

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук»

*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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Савельев Антон Игоревич

Санкт-Петербург 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ГРУППОЙ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ .....	13
1.1 Анализ существующих подходов к управлению энергетическими ресурсами в группе роботов.....	14
1.2 Анализ методов распределения целевых задач и определения местоположений сервисного энергетического обслуживания роботов .....	19
1.3 Анализ подходов и технических средств перераспределения энергетических ресурсов между роботами.....	25
1.4 Выводы по первой главе.....	40
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ .....	43
2.1 Математическая постановка задачи.....	43
2.2 Математическая модель робототехнической системы с групповым управлением.....	48
2.3 Комплекс алгоритмов управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов .....	58
2.4 Выводы по второй главе.....	77
3 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ РОБОТОВ.....	79
3.1 Алгоритмическое и аппаратное обеспечение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии .....	79

3.2	Методика расчета оптимальных параметров системы беспроводной передачи энергии.....	92
3.3	Тестирование и систематизация эксплуатационных ограничений разработанной системы .....	99
3.4	Выводы по третьей главе.....	110
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ РОБОТОВ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ .....	111
4.1	Описание программной системы управления группой наземных роботов	111
4.2	Экспериментальные исследования разработанного обеспечения в среде Gazebo .....	121
4.3	Экспериментальное исследование максимального радиуса функционирования группы с перераспределением ресурсов.....	135
4.4	Выводы по четвертой главе .....	139
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	141
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	143
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА .....	156
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....	160
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. КОПИИ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СВИДЕТЕЛЬСТВ И ПАТЕНТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ.....	164
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. КОПИИ АКТОВ ВНЕДРЕНИЯ.....	170

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** 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, A.L. 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.

**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.

**Краткое содержание работы:**

**Первая глава** диссертации посвящена аналитическому обзору существующих подходов к перераспределению энергетических ресурсов в группе роботов, методов оптимального распределения задач и определения маршрутных точек для проведения операции заряда (точек заряда). Также в данной главе представлен обзор способов перераспределения ресурсов в группе наземных роботов, проведен анализ их преимуществ и недостатков. Рассмотрены ключевые особенности бесконтактной передачи электрической энергии. В качестве перспективного способа выбрана бесконтактная передача энергии посредством индуктивно-связанных контуров. Рассмотрены существующие стандартизированные решения беспроводных зарядных устройств, а также проведен анализ однонаправленных и двунаправленных БСПЭ, представленных в исследовательских работах.

**Во второй главе** представлена разработка математической модели и алгоритмов функционирования группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов. Разработанная математическая модель отличается введением комплекса 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. Группе роботов назначаются целевые задания (задачи), каждая из которых описана кортежем параметров. В качестве параметров модели заданы значения максимальных и минимальных уровней энергетических ресурсов для роботов, которые используются для определения выполнимости задач и координат точек заряда на планируемых траекториях роботов-рабочих. Разработанные алгоритмы функционирования группы роботов отличаются реализацией процессов перераспределения энергетических ресурсов на основе результатов предварительного планирования внешней централизованной системой управления.

**В третьей главе** представлена разработка аппаратного и алгоритмического обеспечения для реализации перераспределения энергетических ресурсов между роботами. Структура и схемотехнические решения разработанной двунаправленной БСПЭ отличаются применением резонансного автогенератора, задание рабочей частоты которого осуществляется передающим резонансным контуром, а также отсутствием отдельного синхронного или несинхронного выпрямителя в принципиальной схеме. Использование автогенератора позволяет поддерживать резонанс в передающем контуре при изменении индуктивности передающей катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. Приемная и передающая части двунаправленной БСПЭ имеют идентичные резонансные контуры, что дает возможность избавиться от дополнительных систем подстройки частоты приемного контура при изменении взаимного расположения катушек. Перечисленные особенности способствуют достижению высокой эффективности передачи энергии при значительных смещениях между приемной и передающей частями системы. Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять мониторинг параметров и управление

двунаправленной БСПЭ. Использование БСПЭ рассматривается в составе распределенной системы управления робота. Предложенные алгоритмы реализуют функции защиты, которые учитывают специфику разработанных схемотехнических решений.

**В четвертой главе** представлено описание программной системы управления группой наземных роботов, отражены результаты экспериментальных исследований разработанного модельно-алгоритмического и аппаратного обеспечения. Приведены результаты имитационного моделирования, выполненного в среде Gazebo, в котором проведено сравнение между группой, функционирующей с традиционными принципами и на основе разработанного обеспечения. Моделирование проведено с целью определения и последующего сравнения времени выполнения задач группами. 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 набора экспериментов, в которых среднее значение расстояния от зарядной станции до целевых задач существенно отличалось. Выбранные значения среднего расстояния позволили выявить, что при его уменьшении преимущество во времени выполнения целевых задач постепенно переходит к группе, функционирующей без перераспределения ресурсов. В каждом наборе экспериментов варьировалось количество целевых задач, поставленных группе. Минимальное количество задач в экспериментах соответствовало общему количеству роботов, а максимальное более чем в два раза превосходило его. Также представлены результаты вычислительного эксперимента, направленного на определение разницы в максимальном радиусе работы групп функционирующих с перераспределением ресурсов и без него для различных затрат энергии на выполнение задачи.

## **1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ГРУППОЙ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ**

В первой главе 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. В качестве перспективного способа обмена энергетическими ресурсами рассматривается бесконтактная передача энергии посредством индуктивно-связанных контуров. Проведен анализ существующих стандартизированных решений беспроводных зарядных устройств, а также проведен анализ однонаправленных и двунаправленных беспроводных систем передачи энергии (БСПЭ), представленных в исследовательских работах.

Наземные робототехнические средства [1] могут реализовывать задачи сохранения и перераспределения ресурсов по отношению к внешнему миру, то есть быть звеном в реализации глобальных процессов. Первые этапы развития робототехники не предполагали активного физического или энергетического взаимодействия между робототехническими единицами [2], что в принципе исключало задачу сохранения и перераспределения ресурсов внутри самой робототехнической системы. Появление направления групповой робототехники [3–5] сделало данную внутрисистемную задачу актуальной. Групповое управление предполагает координированное и согласованное управление одновременно несколькими роботами для выполнения целевой задачи. Для расширения функциональных возможностей группы требуется решать задачи сохранения и перераспределения ресурсов внутри нее с учетом возможностей роботов и специфики выполняемых ими задач. Анализ современного состояния проблемы перераспределения энергетических

ресурсов между робототехническими средствами позволил выделить основные направления и методы решения задачи диссертационного исследования, а также выявить их достоинства и недостатки.

### **1.1 Анализ существующих подходов к управлению энергетическими ресурсами в группе роботов**

Разработка подходов и методов, направленных на повышение эффективности функционирования группы роботов при совместном выполнении целевых задач, является важным направлением современных исследований в области робототехники. Актуальными на сегодняшний день являются задачи управления и оптимизации использования энергетических ресурсов роботов и группы в целом. Функциональные возможности, эффективность выполнения задач и время автономной работы во многом зависят от суммарных энергетических ресурсов, доступных группе роботов, и принципов их сохранения и перераспределения. Подготовленный в рамках диссертационного исследования обзор методов группового управления и распределения энергетических ресурсов включает примеры из области наземной, воздушной и водной робототехники [6].

Технологические достижения, способствующие передаче энергии между роботами, привели к появлению подходов, в которых индивидуальный запас энергетических ресурсов робота, рассматривается как общий для всей группы. В работе [7] основное внимание уделяется проблеме маршрутизации при исследовании рабочего пространства роем роботов, в которой часть роботов имеют функцию передачи энергии другим роботам. Задача исследования формулируется как задача двухфакторной оптимизации. Качество маршрутов измеряется с точки зрения компромисса Парето между прогнозируемой областью, исследуемой роботами, и риском выхода из строя робота из-за разряда батареи. Если область, исследуемая роем, слишком велика, вероятность разряда батареи робота повышается. Чтобы эффективно

сбалансировать эти две противоречивые цели, используется эволюционный алгоритм, основанный на биоинспирированных методах. Предложенный алгоритм NSGA-II сортирует потенциальные точки заряда в соответствии с общей площадью, исследуемой роем. Далее выявляется, доминирует ли каждое решение с точки зрения оптимальности по принципу Парето над другими решениями в общем, и выбирается самое близкое расстояние от точки заряда до каждого агента.

Система, состоящая из группы мобильных роботов и подвижной зарядной станции, рассматривается в [8]. Роботы выполняют транспортную задачу и периодически пополняют заряд на станции. Размещение зарядной станции в области рабочего пространства влияет на производительность группы и эффективность расхода энергетических ресурсов. Авторы предлагают подход, в котором зарядная станция является по сути автономным роботом, который на основе данных от рабочих роботов пытается постепенно улучшить свое местоположение. В ходе моделирования было показано, что подход обеспечивает производительность, сравнимую с хорошо расположенной статической зарядной станцией. Привлекательной особенностью является способность системы с подвижной зарядной станцией адаптироваться к динамически меняющимся и случайно расположенным задачам.

Применение социального поведения для увеличения времени автономной работы всего роя предложено в работе [9]. Авторами представлена модель, в которой рои роботов выполняют задачу очистки окружающей их среды, собирая предметы и сбрасывая их в целевую зону. Рабочее пространство роя делится на 3 зоны в зависимости от реализуемых там задач: зона поиска, целевая зона, зона заряда. В зоне поиска размещены блоки и роботы, роботы очищают эту область, перемещая блоки в целевую зону. Каждый робот располагает информацией о местоположении целевой области и области заряда. Уровень заряда аккумулятора инициализируется произвольно, а когда он опускается ниже минимального значения, робот

переходит в режим поиска зарядной станции. Альтруистический подход функционирования состоит в том, что если робот находится в режиме поиска блоков и имеет уровень заряда выше порогового значения, он может передать некоторое количество энергии роботам, имеющим энергию ниже порогового уровня. Для этого роботы должны находиться в непосредственной близости друг к другу. При альтруистическом подходе общее количество потребляемой роботами энергии снижается. Приведенные экспериментальные результаты показывают, что внедрение социального поведения в рои роботов улучшает производительность и эффективность работы роя с точки зрения потребления энергии. Концепция альтруистического поведения в рое роботов также исследовалась в [10], и была практически реализована на основе роботов CISSBot, которые имеют возможность обмена аккумуляторными батареями.

Прогресс в области подводной робототехники и технологий беспроводных сенсорных сетей привел к разработке роботов-рыб, оснащенных сенсорами, беспроводной связью и собственным вычислителем. Алгоритм, предложенный в [11], основан на социальном поведении рыб и применяется авторами для оптимизации динамического назначения задач и энергосбережения в искусственном рое роботов-рыб. Сначала выполняется моделирование потребления энергии агентом роя, а затем предлагается функция затрат при назначении задачи, которая сочетается с моделированием потребления энергии агентом и отвечает требованиям и ограничениям задач. Результаты моделирования показывают, что время выполнения и потребление энергии могут быть уменьшены, а срок возможной работоспособности роя роботов-рыб продлен с помощью предложенного метода.

Метод коллективного энергетического гомеостаза, подобный рассмотренному выше методу социального поведения при работе роя, может повысить эффективность управления использованием энергии в рое. Такой метод предложен в [12] Данный подход расширяет метод роя частиц (Particle swarm optimization, PSO) для выбора задач и планирования движения отдельных роботов, делая их чувствительными к энергетическому состоянию.



Общий эффект этого алгоритма – эволюционная оптимизация метода роя частиц (Energy Aware Particle Swarm Optimization as Search Mechanism - EPSO), заключается в смещении энергоемких задач в сторону тех роботов в рое, которые имеют более высокие уровни энергии. Таким образом, осуществляется выравнивание энергетической нагрузки, что повышает обеспеченность роботов энергией и однородность ее распределения по всему рюю. В данном случае можно говорить о косвенном обмене энергией при смене задач. Экспериментальные результаты показывают, что алгоритм EPSO позволяет социальным роботам выполнять поддержание коллективного уровня энергии более эффективно, уменьшая разброс энергии между агентами роя на 49% и увеличивая количество миссий, которые может выполнить рой, при фиксированном начальном уровне энергии.

EPSO позволяет снизить общее энергопотребление роя при незначительном ухудшении результатов поиска. В [13] представлен поисковый механизм для роя малогабаритных летательных аппаратов, основанный на методе роя частиц. Основная идея метода заключается в том, чтобы летательные аппараты не зависали в воздухе, а перемещались до точки назначения короткими рассчитанными дистанциями.

Еще один метод оптимизации, основанный на методе роя частиц, Navigation Wind PSO (NWPSO), [14] представляет собой механизм поиска для воздушных микро-роботов с ограниченной емкостью батареи, действующих в средах с неизвестной внешней динамикой (например, ветер). Предполагается, что роботы разряжаются только при движении в направлении против ветра под каким-либо углом. Предложенный метод использует концепцию принятия многокритериальных решений и позволяет индивидуумам выбирать свои движения по направлению воздушного потока с небольшими отклонениями от курса, чтобы сэкономить как можно больше энергии. В статье представлен навигационный коллективный поиск, основанный на концепции принятия многокритериальных решений для минимизации дополнительных энергетических затрат, возникающих в воздушных роях под воздействием

неизвестной внешней динамики. Предложенная модель и соответствующие функции предназначены для обеспечения оценки влияния внешней неизвестной динамики на энергопотребление воздушного роя в процессе поиска. Согласно полученным результатам, важным является баланс между сохранением энергии и механизмом поиска, который зависит либо от поискового ландшафта, либо от структуры векторного поля (характеристик ветра).

Также для оптимизации распределения энергетических ресурсов в рое в работе [15] предложен метод выбора главы кластера роботов-рыб на основе нечеткой логики, в соответствии с названием трех факторов нечеткой логики: остаточная энергия (*residual energy*), подвижность (*fish mobility*) и положение (*position*). Поскольку более подвижный агент роя тратит больше энергии, то в качестве главы кластера будет выбран агент с наименьшей подвижностью.

Децентрализованная робототехническая система, основанная на принципах функционирования роя пчел в поисках пищи показана в [16]. Предложенный алгоритм делит агентов на роботов-работников и роботов-добытчиков. Статус агента определяется количеством оставшейся энергии, которая определяет его как работника или добытчика. Агенты работают, пока энергии достаточно, а затем автономно ищут источник энергии. Информация о местоположении источника энергии, которая поступает от робота-добытчика, передается другим роботам посредством локальной связи. Результат симуляции показывает, что робот может непрерывно работать, добывать, перезаряжать и возвращаться к работе самостоятельно, без вмешательства человека.

Проведенный анализ показывает, что исследования в области перераспределения ресурсов в группах робототехнических средств в настоящее время сосредоточены на биологически инспирированных подходах к управлению движением роботов, оптимизации распределения задач между ними. Задачи энергетического обеспечения и планирования при групповом управлении в большей степени рассматриваются со стороны поддержания

энергетических параметров агентов и распределения задач соответствующим образом. Для решения проблемы ограниченного времени автономной работы роевых роботов применяются следующие подходы: оптимизация алгоритмов управления роем и разработка алгоритмов поиска кратчайшего пути для движения каждого агента; сортировка кандидатов на пополнение энергетических ресурсов; обеспечение социального поведения роботов, заключающегося в эффективном распределении ресурсов в рое.

Исходя из проведенного анализа можно выделить перспективные подходы к управлению группой роботов для эффективного использования ресурсов: применение алгоритмов на основе метода роя частиц (PSO), позволяющие повысить время работы и снизить энергопотребление роя путем более эффективного распределения общей энергии между агентами; использование методов разделения обязанностей среди роботов роя, позволяет разделять агентов роя по функциональному признаку, например на роботов-работников, выполняющих задания и роботов, заряжающих их. Так роботы-работники могут не прерывать выполнения задания, получая энергию во время выполнения.

## **1.2 Анализ методов распределения целевых задач и определения местоположений сервисного энергетического обслуживания роботов**

Группа роботов на открытом пространстве может выполнять различные задачи: составление карты, мониторинг местности, поиск объектов интереса, доставку оборудования и обеспечение его функционирования. При ограниченных энергетических ресурсах роботов для снижения общего времени выполнения целевых задач и расширения территории функционирования группы имеет смысл разделять роботов группы по специализации [8, 16]. Роботы-работчие осуществляют непосредственное выполнение целевых задач, а роботы-заряжающие восполняют их ресурсы.

Одним из главных этапов планирования задания является распределение задач между роботами-рабочими.

Для нахождения распределения  $n$  роботов-рабочих на  $m$  задач, которое минимизирует затраты времени на перемещение, где каждый рабочий может выполнять несколько задач, необходимо решить *NP*-полную задачу о назначениях [17, 18].

Методы на основе динамического программирования решают задачу о назначениях по следующему принципу: на каждом шаге назначений, начиная с первого, выбирается самый эффективный (неэффективный) исполнитель по заданному критерию. Таким образом, для поиска оптимального назначения планируемая операция разделяется на ряд последовательных шагов. Соответственно, и сам процесс распределения работ между исполнителями становится многошаговым и развивается последовательно, от этапа к этапу. Однако такой способ решения, как правило, не приводит к получению оптимального решения. Если на первых шагах выбирать самых эффективных (неэффективных) исполнителей, то на последних шагах алгоритма приходится выполнять назначения, которые могут внести негативный вклад в суммарный критерий. Поэтому целесообразно в качестве метода решения задачи «о назначениях» применить математический аппарат динамического программирования, разработанный для решения некоторого класса задач путем их разложения на относительно небольшие, причем, каждый раз оптимизируя управление только на одном шаге [19–21]. Главным недостатком методов на основе динамического программирования является высокая вычислительная сложность. Поэтому увеличение числа задач или роботов-рабочих имеет значительное влияние на время выполнения.

Специфические особенности задач о назначениях послужили поводом к появлению венгерского алгоритма [22–24]. Основная идея венгерского метода заключается в переходе от исходной квадратной матрицы стоимости к эквивалентной ей матрице с неотрицательными элементами и системой  $n$

независимых нулей, из которых никакие два не принадлежат одной и той же строке или одному и тому же столбцу.

Задача о назначениях в математической постановке представляет собой задачу дискретной оптимизации. Поэтому для ее решения можно применить алгоритмы целочисленного программирования. В настоящее время наиболее надежным средством решения целочисленных задач, встречающихся в практических исследованиях, является метод «ветвей и границ» [25, 26]. Главный недостаток алгоритма метода ветвей и границ заключается в необходимости полностью решать задачи линейного программирования, ассоциированные с каждой из вершин многогранника допустимых решений. Для задач большой размерности это требует значительных и неоправданных с практической точки зрения затрат времени. Менее трудоемким методом решения поставленной задачи в этом случае является алгоритм Литтла [27]. Данный алгоритм является частным случаем применения метода «ветвей и границ» и относится к числу точных алгоритмов, однако при решении задач большой размерности, когда разброс данных невелик, этот алгоритм сходится очень медленно.

Из рассмотренных решений наиболее подходящим для поставленной задачи о назначениях является венгерский алгоритм. Алгоритм является строго полиномиальным и обеспечивает точное решение за минимально возможное время, в отличие от других рассмотренных алгоритмов.

Помимо распределения задач между роботами, в группе, разделенной по функциональному признаку, необходимо определить точки заряда и маршруты роботов. В ходе анализа существующих решений проблемы определения точек заряда были найдены методы, разработанные преимущественно для разведывательных операций или доставки товаров в городских условиях беспилотными летательными аппаратами и управляемыми транспортными средствами с ограниченным запасом энергии.

В [28] исследуется задача планирования маршрута для электромобиля с временными интервалами и ожиданием заряда на станции, поскольку могут

возникнуть сценарии, когда транспортное средство будет находится в ожидании из-за большого числа клиентов и малого количества зарядных устройств. Для решения небольших подобных задач авторами предлагается рассматривать ее как задачу смешанного целочисленного линейного программирования и решать с помощью программного пакета CPLEX. Для более сложных задач авторами была разработана математическая модель, состоящая из адаптивного поиска больших окрестностей (ALNS – Adaptive Large Neighborhood Search) и решения смешанной целочисленной программы.

В работе [29] демонстрируется решение задачи планирования маршрута электрокара с учетом запаса его энергии и временных окон доставки товара. Авторы разработали оптимизированный муравьиный алгоритм (ACO – Ant Colony Optimization), совмещенный с методом вставки точки заряда в построенный маршрут (выбор ближайшей статичной зарядной станции) и расширенным локальным поиском. Также разработана новая модель вероятностного выбора в ACO, которая учитывает влияние расстояния между точками и временными интервалами. Кроме того, разработанный алгоритм позволят сравнить 3 способа заряда (полный, частичный, замена аккумулятора) и выбрать наиболее оптимальный относительно времени посещения всех точек и стоимости электроэнергии.

Применение муравьиного алгоритма для поиска стратегии поведения группы мобильных роботов на рабочем поле с препятствиями рассматривается в работе [30, 31]. Авторами рассматривается вариант решения проблемы распределения задач в группе мобильных роботов при наличии препятствий в рабочем пространстве. Базовым алгоритмом решения поставленных задач являлся один из видов муравьиного алгоритма - метод мультиколониальной муравьиной системы в сочетании с алгоритмом планирования траектории, реализованный с использованием принципа динамического программирования. Результаты вычислительных экспериментов показали, что траектории роботов строятся на подмножестве свободных ячеек рабочего пространства и не пересекают ячейки с препятствиями. При этом

конфигурация рабочего поля влияет не только на фактические маршруты роботов, но и на перераспределение заданий между ними, и число задействованных роботов.

В [32] рассматривается проблема планирования маршрута для электромобиля с учетом временных интервалов и времени ожидания на статической зарядной станции. Для минимизации ожидания заряда авторами статьи предлагается двухступенчатая эвристика, основанная на симуляции и использующая ALNS с адаптированными под данную задачу операторами рождения и уничтожения. На первой стадии выполняется построение траекторий с учетом среднего времени ожидания на станции. При этом если реальное время ожидания превысит ожидаемое, то эта информация будет использоваться при планировании маршрутов других транспортных средств. На второй стадии выполняется корректировка неподходящего решения путем штрафования за нарушение заданных временных интервалов и позднего возвращения в депо.

В [33] также исследуется проблема минимизации как времени посещения всех целевых точек, преодолеваемого расстояния, так и минимизации времени и стоимости заряда аккумуляторной батареи. Авторами предложен метод смешанно-целочисленного линейного программирования (MILP – Mixed-Integer Linear Programming), решаемый с помощью программного пакета CPLEX для небольшого набора целевых точек. Для решения задач с большим набором точек авторами была разработана гибридная эвристика, состоящая из комбинации жадного алгоритма и поиска переменных окрестностей.

В работе [34] рассматривается задача планирования маршрута для группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с посещением всех целевых точек за минимальное время. Также учитывается и ограниченный энергетический ресурс летательных аппаратов. Изучается сценарий, в котором БПЛА может пополнить энергетический ресурс на стационарных или мобильных зарядных станциях. Авторы предлагают решение, которое

позволяет определить не только порядок посещения целевых точек летательными аппаратами, но и время и место посадки на зарядную станцию. Данную задачу предлагают рассматривать как обобщенную задачу коммивояжера и решать ее с помощью алгоритма Concorde TSP Solver (TSP – Traveling Salesman Problem), предложенного в [35]. Кроме того, вычисляется минимальное количество наземных роботов для решения задачи и маршруты для них. Аналогичные задачи рассматриваются в работах [36] и [37].

Автоматизация сервисного обслуживания БПЛА является актуальной научной задачей [38]. Авторами [39] исследуется задача разведки территории группой, состоящей из наземных и летательных беспилотных аппаратов. Наземный сервисный робот выполняет роль мобильной базы, на которой БПЛА может восполнить запас энергии во время разведки территории. В цели работы входила минимизация пройденного расстояния каждым из БПЛА. В качестве решения авторы работы предложили стратегию планирования, основанную на 4 этапах: формирование групп из наземных и летательных аппаратов; декомпозиция целевого района на оптимальные части, которые могут быть покрыты любыми командами без заряда/дозаправки; распределение команд на части разбитого района для его исследования; равномерное распределение всех БПЛА в группе на заданную часть района, и по завершении разведки возврат на базовую платформу для заряда и перемещения к следующей части целевого района.

В работе [40] рассматривается задача поиска целей группой БПЛА с ограниченным энергетическим ресурсом, который они могут пополнить с помощью мобильных наземных заряжающих платформ. Передвижение заряжающих платформ происходит по дорожной карте, а именно по графу, построенному по данной сети. В качестве решения авторами предлагается использование MILP и CP. Результаты экспериментов продемонстрировали, что CP в целом предлагает лучшие решения по сравнению с MILP.

В [41] представлено решение задачи для нескольких БПЛА и одного наземного робота, предназначенного для их дозаправки, в котором



предлагается двухуровневая оптимизация: оптимизация траектории наземного робота путем поиска центроидов кластеров, найденных с помощью метода k-средних среди всех целевых точек; оптимизация траекторий БПЛА с учетом распределенных между ними задач и точек дозаправки, найденных в первом этапе с учетом ограниченного количества топлива у БПЛА, неограниченного количества топлива у наземного робота и временных окон остановок наземного робота в точках дозаправки.

В рассмотренных решениях зарядные станции либо статичны, либо у них не ограничены энергетические ресурсы. Также рабочими аппаратами в основном являются летательные аппараты, что не подходит для решения поставленной задачи в рамках наземной группы роботов. Предлагаемый в данной работе подход учитывает ограниченный энергетический ресурс заряжающих роботов, а также карту высот местности, на основе которой выбираются участки траектории, в которых будет осуществляться передача энергии между роботами.

### **1.3 Анализ подходов и технических средств перераспределения энергетических ресурсов между роботами**

Для решения задачи планирования и реализации распределения энергетических ресурсов в группе роботов, необходимо выполнить анализ и систематизацию существующих решений в области технических средств передачи электрической энергии между роботами или частями робототехнической системы.

В области модульной робототехники [42–44], где наиболее актуальны задачи передачи энергии и информации между отдельными автономными и неавтономными модулями, активно применяются контактные методы для передачи энергии и информации. Контактные методы передачи энергии подразумевают использование разъемных соединений с различными типами

контактных пар. В данном направлении есть ряд стандартизированных решений, которые могут быть применены для этих целей. Данные решения возможно разделить на быстро разъемные соединения без фиксации и разъемы с фиксацией. Применение разъема с фиксацией для подключения сенсорных и исполнительных модулей к сельскохозяйственной платформе показано в [45]. Авторы используют разъемы стандарта M12, с резьбовой фиксацией. Разъемы с фиксацией подразумевают участие человека в его подключении в связи с чем их применение не актуально для задач перераспределения ресурсов в группе.

В работе [46] авторы разработали модульную блоковую систему I-BLOCKS, в которой каждый блок имеет свое назначение и электрически и механически может соединяться с другими. В качестве основы самих блоков использованы детали LEGO Duplo. Электроника и разъемы спроектированы таким образом, чтобы обеспечить обмен данными и распределение питания между I-BLOCKS, когда они физически соединены. Каждый блок содержит микроконтроллер и разъемы питания и коммуникации. В блок интегрированы 2 штыревых разъема на верхней поверхности и 2 разъема-розетки, встроенных в печатную плату снизу. Аналогичным способом электрического соединения модулей пользуются авторы работы [47, 48] в которой представлена расширяемая модульная робототехническая система Molecube. Активные модули электрически соединяются между собой посредством штыревого разъема вилка-розетка типа PLS.

Для передачи энергии между роботами возможно применять пружинные контактные пары. Такое решение значительно упрощает процесс стыковки и делает ниже требуемую точность к взаимному положению по сравнению со стандартизированными разъемами. Пружинные контакты из листовой меди применяются в [49] для передачи данных и питания между самореконфигурируемыми роботами. Пружинные контакты в паре с контактными площадками на печатной плате использовали авторы работы [50] для модульного робота Thor. Механическое соединение модулей осуществляется за счет магнитов или резьбовых соединений. Для передачи

энергии и информации между модулями используется пять пружинных контактов. Пружинные контакты также используются в быстродействующем механизме для соединения модульных робототехнических систем HiGen представленном в [51], и в соединениях модульного робота Odin [52] для организации передачи энергии и информационной шины между модулями.

Принципы, заложенные в наземные зарядные станции для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представленные в [53, 54] возможно также применить для передачи энергии между роботами. Авторы разработали зарядную станцию на основе матриц интеллектуальных контактов и зарядную станцию на основе плоских параллельных электродов. Зарядные станции способны заряжать одновременно несколько аппаратов и передавать энергию в условиях неточной посадки БПЛА. Передача энергии осуществляется посредством плоских прямоугольных бортовых посадочных электродов, к которым подключены полюса аккумулятора БПЛА. Представлена схема управления интеллектуальным контактом. Проведено моделирование работы интеллектуальной контактной матрицы [55] Станция на основе плоских параллельных электродов содержит систему контактных площадок, разделенных узкими диэлектрическими прокладками. На БПЛА расположены четыре бортовых посадочных электрода таким образом, что их точки касания с посадочной платформой лежат в углах квадратов. Такое расположение объясняется исключением замыкания бортовым электродом соседних наземных электродов. Каждый из бортовых электродов подключен к зарядному контроллеру аккумулятора. Правильное подключение к зарядному устройству обеспечено при любом расположении аппарата на посадочной платформе.

В ранее рассмотренной работе [56] предлагаются методы для обмена батареями в робототехнической системе, в которой вся информация собирается на сервере для принятия решений. Сервер анализирует данные и указывает робота, которому необходимо заменить разряженную батарею, а также место, где он должен встретиться с полностью заряженным роботом.

