOI:10.1007/978-981-16-2814-6_31

Практическая ценность научных результатов соискателя заключается в снижении общего времени и расширении территории функционирования группы роботов, выполняющих задачи на открытой местности с переменным рельефом посредством перераспределения энергетических ресурсов внутри группы с применением системы беспроводной передачи энергии.

Диссертационная работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842.

Диссертация «Алгоритмы и программная система управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов» Крестовникова К. Д. рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки).

Заключение принято на расширенном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук». Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования: «за» — 10 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол №11 от 17.11.2023 г.

Директор СПИИРАН СПб ФИЦ РАН,
доктор технических наук

Осипов Василий Юрьевич

Руководитель лаборатории автономных
робототехнических систем,
кандидат технических наук

Савельев Антон Игоревич