



На правах рукописи

**Крестовников Константин Дмитриевич**

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ГРУППОЙ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение  
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) в лаборатории автономных робототехнических систем.

Научный руководитель:

**САВЕЛЬЕВ Антон Игоревич**, кандидат технических наук, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем СПб ФИЦ РАН

Официальные оппоненты:

**БРИСКИН Евгений Самуилович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры "Динамика и прочность машин".

**ДАЛЯЕВ Игорь Юрьевич**, кандидат технических наук, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), заместитель главного конструктора.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Защита состоится «18» апреля 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.206.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-ая линия В.О., 39, каб. 401. Факс: (812) 328 44-50, тел: (812)-328-34-11.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в отделе аспирантуры (каб. 402а) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-а линия В.О., 39 и на сайте <https://dc.spcras.ru/>

Автореферат разослан «1» марта 2024 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.206.01  
кандидат технических наук



**Абрамов Максим Викторович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационной работы.** Робототехнические системы позволяют выполнять широкий набор отраслевых и исследовательских задач. Использование нескольких гомогенных или гетерогенных роботов для решения целевых задач дает преимущества в виде снижения затрат времени или расширения функциональных возможностей по сравнению с одиночным роботом. При этом также возрастает количество ресурсов, необходимое для обеспечения работы группы роботов.

Ограниченный ресурс источника питания одного робота делает целесообразным использование подхода с перераспределением энергетических ресурсов внутри группы, так как позволяет снизить затраты времени, необходимые для возврата роботов к точкам пополнения запаса энергии, и расширить доступную рабочую область. Таким образом, эффективное перераспределение энергетических ресурсов внутри группы роботов является актуальной научно-технической задачей. Осуществить передачу электрической энергии между роботами можно с помощью контактных методов, но в этом случае как правило требуется высокая точность позиционирования, что усложняет сенсорную систему робота. Кроме того, разъемы и контактные пары требуют регулярного обслуживания и должны иметь пылевлагозащищенное исполнение для функционирования в естественной окружающей среде на открытом пространстве. Учитывая тот факт, что функционирование группы роботов может происходить на неоднородных поверхностях, а также несовершенство сенсорных систем, контактные методы передачи энергии имеют значительные ограничения и снижают общую надежность. Данных недостатков лишены беспроводные системы передачи энергии (БСПЭ), которые находят применение в качестве устройств для беспроводного заряда аккумуляторов различных автономных систем. В связи с этим, актуальным представляется разработка подхода к функционированию группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов посредством беспроводной передачи энергии.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время в направлении групповой робототехники в России проводят исследования Карпова И.П., Каляев И. А., Медведев М.Ю., Мещеряков Р.В., Магид Е.А., Петренко В.И., Пшихопов В.Х. и другие. Из зарубежных специалистов, внесших существенный вклад в направление роевой робототехники, следует отметить: M. Birattari, J.C. Barca, M. Brambilla, AL. Christensen, E. Ferrante, J. Gomes, S. Kernbach, J.H. Lee, W. Liu и другие. Исследования ученых сосредоточены на биологически инспирированных подходах к управлению группами роботов, оптимизации распределения задач и совместном передвижении в среде с динамическими препятствиями, а также на вспомогательных технологиях для функционирования роевых систем. Задачи энергетического обеспечения и планирования при групповом управлении в большей степени рассматриваются со стороны поддержания энергетических параметров роботов и распределения задач соответствующим образом. На текущий момент подходы к управлению группой роботов с перераспределением энергетических ресурсов системно не рассматривались.

**Целью диссертационной работы является** снижение временных затрат и расширение территории функционирования группы роботов, выполняющих задачи на открытой местности с переменным рельефом посредством перераспределения энергетических ресурсов внутри группы с применением системы беспроводной передачи энергии.

Для достижения указанной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. анализ современных подходов к решению задачи перераспределения энергетических ресурсов в группе наземных роботов;
2. разработка математической модели группового управления наземными роботами, учитывающей перераспределение энергетических ресурсов внутри группы;

3. разработка алгоритмов группового управления наземными роботами с перераспределением энергетических ресурсов;
4. разработка алгоритмического и аппаратного обеспечения двунаправленной беспроводной системы передачи энергии;
5. апробация разработанных решений в моделирующей среде, обработка и оценивание полученных экспериментальных результатов.

**Объектом исследования** является процесс управления группой наземных роботов, оснащенных двунаправленной беспроводной системой передачи энергии.

**Предметом исследования** являются модели и алгоритмы группового управления роботами при перераспределении энергетических ресурсов и реализации целевых задач.

**Научную новизну** диссертационной 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 и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость полученных научных результатов состоит в развитии научно-методического аппарата в области группового управления наземными роботами с перераспределением энергетических ресурсов. Практическая значимость научных результатов состоит в снижении временных затрат на выполнение целевых задач группой наземных роботов при функционировании на открытом пространстве с переменным рельефом.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе используются методы теории информации, теории множеств, методы математического моделирования, методы системного анализа и синтеза, а также методы логического анализа и вывода. При разработке аппаратных решений БСПЭ применялись методы структурного синтеза и параметрической оптимизации. Для компьютерного моделирования, разработанного математического и алгоритмического обеспечения, применялась среда Gazebo.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Математическая модель управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов.
2. Комплекс алгоритмов решения задачи группового централизованного управления наземными рабочими и заряжающими роботами при совместном функционировании.
3. Архитектура программной системы управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов.

**Соответствие требованиям.** Представленные результаты соответствуют 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». **Положения, выносимые на защиту**, соответствуют следующим пунктам паспорта специальности: п. 3. «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем», п. 8. «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования».

**Степень достоверности результатов.** Высокая степень достоверности научных положений, выводов и результатов обеспечена анализом текущего уровня исследований в данной области, корректным использованием апробированного математического аппарата, согласованностью теоретических выводов с результатами моделирования и экспериментов, сравнением предложенных решений с известными аналогами и одобрением основных положений диссертационной работы на российских и международных научных конференциях.

**Апробация и реализация результатов.** Разработанные модель и алгоритмы группового управления роботами с перераспределением энергетических ресурсов были реализованы в виде программно-аппаратного обеспечения, использованы рядом коммерческих и государственных организаций, а также внедрены в образовательном процессе. Исследования, отражённые в диссертации, проведены в рамках 2 научно-исследовательских работ: 1) грант РФФИ №19-08-01215А «Теоретические основы двунаправленной беспроводной передачи энергии и алгоритмы построения автоматического перераспределения энергоресурсов в группе роботов»; 2) грант Президента РФ МК-3094.2022.1.6 «Подход к позиционированию подводного автономного аппарата для получения беспроводной электрической энергии от зарядной станции надводного аппарата». 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. На предложенные технические решения получено два патента на изобретение и четыре свидетельства о регистрации программы для ЭВМ: «Беспроводная зарядная система» № 2698307 от 26.08.2019 г.; «Двунаправленная система беспроводной передачи энергии» № 2802056 от 22.08.2023 г.; «Образовательная облачная среда для программирования наземных робототехнических платформ» №2022680118 от 27.10.2022, «Программное обеспечение для управления передающей частью беспроводной системы передачи энергии на базе резонансного автогенератора» №2023669595 от 18.09.2023, «Программный модуль позиционирования робота по ArUco-маркерам» №2023681828 от 19.10.2023, «Программный комплекс формирования миссий группы наземных роботов» №2023686919 от 11.12.2023.

Основные положения диссертационной работы представлялись на международных и российских 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).