В [57] представлена роботизированная система замены аккумулятора и его последующей беспроводной зарядки. Экспериментальные результаты показывают, что пиковый ток беспроводной зарядки системы составляет около 725 мА. Время зарядки аккумулятора емкостью 4000 мАч составляет около 8 часов при средней эффективности зарядки 46,4%.

Беспроводной способ передачи энергии от источника к мобильному приемнику отличается относительно большим воздушным зазором между ними. Возможность беспроводной передачи энергии через индуктивно связанные резонансные контуры продемонстрирована в [58]. Показана система с одной большой катушкой источника энергии и одним или двумя небольшими приемниками. Резонанс между катушками источника и нагрузки достигается с помощью подстройки посредством резонансных конденсаторов. Представлена математическая модель системы на основе уравнений Кирхгофа. Напряжение на каждой катушке описывается как скорость изменения магнитного потока. Система уравнений связывает комплексные амплитуды магнитного потока и тока для каждой из катушек представленной модели. Авторы утверждают, что в системе с одним приемником в резонансе более 50% энергии, которая подается от фактического источника, достигает нагрузки. В системе с несколькими приемниками необходимо отслеживать сдвиги частоты относительно резонансной и выполнять подстройку резонансными емкостями, чтобы увеличить эффективность системы.

В [59] предложена система беспроводной передачи энергии на основе магнитного резонанса с одной передающей катушкой и одной приемной. Представлены эквивалентные схемы и математические уравнения, описывающие связи параметров передающей и приемной частей системы, представляющие собой последовательную RLC-резонансную цепь с внутренним сопротивлением  $R$ , собственной индуктивностью и емкостью. Получены математические уравнения для параметров выходной мощности системы. Предложенное решение практически реализовано с использованием соленоидных катушек и установлено на подвижную четырехколесную

платформу. Максимальная мощность, отдаваемая приемной частью в нагрузку, составила 1,3 Вт.

Система, обеспечивающая непрерывную работу множества роботов без батарей и способная одновременно обеспечивать беспроводное питание и двунаправленную связь между несколькими роботами, представлена в [60]. Прототип системы представляет собой поверхность 60×60 см, которая обеспечивает питание и двунаправленную связь для группы из пяти роботов, каждый из которых потребляет 200 мВт энергии. Передача энергии в этой системе происходит с использованием LC контура, расположенного под рабочей поверхностью, и нерезонансной катушки на каждом роботе. Демонстрируется мощность, составляющая в среднем 4,1 мВт/см<sup>2</sup> для статической нагрузки. Пиковая мощность для динамических нагрузок, достигается с помощью конденсаторной схемы хранения и преобразования мощности. Также представляется одновременная широкополосная связь между поверхностью и всеми роботами посредством амплитудной модуляции магнитного поля, а также связь между отдельными роботами и поверхностью посредством модуляции тока нагрузки.

Способ беспроводной передачи энергии позволяет совершать заряд аккумуляторов роботов в движении, таким образом, принципиально решает проблему конечной емкости батареи. Предложенная в [61] система бесконтактного зарядного устройства основана на магнитно-резонансной связи. Управление зарядным устройством и выполнение алгоритма шифрования энергии осуществляется стандартным цифровым сигнальным процессором (digital signal processor, DSP). Плотность магнитного потока резонансной и приемной катушек может достигать 0,25 мТл при зарядке целевых роботов (ориентированных на выполнение какой-либо задачи), тогда как плотность магнитного потока резко снижается почти до 0 мТл для нецелевых роботов. То есть канал передачи энергии защищен от нецелевых роботов, и к зарядке допускается только тот робот, который имеет ключ

безопасности. Заряд аккумулятора осуществляется постоянным током 1 А, при напряжении 10 В.

В [62] предлагается беспроводная система зарядки на лету (On-the-fly Inductive Charging), состоящая из нескольких зарядных элементов. Данная система обеспечивает зарядку аккумуляторов агентов роя при движении, что позволяет не прерывать выполнение задания для пополнения запаса энергии агента. Для определения способности системы поддерживать постоянную работу роя, разработана вероятностная модель роя, учитывающая поведение агентов и размер роя. На основе данной модели создан прототип системы с 12 зарядными элементами и небольшим роботом Mona. Проведенная серия экспериментов с различными средами и поведенческими конфигурациями агентов, подтвердила соответствие модели и ее способность поддерживать постоянную работу системы. Расстояние между передатчиком и приемником в данной системе не должно превышать 10 мм для максимальной эффективности передачи энергии.

В [63] представлена зарядная платформа на основе индуктивной передачи энергии. Показана конструкция системы силового преобразователя, приемной и передающей частей системы передачи энергии. От данной платформы могут заряжаться до четырех роботов E-ruck. Среднее время заряда составляет около трех часов.

Исходя из проведенного анализа, возможно выделить две основные группы способов, посредством которых возможно осуществить обмен электрической энергией между роботами (рисунок 1):

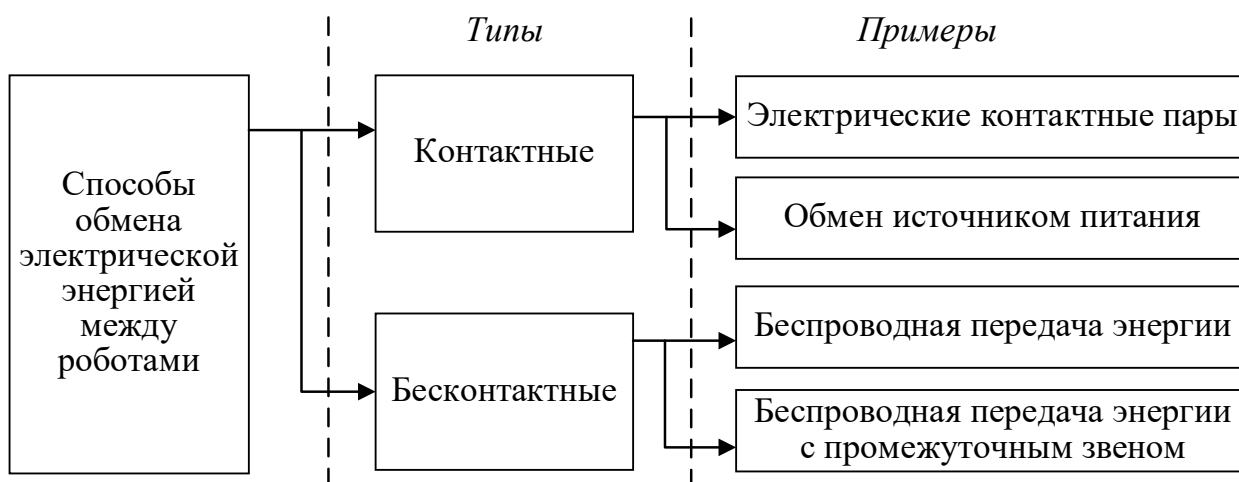


Рисунок 1 – Классификация способов обмена электрической энергией между роботами группы

Традиционным решением для передачи энергии можно считать контактные способы, подразумевающие наличие соединительных проводов, разъемов или контактных пар. Данные способы зачастую требуют вмешательства человека в процесс эксплуатации робототехнической системы, что накладывает некоторые ограничения. Если робот эксплуатируется в агрессивной среде или на открытом воздухе, то требуется применение дополнительных мер по защите разъемов и контактных пар от загрязнения и попадания влаги. Применение контактных методов как правило требует высокой точности позиционирования, что усложняет сенсорную систему робота.

Способы с обменом источником энергии между роботами, требуют дополнительного механического устройства, осуществляющего данную операцию, а также коммутация источника питания робота требует специализированных контактных пар. Данное устройство неизбежно увеличивает массу робота и требует определённого объема для размещения, а также снижает общую надежность робототехнической системы. Стоит отметить, что данное устройство не может быть универсальным, для каждого нового типа робота необходима отдельная разработка системы обмена источником энергии, учитывающая его конструктивные особенности.

Перечисленных выше недостатков лишен способ беспроводной передачи энергии. Беспроводная передача энергии возможна непосредственно между двумя роботами, а также с использованием промежуточного звена в роли которого может выступать зарядная станция или специальная площадка. Уменьшить вовлечение человека в процесс эксплуатации робототехнической системы, упростить процесс позиционирования и последующего обмена энергией между роботами возможно с помощью применения данного способа передачи энергии.

Системы, предназначенные для бесконтактной передачи энергии, рассматриваются в исследовательских работах под названиями «Беспроводная система передачи энергии» от англоязычного термина WPT (Wireless Power Transmission) - system, и «Беспроводная зарядная система» от англоязычного термина «Wireless charging system».

Наиболее распространенные решения в данной области основаны на принципе передачи энергии между индуктивно связанными элементами и имеют возможность однонаправленной передачи энергии от источника к потребителю. Самым распространенным стандартом беспроводного зарядного устройства для мобильных пользовательских устройств на данный момент является Qi. Он разработан консорциумом беспроводной электромагнитной энергии (Wireless Power Consortium, WPC). Именно стандарт Qi поддерживают многие производители современных смартфонов и планшетов. Другой стандарт, также использующий принцип электромагнитной индукции, как и Qi, называется PMA. Он внедрен компанией Powermat в 2012 году. Данный стандарт не предоставляет такую широкую поддержку производителей устройств, как Qi, поэтому менее востребован. Последний стандарт, созданный A4WP (Alliance for Wireless Power), под названием Rezence, основан на принципах электромагнитного резонанса и работает на частоте 6.78 MHz. Возможна передача мощности до 50 Вт, на расстояние до 5 см. Развитие стандарта поддерживают Qualcomm, LG, Intel, HTC и другие.



Qi - это стандарт, разработанный для индукционной передачи энергии на расстояние до 4 см. Аппаратура Qi включает в себя площадку передатчика и совместимый приёмник в подключаемом устройстве. При использовании подключаемое устройство размещают на площадке передатчика. Устройства стандарта Qi используют электромагнитную индукцию между двумя плоскими катушками. Одна из них является базой и подключается к источнику энергии, а вторая находится внутри заряжаемого устройства и является приёмником. Стандарт Qi низкой мощности предусматривает передачу мощности — до 5 Вт, средней мощности — до 15 Вт [64]. Данный стандарт включает в себя возможность использовать ограниченную систему передачи данных для базовой станции и мобильного устройства. Это позволяет заряжать и передавать базовой станции информацию о состоянии заряда. Таким образом, базовая станция может обнаружить устройство и остановить свою работу, когда устройство заряжено. Передача энергии происходит в диапазоне частот 87-205 кГц. КПД находится в пределах 50-70% [65]. Передатчик и приемник могут быть основаны на специализированных интегральных микросхемах. Передающая катушка имеет диаметр около 40мм и толщину 2мм, конечное устройство имеет компактные размеры.

Стандарт PMA включает в себя две версии. Система первого поколения рассчитана на передачу мощности до 5 Вт, и имеет одну передающую и принимающую катушки. Во втором поколении мощность увеличена до 15 Вт и передатчик имеет несколько катушек. Система работает в диапазоне частот 277-357 кГц. КПД находится в пределах 50-70%. Передатчик и приемник стандарта PMA схожи с Qi.

Стандарт Rezence основан на принципе магнитного резонанса и позволяет от одного передатчика заряжать несколько устройств одновременно, что является основным отличием от предыдущих стандартов Qi и PMA. Система работает на частоте 6.78 МГц и позволяет передавать мощность до 50 Вт [66]. Для коммуникации между приемником и

передатчиком используется Bluetooth на частоте 2.4 ГГц. Эффективность системы находится в пределах 25-50%. Эффективность системы ниже, чем у систем стандарта Qi и PMA.

Помимо стандартизированных решений, разработки БСПЭ активно рассматриваются в исследовательских работах. В статье [67] и работе [68] разработана и протестирована система для зарядки аккумуляторов гибридного велосипеда (E-bikes). При питающем напряжении 46 В, выходном напряжении 36 В, передаваемой мощности 96 Вт, коэффициент полезного действия системы составил 79%. В диссертационной работе [69] произведен анализ магнитных полей данной системы. Для соблюдения рекомендаций и требований международной комиссии по защите от неионизирующего радиационного излучения (ICNIRP), безопасное расстояние эксплуатации для разработанной системы составляет 0,25 м. Разработанная система [69] представляет собой силовую часть устройства для передачи энергии по средством электромагнитной индукции и не имеет систем управления, защиты и взаимодействия с пользователем. В работе не рассматривался эффект индукционного нагрева металлических предметов, попадающих в магнитное поле системы, создаваемое передающим резонансным контуром, и задачи экранирования магнитных полей.

Разработка беспроводной системы заряда EDLC-конденсатора (ионистора), предназначенного для питания гибридного велосипеда, представлена в работе [70]. Передающая часть системы представляет собой параллельный резонансный контур, подключенный к генератору переменного тока с рабочей частотой 2.3 МГц. Приемная часть представлена неуправляемым выпрямителем и DC-DC преобразователем. Экспериментальные результаты были получены при следующих параметрах: расстояние передачи энергии 50 мм, передаваемая мощность 100 Вт, сопротивление нагрузки 50 Ом, внешний диаметр передающей и приемной катушек 200 мм. Одной из особенностей системы является то, что приемная и передающая катушки выполнены проводниками на двухсторонней печатной

плате. Эффективность системы с параллельным резонансным контуром на частоте передачи энергии 1.1 МГц составила 72-73%. Для системы с последовательным резонансным контуром эффективность передачи энергии достигала 70% на частоте 2.3 МГц. Авторы провели исследование разработанной системы заряда с тремя типами преобразователей постоянного тока в приемной части [71]: boost-type, step-down type и buck-boost type. В процессе сравнения авторами было выявлено, что преобразователь постоянного тока повышающего типа (boost-type) является наиболее подходящим, так как система с ним в общем является более компактной при выходной мощности до 1,1 кВт.

В работе [72] представлена разработка и практическое тестирование БСПЭ с планарными магнитосвязанными катушками. Приемная и передающая катушки имеют размеры 13x13 и 21x21 см соответственно. Передающая катушка содержит 10 витков провода, приемная 5 витков. Максимальная эффективность передачи энергии составила 77% при передаваемой мощности 295 Вт, с использованием принудительного охлаждения системы.

Система беспроводной передачи энергии, предназначенная для заряда батареи роботов m3Pi представлена в [73]. Передача энергии осуществляется через высокочастотное магнитное поле. Передающая часть системы находится под поверхностью эксплуатации роботов. Приемная часть системы состоит из выпрямителя и повышающего DC-DC преобразователя для управления процессом заряда аккумуляторов. Номинальная передаваемая мощность составляет 7 Вт. Максимальная эффективность системы составила 43%.

Активное развитие систем однонаправленной передачи энергии подтверждается значительным количеством исследовательских образцов систем, а также стандартизированных решений. Системы предполагают наличие передатчика энергии и приемника, основной частью которых являются катушки различных типов и размеров. Функционал передающей и приемной частей системы строго определен схемотехническими решениями.

Следовательно, использование однонаправленных систем для перераспределения энергии между роботами потребует установки и приемной и передающей частей системы на каждого робота. Более практичное решение данной задачи могут предоставить двунаправленные БСПЭ, в которых каждая часть системы может использоваться в роли передающей и приемной.

Разработка двунаправленной БСПЭ с использованием топологии выпрямителя с удвоением напряжения в приемной части показана в [74]. В предложенном решении в передающей части используется полумостовой инвертор тока, а в приёмной части используется выпрямитель на MOSFET транзисторах с удвоением напряжения. Во время работы в режиме обратной передачи энергии выпрямитель на MOSFET транзисторах используется как инвертор, а при передаче энергии от передающей части к приемной, в прямом направлении, работает как неуправляемый выпрямитель. Для достижения плавного переключения инверторных ключей при близких к нулевому уровню значениях напряжения, скважность преобразователя поддерживается на уровне 50%, а передаваемая мощность регулируется путем изменения рабочей частоты системы. Для компенсации пульсаций на силовых ключах передающей части устанавливают последовательно с параллельным LC передающим контуром дополнительный конденсатор, получая тем самым последовательно-параллельный резонансный контур. Так как прототип системы имеет мощность 1.2 кВт и входит в диапазон систем с высокой мощностью, авторы предлагают применение для пополнения заряда аккумуляторов транспортных средств и передачи энергии от одного транспортного средства к другому. Номинальный зарядный ток – 3.7 А, выходное напряжение 325 В. Полученная эффективность близка к 92%.

Двунаправленная система передачи энергии, позволяющая передавать энергию от одного передатчика на несколько приемников, одновременно рассматривается в [75]. Резонансный контур каждой части системы выполнен по последовательно-параллельной схеме. Контур системы настроены на работу на резонансной частоте, а каждый реверсивный выпрямитель работает

либо в режиме инвертирования, либо в режиме выпрямления в зависимости от направления передачи энергии. Величина и направление передаваемой энергии определяются углом открытия ключей управляемого выпрямителя. Величина и направление потока энергии между несколькими системами регулируются посредством фазовой и амплитудной модуляции напряжений, которые могут использоваться совместно или по отдельности. Система передачи энергии, представленная в работе, имеет мощность 1.5 кВт, рабочую частоту 20 кГц. Эффективность системы составляет 85% при воздушном зазоре 40 мм, питающее напряжение 200 В.

Гибридная система двунаправленной БСПЭ предложена в [76]. Система состоит из двух пар катушек, где одна пара выступает в роли передающей части, а другая в роли приемной. Как передающая часть системы, так и приемная имеют два контура объединенные на общем проводе, причем один из контуров построен по последовательной схеме, а другой по последовательно-параллельной. Такая гибридная концепция позволяет использовать LCL и LC контура для компенсации уменьшения потока передаваемой мощности из-за осевых смещений приемной и передающей частей системы, поскольку объединенная выходная мощность обеих контуров приводит к приблизительно постоянной выходной мощности. Приемный и передающий резонансные контура питаются от полумостового преобразователя, который служит либо источником, либо нагрузкой, в зависимости от направления потока мощности. Преобразователь работает с требуемой частотой, и амплитуда напряжения, генерируемая в приемном контуре, регулируются фазовой модуляцией. При использовании в качестве однонаправленной системы передачи энергии преобразователь может работать как выпрямитель для получения постоянного тока на выходе системы. Система работает при напряжении 180 В на частоте 85 кГц. Максимальная передаваемая мощность - 3.3 кВт с эффективностью передачи энергии 91% при оптимальном положении приемных и передающих контуров друг относительно друга: без продольного и поперечного смещения,

расстояние между приемными и передающими контурами 120 мм. Системы с аналогичным диапазоном мощностей также рассмотрены в [77–79].

Авторы работы [80] предлагают беспроводную систему малой мощности для заряда аккумуляторных батарей портативных устройств. В приемной и передающей частях системы используется последовательный резонансный контур и полумостовая схема включения силовых транзисторов, что обеспечивает возможность двунаправленной передачи энергии. Приемная и передающая катушки имеют круглую форму и 18 витков, внутренний диаметр 21.7 мм и наружный диаметр 32 мм. Так как при использовании системы могут возникнуть осевые смещения и увеличение воздушного зазора между приемной и передающей катушками, предлагается изменение рабочей частоты от 110 кГц до 205 кГц. Для управления резонансным контуром используется частотная модуляция. Входное и выходное напряжение системы передачи энергии 4 В, передаваемая мощность 2.5 Вт. При воздушном зазоре 2 мм и осевых смещениях до 8 мм эффективность передачи энергии составляет 70%.

Авторами работы [81] разработана собственная интегральная схема, включающая в себя систему управления двунаправленной БСПЭ и реализующая систему передачи энергии от аккумулятора к аккумулятору, которая имеет минимальное количество дополнительных компонентов на печатной плате. Для проверки системы был собран прототип с использованием топологии с последовательным резонансным контуром, которая обладала большей расчетной эффективностью и меньшими размерами. В прототипе не было реализовано схемы управления для регулирования выходного напряжения или тока, поскольку выходной ток системы зарядки со временем уменьшается, а его максимальное значение ниже номинального тока зарядки, допустимого большинством мобильных устройств. Данная БСПЭ работает на частоте 6.78 МГц, а выходная мощность составляет 1.55 Вт. Система показала эффективность 58.6% в номинальном режиме работы.

В работе [82] представлена двунаправленная БСПЭ с возможностью обмена данными. Система передачи информации интегрирована в контроллер системы передачи энергии. Для кодирования данных используется амплитудная модуляция. Структура предлагаемой системы беспроводной передачи энергии основана на последовательном резонансном контуре с двунаправленным up/down преобразователем. В режиме передачи энергии управляемые ключи, включенные по схеме моста, работают в качестве инвертора в передающей части, а в режиме приема энергии внутренние диоды транзисторов работают в качестве неуправляемого выпрямителя совместно с двунаправленным DC-DC преобразователем. Частота работы системы составляет 500 кГц. Стабильная работа системы обеспечивается при воздушном зазоре до 50 мм и боковом смещении до 20 мм.

Представленные на данный момент стандарты беспроводных систем передачи энергии (Qi, PMA, AirFuel) имеют возможность исключительно однонаправленной передачи энергии. Исследовательские и экспериментальные образцы рассмотренных систем в большинстве случаев построены на основе полумостовых или мостовых инверторов, подразумевающих отдельную систему управления, реализующую алгоритмы двунаправленной передачи энергии. Одним из общих недостатков основной части представленных БСПЭ является необходимость управления рабочей частотой в зависимости от взаимного расположения приемной и передающей частей и величины нагрузки. Большинство систем двунаправленной БСПЭ относятся к классу систем с большой передаваемой мощностью (более 1 кВт), так как предназначены для электротранспорта и иных промышленных применений. Системы в данном диапазоне передаваемой мощности избыточны для большинства малых наземных роботов. Следующим по распространенности решением являются системы с малой передаваемой мощностью, разработанные для применения в мобильной электронике. Их передаваемая мощность лежит в диапазоне до 10 Вт, что будет достаточно только для роботов малых размеров при приемлемой продолжительности

времени заряда. Системы в диапазоне средней передаваемой мощности, подходящие для использования в робототехнике, представлены в основном однонаправленными системами и недостаточно широко освещены в исследовательских работах.

#### **1.4 Выводы по первой главе**

В первой главе представлен анализ подходов к решению задачи перераспределения ресурсов в группе роботов. На основе проведенного анализа составлена классификация способов повышения эффективности использования ресурсов группой (рисунок 2), а также представлены примеры реализации.

Исследования в направлении перераспределения ресурсов 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 2 – Классификация способов повышения эффективности использования ресурсов группой

Для снижения расхода энергии и уменьшения общего времени выполнения целевых задач группой необходимо оптимизировать перемещение роботов между задачами. Из рассмотренных методов для оптимального распределения задач между роботами возможно выделить венгерский алгоритм. Алгоритм является строго полиномиальным и обеспечивает точное решение за минимально возможное время, в отличие от других рассмотренных алгоритмов. В ходе анализа существующих решений проблемы определения точек заряда были найдены методы, разработанные преимущественно для разведывательных операций или доставки товаров клиентам в городских условиях беспилотными летательными аппаратами и управляемыми транспортными средствами с ограниченным запасом энергии. В рассмотренных решениях зарядные станции либо статичны, либо у них не ограничены энергетические ресурсы. Кроме того в рассмотренных решениях,

транспортными средствами в основном являются летательные аппараты, что не подходит для решения поставленной задачи в рамках наземной группы роботов.

Передача энергии между роботами группы возможна с использованием контактных методов и посредством беспроводной передачи энергии. Применение беспроводной передачи энергии имеет значительные преимущества перед контактными системами и методами обмена источниками питания роботов. Представленные на данный момент стандарты беспроводных систем передачи энергии (Qi, PMA, AirFuel) имеют возможность исключительно однонаправленной передачи энергии. Большинство систем двунаправленной БСПЭ относятся к классу систем с большой передаваемой мощностью (более 1 кВт), так как предназначены для электротранспорта и иных промышленных применений. Следующим по распространенности решением являются системы с малой передаваемой мощностью, разработанные для применения в мобильной электронике и медицине. Их передаваемая мощность лежит в диапазоне до 10 Вт, что будет достаточно только для роботов малых размеров при приемлемой продолжительности времени заряда. Системы в диапазоне средней передаваемой мощности, подходящие для использования в робототехнике, представлены в основном однонаправленными системами и недостаточно широко освещены в исследовательских работах. Одним из общих недостатков, представленных БСПЭ, является необходимость регулирования рабочей частоты в зависимости от взаимного расположения приемной и передающей частей и величины нагрузки.

## **2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**

Во второй главе описаны теоретические результаты выполненной диссертационной работы. Приведено описание основных используемых параметров и формальной постановки задачи диссертационного исследования. В опубликованной работе, содержащей отдельные результаты диссертационного исследования [83], проведен анализ моделей роевых робототехнических систем разработанных с учетом энергетических параметров агентов и роя, а также возможностью энергетического обмена между агентами. Существующие модели не учитывают особенности беспроводной передачи энергии между роботами и в большинстве случаев направлены на централизованное поддержание энергетического потенциала системы, что делает необходимым разработку соответствующей модели. Модель должна описывать группу наземных роботов [84] и принципы взаимодействия внутри нее для перераспределения энергетических ресурсов. В разработанной математической модели и алгоритмах учтены энергетические параметры роботов, задач и среды функционирования, а также особенности передачи энергии посредством БСПЭ.

### **2.1 Математическая постановка задачи**

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 3). 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 идентичную 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.

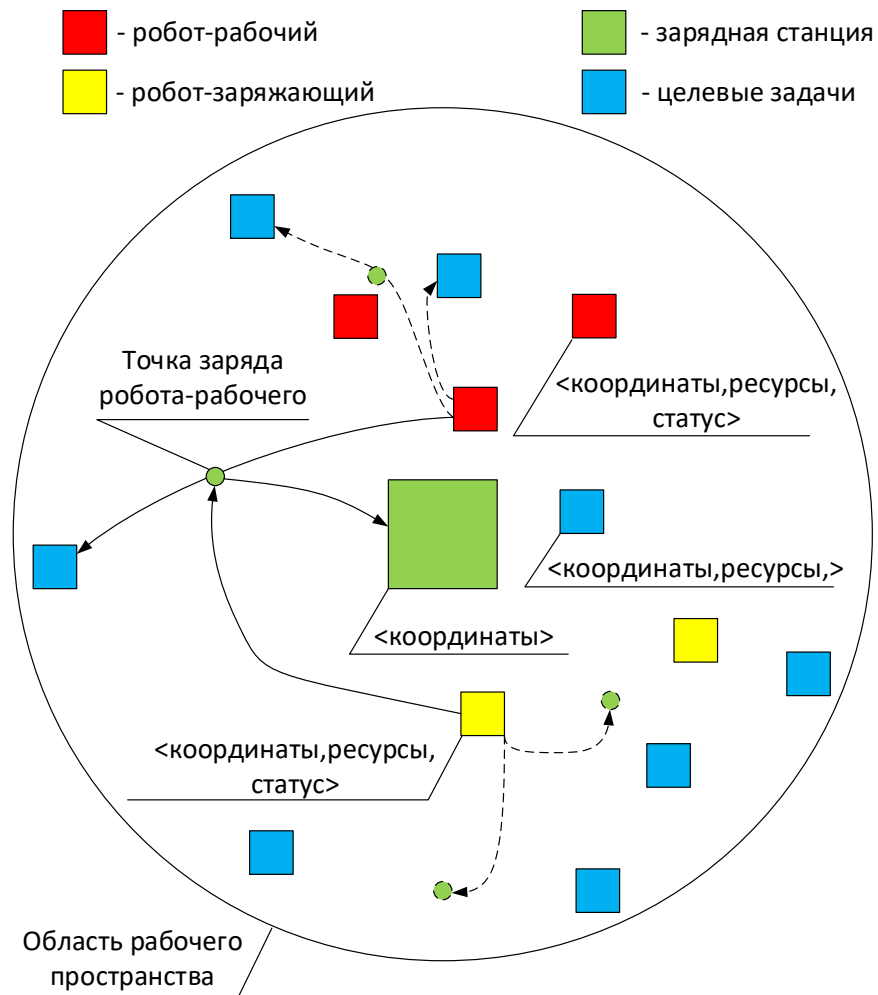


Рисунок 3 – Визуальное представление задачи

С учетом этого математическую формулировку задачи поиска оптимального плана назначений  $\|x_{ij}\|_0$   $i$ -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, см. также раздел 2.2 таблица 1.

В ряде случаев вместо задачи (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,  $Q_{don}$  – 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  $\tau_{ij}$ :

$$P = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \cdots & \tau_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{m1} & \cdots & \tau_{mn} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $m$  – число роботов,  $n$  - число задач.

Матрица назначений  $Z$  имеет размерность  $m \times n$  и состоит из элементов  $x_{ij}$ :

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

Алгоритм решения поставленной задачи может быть следующим. Для каждого робота-рабочего осуществляется поиск траектории движения до каждой точки задачи, затем определяются точки заряда на каждой из траекторий. На следующем шаге должны быть определены траектории от каждого робота-заряжающего до каждой точки заряда робота-рабочего. Необходимо определить время перемещения роботов, время на передачу энергии и определить  $\tau_{ij}$  с учетом времени непосредственного выполнения целевой задачи. Далее необходимо выбрать варианты назначений рабочих и заряжающих роботов таким образом, чтобы общее время выполнения всех целевых задач было минимальным. Описанный алгоритм решения задачи можно отнести к переборным методам, так как рассматриваются все возможные варианты. Поиск оптимального решения существенно усложняется если количество задач превышает число роботов-рабочих. В этом

случае время выполнения задач на каждой последующей итерации управления зависит от предыдущих решений и фактического времени выполнения целевой задачи. Аналогичная ситуация складывается в том случае, если роботов-заряжающих меньше, чем точек заряда на траекториях роботов-рабочих. Стоит отметить, что невозможно заранее вычислить точное время передачи энергии между роботами при использовании бесконтактной системы передачи энергии, так как оно зависит от точности позиционирования роботов. Описанный выше алгоритм вычисления времени выполнения целевой задачи теряет смысл если во время функционирования группы могут быть назначены новые целевые задачи. Решение поставленной задачи методом перебора всех вариантов имеет высокую вычислительную сложность. Ввиду всего вышеперечисленного 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.

## 2.2 Математическая модель робототехнической системы с групповым управлением

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель управления группой наземных роботов, учитывающая параметры наземных роботов и группы, необходимые для распределения задач и энергетических ресурсов. В таблице 1 представлены переменные и множества, их описание и взаимосвязи, которые далее будут использоваться в модели и алгоритмах.

Таблица 1 – Переменные и множества математической модели и алгоритмов

Обозначение	Описание
$b_u$	Точка поверхности рабочего пространства $b_u = [x_u, y_u, z_u]$   $b_u \in B, u = 1, \dots, um, um \in \mathbf{N}$
$B$	Матрица точек карты высот рабочего пространства
$cz$	Координаты зарядной станции $cz = [x_u, y_u, z_u]$
$R$	Множество роботов $R = \{W, C\}$
$W$	Множество роботов-рабочих $W = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_m\}$ , где $i$ – идентификатор робота, $i \in [1;m], m \in \mathbf{N}$
$C$	Множество заряжающих роботов $C = \{c_1, \dots, c_k, \dots, c_z\}$ , где $z$ – число заряжающих роботов, $k \in [1;z], z \in \mathbf{N}$
$w_i$	Робот-рабочий, описан кортежем параметров $w_i = \langle cr_i, er_i, sr_i \rangle$
$c_k$	Робот-заряжающий, описан кортежем параметров $c_k = \langle cr_k, er_k, sr_k \rangle$
$cr_i, cr_k$	Координаты робота в пространстве $cr_i = [x_i, y_i, z_i]$
$er_i, er_k$	Текущий запас энергии робота в относительных единицах
$sr_i, sr_k$	Параметр статуса робота $sr_i$ принимает значения 0 или 1, если робот выполняет миссию, то $sr_i = 1$
$T_a$	Множество целевых задач, назначенных группе. $T_a = \{ta_1, \dots, ta_j, \dots, ta_n\}$ , где идентификатор задачи $j \in [1;n], n \in \mathbf{N}$
$ta_j$	Целевая задача, описана кортежем параметров $ta_j = \langle ct_j, et_j \rangle$
$ct_j$	Координаты точки выполнения задачи $ct_j = [x_i, y_i, z_i]$
$et_j$	Значение энергии в относительных единицах, которое необходимо для выполнения роботом-рабочим задачи $ta_j$
$E_j$	Расход энергетических ресурсов робота на выполнение задачи в Вт·ч
$E_{max}$	Максимально возможный запас энергии робота в Вт·ч.
$E_m$	Затраты энергетических ресурсов на преодоление роботом единичного расстояния $d_u$ в Вт·ч



$d_u$	Единичное расстояние в метрах при прохождении которого робот расходует $E_r$ , Вт·ч энергии
$e_m$	Расход энергии на преодоление единичного расстояния $d_u$ в относительных единицах (процентах от максимально возможного запаса энергии робота $E_{max}$ )
$e_{minw}$	Заданный минимальный уровень запаса энергетических ресурсов в относительных единицах для роботов-рабочих
$e_{minc}$	Заданный минимальный уровень запаса энергетических ресурсов в относительных единицах для роботов-заряжающих
$e_{max}$	Заданное максимальное значение уровня запаса энергетических ресурсов в относительных единицах для роботов
$M_i, M_k$	Кортежи $M_i$ и $M_k$ включают в себя параметры миссии робота. $M_i = \langle p_{ij}, cr_i, ct_j \rangle$ - для роботов-рабочих. $M_k = \langle p_{kg}, cz, ct_g \rangle$ - для роботов-заряжающих
$P_w$	Множество траекторий роботов-рабочих до точек выполнения задач $P_w = \{p_{ij}\}$
$P_c$	Множество траекторий роботов-заряжающих до точек выполнения задач пополнения энергетических ресурсов $P_c = \{p_{kg}\}$
$p_{ij}$	Траектория перемещения в точку выполнения задачи $ta_j$ для робота-рабочего $w_i$ . Траектории помещаются во множество $P_w = \{p_{ij}\}$ , и представляет собой набор точек от координат положения $i$ -робота-рабочего до координат точки выполнения $j$ -задачи
$p_{kg}$	Траектория перемещения в точку выполнения задачи пополнения энергетических ресурсов $tc_g$ для робота-заряжающего $ck$ . Траектории помещаются во множество $P_c = \{p_{kg}\}$ , и представляет собой набор точек от координат положения $i$ -робота-заряжающего до координат точки выполнения $g$ -задачи
$T_w$	Множество выполнимых задач $tw_j$ полученное из $T_a$ . $T_w = \{tw_c, \dots, tw_j, \dots, tw_d\}$ , где $j$ – идентификатор задачи, $c$ – наименьший идентификатор задачи в $T_w$ , $d$ – наибольший идентификатор задачи в $T_w$ , $c, d \in \mathbf{N}$
$tw_j$	Выполнимая целевая задача, описана кортежем параметров $tw_j = \langle ct_j, et_j \rangle$
$T_c$	Множество задач $tc_g$ пополнения энергетических ресурсов сформированное на основе найденных точек заряда роботов-рабочих. $T_c = \{tc_1, \dots, tc_g, \dots, tc_q\}$ , где идентификатор задачи $g \in [1, q]$ , $q \in \mathbf{N}$
$tc_g$	Задача пополнения энергетических ресурсов, описана кортежем параметров $tc_g = \langle ct_g, et_g \rangle$

$ct_g$	Координаты задачи пополнения энергетических ресурсов
$et_g$	Количество энергии в относительных единицах, которое необходимо передать роботу-рабочему от робота-заряжающего
$\eta_p$	Параметр потенциальной эффективности передачи энергии между роботами, показывает отношение между энергией, которую робот-рабочий получил, и энергией, которую робот-заряжающий при этом передал.
$cp_i$	Кортеж координат точек заряда $i$ – робота. $ct_g \in cp_i,  cp_i  = pm, pm$ – число точек заряда $i$ – робота, $pm \in \mathbf{N}$
$dc_j$	Длина пути по траектории робота-заряжающего от зарядной станции до точки выполнения задачи
$D_w$	Множество включает в себя элементы, состоящие из идентификаторов роботов-рабочих и идентификаторов задач. $D_w = \{(i, j)\}, i = 1, \dots, m; j = c, \dots, d$
$D_c$	Множество включает в себя элементы, состоящие из идентификаторов роботов-заряжающих и идентификаторов задач. $D_c = \{(k, g)\}, k = 1, \dots, z; g = 1, \dots, q$
$l_{ij}$	Длина траектории $i$ - робота-рабочего до $j$ - целевой задачи
$L_w$	Множество длин траекторий от роботов-рабочих до точек выполнения задач $L_w = \{l_{1c}, \dots, l_{ij}, \dots, l_{md}\}, i = 1, \dots, m; j = c, \dots, d$
$l_{kg}$	Длина траектории $i$ -го робота-заряжающего до точки выполнения $g$ -задачи пополнения энергетических ресурсов
$L_c$	Множество длин траекторий от роботов-заряжающих до точек задач пополнения энергетических ресурсов. $L_c = \{l_{kg}\}, i = 1, \dots, z; g = 1, \dots, q$
$nb$	Количество точек на траектории, необходимое для позиционирования роботов при передаче энергии
$a$	Длина робота в метрах
$s_b$	Шаг карты высот в метрах, принятый равномерным и одинаковым по осям $X, Y$ для всей карты высот: $s_b =  x_u - x_{u+1}  =  y_u - y_{u+1} $
$l_{0...bg}$	Длина пути от начальной точки траектории $p_{ij}$ движения робота-рабочего до точки траектории с номером $bg$
$l_{bg...Q}$	Длина пути участка траектории $p_{ij}$ от точки с номером $bg$ до точки с номером $Q$
$Q_n$	Число точек траектории в диапазоне которых разрешен заряд, $Q_n = \delta e \cdot d_u / e_m s_b$

Пусть поверхность, определяющая рабочее пространство, задана картой высот  $b_u = [x_u, y_u, z_u] | b_u \in B, u = 1, \dots, um$ , 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 или 1. 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  $c_i = \langle cr_k, er_k, sr_k \rangle$ .

Группе роботов-рабочих назначаются целевые задания (задачи)  $ta_j$  представленные во множестве  $T_a = \{ta_1, \dots, ta_j, \dots, ta_n\}$ , где идентификатор 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.

Взаимосвязи описанных выше множеств и параметров можно представить в графическом виде следующим образом (рисунок 4):



Рисунок 4 – Взаимосвязи множеств и параметров в графическом виде

Для всех роботов определено значение  $E_{max}$  – максимально возможный запас энергии робота в Вт·ч, обусловленный физическими характеристиками источника питания и соответствующий уровню полного заряда. В процессе движения робот расходует энергетические ресурсы на перемещение, величина  $E_m$  определяет затраты энергетических ресурсов на преодоление роботом единичного расстояния  $d_u$ . Расход энергетических ресурсов в относительных единицах на преодоление единичного расстояния определяется в соответствии с формулой (12):

$$e_m = \frac{E_m}{E_{max}}. \quad (12)$$

Значение  $e_m$  позволяет оценивать расход энергии на преодоление единичного расстояния  $d_u$  в процентах от максимально возможного запаса энергии робота  $E_{max}$ .

Расход энергии робота  $E_j$  на выполнение задачи переводится в относительные единицы по формуле (13):

$$et_j = \frac{E_j}{E_{max}}. \quad (13)$$

С помощью  $et_j$  определяется сколько энергии в процентах от максимально возможного запаса энергии робота  $E_{max}$  будет израсходовано на выполнение задачи.

Текущий уровень запаса энергетических ресурсов в относительных единицах  $er_i$  определяется как соотношение текущего значения запаса энергии к максимальному  $E_{max}$ . Аналогично определяется, заданный минимальный уровень запаса энергетических ресурсов в относительных единицах для роботов-рабочих –  $e_{minw}$  и роботов-заряжающих –  $e_{minc}$ . При  $er_i \leq e_{minw}$  роботу требуется пополнение энергетических ресурсов.

В предлагаемой модели принято, что процесс пополнения энергетических ресурсов роботов всегда осуществляется до заданного максимального значения  $e_{max}$ , при этом должно выполняться неравенство (14):

$$e_{minw} < e_{max} \leq 1 \quad (14)$$

Значение 1 в данном неравенстве соответствует максимальному уровню энергетического запаса робота  $E_{max}$ .

Также примем, что  $e_{minc} < e_{minw}$ , так как роботу-заряжающему необходимо преодолевать путь от зарядной станции до точки заряда и обратно.

По значениям  $e_{minw}$ ,  $e_{minc}$  и  $e_{max}$  определяются диапазоны уровней энергетических ресурсов, доступных роботам-рабочим и роботам-заряжающим для перемещения по траектории и выполнения задач.

Роботы-рабочие имеют три состояния: следование по маршруту, выполнение задачи и заряд 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 до тех пор, пока не прибудет заряжающий робот и не 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 робота-рабочего 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 состоянии 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 данном состоянии он расходует свой запас энергии на восполнение заряда батареи робота-рабочего до достижения ее заряда, соответствующего заданной величине  $e_{max}$ . 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 (рисунок 5).

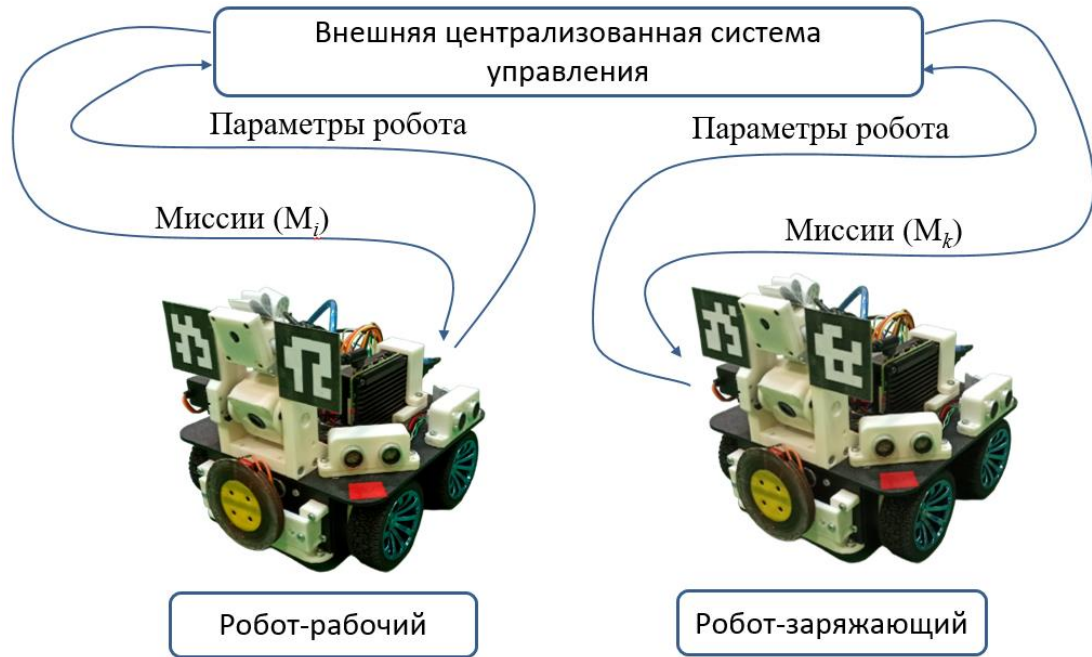


Рисунок 5 – Информационный обмен между роботами и системой управления группой

Рабочие и заряжающие роботы передают системе управления свои координаты ( $cr_i, cr_k$ ), 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  $sr_i$ , и координаты задачи  $ct_j$ . Для робота-заряжающего задачей будет являться передача энергии роботу рабочему в определенной точке рабочей области, а координатами точки пополнения запаса энергетических ресурсов будут являться координаты зарядной станции  $cz$ .

С учетом определенных состояний функционирования роботов-рабочих общее время выполнения  $j$ -задачи  $i$ -роботом складывается из следующих составляющих (15):

$$\tau_{ij} = \tau_s + \tau_r + \tau_{tx} + \tau_{exp} + \tau_j, \quad (15)$$

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:

$$T_w = f_1(ct_j, cz, e_{max}, e_{minw}, e_{minc}, e_m, \delta e, \eta_p), j \in \{1, n\}, \quad (16)$$

см. раздел 2.2 рисунок 9.

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. Длина траектории зависит от того, каким образом целевые задачи будут распределены между роботами и взаимного расположения робота и назначенной ему задачи:

$$L_w = f_2(B, ct_j, cr_i), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\}, \quad (17)$$

$$\langle P_w, D_w \rangle = f_3(T_w, W), \quad (18)$$

см. раздел 2.2 рисунок 10 и рисунок 11.

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  $cr_i$ :

$$T_c = f_4(p_{ij}, ct_j, er_i, et_j, e_{max}, e_{minw}, e_m, \delta e, d_u, s_b, nb), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\}, \quad (19)$$

см. раздел 2.2 рисунок 12.

$$\eta_n = f_5(\eta_{max}, L_{rel}, H_{rel}, P_{rel}), \quad (20)$$

где  $\eta_{max}$  – максимальная возможная эффективность передачи энергии (см. раздел 3.3, формула (52)),  $L_{rel}, H_{rel}, P_{rel}$  – расстояние, смещение, передаваемая мощность БСПЭ в относительных единицах (см. раздел 3.3, системы уравнений (55), (56)).

Время ожидания, работа-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:

$$L_c = f_2(B, ct_g, cr_k), g \in \{1, q\}, k \in \{1, z\}, \quad (21)$$

$$\langle P_c, D_c \rangle = f_6(T_c, C), \quad (22)$$

см. раздел 2.2 рисунок 11 и рисунок 14.

Примем, что на момент начала работы группы количество рабочих и заряжающих роботов известно и постоянно:  $/W/ = const, /C/ = const$ .

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:

$$M_i = f_7(P_w, T_c, T_w), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\}, \quad (23)$$

$$M_k = f_7(P_c, T_c, cz), g \in \{1, q\}, k \in \{1, z\}, \quad (24)$$

см. раздел 2.2 рисунок 7.

### 2.3 Комплекс алгоритмов управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов

Предложенная математическая модель управления группой наземных роботов была реализована при создании комплекса алгоритмов группового централизованного управления роботами с перераспределением энергетических ресурсов на маршрутах между точками местоположения целевых задач при передвижении на открытом пространстве с переменным рельефом, что обеспечило сокращение общего времени реализации поставленных целевых задач.

На рисунке 6 приведена схема, которая отражает взаимосвязи между разработанными алгоритмами функционирования системы управления группой наземных роботов.



Рисунок 6 – Комплекс алгоритмов управления группой наземных роботов

Далее рассмотрим разработанные алгоритмы более подробно. Каждый робот имеет относительно низкие вычислительные мощности, поэтому управление группой осуществляется внешней централизованной системой управления. Алгоритм функционирования системы управления группой наземных роботов представлен на рисунке 7.

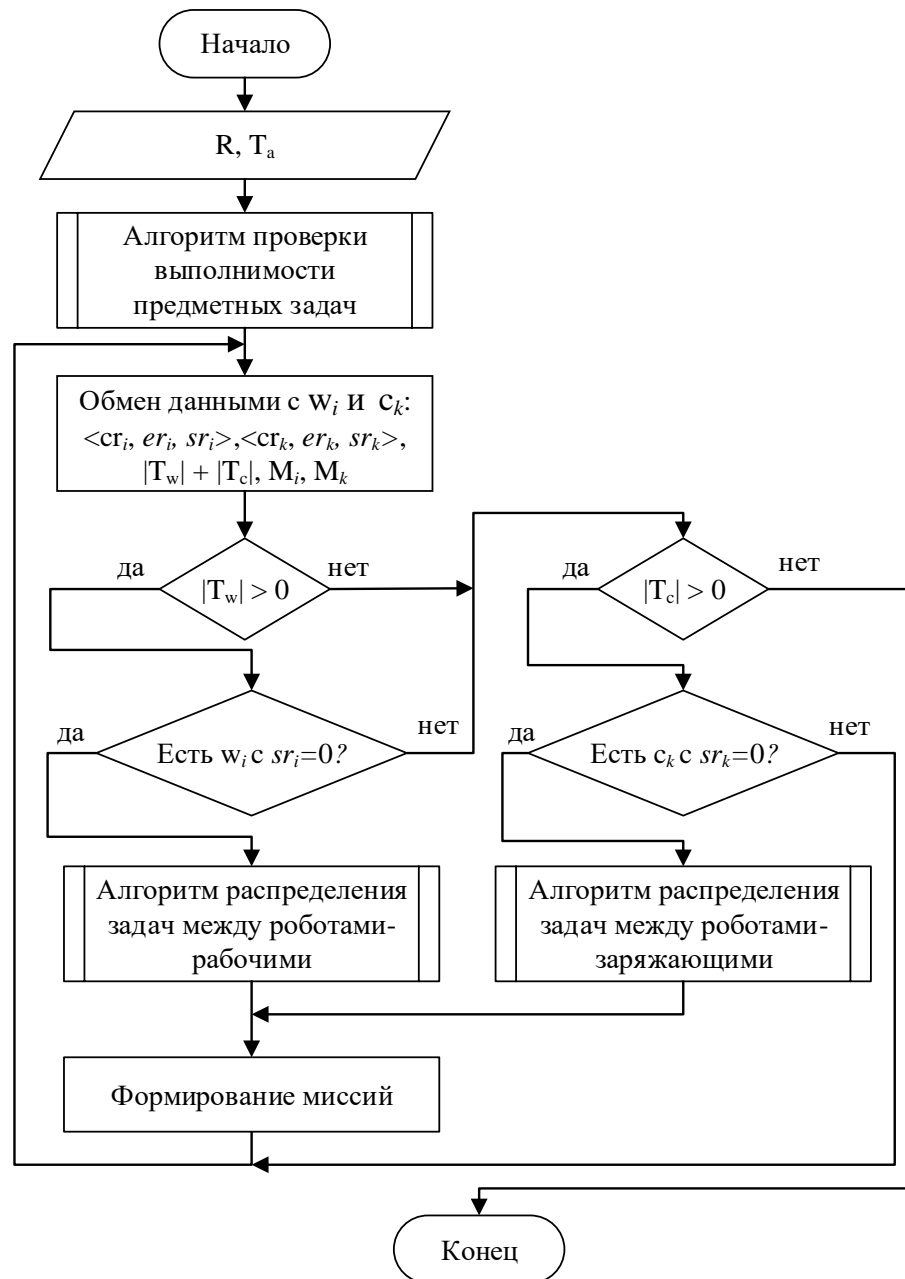


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма функционирования системы управления группой наземных роботов ( $f_7$ )

На первом этапе посредством вложенного алгоритма, представленного на рисунке 9, отбираются выполнимые задачи  $ta_j$ , 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 в себе задачи пополнения энергетических ресурсов. Если множество задач  $T_w$  пустое, а множество  $T_c$  имеет элементы, то система управления группой проверяет наличие свободного робота-заряжающего. Посредством алгоритма распределения задач пополнения энергетических ресурсов между роботами-заряжающими (рисунок 14) 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. Далее в соответствии с алгоритмом распределения задач между роботами-рабочими, представленным на рисунке 10, осуществляется выбор задачи для данного робота, поиск точек пополнения энергетических ресурсов, а затем формируется миссия.

Формирование миссии становится возможным после определения и вычисления всех необходимых параметров для роботов-рабочих или роботов-заряжающих. Формирование миссий и последующая передача их роботам происходит в следующем виде. Для роботов-рабочих  $M_i$  включает в себя траекторию движения робота  $p_{ij}$ , координаты точек пополнения запаса энергетических ресурсов, содержащиеся в кортеже  $cp_i$ , и координаты задачи  $ct_j$ :  $M_i = \langle p_{ij}, cp_i, ct_j \rangle$ . В случае робота-заряжающего задачей будет являться передача энергии роботу рабочему в определенной точке рабочей области, а координатами точки пополнения запаса энергетических ресурсов будут являться координаты зарядной станции  $cz$ :  $M_k = \langle p_{kg}, cz, ct_g \rangle$ .

Алгоритм работы системы управления группой наземных роботов завершает свою работу в случае, когда множество задач  $T_w$  и множество задач пополнения энергетических ресурсов  $T_c$  становятся пустыми, что в свою

очередь означает что все выполнимые задачи, поставленные группе роботов выполнены.

Каждый робот группы функционирует по алгоритму, изображенному на рисунке 8, индексы параметров в котором представлены для роботов-рабочих ( $i$ ). Для роботов-заряжающих необходимо использовать индексы параметров  $k$ .

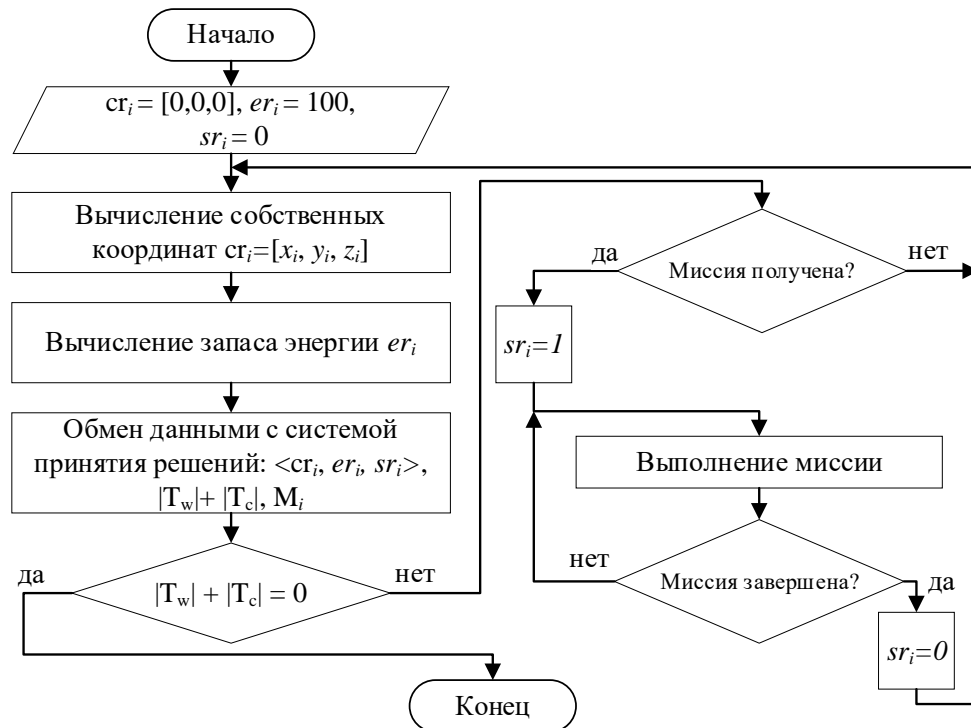


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма функционирования робота из группы

В начальный момент времени после включения робота переменным параметрам присвоены следующие значения:  $сг_i = [0, 0, 0]$ ,  $er_i = 100$ ,  $sr_i = 0$ . 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. Статус робота  $sr_i$  дает системе информацию о том, занят ли робот в текущий момент

выполнением миссии или нет. Если  $sr_i = 1$ , то робот занят выполнением миссии и участвовать в распределении задач или точек заряда он не может. Система управления группой передает роботу значение суммы длины массива выполнимых задач  $T_w$  и длины массива задач пополнения энергетических ресурсов  $T_c$ , которое используется для завершения работы алгоритма. Алгоритм завершает свою работу в случае, если сумма длин данных массивов равна 0. Это означает что все выполнимые задачи и задачи пополнения энергетических ресурсов распределены между соответствующими роботами.

Роботы группы, а соответственно и группа в целом, имеют функциональные ограничения, связанные с физическими параметрами. Ввиду того, что задачи группе роботов ставятся извне, 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. Для отбора выполнимых задач разработан алгоритм, представленный на рисунке 9.

Алгоритм проверки выполнимости целевых задач основан на счетном цикле, внутри которого каждая задача из множества  $T_a$  проверяется по двум условиям. Первое проверяемое условие, представленное неравенством (25), соблюдается в случае, если энергия необходимая для выполнения задачи не превышает значение энергетических ресурсов, доступное роботу-рабочему для использования:

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

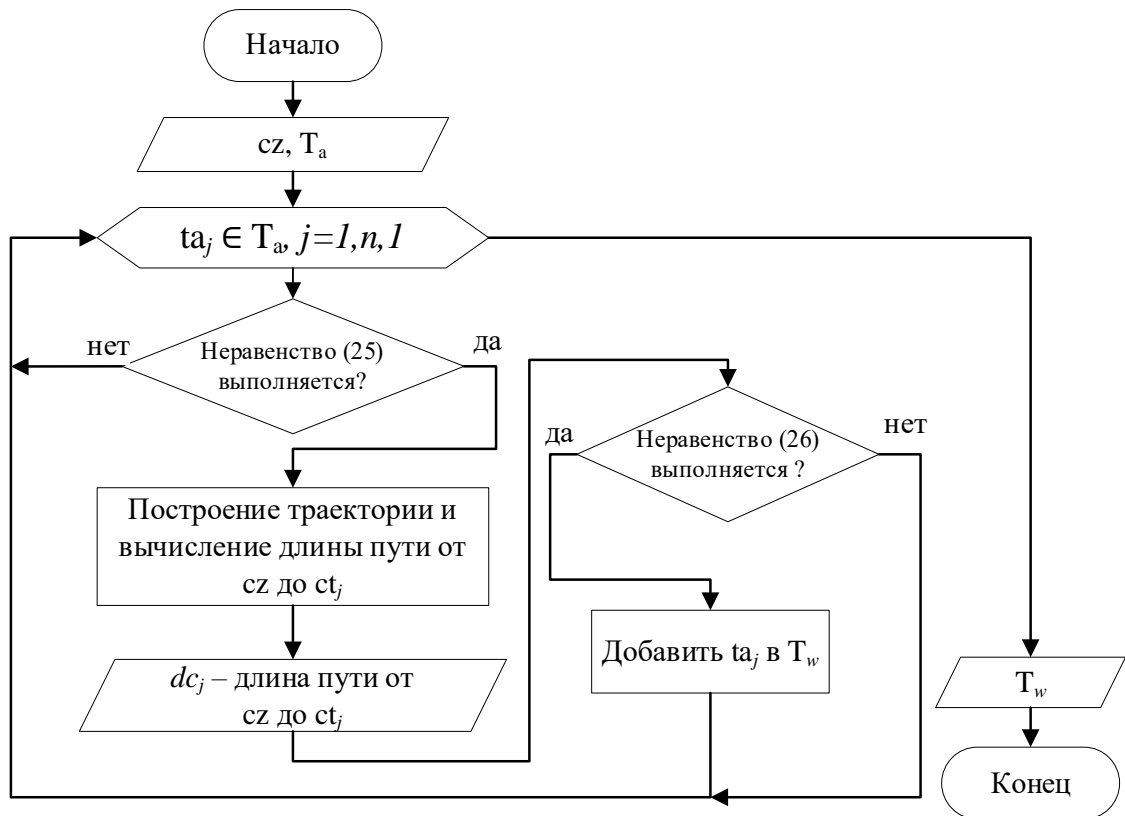


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма проверки выполнимости целевых задач  
(fi)

Предлагаемая модель функционирования группы предполагает наличие стационарного источника с потенциально неограниченным запасом энергии. В роли данного источника выступает зарядная станция, расположенная в рабочем пространстве группы, и имеющая координаты  $cz = [x_u, y_u, z_u]$ . Таким образом роботы-заряжающие имеют возможность неограниченного пополнения собственных энергетических ресурсов. Предполагается что робот-заряжающий пополняет свой запас энергетических ресурсов до значения  $e_{max}$  на зарядной станции, после чего может получить миссию на пополнение заряда робота-рабочего. Так как расход энергии на перемещение рабочих и заряжающих роботов принят в модели одинаковым, возможно использовать расстояние непосредственно от зарядной станции до задачи для проверки её достижимости роботом-рабочим. Количество энергии доступное роботу-рабочему, с учетом той которую ему передаст робот-заряжающий, должно

быть достаточным для преодоления пути от зарядной станции до задачи и для ее выполнения. Для проверки данного требования выведено неравенство (26):

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

Левая часть неравенства (26) означает, что роботам необходимо преодолеть удвоенное расстояние, поскольку требуется, чтобы робот-заряжающий после передачи энергии роботу-рабочему вернулся обратно к зарядной станции для пополнения собственных ресурсов. Правая часть неравенства показывает общее количество энергии, доступное роботу-рабочему с учетом эффективности передачи энергии от робота-заряжающего. Параметр потенциальной эффективности передачи энергии между роботами –  $\eta_p$ , показывает отношение между энергией, которую робот-рабочий получил, и энергией, которую робот-заряжающий при этом передал. Данный параметр позволяет учесть потери энергии при передаче энергии между роботами группы, что является особенностью использования БСПЭ. Также  $\eta_p$  возможно использовать для учета расхода энергии робота-рабочего во время получения энергии от робота-заряжающего. Для устойчивой работы реальной системы параметр  $\eta_p$  следует задавать как предполагаемое минимальное значение эффективности передачи энергии между роботами.