**Публикации.** По научным результатам диссертационного исследования опубликовано 18 работ, в том числе 10 публикаций в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», две статьи в указанном перечне опубликованы без соавторов, 8 публикаций в зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus/WoS (в том числе 7 публикации в журналах Q3/Q4), свидетельства о государственной регистрации изобретения и программ для ЭВМ.

**Личный вклад соискателя.** Автором лично разработаны математическая модель и алгоритмы функционирования группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов, разработаны аппаратное и алгоритмическое обеспечение двунаправленной БСПЭ, проведено практическое тестирование и систематизация эксплуатационных ограничений. Разработка модели робототехнической системы с групповым управлением в среде Gazebo и эксперименты с ней проведены в соавторстве с научным руководителем, причем вклад соискателя был значительным.

**Структура и объем работы.** Текст работы состоит из следующих структурных элементов: введение; основная часть, включающая четыре главы; заключение; список литературы, содержащий 110 наименований; три приложения, содержащие список публикаций соискателя по теме диссертации, копии полученных свидетельств об интеллектуальной собственности, а также копии актов внедрения результатов диссертационной работы. Общий объем диссертационной работы – 178 страниц. Работа включает в себя 53 рисунков, 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, решаемая научная задача и положения, выносимые на защиту, отражена суть и новизна основных научных результатов.

**В первой главе** диссертационной работы рассмотрены существующие подходы к управлению энергетическими ресурсами в группе наземных роботов, методы оптимального распределения сервисных и целевых задач, а также определения местоположений на маршрутах роботов для осуществления сервисного обслуживания. Также представлен обзор способов перераспределения ресурсов в группе наземных роботов, проведен анализ их преимуществ и недостатков. На основе проведенного анализа составлена классификация способов повышения эффективности использования ресурсов группой (рисунок 1), а также представлены примеры реализации.

Исследования в области управления ресурсами в группах робототехнических средств в настоящее время сосредоточены на биологически инспирированных подходах к управлению группами роботов, оптимизации распределения целевых заданий и перемещения роботов, а также на вспомогательных сервисных задачах. Научные проблемы энергетического обеспечения и планирования при групповом управлении рассматриваются со стороны поддержания энергетических параметров роботов и распределения задач соответствующим образом. Способ к управлению группой наземных роботов с разделением функций между ними, следует выделить в качестве перспективного для повышения эффективности использования энергетических ресурсов. Также стоит отметить способы, связанные с внедрением социального поведения при групповом управлении. Под социальным поведением, как правило рассматриваются альтруистические подходы при функционировании роботов. Сущность данных подходов состоит в передаче информации о местах расположения ресурсов между роботами или обмене целевыми задачами, а также в обмене энергетическими ресурсами.

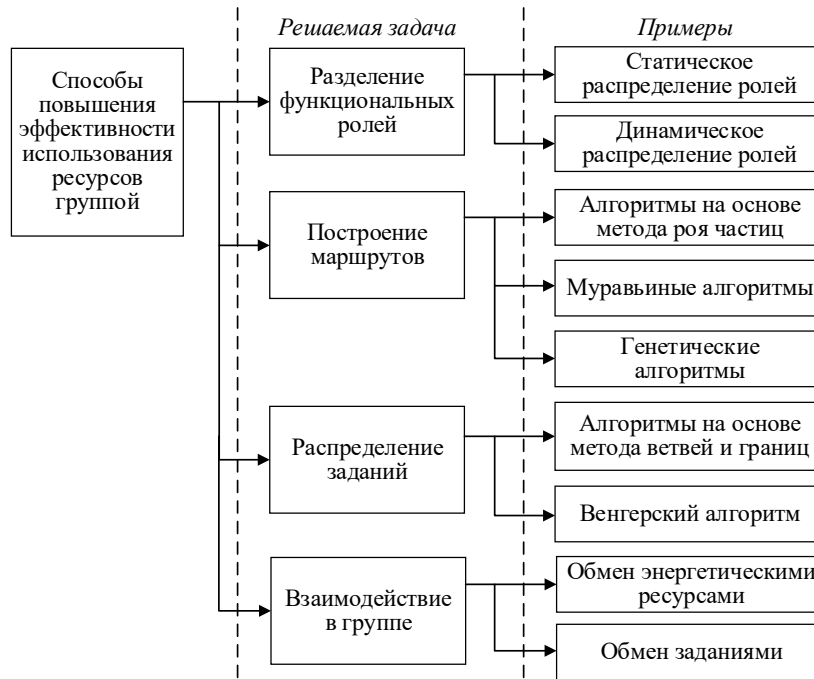


Рисунок 1 – Классификация способов повышения эффективности использования ресурсов группой

В качестве перспективного способа обмена энергетическими ресурсами выбрана бесконтактная передача энергии посредством индуктивно-связанных контуров. Рассмотрены существующие стандартизированные решения беспроводных зарядных устройств, а также проведен анализ однонаправленных и двунаправленных беспроводных систем передачи энергии (БСПЭ), представленных в исследовательских работах.

**Во второй главе** представлена математическая постановка задачи, описывается разработанная математическая модель и алгоритмы функционирования группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов. Приведено описание параметров модели и их взаимосвязи, определены состояния функционирования роботов. В данной работе рассматривается задача управления группой гомогенных роботов, функционально разделенной на рабочих и заряжающих, которым необходимо выполнить ряд целевых задач с определёнными координатами, расположенных в области рабочего пространства, описанного поверхностью (рисунок 2). В начальный момент времени роботы расположены в определенных точках рабочего пространства. Энергоснабжение группы обеспечивает стационарная зарядная станция с неограниченным запасом энергии, расположенная в рабочем пространстве, и имеющая известные координаты. Группа имеет внешнюю по отношению к роботам централизованную систему управления. Аккумуляторные батареи рабочих и заряжающих роботов имеют равную энергоёмкость. Энергетические ресурсы батареи роботов-рабочих расходуются на преодоление пути до места расположения задания и на его выполнение. Энергетические ресурсы роботов-заряжающих расходуются на пополнение заряда роботов-рабочих и преодоление пути до места, в котором осуществляется передача энергии. Необходимо обеспечить эффективное выполнение целевых задач роботами-рабочими.

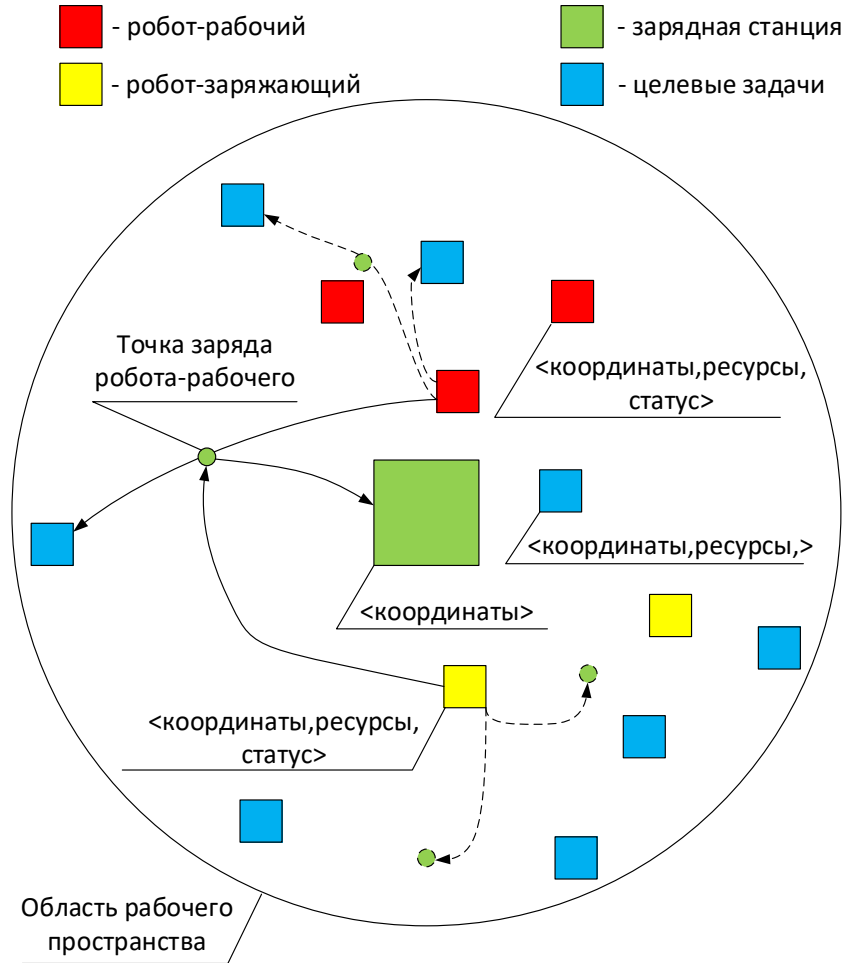


Рисунок 2 – Визуальное представление задачи

С учетом этого математическую формулировку задачи поиска оптимального плана назначений  $\|x_{ij}\|_o$   $i$ -роботов на  $j$ -целевые задачи можно записать в следующем виде. Требуется найти такой оптимальный план, при котором достигается максимум целевой функции  $V_o$  - числа решаемых целевых задач, с учетом их важности:

$$V_o(\|x_{ij}\|_o) = \max_{\|x_{ij}\| \in \Omega} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_j x_{ij}, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tau_{ij} x_{ij} \leq T_{\text{доп}}, \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \text{Alg}(Z_{m \times n}, E, R, T_a, B, cz) \leq \tau_{j\text{доп}}, \quad (3)$$

$$E_i + E_g(\tau_{ij}) \geq E_{ij}(\tau_{ij}), \quad (4)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{робот назначен на } j - \text{задачу} \\ 0, & \text{не назначен} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, m}, \quad (7)$$

где  $V_o$  – значение целевой функции,  $A_j$  – важность задачи,  $\tau_{ij}$  – элемент матрицы затрат времени  $S$ ,  $x_{ij}$  – элемент матрицы назначений  $Z$ ,  $T_{\text{доп}}$  – допустимое время выполнения целевых задач,  $\tau_{j\text{доп}}$  – допустимое время выполнения целевой задачи,  $E$  – множество энергетических параметров роботов,  $E_{ij}$  – общие затраты энергии на выполнение  $j$ -целевой задачи  $i$ -роботом,  $E_i$  – текущий запас энергии робота-рабочего,  $E_g$  – энергетические ресурсы которые робот-заряжающий может передать роботу-рабочему.

В ряде случаев вместо задачи, описанной выражениями (1) - (7), можно решать задачу, согласно которой требуется найти оптимальный план назначений из стремления минимизации общего времени выполнения целевых задач:

$$F_o(\|x_{ij}\|_o) = \min_{\|x_{ij}\| \in \Omega} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tau_{ij} x_{ij}, \quad (8)$$



при ограничениях (3) - (7) и:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_j x_{ij} \geq Q_{\text{доп}}, \quad (9)$$

где  $F_o$  – значение целевой функции,  $Q_{\text{доп}}$  – число решаемых задач с учетом их важности.

В соответствии с поставленной задачей матрица затрат времени  $P$  имеет размерность  $m \times n$  и состоит из элементов  $\tau_{ij}$ , где  $m$  – число роботов,  $n$  – число задач. Матрица назначений  $Z$  имеет размерность  $m \times n$  и состоит из элементов  $x_{ij}$ .

Оптимальный план распределения роботов на целевые задачи с учетом возможного перераспределения ограниченных ресурсов роботов, обеспечивает минимизацию суммарных затрат времени на выполнение целевых задач.

Решение поставленной задачи методом перебора всех вариантов имеет высокую вычислительную сложность. Ввиду этого актуальна реализация одношагового управления, при котором новая итерация распределения роботов-рабочих на целевые задачи и роботов-заряжающих на задачи пополнения энергетических ресурсов будет выполняться в случае наличия свободных роботов. На каждом шаге управления будет выполняться оптимальное распределение свободных роботов-рабочих между целевыми задачами, затем осуществляться поиск точек заряда исключительно на определенных траекториях перемещения роботов-рабочих до целевых задач. После определения точек заряда формируются задачи пополнения энергетических ресурсов, которые распределяются между свободными роботами-заряжающими. Данный алгоритм решения задачи позволит реализовать функционирование группы роботов с перераспределением ресурсов, в случае если неизвестно точное время передачи энергии, время выполнения целевой задачи, а также если возможна постановка новых целевых задач непосредственно во время функционирования группы.

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель управления группой наземных роботов, учитывающая параметры наземных роботов и группы, необходимые для распределения задач и энергетических ресурсов. Пусть поверхность, определяющая рабочее пространство, задана картой высот  $b_u = [x_u, y_u, z_u]$ ,  $b_u \in B$ ,  $u = 1, \dots, m$ , а также множество роботов  $R$ , состоящее из множества роботов-рабочих  $W$  и заряжающих роботов  $C$ :  $R = \{W, C\}$ . Множество роботов-рабочих представляется в виде  $W = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_m\}$ , где  $i$  – идентификатор робота,  $i \in [1; m]$ . Каждый робот-рабочий описан кортежем параметров  $w_i = \langle cr_i, er_i, sr_i \rangle$ , где  $cr_i = [x_i, y_i, z_i]$  – координаты робота-рабочего в пространстве,  $er_i$  – значение его текущего запаса энергии в относительных единицах и параметр его статуса  $sr_i$ , принимающий значения 0 если робот не занят выполнением миссии, и 1 если занят. Множество заряжающих роботов представляет собой множество  $C = \{c_1, \dots, c_k, \dots, c_z\}$ , где  $z$  – число заряжающих роботов. При этом робот-заряжающий аналогично описан кортежем параметров  $c_k = \langle cr_k, er_k, sr_k \rangle$ . Группе роботов-рабочих назначаются целевые задания (задачи)  $ta_j$  представленные во множестве  $T_a = \{ta_1, \dots, ta_j, \dots, ta_n\}$ , где номер задачи  $j \in [1; n]$ . Каждая задача описана кортежем параметров  $ta_j = \langle ct_j, et_j \rangle$ , где  $ct_j = [x_j, y_j, z_j]$  – координаты точки выполнения задачи,  $et_j$  – значение энергии в относительных единицах, которое необходимо для выполнения роботом-рабочим задачи  $ta_j$ .

В процессе функционирования системы управления группы формируется множество задач пополнения энергетических ресурсов  $T_c$ . Данное множество аналогично по структуре множеству  $T_a$ ,  $T_c = \{tc_1, \dots, tc_g, \dots, tc_q\}$ , где идентификатор задачи  $g \in [1, q]$ . Каждая задача описана кортежем параметров  $tc_g = \langle ct_g, et_g \rangle$ , где  $ct_g$  – координаты задачи, а  $et_g$  – количество энергии в относительных единицах, которое необходимо передать роботу-рабочему от робота-заряжающего. Соответственно задачи пополнения энергетических ресурсов выполняют роботы-заряжающие.