Если неравенство (26) выполняется, то в соответствии с представленным алгоритмом задача добавляется во множество  $T_w = \{tw_c, \dots, tw_j, \dots, tw_d\}$ , где идентификатор задачи  $j \in [c;d]$ .  $T_w$  является пустым на момент начала работы алгоритма. Таким образом проверяются все задачи из множества задач  $T_a$ , после чего алгоритм завершает свою работу.

Распределение задач между роботами-рабочими выполняется посредством алгоритма, представленного на рисунке 10. Блоки 2,4 и 7 алгоритма распределения задач содержат вложенные отдельные алгоритмы.



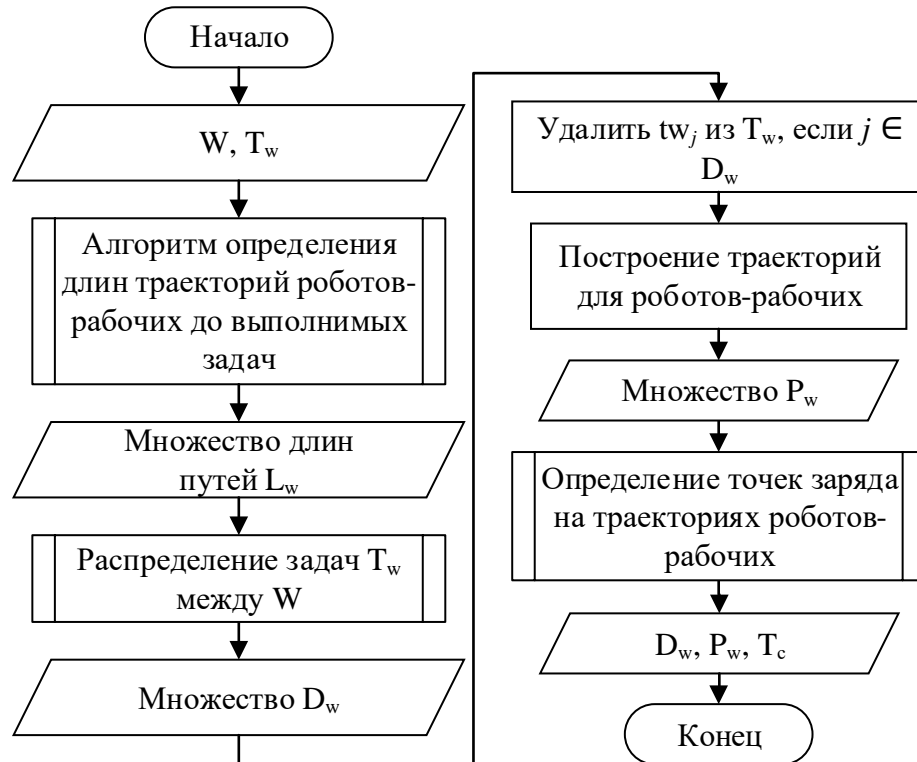


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма распределения задач между роботами-рабочими ( $f_3$ )

На вход алгоритма подается множество, содержащее кортежи параметров роботов-рабочих  $W$  и множество выполнимых задач  $T_w$ . Также в алгоритме используется множество распределенных задач между роботами-рабочими  $D_w = \{(i, j), \dots\}, j = c, \dots, d; i = 1, \dots, m$ , которое в начальный момент времени является пустым  $D_w = \emptyset$ . В данное множество после применения алгоритма оптимального распределения (блок 4) будут добавляться элементы, включающие в себя идентификатор робота-рабочего и идентификатор задачи.

На первом этапе алгоритма, посредством вложенного алгоритма, представленного на рисунке 10, для всех роботов-рабочих, имеющих статус  $sr_i = 0$ , строятся траектории до каждой задачи из множества  $T_w$  и вычисляются их длины. После работы данного алгоритма образуется множество  $L_w = \{l_{1c}, \dots, l_{ij}, \dots, l_{md}\}$ , в котором содержатся длины траекторий до достижимых точек выполнения задач. Далее множество  $L_w$  используется для оптимального

распределения выполнимых задач между роботами-рабочими посредством венгерского алгоритма [22].

Венгерский алгоритм позволяет находить оптимальное соответствие между роботом-рабочим и выполняемой задачей, исходя из длины траектории  $l_{ij}$  между  $i$ -роботом и  $j$ -задачей. Матрица, с которой оперирует венгерский алгоритм, имеет следующий вид (27):

$$\begin{bmatrix} l_{11} & \cdots & l_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1} & \cdots & l_{mn} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

При  $|\mathbb{W}| \geq |\mathbb{T}_w|$ , строится матрица размерностью  $|\mathbb{W}| \times |\mathbb{W}|$ , где алгоритмом распределения будут учитываться только первые  $|\mathbb{T}_w|$  строк (остальные – фиктивные задачи). Отобранные пары идентификаторов роботов-рабочих и координаты задач добавляются элементом во множество  $\mathbb{W}$ .

Для построения траектории каждого робота была выбрана модификация алгоритма LRLHD-A\* (Local Roughness Local Height Difference A\*) [85, 86]. Данный алгоритм позволяет находить энергоэффективные пути движения наземных роботов по неоднородной поверхности, что является необходимым при ограниченном заряде батареи робота. Определение длин траекторий роботов-рабочих, операция, представленная в блоке 2 алгоритма распределения задач, осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 11. Данный алгоритм также применяется в составе алгоритма распределения задач между роботами-заряжающими (рисунок 14) для определения длин траекторий до задач пополнения энергетических ресурсов.

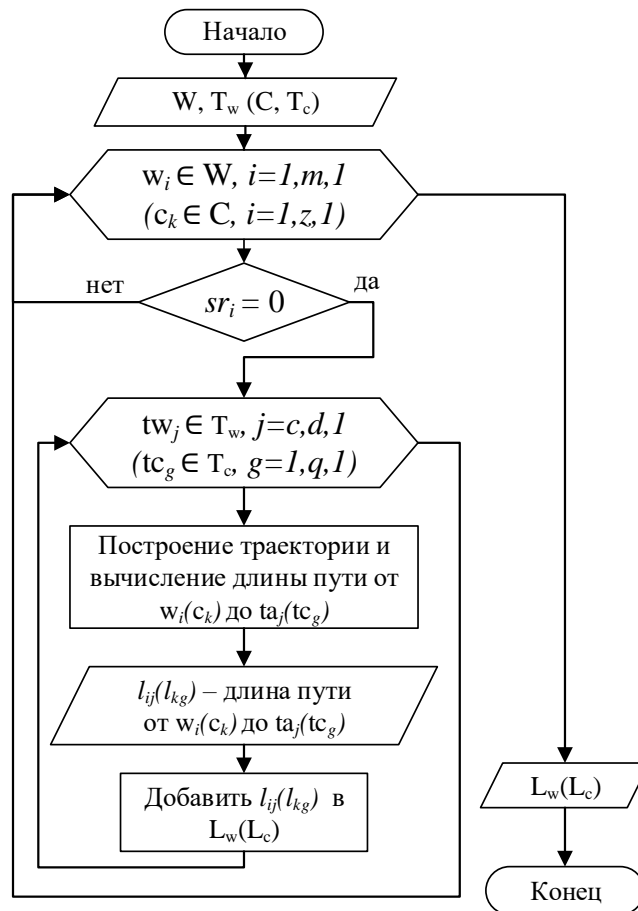


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма определения длин траекторий роботов-рабочих до выполнимых задач (роботов-заряжающих до задач пополнения энергетических ресурсов) ( $f_2$ )

В алгоритме на рисунке 11 для каждого робота строится траектория перемещения от точки  $sr_i$  до точки выполнения каждой задачи  $st_j$ . Затем по координатам промежуточных точек траектории определяется её длина  $l_{ij}$ , которую необходимо преодолеть роботу-рабочему, чтобы достигнуть точки выполнения задачи. Далее рассчитанное значение добавляется во множество  $L_w$ . Алгоритм работает, пока не будут рассмотрены все задачи из множества  $T_w$  для каждого робота-рабочего.

Удаленность точки выполнения задачи от начального положения робота-рабочего в пространстве и большое количество энергии, необходимое для ее выполнения, могут требовать у данных роботов значительного запаса энергии. Ввиду этого для выполнения задачи, назначенной роботу-рабочему, полного заряда аккумуляторной батареи может быть недостаточно. Из этого

возникает необходимость определения координат точек пополнения заряда батареи на траекториях роботов-рабочих. Операция определения точек заряда на траектории роботов-рабочих, обозначенная в блоке 9 (рисунок 10), реализуется посредством разработанного алгоритма, представленного на рисунке 12. На вход данного алгоритма подается множество рабочих точек  $D_w$ , множества выполнимых задач  $T_w$  и траекторий роботов-рабочих до задач  $P_w$ , а также параметры  $a$  и  $s_b$ .

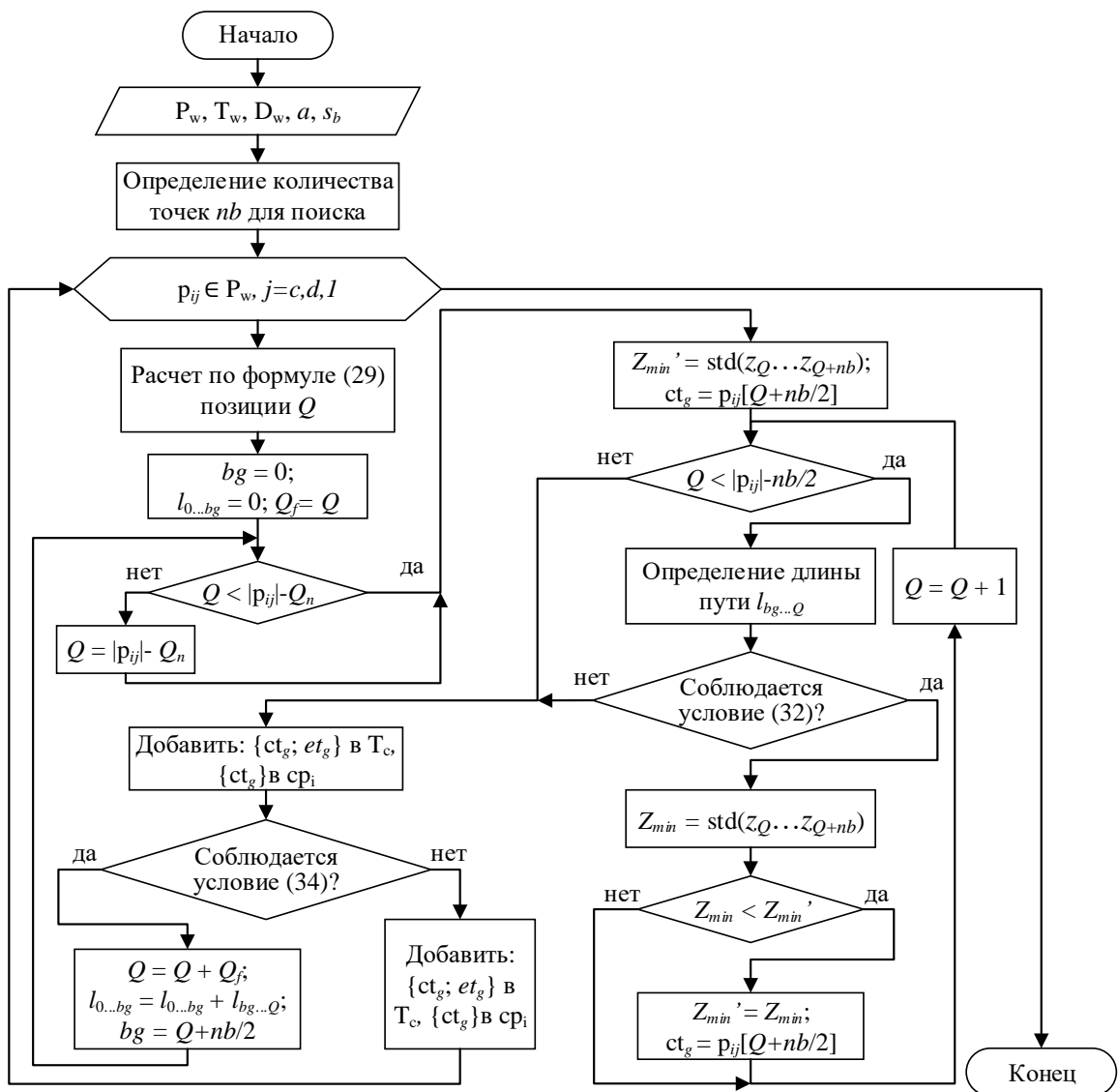


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма определения точек заряда на траекториях роботов-рабочих ( $f_4$ )

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. Количество точек на траектории, необходимое для позиционирования роботов при передаче энергии определяется исходя из их размера, связанного с местом установки катушек БСПЭ (см. рисунок 13).

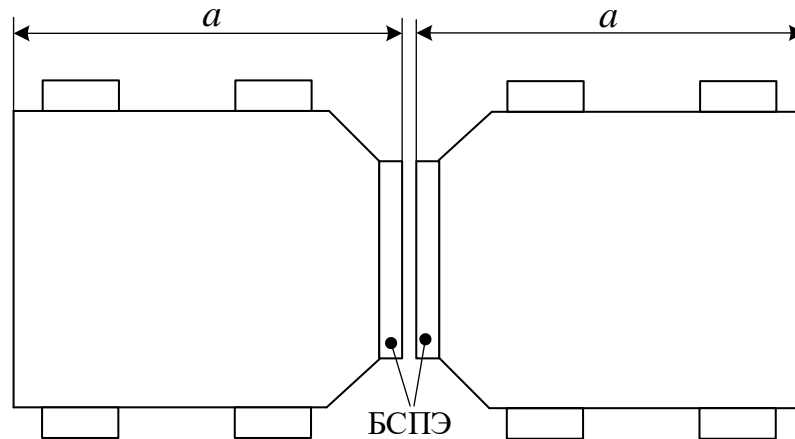


Рисунок 13 – Позиционирование роботов для передачи энергетических ресурсов

Исходя из рисунка 13, количество точек  $nb$  определяется по длине робота  $a$  в соответствии с (28).

$$nb = \frac{2a}{s_b}. \quad (28)$$

где,  $s_b$  – шаг карты высот, принятый равномерным и одинаковым по осям  $X$ ,  $Y$  для всей карты высот:  $s_b = |x_u - x_{u+1}| = |y_u - y_{u+1}|$ .

Следующей частью алгоритма является счетный цикл, внутри которого осуществляется поиск участков на траекториях роботов-рабочих наиболее подходящих для передачи энергии между роботами. Внутри цикла в первом блоке рассчитывается номер  $Q$  позиции элемента множества  $p_{ij}$  соответствующий точке траектории, с которой начинается поиск участков для точек пополнения энергетического запаса роботов-рабочих, по формуле (29).

$$Q = (e_{r_i} - e_{minw} - \delta_e) \cdot d_u / e_m s_b, \quad (29)$$

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. Параметр  $\delta e$  ограничен условием (30).

$$0 < \delta e < e_{max} - e_{minw} - et_j. \quad (30)$$

При позиционировании роботов для передачи энергии необходимо  $nb$  точек траектории. Позиционирование роботов недопустимо в точке выполнения задачи, а также точки, находящиеся за пределами точки выполнения задачи, отсутствуют во множестве  $p_{ij}$ , что не позволяет рассчитывать отклонение по  $z$ -координате между ними. Для учета данных ограничений в алгоритме предусмотрена проверка позиции  $Q$ . Проверка производится в соответствии со следующим неравенством:  $Q < |p_{ij}| - Q_n$ , где  $Q_n$  – число точек траектории в диапазоне которых разрешено пополнение энергетического запаса робота-рабочего. Значение  $Q_n$  рассчитывается исходя из  $\delta e$ :

$$Q_n = \delta e \cdot d_u / e_m s_b. \quad (31)$$

Применение параметра  $Q_n$  позволяет получить некоторый диапазон точек на траектории робота-рабочего в котором будет осуществляться поиск наиболее ровных участков, что важно для случаев, когда значение  $Q$  рассчитанное в соответствии с (29) превышает  $|p_{ij}|$ , а также для случаев поиска последней на траектории точки заряда, если их несколько.

Наиболее подходящими для передачи энергии между роботами являются ровные участки траектории, то есть с наименьшим отклонением по  $z$  – координате между соседними точками. Использование ровных участков для передачи энергии облегчает позиционирование роботов и повышает эффективность передачи энергии за счет уменьшения расстояний и смещений между частями БСПЭ. Наименьшая разница между координатами  $z$  участка

траектории из  $nb$  точек определяется путем вычисления среднеквадратического отклонения  $Z_{min}$  между точками  $z_Q \dots z_{Q+nb}$ . Вычисленное текущее значение  $Z_{min}$  далее сравнивается с предыдущим минимальным значением  $Z_{min}'$ : если  $Z_{min} < Z_{min}'$ , то предыдущее значение заменяется текущим -  $Z_{min}' = Z_{min}$ . Вычисление  $Z_{min}$  и последующее сравнение с предыдущим значением осуществляется в случае если условие, представленное в виде неравенства (32), выполняется. Проверка условия (32) выполняется после определения длины пути до точки  $Q$  и уровня заряда аккумулятора робота-рабочего после преодоления данного пути.

$$e_{minw} < e_{max} - e_m \cdot l_{bg\dots Q} / d_u, \quad (32)$$

где  $l_{bg\dots Q}$  – длина пути участка траектории  $p_{ij}$  от точки с номером  $bg$  до точки с номером  $Q$ .

При этом если заряд аккумуляторной батареи больше минимального уровня  $e_{minw}$ , то будет рассматриваться следующая точка траектории, иначе во множество точек  $T_c$  добавляется новый элемент  $tc_g$ , состоящий из координат центральной точки области позиционирования  $ct_g$  и количества заряда в относительных единицах  $et_g$  (33), которое робот-заряжающий должен передать роботу-рабочему.

$$et_g = e_{max} - e_m \cdot l_{bg\dots Q} / d_u. \quad (33)$$

Также координаты центральной точки области позиционирования добавляются в виде элемента в кортеж координат точек заряда  $i$  – работа  $sr_i$ ,  $ct_g \in sr_i$ ,  $|sr_i| = pm$ ,  $pm$  – число точек заряда  $i$  – работа. Новый элемент добавляется во множество  $T_c$  также в случае, когда номер  $Q$  становится больше разности  $|p_{ij}|$  и  $nb/2$ , поскольку точки в диапазоне номеров  $[|p_{ij}| - nb/2; |p_{ij}|]$  невозможно использовать в качестве участка позиционирования роботов для передачи энергетических ресурсов. После добавления новых элементов в  $T_c$  и  $sr_i$  в соответствии с условием (34) проверяется, достаточно ли энергетических ресурсов робота-рабочего для преодоления им расстояния до точки

выполнения задачи, выполнения этой задачи и возвращения обратно до данной точки заряда.

$$e_{max} - e_{minw} < et_j + 2e_m \cdot (l_{ij} - l_{bg...Q} - l_{0...bg}) / d_u, \quad (34)$$

где  $l_{0...bg}$  – длина пути от начальной точки траектории  $p_{ij}$  движения робота-рабочего до точки траектории с номером  $bg$ .

Если заряда аккумулятора достаточно и неравенство не выполняется, то в  $T_c$  и  $sr_i$  снова добавляются указанные выше элементы, а далее производится поиск точек заряда для следующей траектории из множества  $P_w$ . Повторное добавление элементов необходимо для того, чтобы после завершения выполнения задачи робот-рабочий пополнил свой заряд перед получением новой миссии. В случае если неравенство (34) выполняется обновляется номер точки  $Q$  от которой начинается поиск следующей точки заряда для оставшегося участка траектории. Алгоритм завершает свою работу после рассмотрения всех траекторий из множества  $P_w$ .

Алгоритм распределения задач пополнения энергетических ресурсов между заряжающими роботами изображен на рисунке 14. На вход данного алгоритма подаются множество задач пополнения энергетических ресурсов  $T_c$  и множество роботов-заряжающих  $C$ .

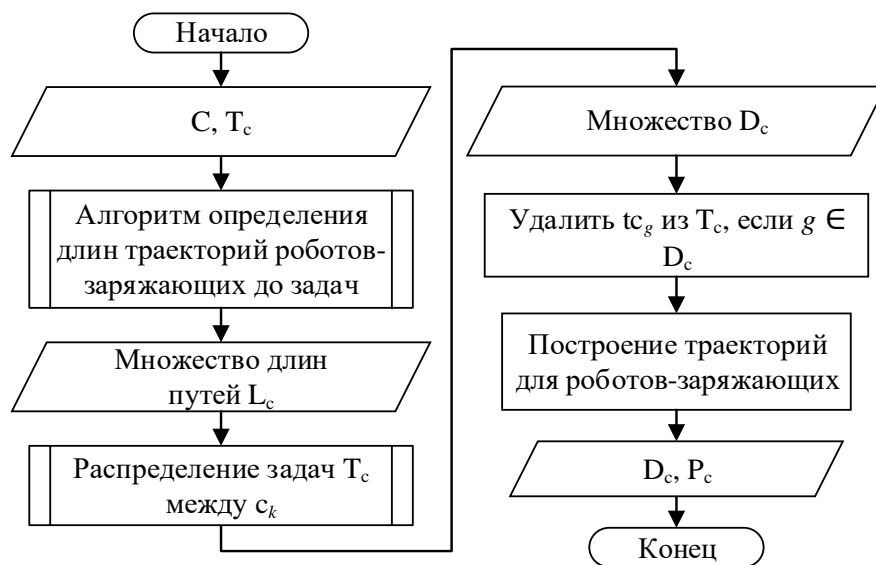


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма распределения задач пополнения энергетических ресурсов между роботами-заряжающими ( $f_6$ )



Представленный алгоритм в общем аналогичен алгоритму распределения задач между роботами-рабочими (рисунок 10). Принципиальным отличием является отсутствие блока вложенного алгоритма определения точек заряда на траекториях, что обусловлено заложенными принципами функционирования группы, в которых роботы-заряжающие пополняют свой заряд на стационарной зарядной станции. Алгоритм определения длин траекторий роботов-заряжающих до задач пополнения энергетических ресурсов (блок 2, рисунок 14) представлен в развернутом виде на рисунке 11. При работе данного алгоритма с роботами-заряжающими используются переменные, указанные в скобках.

Результатом работы алгоритма распределения задач пополнения энергетических ресурсов между роботами-заряжающими является множества  $D_c$  и  $P_c$ , которые используются в алгоритме работы системы управления группой для формирования миссий. Элементами множества  $D_c$  являются пары параметров устанавливающие соответствие между идентификатором робота-рабочего и идентификатором задачи,  $D_c = \{(k, g)\}$ ,  $k = 1, \dots, z$ ;  $g = 1, \dots, q$ . Множество  $P_c$  аналогично множеству  $P_w$  и содержит траектории роботов-заряжающих до точек выполнения задач пополнения энергетических ресурсов  $P_c = \{p_{kg}\}$ .

Алгоритм, представленный на рисунке 15, предназначен для управления процессом позиционирования робота-заряжающего относительно робота-рабочего для передачи энергии в точке заряда. Работа алгоритма основана на принципе вычисления положения центра ArUco-маркера относительно центра объектива камеры системы технического зрения.

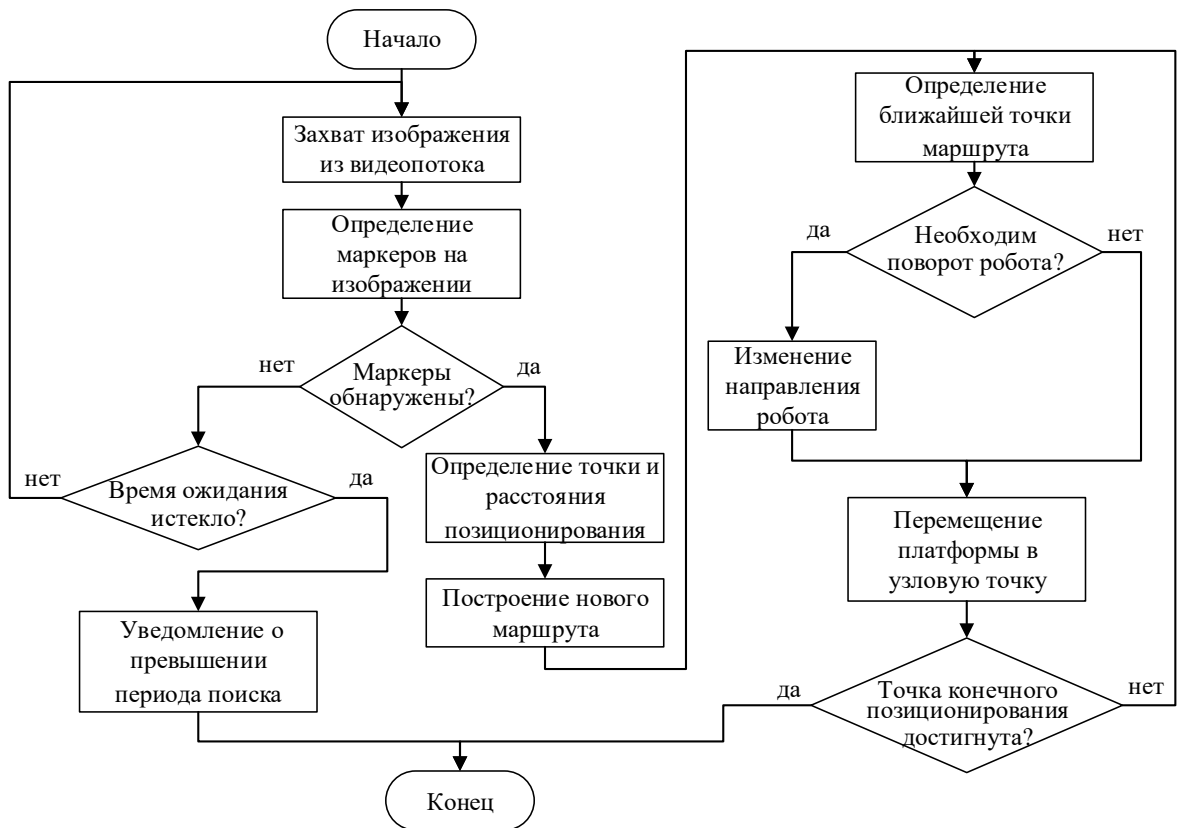


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма конечного позиционирования робота-заряжающего

Предполагается, что в начале процесса позиционирования роботы могут находиться на расстоянии, превышающем допустимое для идентификации ArUco-маркера. Предлагаемый алгоритм начинает свою работу в тот момент времени, когда система технического зрения определяет маркеры. До этого момента робот-заряжающий перемещается по траектории определенной при формировании миссии. Локализация и навигация робота в рамках движения по траектории, определенной при формировании миссии, может осуществляться посредством одометрии, инерциальной системы навигации или иных внешних систем. Если два ArUco-маркера с заранее известными идентификаторами не были определены на изображении, то поиск повторяется снова до тех пор, пока не будет превышено заданное время ожидания обнаружения маркеров. При этом алгоритм уведомляет о превышении времени обнаружения программный модуль выполнения миссии.

В случае успешного определения ArUco-маркеров вычисляются координаты точки конечного позиционирования в трехмерном пространстве –  $N$ . Для этого сперва необходимо определить векторы сдвига каждого маркера в пространстве относительно системы отсчета  $C$ , связанной с камерой, которая неподвижно закреплена на заряжающем роботе. На рисунке 16 показаны данные векторы  ${}^C P_{M1}$  и  ${}^C P_{M2}$ , направленные в точки  $M1$  и  $M2$  соответственно, обозначающие геометрический центр каждого ArUco-маркера.