Роботы-рабочие имеют три состояния: следование по маршруту, выполнение задачи и заряда аккумуляторной батареи. В состоянии следования по маршруту робот последовательно перемещается между двумя точками траектории, пока не достигнет конечной точки или точки заряда (при ее наличии). При достижении точки заряда робот-

рабочий останавливается и ожидает пока робот-заряжающий восполнит заряд его батареи. При достижении координат целевой задачи, робот приступает к ее выполнению. Процесс непосредственно выполнения роботом целевой задачи в рамках данной работы не рассматривается, так как не оказывает прямого влияния на процессы функционирования группы и перераспределения ресурсов. Заряжающие роботы имеют четыре состояния: следование по маршруту, позиционирование для передачи энергии, передача энергии роботу-рабочему, восполнение заряда собственной батареи. Состояние следования по маршруту заряжающих роботов аналогично роботам-рабочим за исключением отсутствия остановок в ожидании собственного заряда. При достижении заряжающим роботом точки заряда он находится на месте до тех пор, пока робот-рабочий не прибудет в данную точку для заряда аккумуляторной батареи, после чего заряжающий робот переходит в состояние позиционирования для передачи энергии. В режиме позиционирования заряжающий робот движется по локальной траектории до конечной точки, в которой начинается передача энергии роботу-рабочему. После завершения позиционирования с роботом-рабочим заряжающий робот переходит в состояние передачи энергии, в котором расходует свой запас энергии на восполнение заряда батареи робота-рабочего до заданной величины  $e_{max}$ . По завершении передачи энергии, робот-рабочий продолжает движение по траектории, а робот-заряжающий начинает перемещение к зарядной станции для восполнения заряда собственной батареи.

Между централизованной системой управления и роботами группы  $R$  осуществляется информационный обмен. Рабочие и заряжающие роботы передают системе управления свои координаты ( $ct_i, ct_k$ ), текущий уровень заряда ( $er_i, er_k$ ) и статус ( $sr_i, sr_k$ ). На основе информации, полученной от роботов, система управления в соответствии с алгоритмами работы формирует миссии для каждого робота. Миссия  $M_i$  роботов-рабочих включает в себя траекторию движения робота  $p_{ij}$ , координаты точек пополнения запаса энергетических ресурсов, содержащиеся в кортеже  $cr_i$ , и координаты задачи  $ct_j$ :  $M_i = \langle p_{ij}, cr_i, ct_j \rangle$ . Для робота-заряжающего задачей является передача энергии роботу рабочему в определенной точке рабочей области, а пополнение собственного запаса энергетических ресурсов происходит на зарядной станции с координатами  $cz$ :  $M_k = \langle p_{kg}, cz, ct_g \rangle$ .

С учетом определенных состояний функционирования роботов-рабочих общее время выполнения  $j$ -задачи  $i$ -роботом складывается из следующих составляющих:

$$\tau_{ij} = \tau_s + \tau_r + \tau_{tx} + \tau_{exp} + \tau_j, \quad (10)$$

где  $\tau_{ij}$  – общее время выполнения  $j$ -задачи  $i$ -роботом,  $\tau_s$  – время принятия решений системой управления,  $\tau_r$  – время перемещения  $i$ -робота к  $j$ -задаче,  $\tau_{tx}$  – общее время передачи энергии от робота-заряжающего к роботу-рабочему,  $\tau_{exp}$  – время ожидания робота-заряжающего,  $\tau_j$  – время выполнения  $j$ -задачи.

Примем, что время принятия решений системой управления мало и им можно пренебречь в общем времени выполнения задачи, а также, что  $\tau_s = const$ . Процесс непосредственно выполнения роботом целевой задачи в рамках данной работы не рассматривается, ввиду чего примем, что  $\tau_j = const$ . При этом задачи ставятся извне ( $T_a$ ) и для стабильно функционирования группы необходимо проверить их выполнимость:

$$T_w = f_1(ct_j, cz, e_{max}, e_{minw}, e_{minc}, e_m, \delta e, \eta_p), j \in \{1, n\} \quad (11)$$

Значение  $\tau_r$  зависит от скорости движения робота, рельефа рабочего пространства и длины траектории. Скорость движения по траектории и ее максимальное значение является параметрами, зависящими от конструктивных решений конкретного робота. Примем, что роботы перемещаются в рабочем пространстве с максимально возможной скоростью, ограниченной их конструктивными параметрами и условиями функционирования. Тогда время перемещения  $i$ -робота-рабочего к  $j$ -задаче зависит от выбранной траектории и рельефа рабочего пространства. Примем, что на момент начала работы группы количество рабочих и заряжающих роботов известно и постоянно:  $|W| = const$ ,  $|C| = const$ . Длина траектории зависит от того, каким образом целевые задачи буду

распределены между роботами и взаимного расположения робота и назначенной ему задачи:

$$L_w = f_2(B, ct_j, cr_i), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\}, \quad (12)$$

$$\langle P_w, D_w \rangle = f_3(T_w, W). \quad (13)$$

Общее время передачи энергии от робота-заряжающего к роботу-рабочему  $\tau_{tx}$  зависит от числа точек заряда ( $pm$ ), эффективности передачи энергии между роботами ( $\eta_n$ ) и количества энергии, которое необходимо передать между роботами ( $et_g$ ). Параметры  $pm$  и  $et_g$  вычисляются при формировании множества задач пополнения энергетических ресурсов роботов-рабочих  $T_c$  и кортежа точек заряда  $i$ -робота  $cr_i$ :

$$T_c = f_4(p_{ij}, ct_j, er_i, et_j, e_{max}, e_{minw}, e_m, \delta e, d_w, s_b, nb), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\}, \quad (14)$$

$$\eta_n = f_5(\eta_{max}, L_{rel}, H_{rel}, P_{rel}), \quad (15)$$

где  $\eta_{max}$  – максимальная возможная эффективность передачи энергии,  $L_{rel}$ ,  $H_{rel}$ ,  $P_{rel}$  – расстояние, смещение, передаваемая мощность БСПЭ в относительных единицах.

Время ожидания, робота-заряжающего роботом-рабочим,  $\tau_{exp}$  зависит от количества задач пополнения энергетических ресурсов ( $/T_c/$ ), длины траектории робота-заряжающего ( $l_{kg}$ ) и их количества в составе группы ( $/C/$ ). Длина траектории зависит от того, каким образом задачи пополнения энергетических ресурсов будут распределены между роботами-заряжающими и взаимного расположения робота и назначенной ему задачи:

$$L_c = f_2(B, ct_g, cr_k), g \in \{1, q\}, k \in \{1, z\}, \quad (16)$$

$$\langle P_c, D_c \rangle = f_6(T_c, C). \quad (17)$$

Функционирование рабочих и заряжающих роботов соответствующим образом обеспечивается системой управления группой, посредством формирования миссий на основе заданных параметров задач, роботов и области рабочего пространства. С учетом указанных выше функциональных зависимостей время выполнения  $j$ -задачи  $i$ -роботом  $\tau_{ij}$  будет зависеть от того, как сформированы миссии каждого робота группы:

$$M_i = f_7(P_w, T_c, T_w), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\}, \quad (18)$$

$$M_k = f_7(P_c, T_c, cz), g \in \{1, q\}, k \in \{1, z\}. \quad (19)$$

На рисунке 3 приведена схема, которая отражает взаимосвязи между разработанными алгоритмами функционирования системы управления группой наземных роботов.