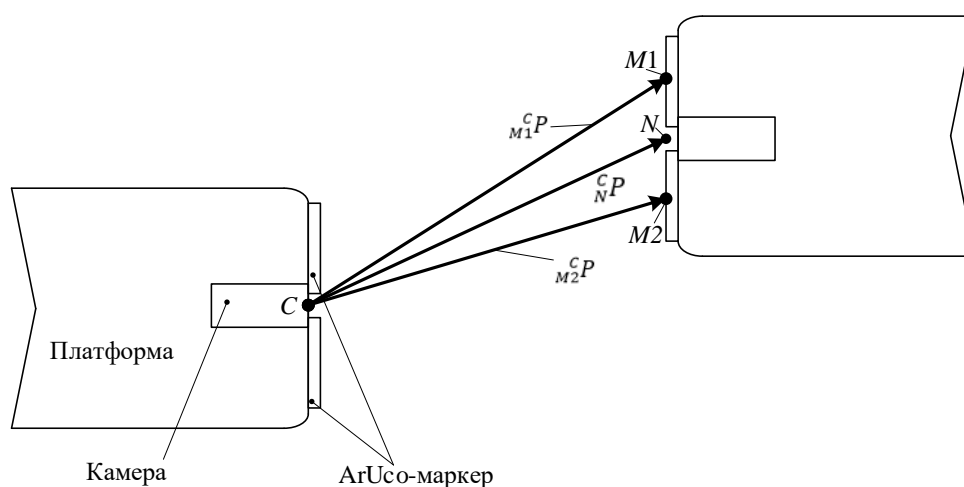


Рисунок 16 – Определение координат точки конечного позиционирования

Посредством библиотеки компьютерного зрения OpenCV по изображениям и параметрам камеры (коэффициенты дисторсии и др.) определяются координаты векторов сдвига  ${}^C P_{M1} = (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1})^T$  и  ${}^C P_{M2} = (x_{M2}, y_{M2}, z_{M2})^T$  относительно системы отсчета камеры  $C$ . Далее, чтобы найти координаты средней точки  $N$  между маркерами в системе отсчета камеры, можно вычислить половину от суммы координат векторов. Тогда полученный вектор  ${}^C P_N = (x_N, y_N, z_N)^T$  (35) будет указывать на середину между центрами двух маркеров в пространстве.

$${}^C P_N = \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{M1} + x_{M2} \\ y_{M1} + y_{M2} \\ z_{M1} + z_{M2} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Далее с учетом дополнительных данных о взаимном положении роботов обновляется траектория движения робота-заряжающего до точки конечного позиционирования. Генерация локальной траектории проводится также с использованием алгоритма LRLHD-A\* [85]. Полученная траектория сглаживается с применением алгоритма CSA [87].

По сгенерированной траектории определяется ближайшая точка (вершина полученного маршрута), к которой затем перемещается заряжающий робот. Данные об ориентации и положении, полученные с помощью технического зрения, позволяют уточнить направление движения заряжающего робота к точке конечного позиционирования и корректировать его при значительном отклонении, которое задается отдельно. Движение продолжается, пока робот-заряжающий не достигнет точки конечного позиционирования с заданной точностью. В алгоритме это реализовано циклически, проверяя, достиг заряжающий робот точки конечного позиционирования или нет: если нет, то определяется ближайшая точка траектории, к которой затем направляется робот. Если система технического зрения перестанет определять маркеры, то заряжающий робот будет перемещаться по траектории, определенной при формировании миссии. В таком случае это может повлиять на точность конечного позиционирования, если маркеры так и не будут обнаружены.

При достижении точки конечного позиционирования параллельность между роботами достигается за счет использования данных об ориентации заряжающего робота относительно точки позиционирования. Для этого предлагается использовать матрицы поворота каждого маркера, которые так же, как и векторы сдвига, определяются с помощью системы технического зрения. В соответствии с приведенными в [88] определениями, связанными с матрицами поворота, соответствующие координатные оси двух систем отсчета являются сонаправленными при нулевых значениях углов поворота одной системы отсчета относительно другой. С учетом этого, если, например,

ориентация задается через углы Эйлера, то матрица поворота (36) становится единичной (37):

$$R = \begin{bmatrix} c\alpha s\gamma - s\alpha c\beta s\gamma & -c\alpha s\gamma - s\alpha c\beta s\gamma & s\alpha s\beta \\ s\alpha c\gamma + c\alpha c\beta s\gamma & -s\alpha c\gamma + c\alpha c\beta s\gamma & -c\alpha s\beta \\ s\beta s\gamma & s\beta c\gamma & c\beta \end{bmatrix}, \quad (36)$$

где  $c\alpha = \cos\alpha$ ,  $s\alpha = \sin\alpha$ ,  $\alpha \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$ ,

$$R|_{\alpha=0, \beta=0, \gamma=0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Соответственно параллельность роботов можно проверять по тому признаку, что матрицы поворота стремятся к единичной.

## 2.4 Выводы по второй главе

Во второй главе представлены разработанная 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. Рабочее пространство описано картой высот с шагом, принятым равномерным и одинаковым по осям для всей карты высот. Задано множество роботов, которое включает в себя роботов рабочих и заряжающих. Каждый робот описан кортежем параметров, который включает в себя текущие координаты, энергетический запас в относительных единицах и параметр его статуса. Группе роботов назначаются целевые задания (задачи), каждая из которых описана кортежем параметров, включающим в себя значения энергии в относительных единицах и координаты. При перемещении в области рабочего

пространства роботы расходуют энергию, которая определяется исходя из количества преодоленных единичных расстояний. В модели заданы значения максимальных и минимальных уровней энергетических ресурсов для роботов, которые используются для определения выполнимых задач и точек заряда на траекториях роботов-рабочих.

Разработанные алгоритмы функционирования группы наземных роботов отличаются реализацией процессов перераспределения энергетических ресурсов между роботами на основе результатов предварительного планирования внешней централизованной системой управления. Функционирование группы описано в восьми алгоритмах. Основным алгоритмом является «Алгоритм работы системы управления группой». Система управления группой получает от роботов информацию о их текущих координатах, запасе энергии, а также статус. Далее осуществляется распределение, ранее отобранных, выполнимых задач между роботами-рабочими. Алгоритм применяется для роботов, не занятых выполнением задач на текущий момент. После оптимального распределения выполнимых задач между роботами, осуществляется определение точек заряда на траекториях их движения. В качестве точек заряда выбираются участки траектории имеющие минимальное отклонение по высоте между соседними точками карты высот, что обеспечивает увеличение эффективности передачи энергии между роботами и сокращение временных затрат на данный процесс. Определённые точки заряда формируют множество задач пополнения энергетических ресурсов и подлежат оптимальному распределению между роботами-заряжающими. Для оптимального распределения задач между роботами применяется венгерский алгоритм, что обеспечивает снижение затрат времени на перемещение роботов.

### **3 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ РОБОТОВ**

В третьей главе представлено описание разработанного аппаратного и алгоритмического обеспечения для реализации энергетического обмена между роботами группы. Разработанная двунаправленная БСПЭ реализована на базе резонансного автогенератора, частото задающим контуром которого является передающий, что позволяет поддерживать резонанс при изменении индуктивности передающей катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. 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.

#### **3.1 Алгоритмическое и аппаратное обеспечение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии**

Анализ существующих решений в области БСПЭ показал активное развитие способов однонаправленной передачи энергии. На текущий момент существуют стандартизированные решения, а также в исследовательских работах представлено значительное количество прототипов с различным уровнем передаваемой мощности. Основным недостатком однонаправленных БСПЭ в рамках задачи перераспределения ресурсов в группе является необходимость установки и приемной и передающей частей системы на каждого робота. Данная проблема может быть решена применением двунаправленных БСПЭ, но большинство представленных систем относятся либо к классу систем с большой передаваемой мощностью и предназначены для электротранспорта и иных промышленных применений, либо имеют передаваемую мощность в диапазоне до 10 Вт и предназначены для применения в мобильной электронике и медицине. Экспериментальные

данные с рабочими характеристиками данных систем как правило получены при соосном расположении приемной и передающей катушек на фиксированном расстоянии, что не позволяет оценить рабочие характеристики в полной мере. Передача энергии между роботами подразумевает наличие расстояния и смещения между приемной и передающей частями БСПЭ ввиду ограниченных возможностей сенсорной системы роботов и рельефа местности в области эксплуатации. Перечисленные факторы делают актуальной разработку двунаправленной БСПЭ средней мощности (от 10 Вт до 1 кВт), которая, в независимости от взаимного расположения приемной и передающей частей системы, будет работать в резонансном режиме с высокими показателями эффективности и передаваемой мощности.

В первых авторских работах по диссертационному исследованию были описаны разработанные однонаправленные БСПЭ на катушках с сердечником и на катушках без сердечника [89, 90]. В процессе исследования было выявлено, что разработанные образцы на катушках без сердечника имеют меньший вес, лучшую эффективность и большую дистанцию передачи энергии. Системы с однонаправленной передачей энергии хорошо подходят для эксплуатации совместно с различными мобильными сервисными платформами [91], беспилотными подводными аппаратами [92, 93]. В процессе диссертационного исследования при анализе и разработке математической модели роевой робототехнической системы с возможностью двунаправленной передачи энергии между агентами автором было выявлено, что применение однонаправленных БСПЭ либо накладывает ограничения на способы передачи энергии между агентами и исключает возможность сквозной передачи энергии через агента, либо требует одновременной установки и приемных и передающих частей БСПЭ в каждом энергетическом соединении [94]. Двунаправленная система лишена данных недостатков. Опираясь на предыдущие исследования однонаправленных систем, была



разработана структура двунаправленной БСПЭ, включающая блоки приемной и передающей части системы и их связи с конечным устройством (роботом).

В рамках диссертационной работы тестирование двунаправленной БСПЭ было проведено при взаимодействии наземных роботов, имеющих собственную распределенную систему управления (СУ) [95]. Разработанная архитектура, обладающая свойствами масштабируемости и адаптивности, состоит из трех уровней и может применяться для робототехнических комплексов различного назначения и беспилотных аппаратов. Таким образом управление двунаправленной БСПЭ может осуществляться отдельным аппаратным модулем уровня устройств. Обмен командами и сообщениями с высокоуровневым вычислителем осуществляется через внутрисистемный коммуникационный интерфейс. Структурная схема модулей уровня устройств предполагает использование низкоуровневого вычислителя, в качестве которого может применяться микроконтроллер. В данном варианте организации СУ работа общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ будет иметь вид, представленный на рисунке 17. Программное обеспечение микроконтроллера модуля двунаправленной БСПЭ работает в условно бесконечном цикле, пока присутствует питание микроконтроллера, что отражено в первом блоке алгоритма.

При наличии питания модуль БСПЭ ожидает команды от СУ робота. В случае поступления команды «передача энергии», работа модуля продолжается по алгоритму в режиме передачи энергии, блок схема которого приведена на рисунке 18. В случае поступления команды «прием энергии» модуль осуществляет работу по алгоритму, представленному на рисунке 19.

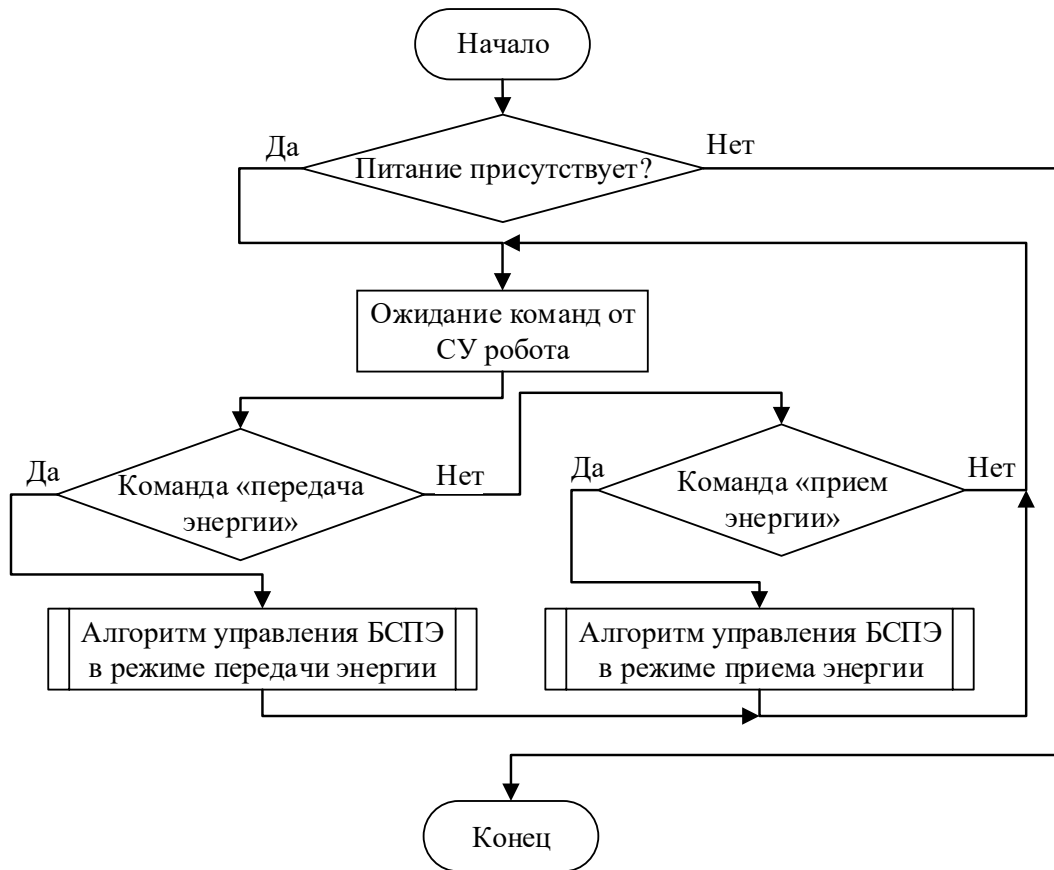


Рисунок 17 – Блок-схема общего алгоритма функционирования модуля двунаправленной БСПЭ

На первом шаге алгоритма управления БСПЭ в режиме передачи энергии осуществляется проверка сигнала контроля рабочей частоты. В соответствии с описанием схемотехнических решений, представленным в разделе 3.2, сигнал в цепи контроля рабочей частоты позволяет определить текущий режим работы части системы, которая установлена в другом роботе и должна принимать энергию. Если до начала передачи энергии в данной цепи присутствует сигнал с импульсами прямоугольной формы и в заданном диапазоне частот, то из этого следует что часть БСПЭ, установленная в другом робота, которая должна принимать энергию, в текущий момент осуществляет её передачу. В данном случае запуск невозможен, так как может вызвать повреждение силовых электронных компонентов БСПЭ. Если запуск невозможен, то СУ робота отправляется соответствующее сообщение, после чего вложенный алгоритм завершает свою работу, а в общем алгоритме

происходит переход к ожиданию команд. Сообщения, отправляемые СУ робота от модуля двунаправленной БСПЭ, соответствующие им параметры и условия представлены в таблице 2.

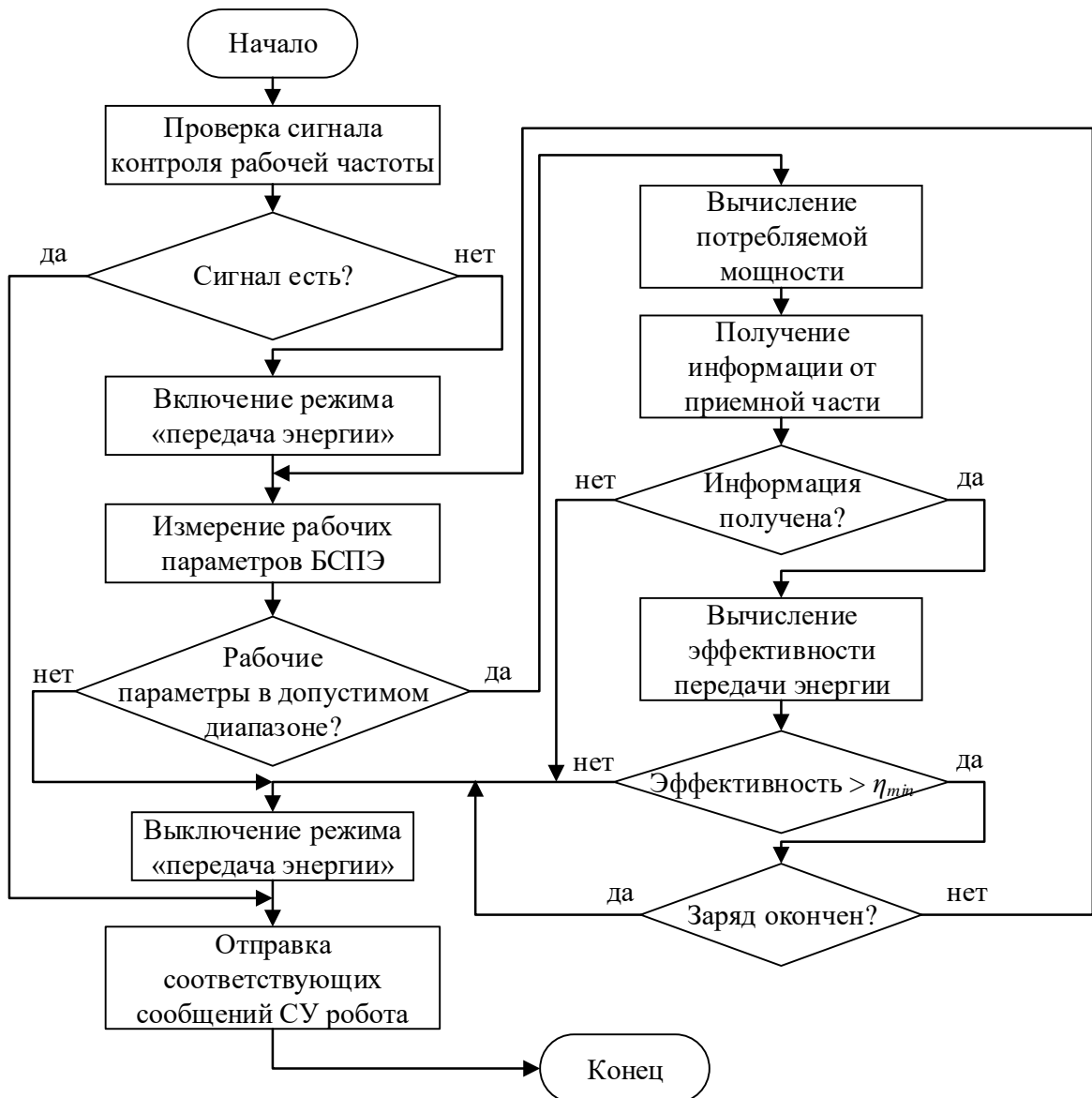


Рисунок 18 – Блок-схема алгоритма управления БСПЭ в режиме передачи энергии

В случае отсутствия соответствующего сигнала в цепи контроля рабочей частоты, включается режим передачи энергии и происходит измерение рабочих параметров БСПЭ. Если параметры в допустимом диапазоне, то вычисляется потребляемая мощность для того, чтобы осуществить дальнейший расчет эффективности передачи энергии. Для расчета

эффективности передачи энергии необходима информация от приемной части системы о значении напряжения и тока нагрузки в текущий момент. В случае если информация от приемной части не получена, режим передачи энергии выключается, СУ робота отправляется соответствующее сообщение, и происходит переход к ожиданию команд в основном алгоритме. Если эффективность энергии больше минимального заданного значения, то выполняется проверка уровня заряда аккумуляторной батареи, информация о котором предоставляется приемной частью системы. Пока процесс заряда не завершен, а все рабочие параметры и эффективность передачи энергии находятся в допустимом диапазоне, работа системы в режиме передачи продолжается с циклической проверкой данных параметров. По окончании процесса заряда модуль двунаправленной БСПЭ отправляет соответствующее сообщение (таблица 2) СУ робота.

Функционирование модуля осуществляется в режиме приема энергии при получении соответствующей команды от СУ робота.

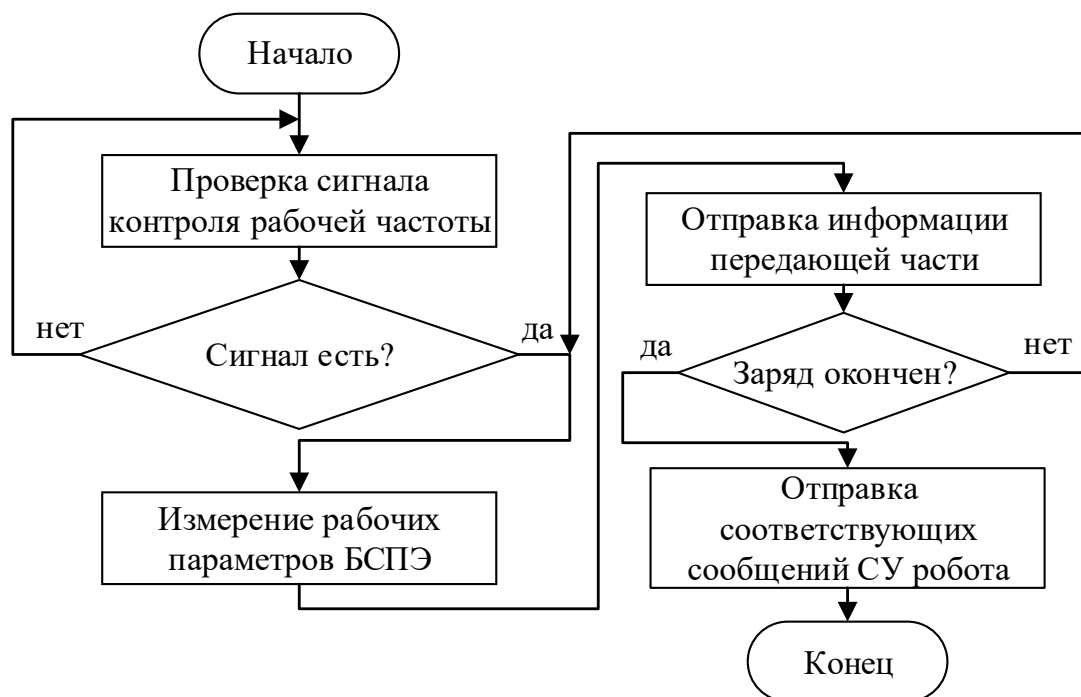


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритма управления БСПЭ в режиме приема энергии

Основными операциями алгоритма (рисунок 19) являются измерение рабочих параметров БСПЭ и отправка этой информации на передающую часть. По окончании заряда модуль информирует СУ робота, а алгоритм работы модуля в режиме приема энергии завершает свою работу.

Таблица 2 – Сообщения модуля двунаправленной БСПЭ

Режим передачи энергии	
Условие	Сообщение
Присутствует сигнал в цепи контроля рабочей частоты	«Передача не возможна»
Ток потребления $< I_{min}$	«Нет нагрузки»
Ток потребления $> I_{max}$	«Перегрузка»
Рабочая частота $> F_{max}$	«Не номинальный режим работы»
Напряжение питания $< U_{min}$	«Низкий заряд батареи»
Информация от приемной части отсутствует	«Нет связи с приемной частью»
Эффективность $< \eta_{min}$	«Низкая точность позиционирования»
Заряд окончен	«Заряд окончен»
Режим приема энергии	
Заряд окончен	«Заряд окончен»

Параметры в таблице Т1 для режима передачи энергии имеют следующие значения:  $I_{min}$  – минимальное значение тока потребления;  $I_{max}$  – максимальное значение тока потребления;  $F_{max}$  – максимальное значение рабочей частоты;  $U_{min}$  – минимальное значение напряжения питания;  $\eta_{min}$  – минимальное значение эффективности передачи энергии.

В представленных алгоритмах подразумевается, что модуль двунаправленной БСПЭ имеет питание от бортовой сети робота, а уровень питающего напряжения соответствует напряжению аккумуляторной батареи. Критерием для определения окончания заряда может служить уровень напряжения, измеряемый частью БСПЭ, которая функционирует в режиме приема энергии.

Далее рассмотрим более подробно разработанные аппаратные решения двунаправленной БСПЭ. Опираясь на предыдущие исследования однонаправленных систем, была разработана структура двунаправленной БСПЭ, представленная на рисунке 20. Структурная схема выполнена в виде блоков, представляющих приемную и передающую части системы, и их связей с конечным устройством.

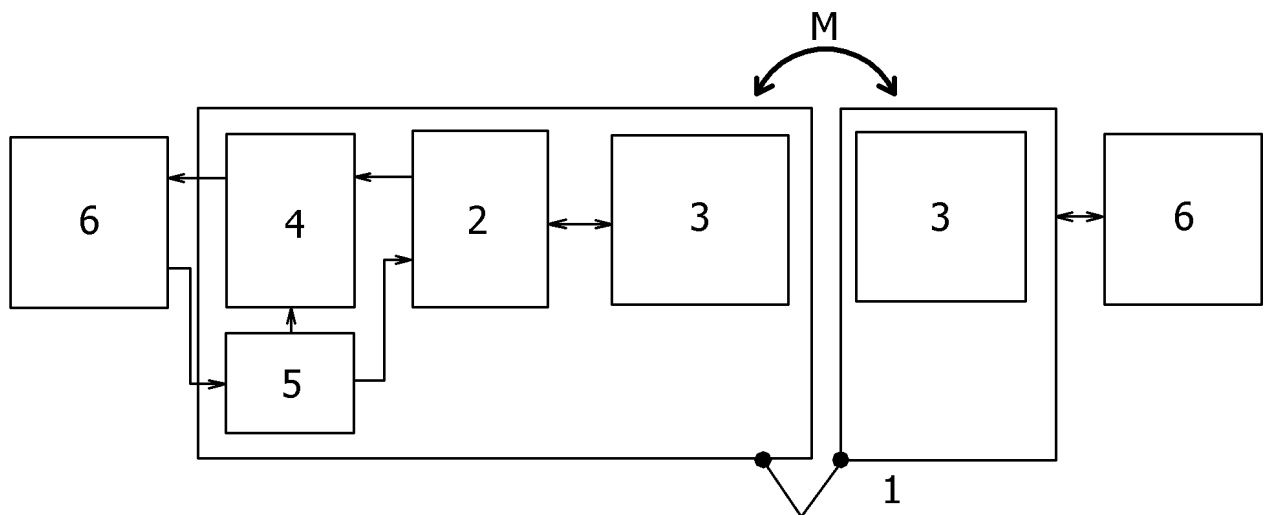


Рисунок 20 – Структурная схема двунаправленной БСПЭ

Двунаправленная БСПЭ состоит из двух функциональных частей (1), имеющих идентичную принципиальную схему. Каждая функциональная часть системы 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, в которые установлена функциональная часть предлагаемой системы. Каждая функциональная часть предлагаемого решения 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 (M) параллельные резонансные LC-контуры.

Передающий контур предлагаемой двунаправленной БСПЭ является частото задающим для резонансного автогенератора, что позволяет поддерживать резонанс в нем при изменении индуктивности катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. Резонанс в передающем контуре позволяет передавать максимальную мощность в приемную часть. Приемная и передающая части двунаправленной БСПЭ имеют идентичные резонансные контуры, что позволяет избавиться от дополнительных систем подстройки частоты приемного контура для поддержания в нем резонанса при изменении взаимного расположения катушек. Так как взаимное расположение приемной и передающей частей устройства в одинаковой мере влияют на индуктивность и добротность резонансных контуров, а передающий контур является частото задающим, то оба контура системы передатчик – приемник находятся в резонансе. Перечисленные особенности способствуют достижению высокой эффективности и передаваемой мощности при значительных смещениях между приемной и передающей частями системы.

Использование DC-DC повышающего преобразователя обусловлено тем, что индуцированная ЭДС в приемной катушке будет иметь меньшую амплитуду чем в передающей катушке в виду присутствия воздушного зазора, который имеет высокое сопротивление для магнитного потока, а также активных потерь в резонансных контурах. Амплитуда ЭДС в передающей катушке рассчитывается по формуле (38) [96–98]:

$$U_m = \pi V_{dc} , \quad (38)$$

где  $V_{dc}$ - напряжение источника.

Таким образом применение в структуре системы повышающего преобразователя позволяет получать напряжение на выходе системы, работающей в режиме приема энергии равным и выше напряжения источника питания системы работающей в режиме передачи энергии. Данное свойство позволяет использовать систему для перераспределения энергетических ресурсов между автономными устройствами, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с равным рабочим напряжением. Такая особенность системы актуальна при её использовании для перераспределения ресурсов в группе гомогенных роботов [94].

Схемотехническое решение двунаправленной системы беспроводной передачи энергии, представленное на рисунке 21, разработано на основе предыдущих исследований, в которых описаны БСПЭ на катушках без сердечника [89], и разработан синхронный выпрямитель, а также рассчитаны потери синхронного выпрямителя для применения в приемной части БСПЭ [99, 100].

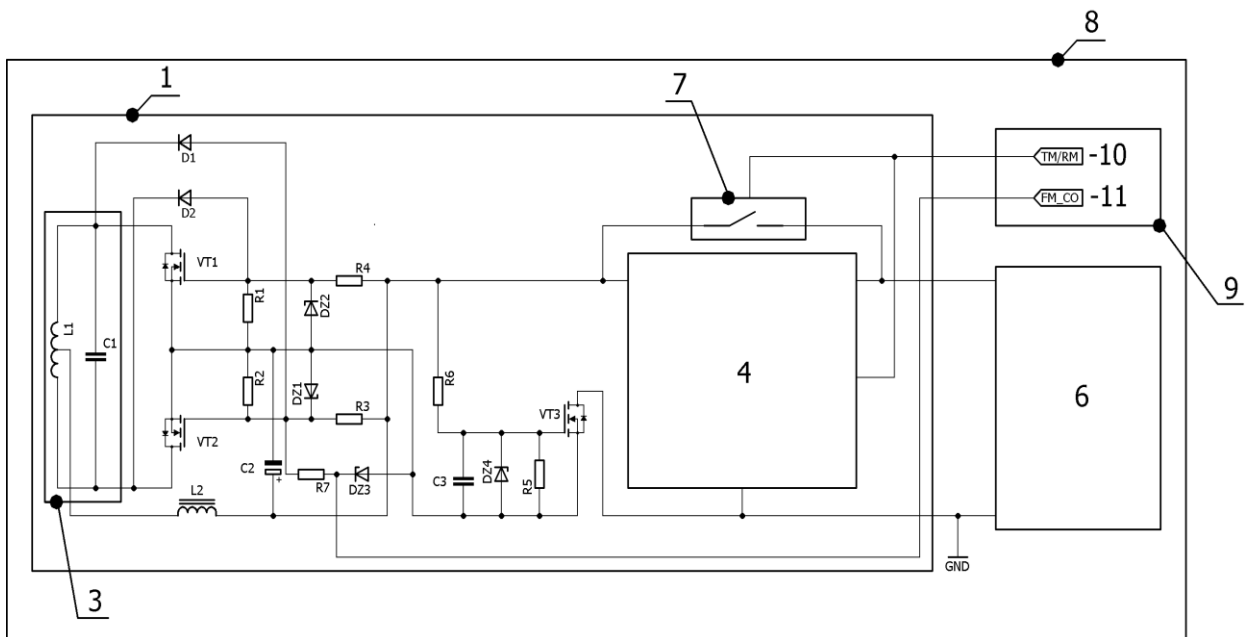


Рисунок 21 – Принципиальная схема двунаправленной БСПЭ



Принцип работы системы в режиме передачи энергии следующий. Конечное устройство (8), в которое установлена функциональная часть двунаправленной БСПЭ (7), имеет собственную систему управления (9). Собственная система управления конечного устройства имеет возможность чтения сигнала с цепи контроля рабочей частоты (11), и подачи управляющего сигнала в цепь выбора режима работы (10). Цепь выбора режима работы управляет ключевым элементом (7) и повышающим DC-DC преобразователем (4). Система управления конечным устройством проверяет наличие сигнала прямоугольной формы в цепи контроля рабочей частоты, если он отсутствует, то системе разрешено подать сигнал в цепь выбора режима работы. При подаче управляющего сигнала в цепь выбора режима работы запрещается работа DC-DC преобразователя, а ключевой элемент замыкает цепь, позволяя протекать току от источника питания (6) конечного устройства ко входу резонансного генератора, тем самым запуская его работу, после чего в резонансном контуре (3) генерируются незатухающие колебания, а в области катушки L1 появляется переменное магнитное поле с частотой в соответствии с (39):

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4\omega_0^2 C^2 R_3^2}}, \quad (39)$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – резонансная частота идеального контура,  $R_3$  – эквивалентное сопротивление нагрузки, приложенной к резонансному контуру,  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость резонансного контура соответственно.

Принцип работы системы в режиме приема энергии следующий. Если одна из функциональных частей системы работает в режиме передачи энергии, а вторая попадает в область действия переменного магнитного поля, создаваемого ею, то в катушке L1 индуцируется ЭДС. В резонансном контуре (3) возникают незатухающие колебания с частотой, равной частоте колебаний, генерируемых в резонансном контуре функциональной части системы, работающей в режиме передачи энергии. Далее ЭДС, индуцированная в L1,

выпрямляется резонансным автогенератором, работающим в данном режиме как синхронный выпрямитель, и поступает на вход повышающего DC-DC преобразователя. Выход DC-DC преобразователя соединен в данном случае с потребителем энергии конечного устройства.

Принцип работы системы на уровне схемотехнических решений и компонентов более подробно представлен в опубликованных работах [101, 102].

Первичная проверка работоспособности предложенного схемотехнического решения проведена в SPICE-симуляторе. График зависимости эффективности передачи энергии от передаваемой мощности, построенный на основе данных моделирования, представлен на рисунке 22.

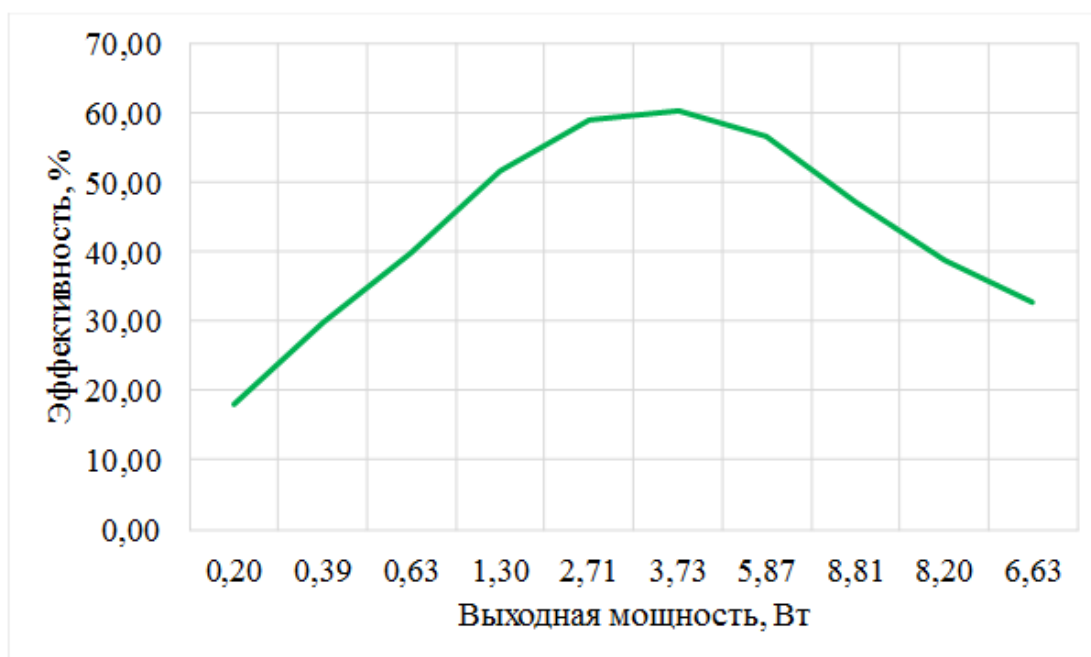


Рисунок 22 – Зависимость эффективности передачи энергии от передаваемой мощности

Исходная схема системы была упрощена для модели путем исключения DC-DC преобразователя, но в расчетах выходной мощности и эффективности учитывалась его эффективность принятая равной 87%. Транзисторы VT3 заменены на активное сопротивление равное 0,065 Ом в приемной и передающей частях системы. Ключевой элемент (рис. 21 – 4) представлен активным сопротивлением 0,065 Ом в части системы работающей в режиме

передачи энергии. Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора резонансного контура и активное сопротивление катушки приняты равными 0,01 Ом. Индуктивность приемной и передающей катушек составляла  $L1 = 14 \mu\text{H}$ , емкость резонансного конденсатора  $C1 = 0,47 \mu\text{F}$ . На основе наших предыдущих исследований коэффициент связи катушек приемной и передающей частей системы принят равным  $k_c = 0,85$ , такое значение может быть достигнуто при непосредственной близости катушек.

Формы тока и напряжений при работе системы без нагрузки представлены на рисунке 23, напряжение источника питания системы работающей в режиме передачи энергии составляло 8,4 В.

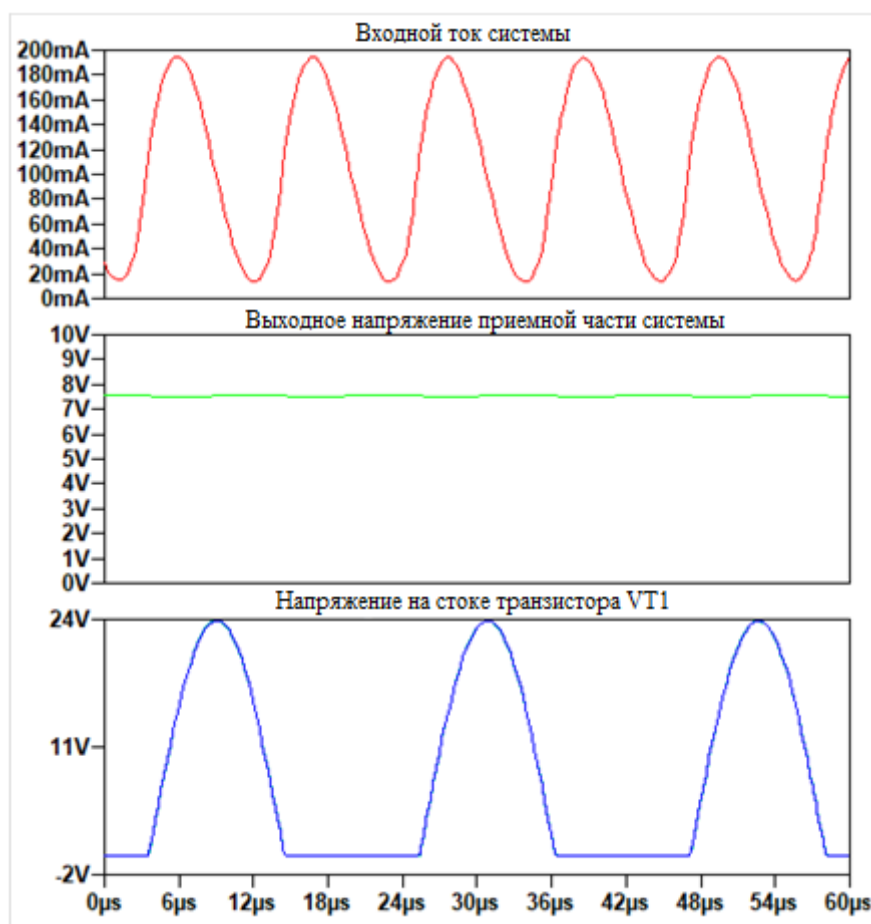


Рисунок 23 – Формы напряжений и тока при работе системы без нагрузки

Моделирование работы схемы проводилось на активную нагрузку с сопротивлением от 1 до 250 Ом. Наибольшей выходной мощностью 8,81 Вт удалось достичь при сопротивлении нагрузки 2 Ом. Наибольшая

эффективность 60,05% достигается при выходной мощности 3,73 Вт. Исходя из графиков, представленных на рисунке 23, рабочая частота системы без нагрузки составила ~43 кГц, а максимальный уровень выходного напряжения системы, работающей в режиме приема энергии, достигал 7,56 В.

Проведенное моделирование позволило проверить работоспособность предложенного схемотехнического решения и получить теоретическую зависимость эффективности системы от передаваемой мощности при заданных параметрах и ограничениях.

### 3.2 Методика расчета оптимальных параметров системы беспроводной передачи энергии

Правильный выбор параметров системы беспроводной передачи энергии, а прежде всего, катушек резонансных контуров в индуктивных системах передачи энергии является важной задачей, так как в значительной степени влияет на эффективность и передаваемую мощность данных систем. Оптимизация контурной катушки является многокритериальной задачей, ввиду наличия взаимосвязанных параметров, косвенно влияющих друг на друга. Плоскую спиральную контурную катушку (рисунок 24), с точки зрения конструктивных особенностей, возможно охарактеризовать следующими параметрами: количеством витков  $N$ , шагом намотки  $d$ , начальным радиусом намотки  $r$ .

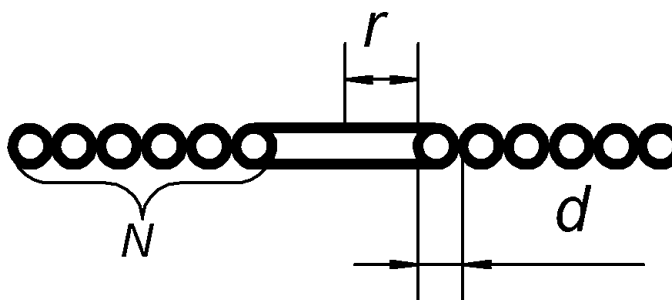


Рисунок 24 – Конструктивные параметры плоской спиралевидной катушки

На эффективность передачи энергии напрямую влияет коэффициент связи между приемной и передающей катушками который рассчитывается исходя из взаимной индукции между катушками (40) [103]:

$$k_{coup} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} = \sqrt{\frac{\Phi_{M1} \Phi_{M2}}{\Phi_{11} \Phi_{22}}}, \quad (40)$$

где  $M_{12}$  – взаимная индуктивность;  $L_1, L_2$  – индуктивность;  $\Phi_{M1}, \Phi_{M2}$  – магнитный поток взаимной индукции;  $\Phi_{11}, \Phi_{22}$  – магнитный потоки самоиндукции, передающей и приемной катушек соответственно.

В БСПЭ при эксплуатации подразумевается наличие воздушного зазора и осевых смещений между катушками непостоянной величины. Из этого следует что коэффициент связи не является постоянной величиной, а исходя из (40) уменьшается с ростом расстояния передачи энергии, так как увеличение расстояния между катушками снижает величину взаимной индукции  $M_{12}$ . Коэффициент связи показывает какая часть магнитного потока, индуцированного одной катушкой, индуцирует ЭДС во второй катушке (41):

$$\varepsilon_2 = -k_{coup} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (41)$$

Таким образом, исходя из (41), для повышения передаваемой мощности и эффективности работы системы в общем случае необходимо увеличивать либо коэффициент связи между катушками, что является возможным только в случае изменения параметров взаимного расположения приемной и передающих катушек, либо за счет увеличения магнитного потока, индуцирующего ЭДС в приемном контуре. В реальных условиях эксплуатации БСПЭ в составе робототехнических систем точное взаимное расположение [104] катушек при передаче энергии и его повторное достижение являются сложной задачей и лишают данный способ передачи энергии преимуществ над контактными методами. Следовательно, выбор оптимального варианта контурной катушки не должен основываться на параметре взаимной индукции и его максимизации.

По закону Био-Савара-Лапласа, величина вектора магнитной индукции, создаваемой некоторым элементарным током в каждой точке пространства, пропорциональна этому току. Магнитный поток пропорционален величине магнитной индукции  $B$ , которая в свою очередь пропорциональна току  $I$  в проводнике. Из этого возможно сделать вывод, что  $\Phi \sim I$ , а коэффициентом пропорциональности является величина индуктивности  $L$  (42):

$$\Phi = LI. \quad (42)$$

Исходя из (42), увеличить магнитный поток, создаваемый передающей катушкой, возможно за счет увеличения тока через нее или увеличения величины ее индуктивности. При этом параметры  $L$  и  $I_m$  катушки в составе LC контура, работающего на резонансной частоте, являются связанными соотношением (43):

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{(2\pi fL)^2 + R_{con}^2}}, \quad (43)$$

где  $U_m$  – амплитуда переменного напряжения, подводимого к резонансному контуру,  $f$  – рабочая частота контурной катушки,  $R_{con}$  – активное сопротивление проводника катушки.

Изменение количества витков катушки приводит к изменению ее индуктивности, а, следовательно, ее реактивного сопротивления. Также с количеством витков изменяется длина проводника и его активное сопротивление. Наличие таких взаимосвязей требует расчета всех параметров катушки в зависимости от количества витков. Для этого необходимо выразить все расчетные соотношения через геометрические параметры катушки.

Электрическими параметрами катушки являются индуктивность и величина активного сопротивления. Величина активного сопротивления однородного проводника с постоянным сечением, без учета влияния поверхностного эффекта вычисляется по формуле (44):

$$R_{con} = \frac{\rho l_{con}}{S}, \quad (44)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника;  $l_{con}$  – длина проводника;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

Для последующих расчетов можно принимать сопротивление проводника катушки круглого сечения, рассчитанное по формуле (43) в том случае если  $D/\delta < 2$  [105], где  $D$  – диаметр провода,  $\delta$  – толщина слоя проводимости. Если неравенство не соблюдается необходимо воспользоваться формулами, предложенными в [105, 106] или иными, для расчета сопротивления проводника с учетом поверхностного эффекта.

Длина проводника спиральной плоской катушки в зависимости от количества витков рассчитывается исходя из формулы (45):

$$l_{con} = 2\pi(Nr + d(0.5N^2 - 0.5N)). \quad (45)$$

Используя (44), (45), возможно вычислить активное сопротивление проводника спиральной катушки.

Расчет величины индуктивности плоской спиральной катушки с достаточно высокой точностью возможно выполнить по эмпирической формуле Вилера [107, 108], приведенной к метрическим единицам и обозначенным выше геометрическим параметрам катушки (46):

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1000}{2.54} \frac{(2r+Nd)^2 N^2}{32r+60Nd}, \quad (46)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Используя амплитудное значение тока  $I_m$  (29), рассчитываются потери на активном сопротивлении контурной катушки -  $P_d$  (47):

$$P_d = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 R_{con}. \quad (47)$$

Для того чтобы проводить сравнение катушек и выбрать оптимальное количество витков, необходимо ввести параметр, который возможно соотнести с параметром потерь  $P_d$  и который характеризует количество энергии магнитного поля, запасаемой в контурной катушке за единицу времени (48):

$$P_m = 2Lf \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2. \quad (48)$$

Более наглядно показать разницу между контурными катушками с разным количеством витков позволит параметр  $\gamma$ , который является отношением энергии магнитного поля, запасаемой в контурной катушке за единицу времени к потерям в ней:

$$\gamma = \frac{P_m}{P_d}. \quad (49)$$

Значения  $\gamma$  менее 1 показывают то, что потери в катушке больше, чем энергия магнитного поля, запасаемая в нем за единицу времени. С увеличением количества витков при неизменном напряжении, приложенном к параллельному LC – контуру, потери в катушке снижаются, так как увеличивается индуктивность и реактивное сопротивление, следовательно, уменьшается величина реактивного тока. При этом рост  $\gamma$  обусловлен тем, что с увеличением количества витков прирост реактивного сопротивления больше, чем прирост активного.

Выбор количества витков подразумевает расчет в табличной форме, так как при таком представлении данных полученные значения параметров катушек наиболее удобно сравнивать между собой. Исходными параметрами для расчета являются:  $U_m$  – амплитуда переменного напряжения подводимого к резонансному контуру,  $f$  – рабочая частота контурной катушки,  $r$  – начальный радиус намотки,  $d$  – шаг намотки катушки,  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника,  $S$  – сечение проводника,  $j$  – допустимая плотность тока в проводнике.

В данной работе подробно рассмотрен вариант выбора оптимального количества витков катушки  $N^*$  при заданном начальном радиусе и шаге намотки. Однако представленные выше формулы можно использовать для подбора оптимальных вариантов катушки при изменяемом шаге или начальном радиусе намотки, или изменяемой рабочей частоте системы. В качестве ограничивающего условия в представленном варианте выбора оптимального количества витков было задано допустимое значение тока в проводнике  $I_m^p: \mathbf{N} = \{N | (N_1 \leq N \leq N_2) \wedge (I \leq I_m^p)\} \in \mathbf{R}^n$ . Данный параметр



рассчитывается по допустимой плотности тока  $j$  и заданному сечению проводника  $S$ :

$$I_m^p = j^p S. \quad (50)$$

Целевая функция представлена действующим током в проводнике катушки:  $I: N \rightarrow R^n$ . Таким образом, для обеспечения максимальной передаваемой мощности:  $I(N) \xrightarrow{N \in N} \max$ .

Если подбор параметров катушки направлен на минимизацию массогабаритных параметров, то ограничения накладываются на размеры катушки или емкость конденсатора резонансного контура. При использовании в передающей части БСПЭ автогенератора, частото задающим контуром которого является передающий LC контур, интерес может представлять подбор оптимальной катушки с условием фиксированной емкости конденсатора резонансного контура и изменяемой рабочей частотой, которая зависит от индуктивности контурной катушки.

Для выбора оптимального количества витков контурной катушки при  $f = const$  задается диапазон значений витков  $[N_1, N_2]$ . Для каждого значения  $N$  при помощи представленных формул рассчитываются геометрические ( $l_{con}$ ) и электрические ( $R_{con}, L$ ) параметры катушки. Затем определяется действующее значение тока в проводнике  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ , в зависимости от которого выбирается оптимальное количество витков  $N^*$ , такое что  $I(N^*) = \max I(N)$ .

При  $f = var$  сначала для каждого  $N$  рассчитываются геометрические и электрические параметры катушки, затем определяется рабочая частота по формуле:

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (51)$$

Далее аналогичным способом, как при  $f = const$  определяются  $I$  и  $N^*$ . При заданных ограничениях в размерах катушки ее внешний диаметр рассчитывается по формуле  $D = 2(r + Nd)$ , а количество витков выбирается такое, чтобы  $D_{max} \leq D$ .

В таблице 3 представлены исходные параметры для расчета и выбора оптимального количества витков приемной и передающих катушек БСПЭ малой мощности использование которой предполагается в задачах энергетического обмена между роботами группы.

Таблица 3 – Исходные параметры для расчета

Параметр	$U_m$	$r$	$d$	$\rho$	$S$	$j^p$
Значение	26.37 V	19 mm	0.74 mm	$0.0171 \frac{\text{Om}\cdot\text{mm}^2}{\text{m}}$	$0.374 \text{ mm}^2$	$6.5 \text{ A/mm}^2$

Для предложенного схемотехнического решения, в котором система построена на основе автогенератора, частотоподающим контуром которого является передающий LC контур, более удобным представляется подбор оптимальной катушки с условием фиксированной емкости конденсатора резонансного контура и изменяемой рабочей частотой, которая зависит от индуктивности контурной катушки. В качестве ограничивающего условия было задано допустимое значение тока в проводнике.

В таблице 4 приведены результаты расчета параметров для значения емкости конденсатора резонансного контура  $C = 0.47 \mu\text{F}$ .

Таблица 4 – Результаты расчета при  $f = \text{var}, C = \text{const}$

N	$f$ , кГц	$I$ , А	$P_d$ , Вт	$P_m$ , Вт	$\gamma$	N	$f$ , кГц	$I$ , А	$P_d$ , Вт	$P_m$ , Вт	$\gamma$
1	771.4	42.4	9.8	252	25.6	11	76.3	4.2	1.2	24.9	19.6
2	391.1	21.5	5.1	127.8	24.7	12	70.2	3.8	1.1	22.9	19.2
3	263.9	14.5	3.5	86.2	24.0	13	65.0	3.5	1.1	21.2	18.9
4	200.1	11.0	2.8	65.4	23.3	14	60.6	3.3	1	19.8	18.5
5	161.6	8.9	2.3	52.8	22.6	15	56.7	3.1	1	18.5	18.2
6	135.8	7.4	2.0	44.4	22.0	16	53.2	2.9	0.9	17.4	17.9
7	117.3	6.4	1.7	38.3	21.5	17	50.2	2.7	0.9	16.4	17.6
8	103.3	5.6	1.6	33.7	21.0	18	47.5	2.6	0.8	15.5	17.3

9	92.4	5	1.4	30.1	20.5	19	45.0	2.5	0.8	14.7	17.0
10	83.5	4.6	1.3	27.3	20.1	20	42.8	2.3	0.8	14	16.8

Исходя из (50), для заданных исходных параметров допустимое значение тока проводника  $I_m^p$  составляет 2.43 А. Следовательно, возможными вариантами являются катушки с количеством витков 19 и 20. Следуя критерию максимизации магнитного потока, создаваемого передающей катушкой, наилучшим вариантом является катушка с 19 витками. Контурная катушка с 19 витками имеет действующее значение тока 2.5 А, что выше, чем рассчитанное значение  $I_m^p$  на 2,8%, поэтому допустимо использовать данный вариант. С учетом заданного ограничения по току, оптимальным вариантом является катушка с 19 витками.

Более подробно методика расчета оптимального количества витков приемной и передающей катушек БСПЭ с параллельным резонансным контуром представлена [109].

### 3.3 Тестирование и систематизация эксплуатационных ограничений разработанной системы

Катушки резонансного контура имеют 19 витков с отводом от середины и намотаны проводом диаметром 0,69 мм. Пользуясь методикой, предложенной в [105], было рассчитано сопротивление проводника катушки с учетом поверхностного эффекта. На частоте работы системы 45 кГц явление поверхностного эффекта увеличивает сопротивление проводника катушки из 19 витков диаметром провода 0,69 мм (по меди) на 3,12%, что является не существенным для прототипа, изготовленного для апробации предложенной структуры и схемотехнического решения. В качестве конденсатора резонансного контура используются пленочные МРР конденсаторы с низким значением ESR.

При проведении первого эксперимента, в резонансном контуре БСПЭ с фиксированной емкостью конденсатора  $C=0.47 \mu\text{F}$  была получена зависимость эффективности от передаваемой мощности (рисунок 25).

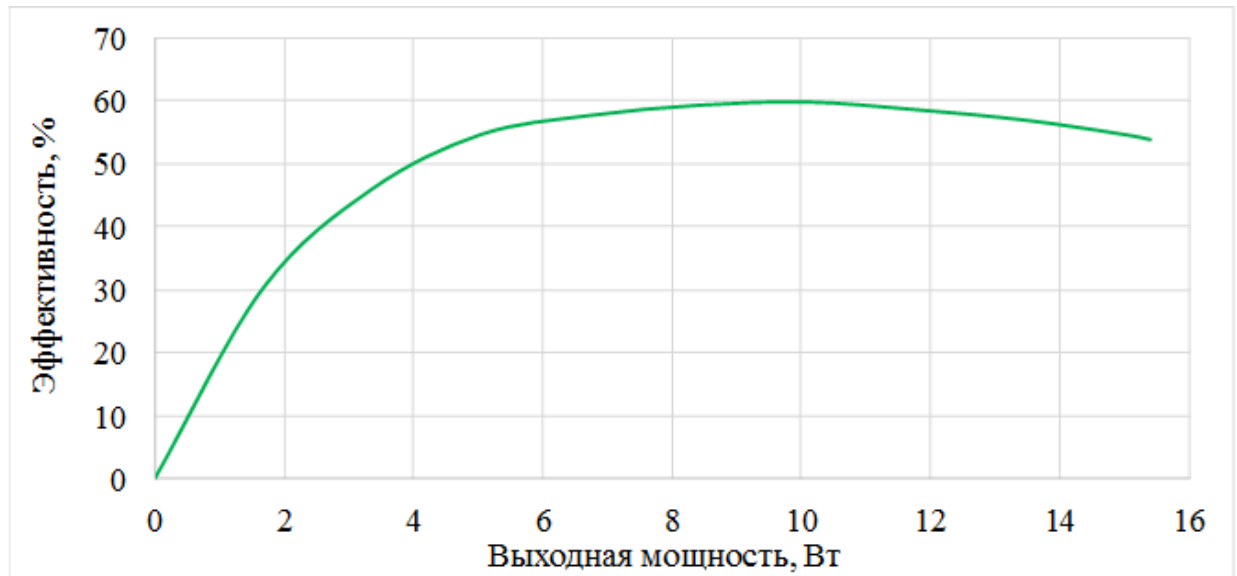


Рисунок 25 – Зависимость эффективности системы от передаваемой мощности.

Из графика на рисунке 25 следует, что максимальная эффективность системы достигает 59.91% при передаваемой мощности 10.09 W. Максимальная передаваемая мощность 15.4 W.

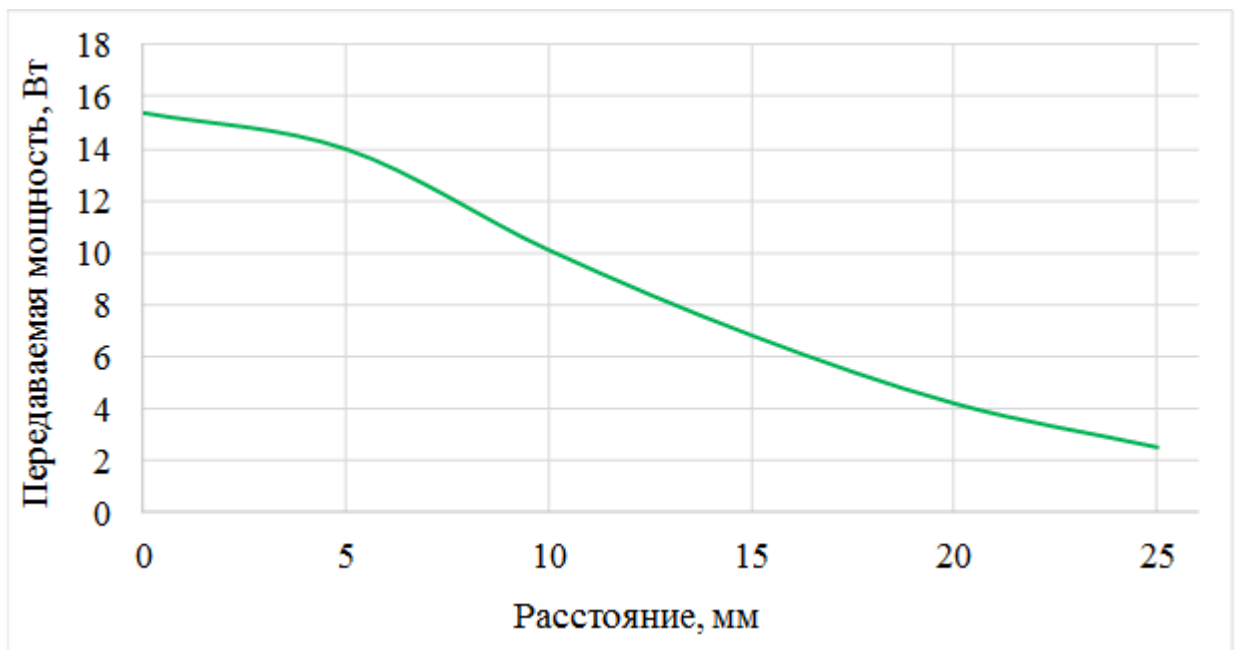


Рисунок 26 – Зависимость максимальной передаваемой мощности системы от расстояния передачи энергии.

Во втором эксперименте проводилось измерение максимальной передаваемой мощности БСПЭ при изменяемом расстоянии между приемной и передающей катушками. Полученная зависимость максимальной передаваемой мощности системы от расстояния передачи энергии представлена на рисунке 26.