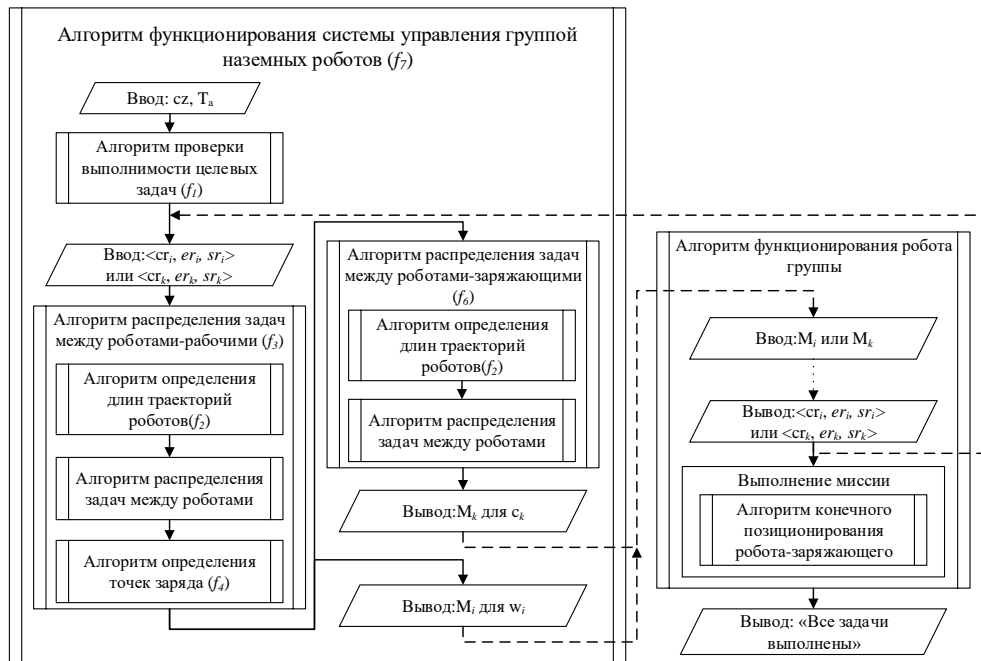


Рисунок 3 – Комплекс алгоритмов управления группой наземных роботов

Алгоритм функционирования системы управления группой наземных роботов представлен на рисунке 4.

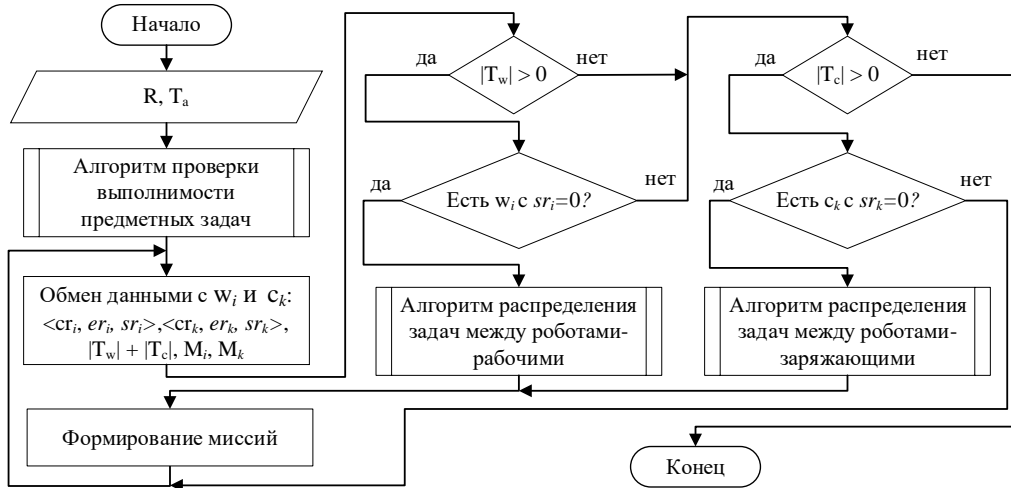


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма функционирования системы управления группой наземных роботов ( $f_7$ )

На первом этапе посредством вложенного алгоритма, отбираются выполнимые задачи  $t_{aj}$ , которые помещаются во множество  $T_w$ . Затем осуществляется обмен данными с роботами группы для получения информации о их собственных координатах и запасе энергетических ресурсов. Далее осуществляется проверка количества элементов множества  $T_w$ , а в случае, если оно пустое, то множества  $T_c$ , которое содержит задачи пополнения энергетических ресурсов. Если множество задач  $T_w$  пустое, а множество  $T_c$  имеет элементы, то система управления проверяет наличие свободного робота-заряжающего. Посредством алгоритма распределения задач пополнения энергетических ресурсов между роботами-заряжающими освободившемуся роботу назначается точка, в которой он должен пополнить заряд робота-рабочего. Далее формируются миссии и снова осуществляется обмен данными с роботами. Если множество задач  $T_w$  не пустое, то система управления группой проверяет наличие свободного робота-рабочего. В соответствии с алгоритмом распределения задач между роботами-рабочими осуществляется выбор задачи для данного робота, поиск точек пополнения энергетических ресурсов, а затем формируется миссия. Алгоритм завершает свою работу, когда множества  $T_w$  и  $T_c$  становятся пустыми, что в свою очередь означает что все выполнимые задачи, поставленные группе роботов выполнены. Каждый робот группы функционирует по алгоритму, изображенному на рисунке 5.

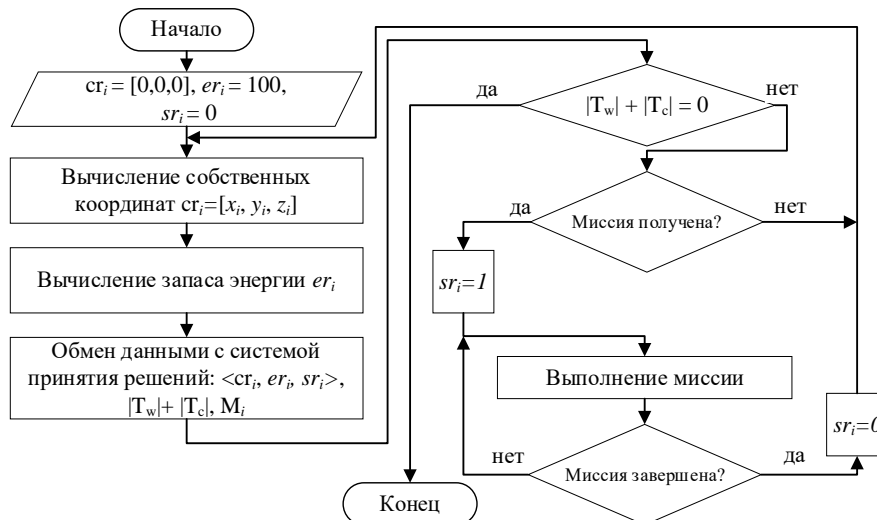


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма функционирования робота из группы

На первом шаге алгоритма робот вычисляет собственные координаты относительно системы отсчета, связанной с картой высот, что необходимо для локализации робота в рабочей области. Второй шаг подразумевает измерение роботом параметров собственного источника питания и вычисление текущего запаса энергии в относительных единицах. Далее происходит обмен данными между роботом и централизованной системой управления. Робот отправляет системе свои координаты, текущий запас энергии и статус. Если  $sr_i = 1$ , то робот занят выполнением миссии и участвовать в распределении задач или точек заряда он не может.

Роботы группы, а соответственно и группа в целом, имеют функциональные ограничения, связанные с физическими параметрами. Ввиду того, что задачи группе роботов ставятся из вне, энергетические ресурсы, необходимые для их выполнения могут превышать допустимые значения. Для стабильного функционирования группы необходимо исключить постановку роботам невыполнимых задач. Задача может быть не выполнима в двух случаях. Первый случай связан с необходимым количеством энергии для ее выполнения, а второй с удаленностью расположения задачи относительно расположения роботов. Проверка выполнимости задачи осуществляется с использованием следующих неравенств:

$$et_j \leq e_{max} - (e_{minw} + \delta e), \quad (25)$$

$$2e_m \frac{dc_j}{du} + et_j \leq e_{max} - e_{minw} + \frac{1}{\eta_p} (e_{max} - e_{minc}). \quad (26)$$

Если представленные неравенства выполняются, то задача добавляется во множество выполнимых задач  $T_w$ .