При увеличении расстояния между катушками снижается величина взаимной индукции, как следствие снижается передаваемая мощность. Кривая имеет нисходящий характер, наибольшее значение передаваемой мощности достигается при непосредственной близости приемной и передающих частей системы. При расстоянии 25 мм передаваемая мощность уменьшается в 6,1 раз и составляет 2,5 Вт.

На рисунке 27 представлена зависимость эффективности работы системы БСПЭ от расстояния между приемной и передающей катушками при максимальной передаваемой мощности для заданного расстояния передачи энергии.

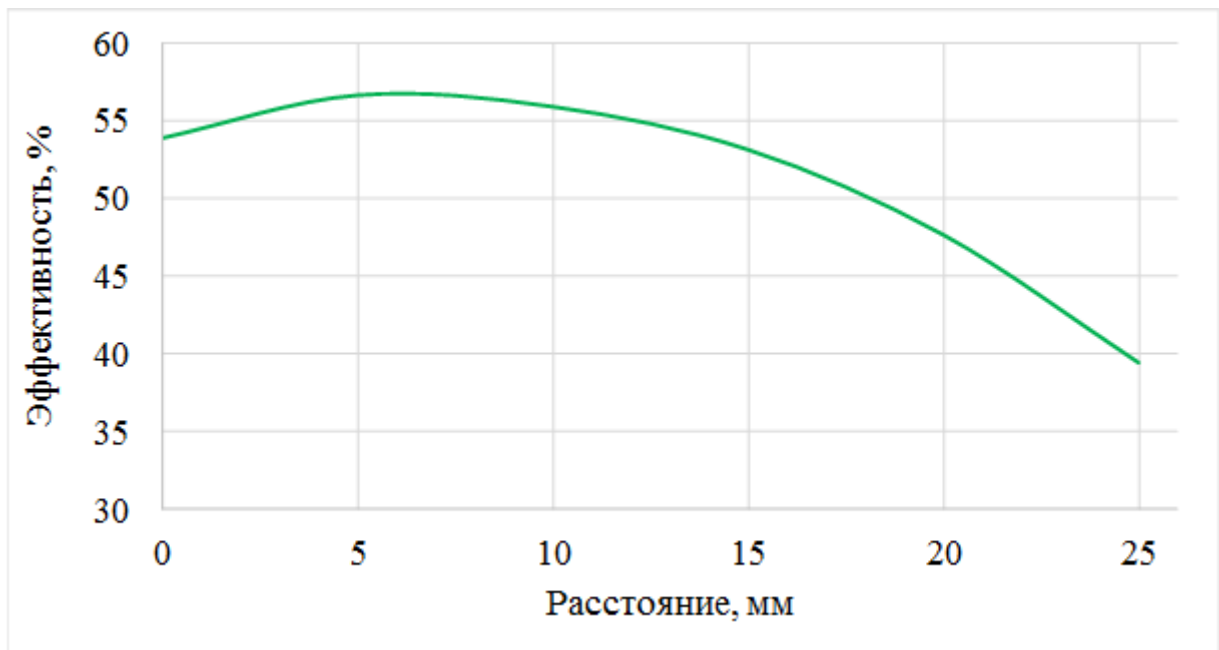


Рисунок 27 – Зависимость эффективности системы от расстояния передачи энергии.

Из графика на рисунке 27 следует, что максимальное значение эффективности при максимальной передаваемой мощности для заданного

расстояния достигает 56.58 % при расстоянии между приемной и передающей частями 5 мм, передаваемая мощность при этом составила 14,01 Вт. Данный факт обусловлен лучшей, по сравнению с другими случаями, согласованностью сопротивления нагрузки с БСПЭ при данной передаваемой мощности и расстоянии.

Преимуществами разработанной двунаправленной БСПЭ является интегрированная система управления режимом передачи энергии и силовая часть системы, не требующая специализированной системы управления так как выполнена в виде резонансного автогенератора. Применение резонансного автогенератора и идентичных контуров в приемной и передающей частях позволяет системе работать всегда в резонансном режиме и не требует подстройки рабочей частоты, независимо от расстояния и смещений между катушками, что позволяет повысить эффективность и передаваемую мощность системы. Данная особенность позволяет использовать систему при низкой точности совмещения приемной и передающей катушек, что актуально при использовании в робототехнике. Одним из свойств представленной структуры и схемотехнического решения является возможность получать напряжение на выходе системы, работающей в режиме приема энергии равным и выше напряжения источника питания системы работающей в режиме передачи энергии. Следовательно, систему возможно использовать для перераспределения энергетических ресурсов между наземными роботами, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с одинаковым и разным рабочим напряжением.

Из рассмотренных в анализе [110] исследовательских работ возможно выделить некоторые взаимосвязи между эффективностью работы системы, передаваемой мощностью и геометрическим расположением приемной и передающих катушек. Эксплуатация БСПЭ в составе наземных роботов требует анализа эксплуатационных ограничений БСПЭ и их систематизации для последующей разработки алгоритмов движения, позиционирования и управления системой заряда аккумулятора. Для систематизации

эксплуатационных ограничений БСПЭ, связанных с относительным расположением приемной и передающей частей системы необходимо провести ряд экспериментов, которые позволят получить характеристики системы для различных условий передачи энергии.

Исследование зависимостей характеристик системы проведено на реальном прототипе. Для получения зависимостей эффективности и передаваемой мощности от расстояния и смещения между приемной и передающей катушками были проведены два вида экспериментов.

В первом виде экспериментов был получен ряд зависимостей передаваемой мощности и эффективности системы для 6 фиксированных расстояний передачи энергии в диапазоне от непосредственной близости катушек друг к другу до 25 мм. Выбор верхнего значения диапазона обусловлен значительным падением ЭДС в приемной катушке и отсутствием работоспособности системы при расстояниях, превышающих данное. При проведении эксперимента передающая часть питалась от стабилизированного источника с напряжением 8,43 В. На выходе приемной части системы выходным DC-DC повышающим преобразователем напряжение было установлено на уровне 8,43 В на холостом ходу. Нагрузкой являлся электронный управляемый балласт со стабилизацией тока. График зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных расстояний -  $L$  передачи энергии представлен на рисунке 28.

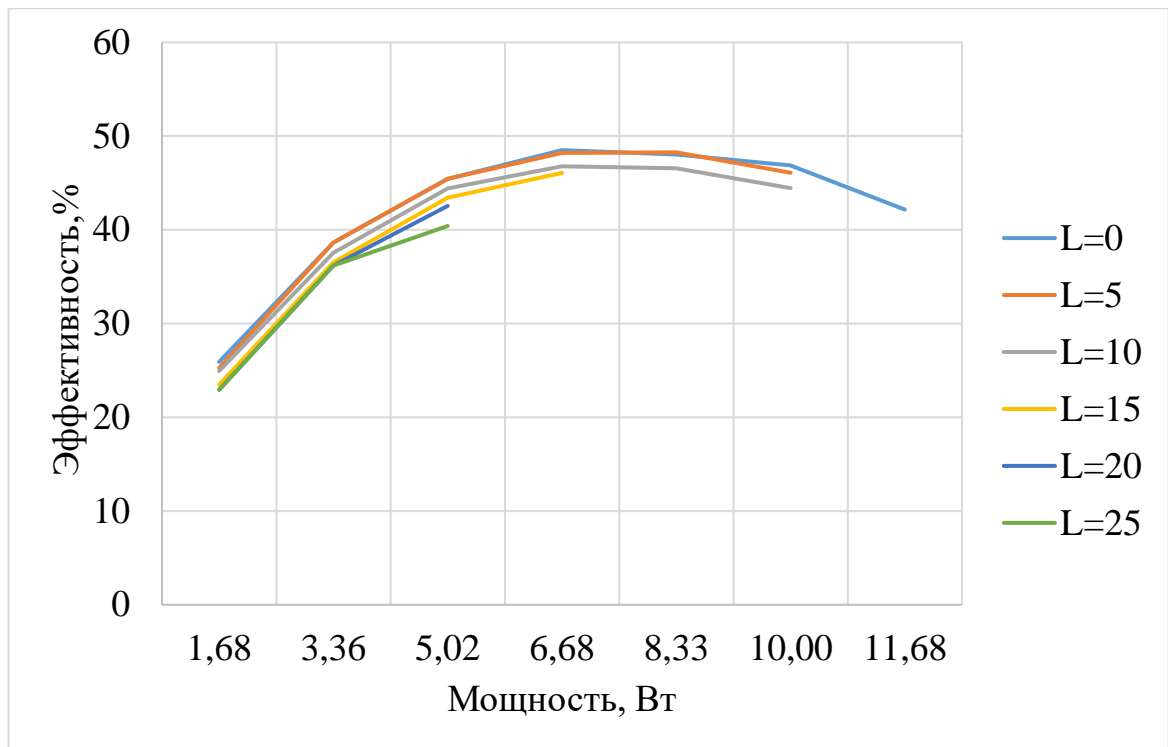


Рисунок 28 – Зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных расстояний между катушками

Кривые на рисунке 28 имеют близкую форму, при  $L=0$  и  $L=5$  мм практически совпадают. Увеличение расстояния между приемной и передающей катушками ведет к снижению максимальной мощности нагрузки. При изменении расстояния между катушками до 25 мм максимальная передаваемая мощность снижается в  $\sim 2,8$  раз по сравнению с минимальным расстоянием между катушками.

Второй ряд экспериментов предполагал получение зависимостей передаваемой мощности и эффективности системы при тех же условиях что и в первом эксперименте. Расстояние между катушками было минимальным ( $L=0$ ) при этом изменялось осевое смещение между катушками –  $H$  в диапазоне до 30 мм. Зависимости были получены для 5 осевых смещений и представлены на рисунке 29.



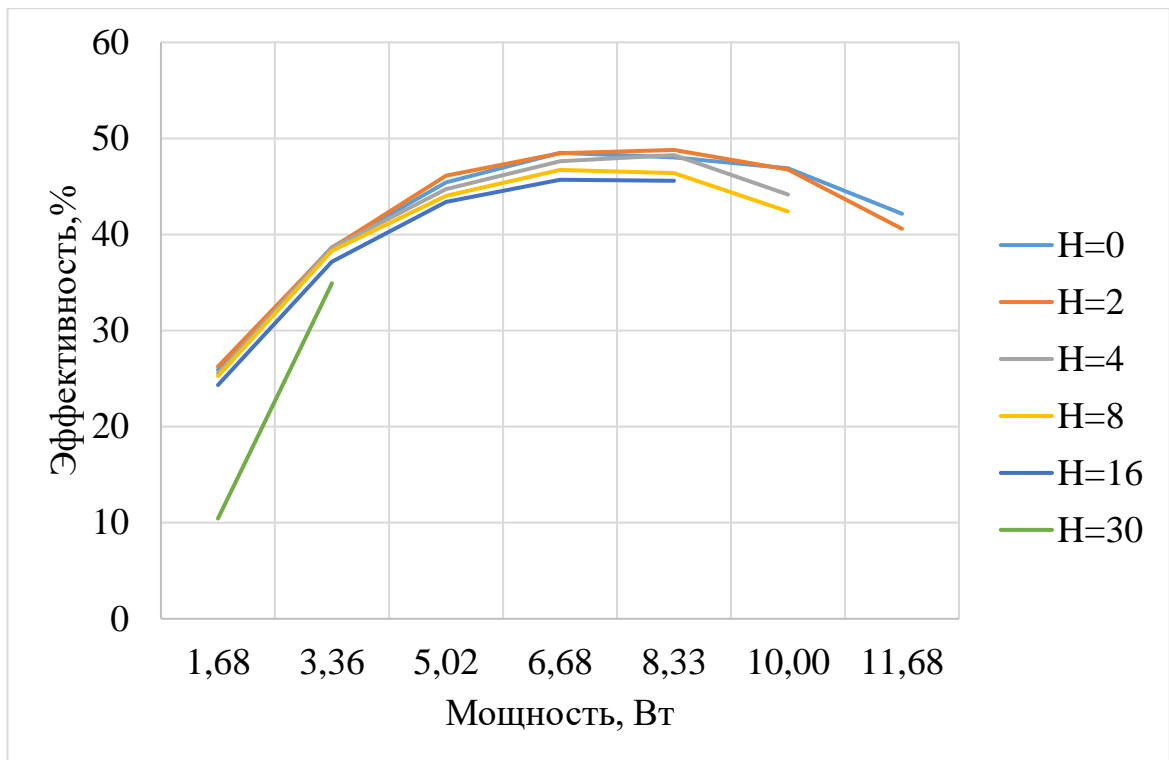


Рисунок 29 – Зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных смещений между катушками

При сравнении графиков на рисунках 28 и 29 можно сделать вывод, что осевые смещения между катушками влияют на передаваемую мощность и эффективность системы в меньшей степени чем расстояние между катушками. При осевом смещении между катушками равным приблизительно половине диаметра катушек максимальная передаваемая мощность падает в  $\sim 3.5$  раза.

Полученные из экспериментов данные в их первоначальном виде не дают возможности вычислять эффективность системы в зависимости от расстояния или смещений между катушками и передаваемой мощности для БСПЭ с другим размером контурных катушек. Для вывода уравнений зависимостей эффективности работы системы и передаваемой мощности от расстояния и смещений между катушками для БСПЭ необходимо выразить полученные результаты в относительных величинах и свести в таблицы.

Перевод экспериментальных данных в относительные единицы проведен следующим образом. Мощность нагрузки  $P_n$  соответствующая



Приведенные в таблице данные с помощью пакета программ для решения задач вычислений были аппроксимированы степенным полиномом третьего порядка. К полученному уравнению поверхности добавлены ограничения на область допустимых значений переменных и получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} z = 0.1498 + 0.04462x + 3.14y - 2.147x^2 + 0.3625xy - 3.566y^2 + \\ \quad + 3.982x^3 - 0.02121x^2y - 0.5439xy^2 + 1.15y^3 \\ y \leq 0.3906x^2 - 1.738x + 1.016 \end{cases}, (55)$$

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

Визуальное представление поверхности, построенной на основе системы уравнений (55) изображено на рисунке 30.

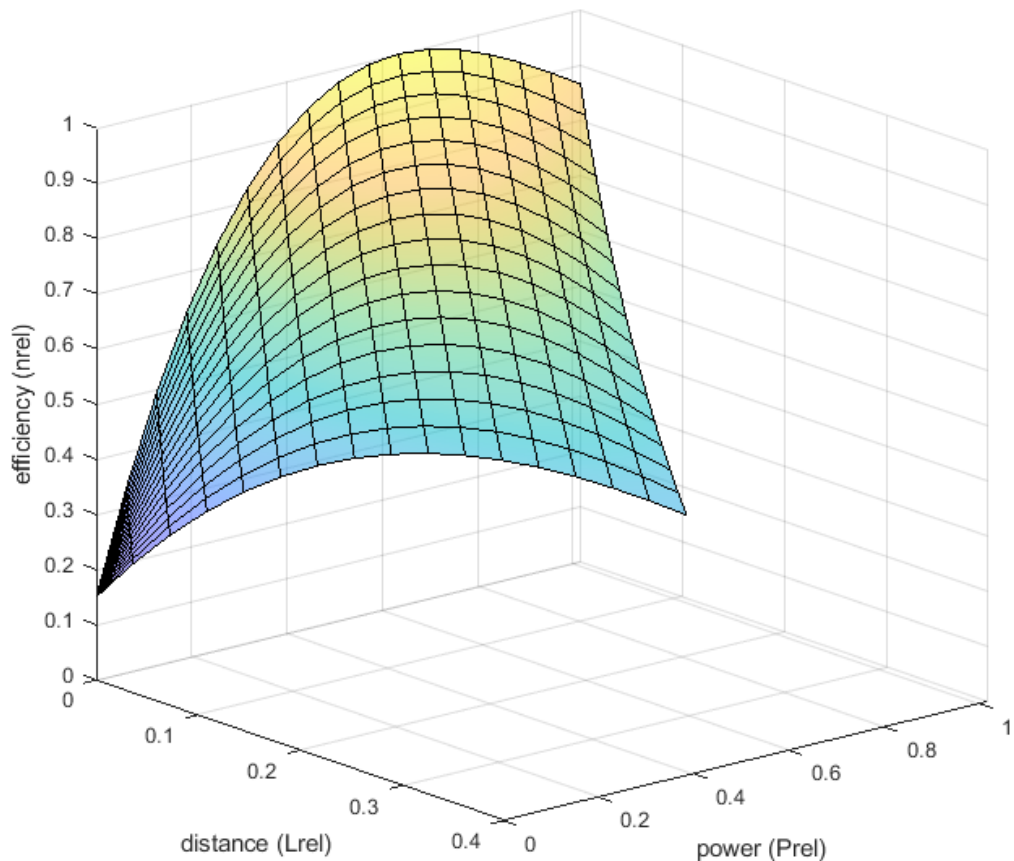


Рисунок 30 – Зависимость эффективности работы системы от мощности нагрузки и расстояния между катушками

В соответствии с формулами (51), (52) и (54) исходные данные экспериментов при передаче энергии со смещением между катушками переведены в относительные единицы и представлены в табличном виде:

Таблица 6 – Зависимость эффективности и передаваемой мощности от осевого смещения между катушками в относительных единицах

$H_{rel} = 0$		$H_{rel} = 0,03$		$H_{rel} = 0,06$		$H_{rel} = 0,13$		$H_{rel} = 0,26$		$H_{rel} = 0,48$	
$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$
0,14	0,53	0,14	0,54	0,14	0,53	0,14	0,52	0,14	0,50	0,14	0,22
0,29	0,80	0,29	0,80	0,29	0,80	0,29	0,79	0,29	0,77	0,29	0,72
0,43	0,94	0,43	0,95	0,43	0,92	0,43	0,91	0,43	0,89		
0,57	1,00	0,57	1,00	0,57	0,98	0,57	0,96	0,57	0,94		
0,71	0,99	0,71	1,01	0,71	1,00	0,71	0,96	0,71	0,94		
0,86	0,97	0,86	0,96	0,86	0,91	0,86	0,87				
1,00	0,87	1,00	0,84								

Аналогично случаю для расстояния между катушками, проведена полиномиальная аппроксимация поверхности, полученной на основе данных при осевом смещении катушек. В результате полученный полином второго порядка дополнен ограничениями на область допустимых значений переменных и выведена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} z = 0.2402 - 0.1936x + 2.322y - 0.4821x^2 + 0.1042xy - 1.774y^2 \\ y \leq -1.342x^2 - 0.7919x + 1.03 \end{cases}, \quad (56)$$

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

Визуальное представление поверхности, построенной на основе системы уравнений (56) изображено на рисунке 31.

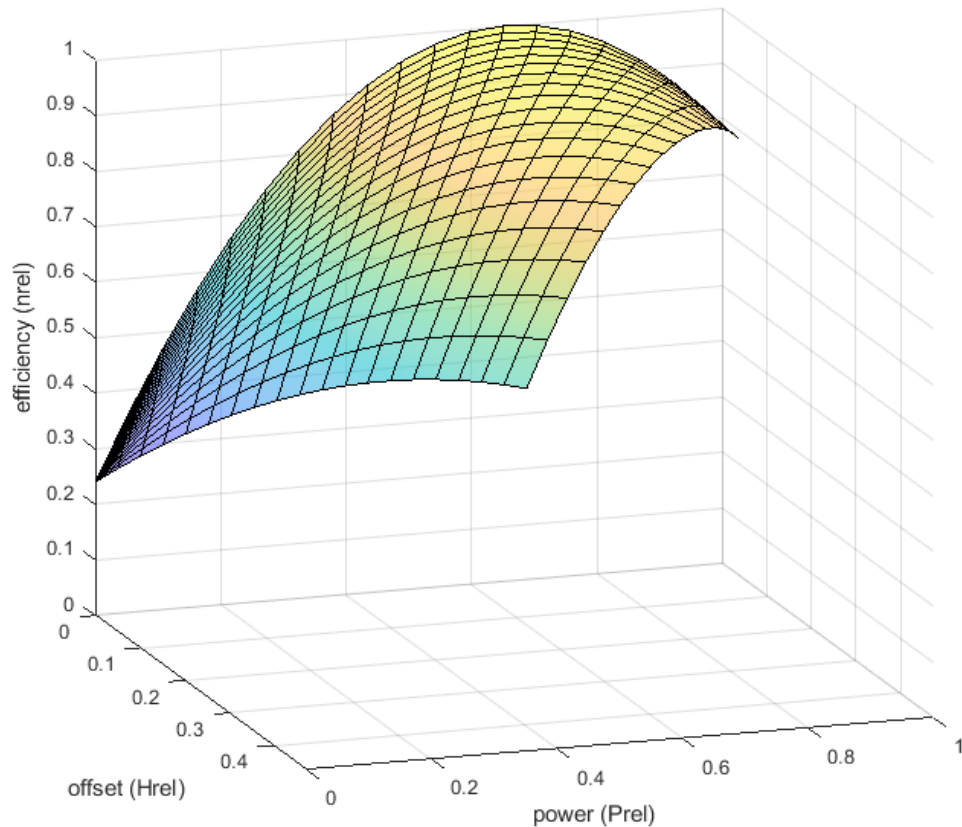


Рисунок 31 – Зависимость эффективности работы системы от мощности нагрузки и смещения между катушками

Сравнение поверхностей, полученных на основе приведенных в относительных единицах данных экспериментов, наглядно показывает большую зависимость эффективности и передаваемой мощности от расстояния передачи энергии чем от осевого смещения между катушками.

Выведенные системы уравнений позволяют вычислять эффективность передачи энергии в зависимости от мощности нагрузки и расстояния или смещения между катушками для БСПЭ, основанных на индуктивно связанных резонансных контурах с плоскими спиралевидными катушками. Использование алгоритмов, основанных на представленных системах уравнений при применении БСПЭ в составе наземных роботов позволит выявить различного рода помехи при передаче энергии. Если расчетное значение эффективности системы ниже реально измеренной, то можно косвенно сделать вывод либо об ошибках в позиционировании роботов, либо о наличии посторонних предметов между приемной и передающей

катушками. Так же возможно проводить предварительную оценку целесообразности передачи энергии между роботами или зарядной станцией и роботом при заданном взаимном положении и принимать решение производить передачу энергии или продолжить позиционирование.

### **3.4 Выводы по третьей главе**

В третьей главе представлено разработанное аппаратное и алгоритмическое обеспечение, реализующее обмен энергетическими ресурсами между роботами. Структура и схемотехнические решения разработанной двунаправленной БСПЭ отличаются применением резонансного автогенератора частото задающим контуром которого является передающий резонансный контур, а также отсутствием отдельного синхронного или несинхронного выпрямителя в принципиальной схеме. Использование резонансного автогенератора, частото задающим контуром которого является передающий контур, позволяет поддерживать резонанс в передающем контуре при изменении индуктивности передающей катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. Приемная и передающая части двунаправленной БСПЭ имеют идентичные резонансные контуры, что дает возможность избавиться от дополнительных систем подстройки частоты приемного контура при изменении взаимного расположения катушек. Перечисленные особенности способствуют достижению высокой эффективности и передаваемой мощности при значительных смещениях между приемной и передающей частями системы.

Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять управление и мониторинг параметров двунаправленной БСПЭ. Использование БСПЭ рассматривается в составе распределенной системы управления наземного робота. Предложенные алгоритмы реализуют функции защиты, которые учитывают специфику разработанных схемотехнических решений.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ РОБОТОВ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**

В четвертой главе обсуждаются результаты экспериментов для оценки разработанного математического, алгоритмического и аппаратного обеспечения для управления группой наземных роботов, подтверждающие его работоспособность и эффективность. Оптимизируемым параметром, как обозначено ранее в диссертационной работе, является общее время выполнения целевых задач группой роботов. При оценке эффективности разработанных решений посредством проведенных экспериментов удалось сравнить разницу во времени выполнения задач группой, работающей без перераспределения энергетических ресурсов, и группой, функционирующей на основе предложенного обеспечения. Для получения статистически значимых результатов апробация предложенного обеспечения проведена посредством имитационного моделирования в среде Gazebo. В качестве поверхности для движения роботов использовалась модель карты высот, созданная из изображения в оттенках серого. Исходной моделью для роботов являлась модификация робототехнической платформы Pioneer 3-AT на которую были добавлены Aruco-маркеры и камеры технического зрения. Также представлен вычислительный эксперимент, в котором проведено сравнение разницы в максимальном радиусе работы групп функционирующих с перераспределением ресурсов и без него для различных затрат энергии на выполнение задачи.

### **4.1 Описание программной системы управления группой наземных роботов**

Разработанные модель и алгоритмы были использованы для создания программного комплекса, 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 32. Система реализована в виде соответствующих исполняемых файлов с использованием программных средств и среды разработки Python 2.7.

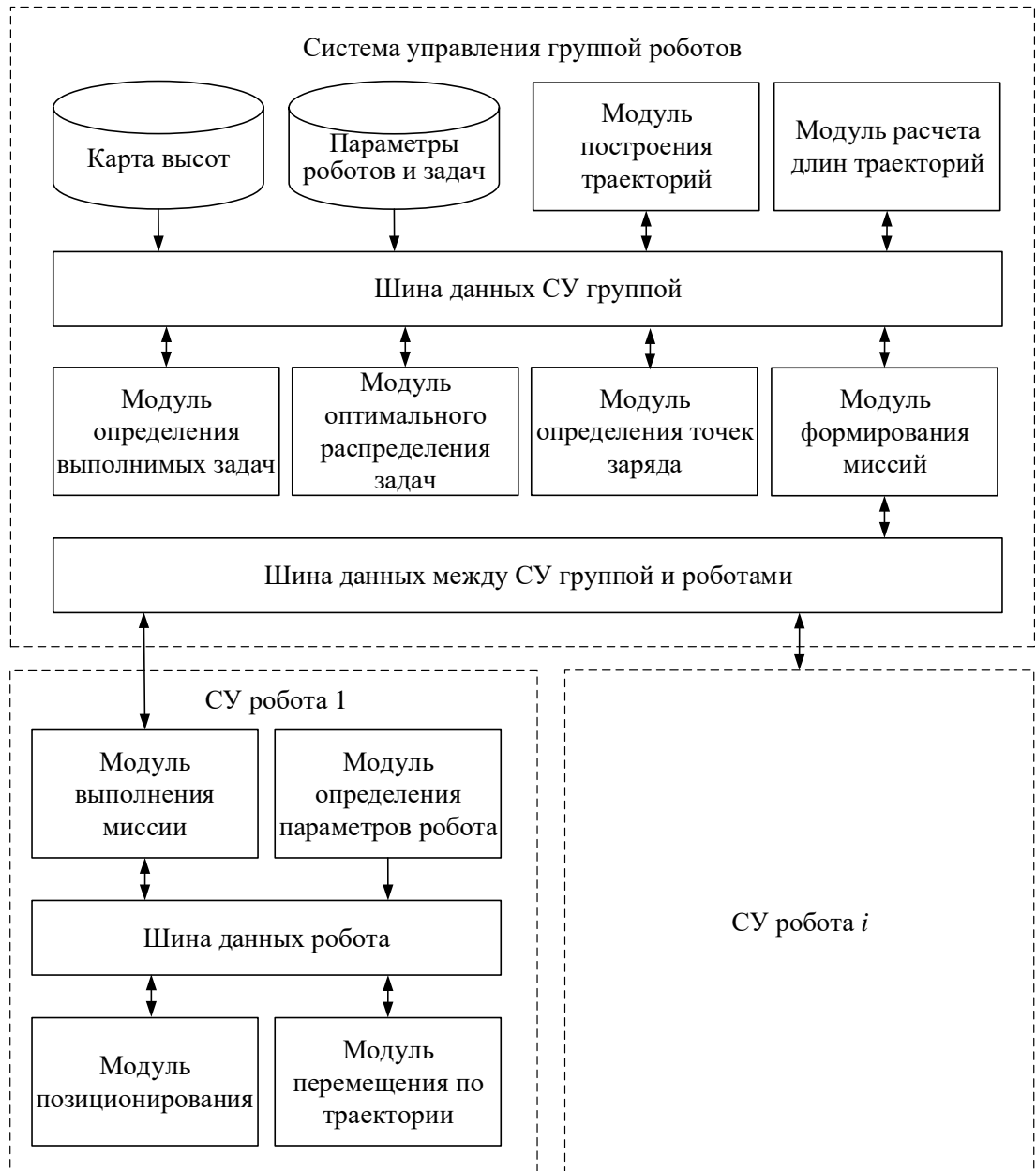


Рисунок 32 – Архитектура программной системы управления группой наземных роботов

Шина данных системы управления (СУ) группой представлена набором топиков (Topics) ROS. ROS-граф системы управления группой роботов представлен на рисунке 33:



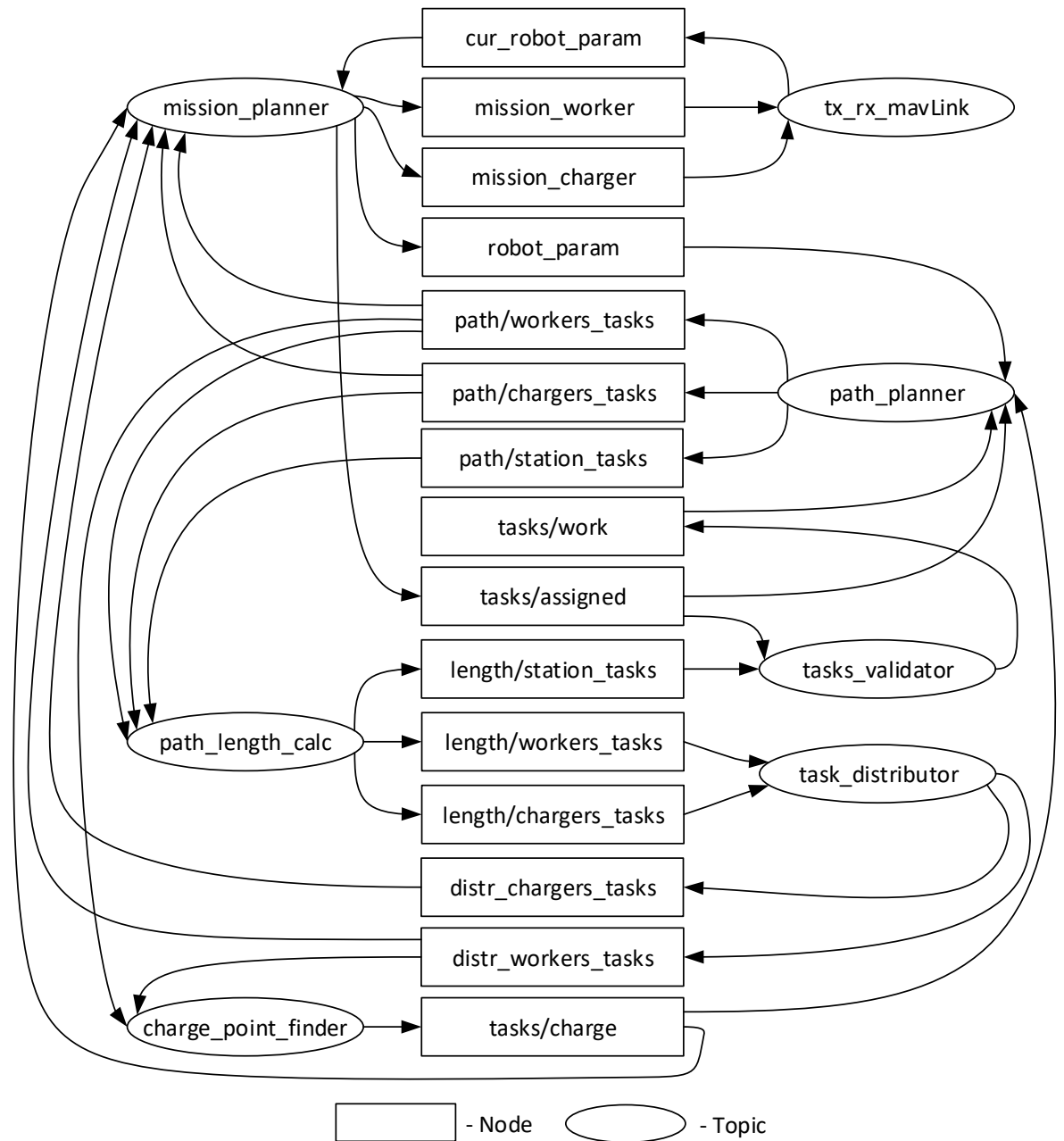


Рисунок 33 – ROS-граф системы управления группой роботов

Шина данных между СУ группой и роботами реализуется нодой (Node) tx\_rx\_mavlink, которая выполняет формирование пакетов данных для передачи роботам с использованием протокола MAVLink. Нода tx\_rx\_mavlink реализована с использованием программного пакета mavros и также осуществляет преобразование принятых от роботов пакетов данных и их передачу ноде mission\_planner. Шина данных каждого робота группы

реализована аналогично с использованием топиков ROS. ROS-граф системы управления робота n (префикс ri) представлен на рисунке 34.