Для оптимального распределения выполнимых задач между роботами-рабочими используется венгерский алгоритм. Венгерский алгоритм позволяет находить оптимальное соответствие между роботом-рабочим и выполняемой задачей, исходя из длины траектории  $l_{ij}$  между  $i$ -роботом и  $j$ -задачей. Для построения траектории каждого робота была выбрана модификация алгоритма LRLHD-A\* (Local Roughness Local Height Difference A\*). Алгоритм определения точек заряда направлен на поиск участков на траекториях движения роботов-рабочих, на которых будет осуществляться позиционирование между роботами-рабочими и роботами-заряжающими для передачи энергетических ресурсов. Выбор данных участков осуществляется по принципу поиска наименьшего отклонения между координатами  $z$  соседних точек траектории. Диапазон поиска точек заряда соответствует следующему диапазону уровня заряда аккумулятора робота-рабочего:  $(e_{minw}; e_{minw} + \delta e)$ , где  $\delta e$  – заданный параметр, позволяющий определить верхнюю границу диапазона заряда аккумуляторной батареи, при котором разрешено пополнение энергетического запаса робота-рабочего. Количество точек на траектории, необходимое для позиционирования роботов при передаче энергии определяется исходя из их размера, связанного с местом установки катушек БСПЭ. Определённые точки заряда формируют множество задач пополнения энергетических ресурсов и подлежат оптимальному распределению между роботами-заряжающими.

**В третьей главе** представлено описание разработанного аппаратного и алгоритмического обеспечения для реализации энергетического обмена между роботами группы. Рассматриваются оригинальные авторские алгоритмы управления и мониторинга параметров двунаправленной БСПЭ в составе распределенной системы управления робота. Приведены экспериментальные результаты тестирования разработанной системы и систематизированы ее эксплуатационные ограничения.

Опираясь на предыдущие исследования однонаправленных систем, разработана структура двунаправленной БСПЭ, представленная на рисунке 6. Структурная схема выполнена в виде блоков, представляющих приемную и передающую части системы, и их связей с конечным устройством, которым выступает робот.

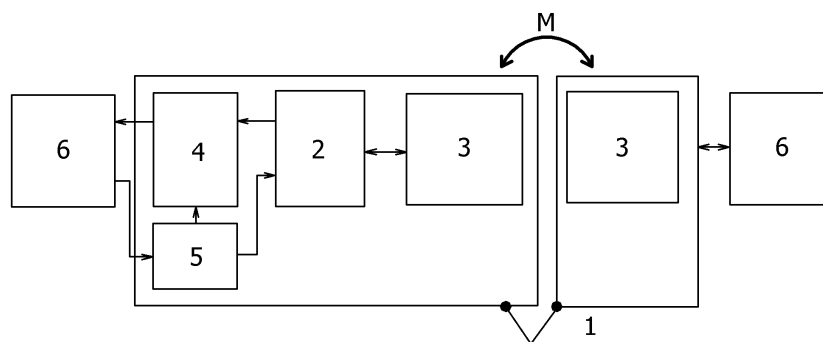


Рисунок 6 – Структурная схема двунаправленной БСПЭ

Двунаправленная БСПЭ состоит из двух функциональных частей (1), имеющих идентичную принципиальную схему. Каждая функциональная часть имеет электрическое подключение к источнику питания или потребителю энергии в конечном устройстве (6), в которое она установлена. Беспроводная передача энергии осуществляется между двумя конечными устройствами. Каждая функциональная часть состоит из следующих структурных блоков: резонансный LC-контур (3), соединенный с выходом резонансного автогенератора (2), повышающий DC-DC (постоянное напряжение в постоянное напряжение) преобразователь (4), цепи управления режимом работы (5), позволяющие управлять работой DC-DC преобразователя и электрически соединять источник энергии конечного устройства со входом резонансного автогенератора. Основной частью системы является резонансный автогенератор. Передача энергии осуществляется методом электромагнитной индукции через индуктивно связанные (М) параллельные резонансные LC-контур. Передающий контур предлагаемой двунаправленной БСПЭ является частотоподающим для резонансного автогенератора, что позволяет поддерживать резонанс в нем при изменении индуктивности катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. Приемная и передающая части имеют идентичные резонансные контуры. Перечисленные особенности способствуют достижению высокой эффективности и передаваемой мощности при значительных смещениях между приемной и передающей частями системы. На основе предложенных схмотехнических решений выполнен прототип двунаправленной БСПЭ, с которым проведен ряд экспериментов для систематизации эксплуатационных ограничений. Полученные в ходе экспериментов данные были обработаны, а на их основе выведены системы уравнений (27), (28) для расчёта эффективности передачи энергии в зависимости от мощности нагрузки, расстояния и смещения между катушками.

$$\begin{cases} z = 0.1498 + 0.04462x + 3.14y - 2.147x^2 + 0.3625xy - 3.566y^2 + \\ \quad + 3.982x^3 - 0.02121x^2y - 0.5439xy^2 + 1.15y^3 \\ y \leq 0.3906x^2 - 1.738x + 1.016 \end{cases}, \quad (27)$$

где  $x = L_{rel}$ ,  $y = P_{rel}$ ,  $z = \eta_{rel}$ ,  $x, y, z \in [0:1]$ .

$$\begin{cases} z = 0.2402 - 0.1936x + 2.322y - 0.4821x^2 + 0.1042xy - 1.774y^2 \\ y \leq -1.342x^2 - 0.7919x + 1.03 \end{cases}, \quad (28)$$

где  $x = H_{rel}$ ,  $y = P_{rel}$ ,  $z = \eta_{rel}$ ,  $x, y, z \in [0:1]$ .

Системы уравнений применяются для расчёта эффективности передачи энергии при реализации мониторинга рабочих параметров и защит в разработанных алгоритмах функционирования приемной и передающей частей БСПЭ. Использование алгоритмов, основанных на представленных системах уравнений позволяет выявить различного рода помехи при передаче энергии.

**В четвертой главе** представлено описание программной системы управления группой наземных роботов, отражены результаты экспериментальных исследований разработанного модельно-алгоритмического и аппаратного обеспечения.

Разработанные модель и алгоритмы были использованы для создания программного обеспечения (ПО), функционирующего на базе Robot Operating System (ROS) и обеспечивающего управление группой наземных роботов. Архитектура системы, состоящая из ряда программных модулей и необходимых шин данных, представлена на рисунке 7. Система реализована в виде соответствующих исполняемых файлов с использованием программных средств и среды разработки Python 2.7.

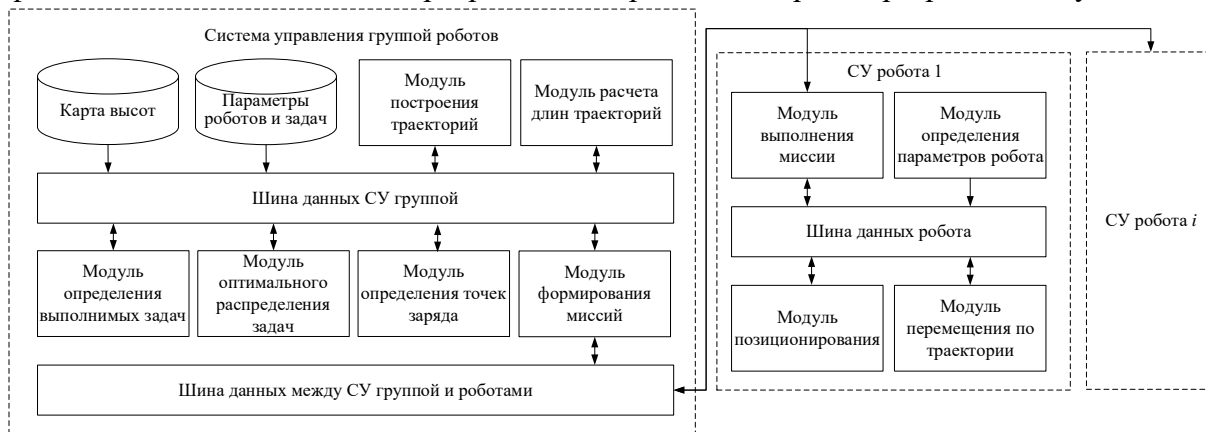


Рисунок 7 – Архитектура программной системы управления группой наземных роботов

Шины данных системы управления (СУ) группой и роботами представлена набором топиков (Topics) ROS. Шина данных между СУ группой и роботами реализуется с использованием программного пакета `mavros`. Исходными данными для работы ПО являются карта высот рабочего пространства и конфигурационный файл, в котором содержатся параметры роботов и задач.

Моделирование выполнено в среде Gazebo с целью определения и последующего сравнения времени выполнения задач группами роботов. Рабочее пространство группы в среде моделирования представляет собой рельефную поверхность (рисунок 8). В области рабочего пространства находится группа роботов, задачи и зарядная станция. В качестве модели для роботов использована модификация Pioneer 3-AT, оснащенная БСПЭ, AgUco-маркерами и камерой технического зрения.

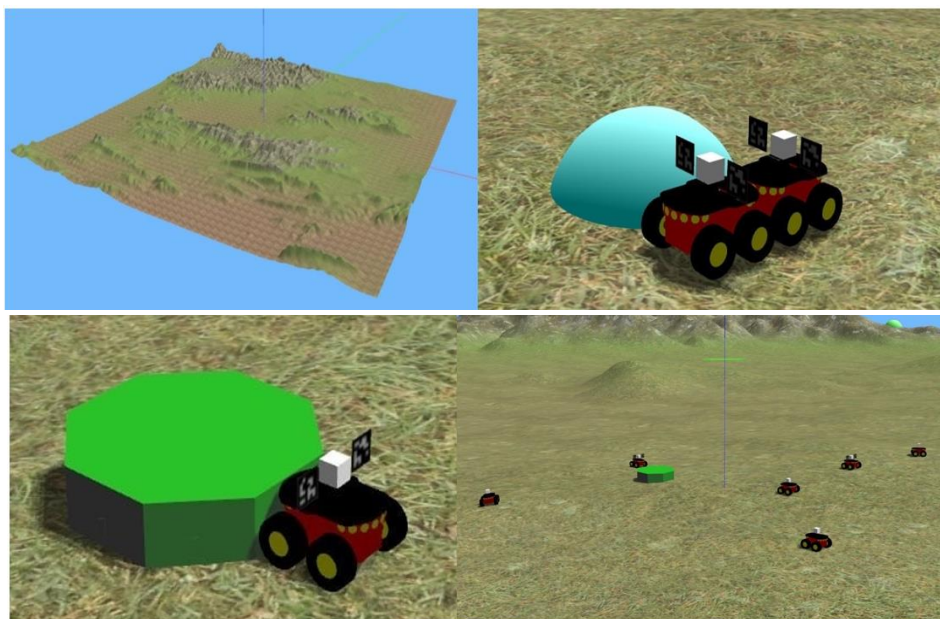


Рисунок 8 – Изображения функционирования имитационной модели

Для создания модели, имеющей высокий уровень соответствия реальному процессу, были проведены замеры потребляемой мощности реального робота (рисунок 9) в различных режимах работы.

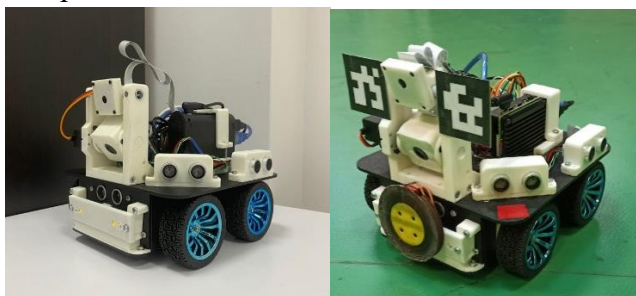


Рисунок 9 – Прототип наземной робототехнической платформы

Целевым параметром, который необходимо выявить при моделировании и по которому осуществляется сравнение между принципами функционирования группы является время. Ввиду того, что потребляемую мощность необходимо связать со временем, рассчитанные величины приведены к энергопотреблению за единицу времени, и переведены в относительные единицы (таблица 1):

Таблица 1. Энергопотребление прототипа наземной робототехнической платформы в относительных единицах

Режимы работы	Потребители	$P_t, \% \cdot ч$	$P_t, \% \cdot с$
Простой	Вычислители в простое	6,8	0,0019
Перемещение	Колесные приводы	26,2	0,0073
	Вычислители		
Выполнение задачи (рабочий)	Дополнительное оборудование	56,2	0,0156
	Вычислители		
Выполнение задачи (заряжающий)	БСПЭ	131,8	0,0366
	Вычислители в простое		
Процесс заряда	Робот-рабочий	100,0	0,0278
	Робот-заряжающий	100,0	0,0278

Энергоемкость аккумуляторной батареи робота соответствует значению 37 Вт·ч, и принята за 100% уровень заряда. Таким образом значения, приведенные в таблице 1, представляют величину расхода заряда аккумуляторной батареи робота за время.

При моделировании в области рабочего поля находилась гомогенная группа из 6 роботов. Моделирование выполнялось по двум сценариям. В первом сценарии все шесть роботов были рабочими и выполняли задачи, а во втором группа была разделена поровну на роботов-рабочих и роботов-заряжающих. Проведено три типа экспериментов, в которых изменялось количество задач от 6 до 15. В каждом типе экспериментов отличалось расположение задач в области рабочего пространства и среднее расстояние от зарядной станции до задачи. Результаты экспериментов со средним расстоянием до задач 225 и 197 м представлены на рисунке 10:



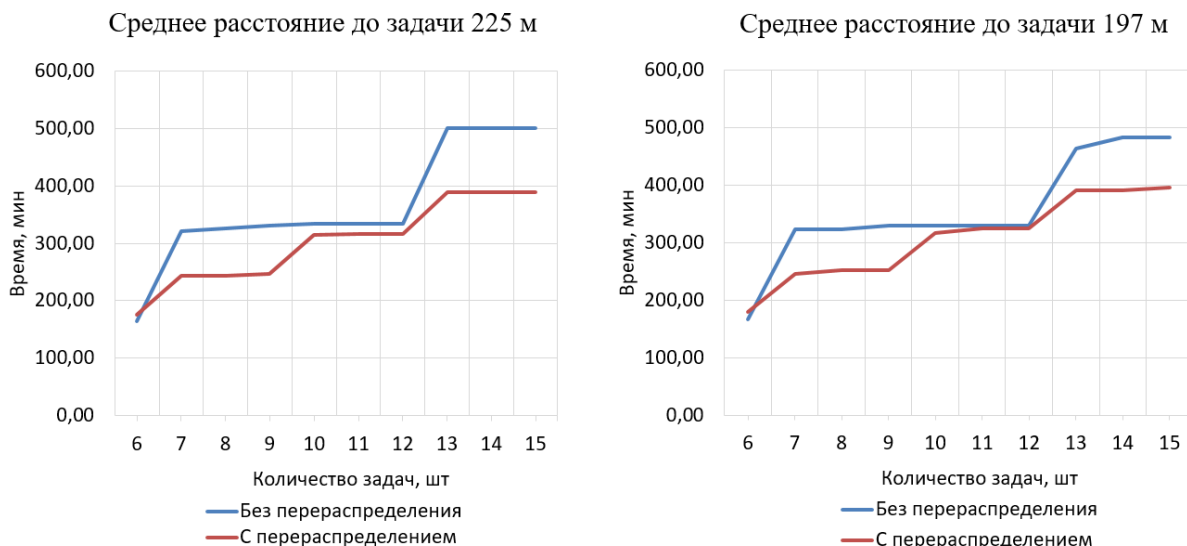


Рисунок 10 – Графики зависимости времени выполнения задач от их количества

При заложенных в модель параметрах группа, функционирующая без перераспределения ресурсов, выполняла 6 задач быстрее группы с перераспределением ресурсов во всех экспериментах. Данный факт обусловлен тем, что на начальный момент времени все роботы имели максимальный уровень заряда, и группа, состоящая только из роботов-рабочих, одновременно приступала к выполнению всех 6 задач. Если количество задач превышает число роботов в группе, то группа с перераспределением ресурсов выполняет задачи быстрее при среднем расстоянии от зарядной станции до задачи более 85 % от максимального радиуса работы группы. Полученные при моделировании результаты показывают общую тенденцию более быстрого выполнения задач группой, функционирующей с перераспределением ресурсов при увеличении расстояния до задач и их количества.

Преимуществом разработанного обеспечения является расширение области функционирования группы. Подтверждение данного факта проведено посредством вычислительного эксперимента, результаты которого представлены на рисунке 11.

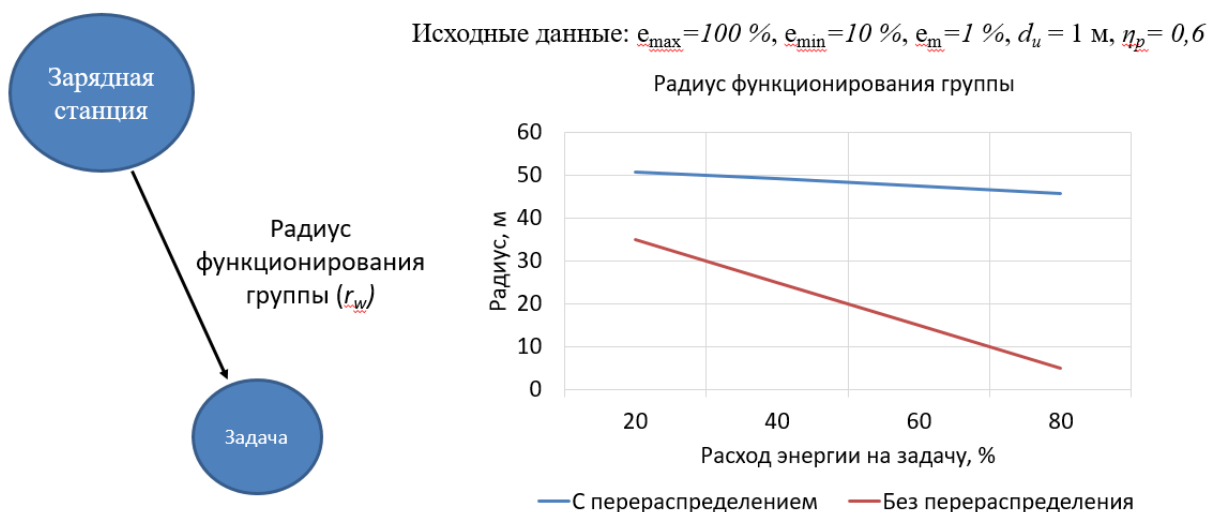


Рисунок 11 – Максимальный радиус функционирования группы в зависимости от расхода энергии на выполнение задачи

По результатам вычислительного эксперимента установлена разница в максимальном радиусе работы групп функционирующих с перераспределением

ресурсов и без него для различных затрат энергии на выполнение задачи. При расходе 20 % запаса энергии робота на выполнение задачи радиус работы группы с перераспределением ресурсов будет больше в 1,66 раз, чем у группы с традиционным принципом функционирования. При увеличении количества энергии необходимого для выполнения задачи до 80% разница в радиусах функционирования превышает 9 раз, с преимуществом у группы с перераспределением ресурсов.

Результаты проведенного моделирования, вычислительных и практических экспериментов подтверждают работоспособность и эффективность разработанного обеспечения. Перераспределение энергетических ресурсов в группе позволяет выполнять роботам задачи, которые при отсутствии такой возможности были бы для роботов недостижимы. Применение двунаправленной БСПЭ позволяет снизить требования к точности конечного позиционирования роботов, тем самым дает возможность упростить их сенсорную систему, снизить затраты времени на данный процесс, и значительно повышает вероятность успешного обмена ресурсами. 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.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе на основе разработанного математического, алгоритмического и аппаратного обеспечения решена научно-техническая задача снижения временных затрат и расширения территории функционирования группы 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. Совокупность предложенных модели, алгоритмов и аппаратных средств для обеспечения функционирования группы роботов с перераспределением энергетических ресурсов включает следующие научные результаты:

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.

Предложенные модель, алгоритмы и аппаратные решения могут быть использованы в перспективных робототехнических системах с групповым управлением. В качестве перспектив дальнейшей разработки темы можно выделить исследования, направленные на переход от централизованного к децентрализованному способу

управления группой наземных роботов на основе принципов самоорганизации, а также биоинспирированных методов информационного и физического взаимодействия в больших группах роботов.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:*

1. Крестовников К.Д. Математическая модель и алгоритмы управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов / К.Д. Крестовников // Информационно-управляющие системы. 2023. № 6, С. 20-34. DOI: 10.31799/1684-8853-2023-6-20-34
  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/NIR.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  
*Регистрация результатов интеллектуальной деятельности:*
19. Крестовников К.Д., Беспроводная зарядная система / Савельев А.И., Крестовников К.Д. // Патент на изобретение №2698307 от 26.08.2019.
20. Крестовников К.Д., Образовательная облачная среда для программирования наземных робототехнических платформ / Савельев А.И., Камынин К.В., Крестовников К.Д., Черноусова П.М., Черских Е.О. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022680118 от 27.10.2022.
21. Крестовников К.Д., Двухнаправленная система беспроводной передачи энергии / Крестовников К.Д., Савельев А.И., Ерашов А.А. // Патент на изобретение №2802056 от 22.08.2023.
22. Крестовников К.Д., Программное обеспечение для управления передающей частью беспроводной системы передачи энергии на базе резонансного автогенератора / Савельев А.И., Крестовников К.Д. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023669595 от 18.09.2023.
23. Крестовников К.Д., Программный модуль позиционирования робота по ArUco-маркерам / Савельев А.И., Летенков М. А., Крестовников К.Д. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023681828 от 19.10.2023.
24. Крестовников К.Д., Программный комплекс формирования миссий группы наземных роботов» / Крестовников К.Д., Аникин Д.А. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023686919 от 11.12.2023

Автореферат диссертации

Крестовников Константин Дмитриевич

АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ГРУППОЙ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Текст автореферата размещен на сайтах:  
Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и  
высшего образования Российской Федерации

<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской  
академии наук»

<https://dc.spcras.ru/>

Подписано в печать "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2024 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.  
Заказ № \_\_\_