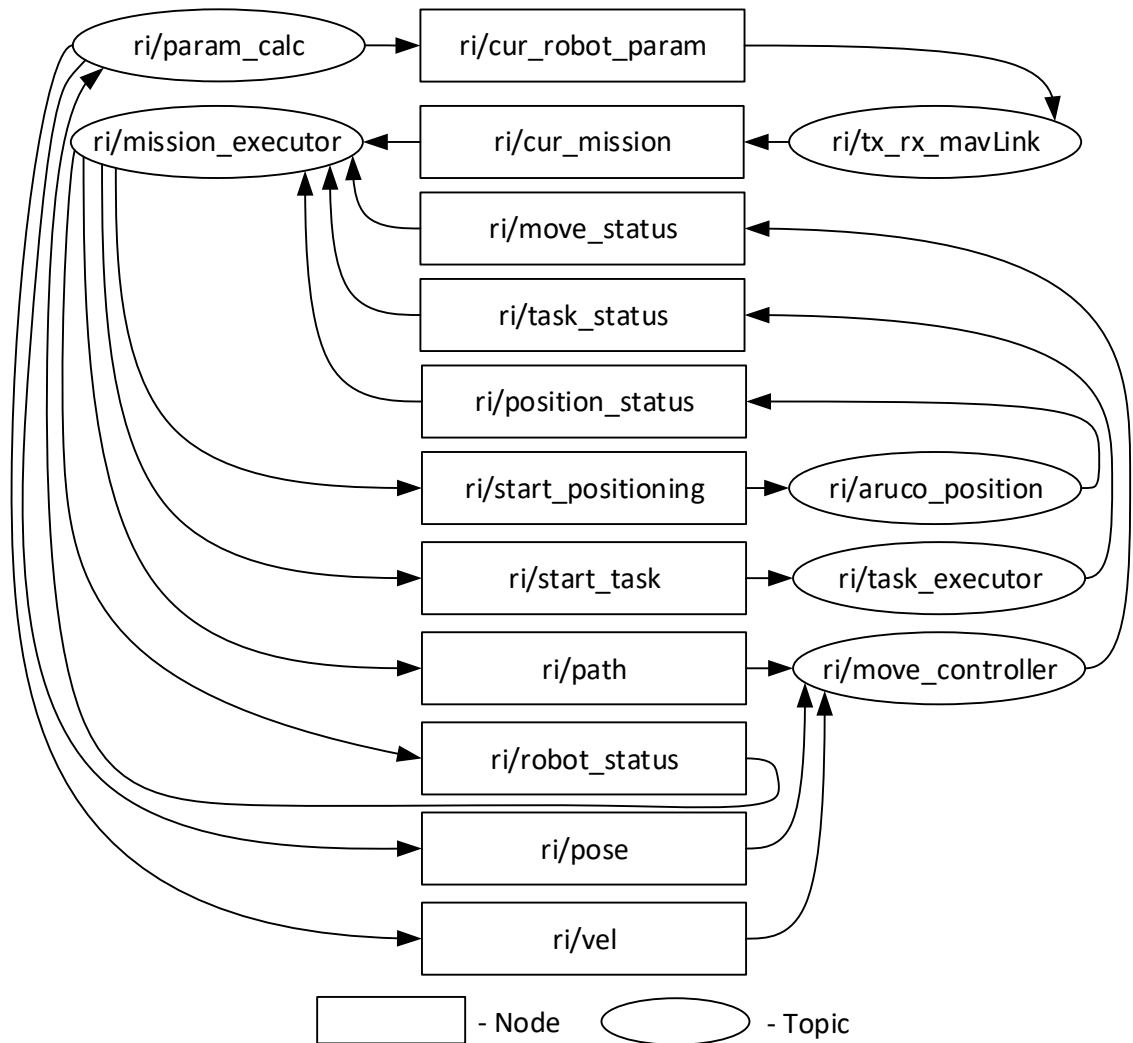


Рисунок 34 – ROS-граф системы управления роботом

Исходными данными для работы программного комплекса являются карта высот рабочего пространства `map.png` и конфигурационный файл `config.py`, в котором содержатся параметры, представленные в таблице A1 (см. приложение A). В процессе функционирования модулей программного комплекса создаются параметры, представленные в таблице A2 (см. приложение A)

Глобальная задача функционирования программной системы соответствует, поставленной задаче диссертационного исследования (см. раздел 2.1), и может быть разделена на ряд операций.

Модуль построения траекторий функционирует следующим образом. Если входными параметрами модуля являются массивы ASSIGNED\_TASKS и CHARGING\_STATION, то создается массив tasks\_charge\_path элементами которого являются траектории от зарядной станции до каждой задачи. Если входными параметрами модуля являются массивы workers\_tasks и robots\_workers, то создается массив workers\_path элементами которого являются траектории от роботов-рабочих до каждой задачи. Если входными параметрами модуля являются массивы chargers\_tasks, robots\_chargers и CHARGING\_STATION то создается массив chargers\_path элементами которого являются траектории от роботов-заряжающих до каждой задачи пополнения энергетических ресурсов. Также создается массив chargers\_charge\_path элементами которого являются траектории от координат задач массива chargers\_tasks до координат зарядной станции. При создании массивов workers\_path и chargers\_path используются только те роботы, которые имеют status = 0

Модуль расчета длин траекторий функционирует следующим образом. Если входным параметром является массив tasks\_charge\_path то создается массив tasks\_charge\_length элементами которого являются длины траекторий от зарядной станции до каждой задачи. Аналогично с массивами workers\_path и chargers\_path, в результате функционирования модуля создаются массивы workers\_path\_length и chargers\_path\_length, которые содержат длины траекторий роботов-рабочих и роботов-заряжающих

Модуль определения выполнимости задач в программном комплексе осуществляет проверку только достижимости задач и функционирует следующим образом. Входным параметром модуля является массив tasks\_charge\_length, который формируется модулем расчета длин траекторий. Если длина траектории больше допустимой, то соответствующий элемент

массива `ASSIGNED_TASKS` не будет добавлен в массив `workers_tasks`.  
 Диаграмма потоков данных операции определения выполнимых задач представлена на рисунке 33:

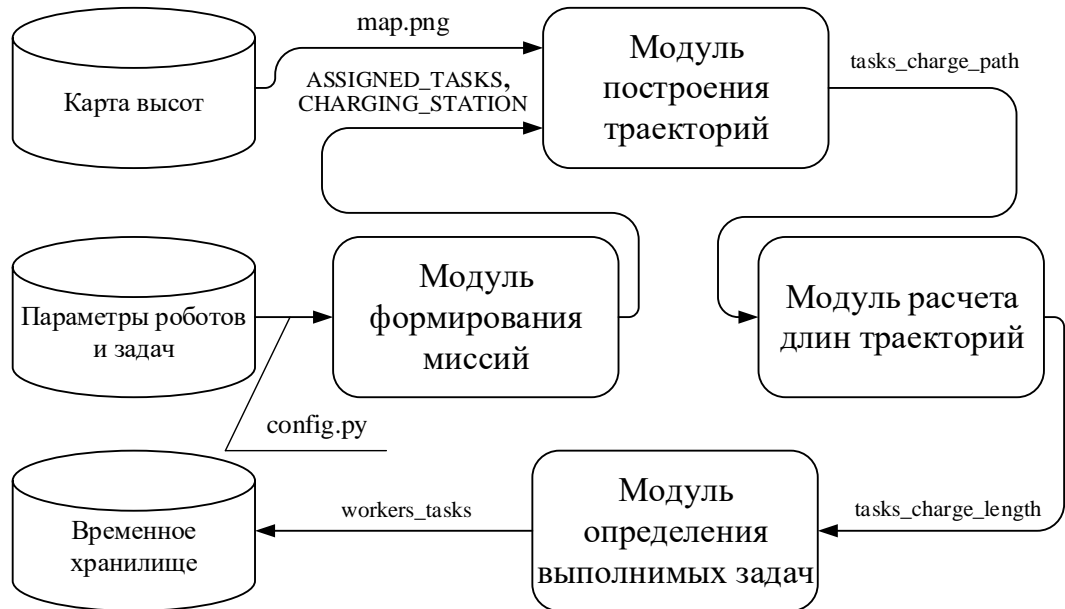


Рисунок 33 – Диаграмма потоков данных операции определения выполнимости целевых задач

Модуль оптимального распределения задач функционирует следующим образом. Входными данными модуля является массив `workers_path_length` или `chargers_path_length`, которые создаются модулем расчета длин траекторий. Элементом данных двумерных массивов является длина траектории от робота до задачи. Применяя венгерский алгоритм к массиву `workers_path_length` или `chargers_path_length`, оптимальные по длине траектории остаются, а вместо всех неоптимальных записывается 0. Создаются новые соответствующие массивы `workers_tasks_length` или `chargers_tasks_length`. Диаграмма поясняющая, операцию оптимального распределения задач пополнения энергетических ресурсов между роботами-заряжающими представлена на рисунке 34:

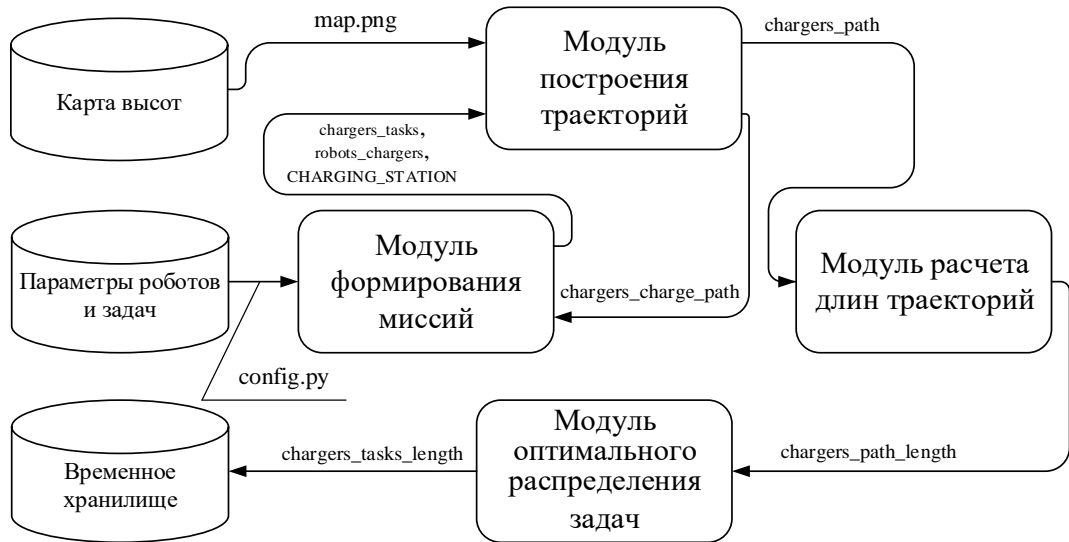


Рисунок 34 – Диаграмма потоков данных операции оптимального распределения задач пополнения энергетических ресурсов

Модуль определения точек заряда функционирует следующим образом. Входными параметрами модуля являются массивы `workers_tasks_length` и `workers_path`, параметры `DISTANCE_RATE`, `ROBOT_LENGTH`, `CHARGE_RANGE`. Модуль функционирует в соответствии с принципами алгоритма определения точек заряда на траекториях роботов-рабочих представленным в разделе 2.2. Координаты определенных точек заряда на траекториях роботов-рабочих добавляются в массив `chargers_tasks`. Операция определения точек заряда представлена на рисунке 35:

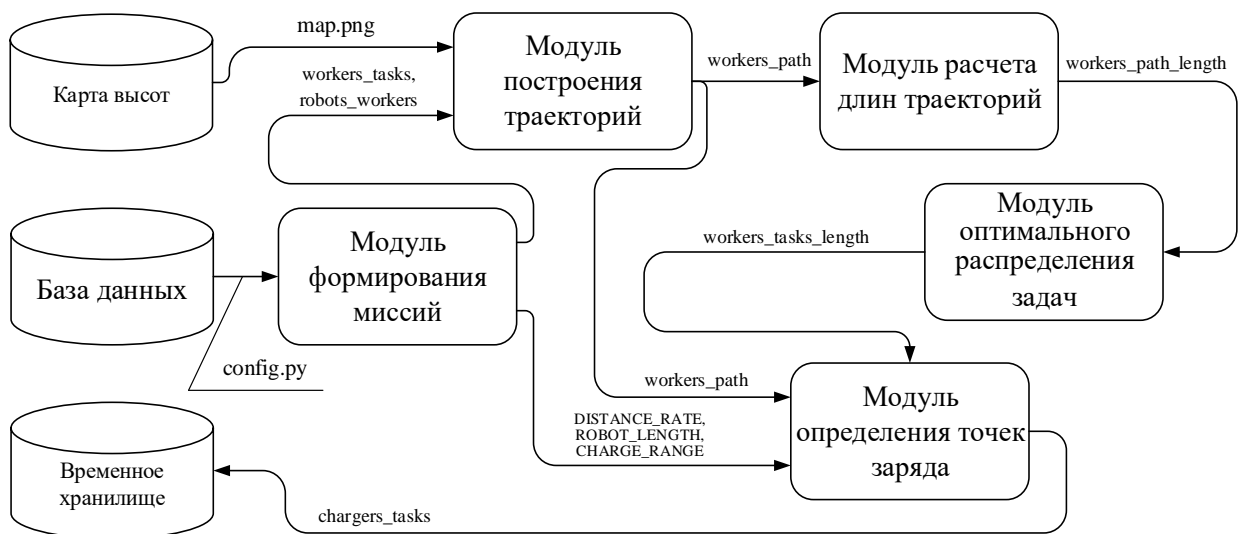


Рисунок 35 – Диаграмма потоков данных операции определения точек заряда

Модуль формирования миссий является координирующим в системе управления группой и функционирует следующим образом. После начала работы модуля осуществляется определение выполнимых задач. Данная операция включает в себя использование модулей построения траекторий, расчета длин траекторий, определения выполнимых задач. Модулю построения траекторий передаются массивы `ASSIGNED_TASKS` и `CHARGING_STATION`, полученный массив `tasks_charge_path`, далее передается в модуль расчета длин траекторий, который формирует массив `tasks_charge_length`. Массив `tasks_charge_length` передается в модуль определения выполнимых задач, который формирует массив координат выполнимых задач `workers_tasks`.

После определения выполнимых задач модуль формирования миссий передает модулю построения траекторий массивы `workers_tasks` и `robots_workers`. Далее полученный массив `workers_path` передается модулю расчета длин траекторий, который формирует массив `workers_path_length`. Массив `workers_path_length` необходим модулю оптимального распределения задач, чтобы сформировать массив `workers_tasks_length`. После создания массива `workers_tasks_length` осуществляется поиск точек заряда на траекториях роботов-рабочих. После получения массива `chargers_tasks` миссии для роботов-рабочих (`workers_mission`) могут быть сформированы и переданы соответствующим роботам. Диаграмма потоков данных операции формирования миссий роботов-рабочих представлена на рисунке 36.

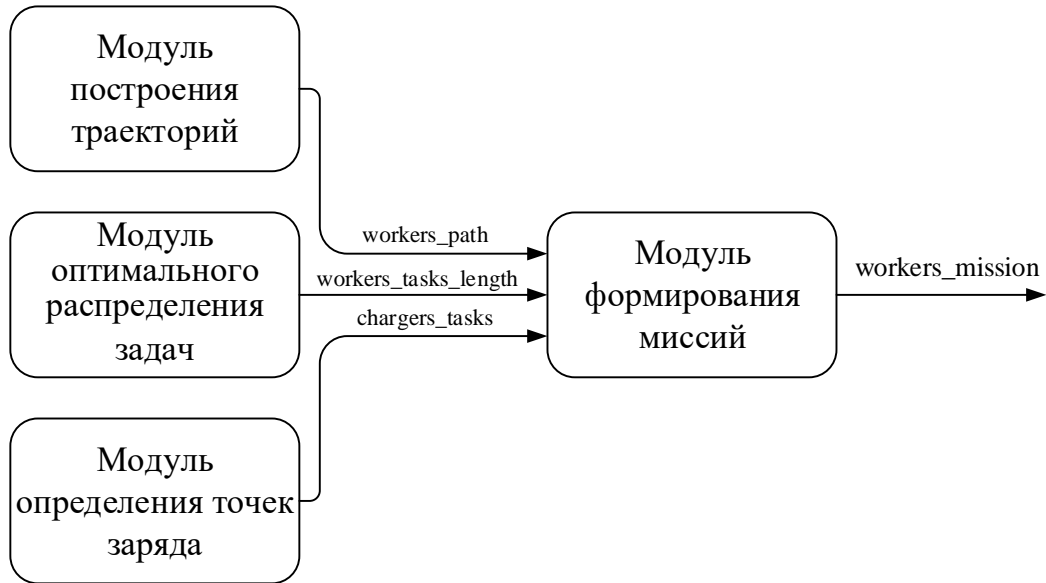


Рисунок 36 – Диаграмма потоков данных операции формирования миссии робота-рабочего

Формирование миссий для роботов-заряжающих требует аналогичной последовательности шагов, как для роботов-рабочих, с той разницей что не осуществляется поиск точек заряда на их траекториях. Также массив `chargers_mission` содержит траекторию перемещения от задачи до зарядной станции. Данная траектория используется для возврата робота-заряжающего к зарядной станции и пополнения собственных ресурсов. На первой итерации функционирования модуля формирования миссий параметры роботов используются из конфигурационного файла. На последующих итерациях в массивы `robots_workers` и `robots_chargers` записывается информация, полученная непосредственно от роботов. Координаты задач из множеств `workers_tasks` и `chargers_tasks` которые были использованы при формировании миссий на текущей итерации, удаляются из данных массивов. Результатом является то, что `workers_tasks` и `chargers_tasks` на следующей итерации работы модуля формирования миссий будут содержать координаты только не распределенных между роботами задач.

Система управления роботом функционирует следующим образом. Модуль выполнения миссии получает массив `workers_mission` или

chargers\_mission предназначенный этому роботу. Модуль выполнения миссии использует для управления роботом модуль перемещения по траектории и модуль позиционирования (рисунок 37). После получения миссии и после ее завершения модуль выполнения миссии обращается к модулю определения параметров робота для получения текущих координат и уровня заряда. После этого модуль выполнения миссии формирует элемент массива robots\_workers или robots\_chargers, с соответствующим статусом робота, и данная информация передается системе управления группой.

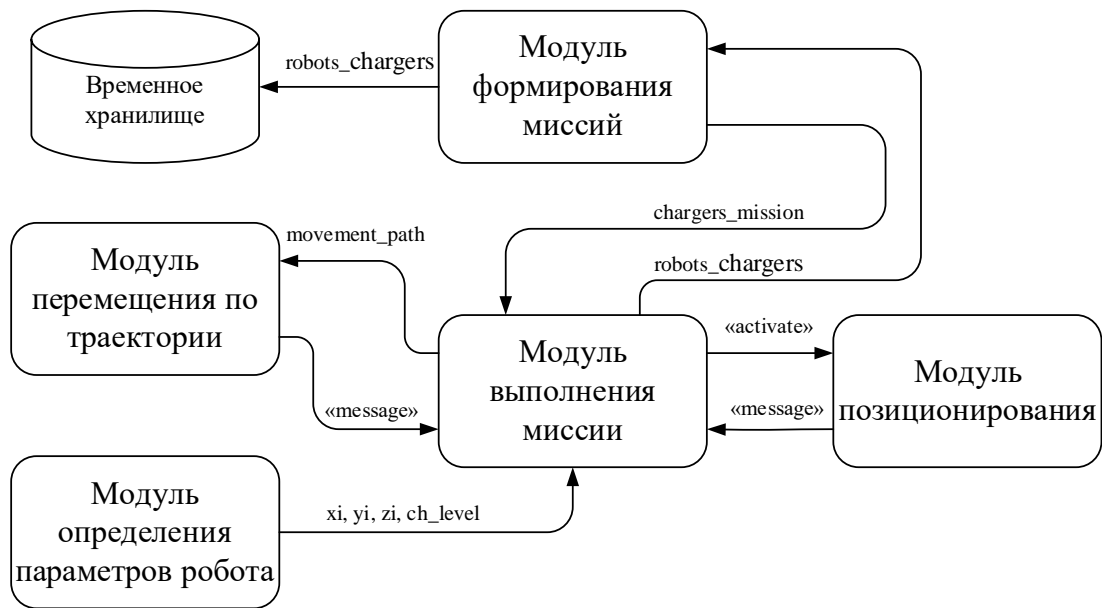


Рисунок 37 – Диаграмма потоков данных операции выполнения миссии робота-заряжающего

Модуль формирования миссий в системе управления группой обновляет соответствующий массив полученной информацией. Модуль перемещения по траектории на основе массива movement\_path осуществляет перемещение по траектории робота до задачи или до промежуточных точек, в которых осуществляется энергетический обмен. При перемещении робот расходует энергию источника со скоростью MOVEMENT\_RATE. По прибытии в заданные точки модуль отправляет соответствующую информацию модулю выполнения миссии. Если робот является заряжающим, то при достижении точки заряда активируется модуль позиционирования, который функционирует в соответствии с алгоритмом, представленным в разделе 2.2.



По завершению позиционирования включается передача энергии, которая подразумевает расход заряда батареи в соответствии с CHARGERS\_TASK\_RATE.

По прибытии робота-рабочего в точку задачи, робот начинает расходовать энергию со скоростью WORKERS\_TASK\_RATE. Пополнение энергетических ресурсов роботов-рабочих в точках заряда и роботов-заряжающих на зарядной станции осуществляется со скоростью CHARGING\_RATE.

#### 4.2 Экспериментальные исследования разработанного обеспечения в среде Gazebo

Для получения статистически значимых результатов апробация предложенного обеспечения к функционированию группы роботов с перераспределением ресурсов проведена посредством имитационного моделирования в среде Gazebo. Рабочее пространство группы в среде моделирования Gazebo представляет собой рельефную местность, вид которой представлен на рисунке 38. В области рабочего пространства находится группа роботов, задачи и зарядная станция.

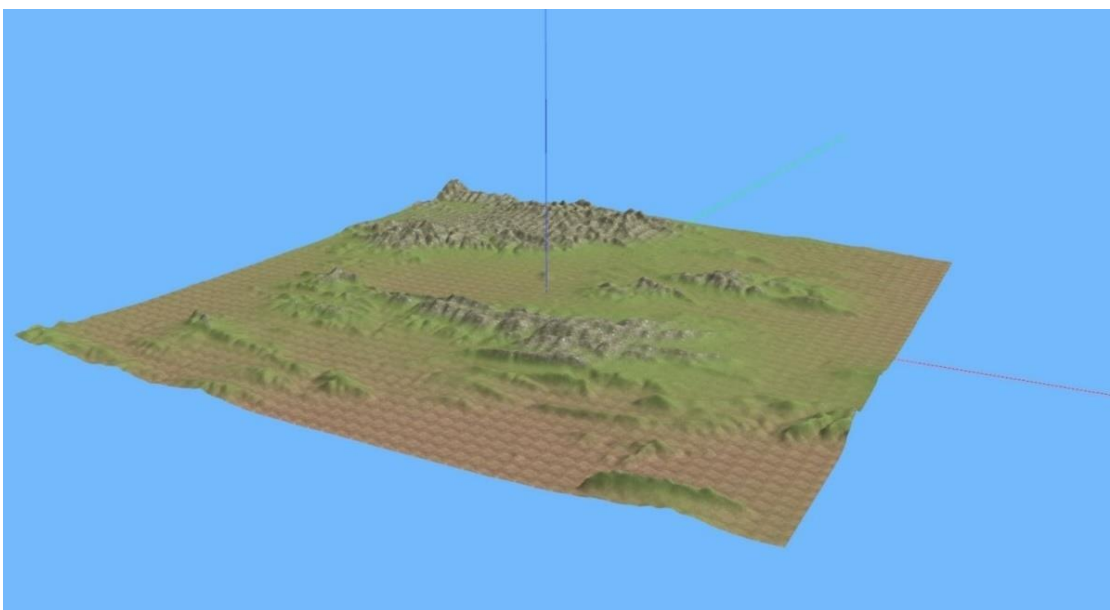


Рисунок 38 – Рельефная местность рабочего пространства группы

Зарядная станция представляет собой объект следующего вида (рисунок 39):

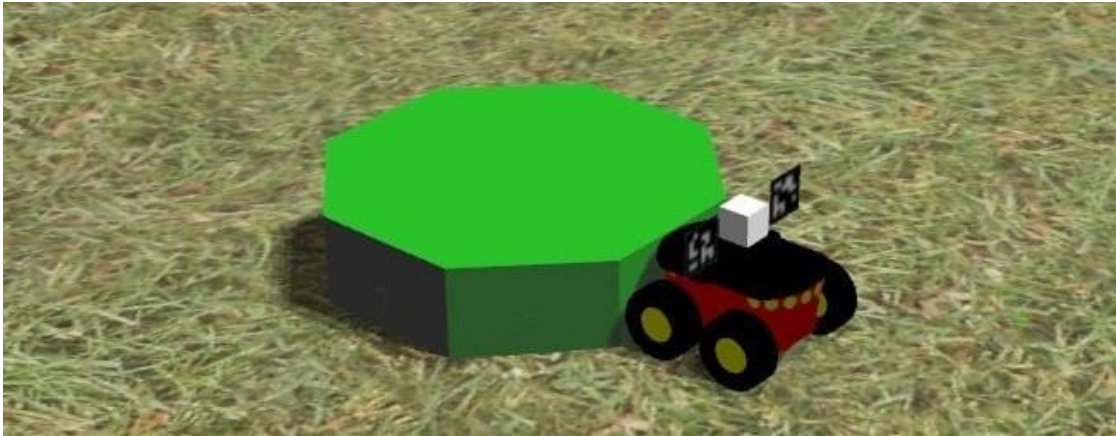


Рисунок 39 – Внешний вид зарядной станции

Зарядная станция имеет количество постов передачи энергии для роботов превышающее их количество, что убирает ограничение на число одновременно заряжающихся роботов в модели. Места расположения целевых задач, поставленных группе роботов, обозначаются в области рабочего пространства следующим образом (рисунок 40):



Рисунок 40 – Обозначение точки выполнения целевой задачи

В качестве исходной модели для роботов использована модификация моделей Pioneer 3-AT. Четырехколесные наземные роботы, модель которых представлена на рисунке 41, оснащены БСПЭ, ArUco-маркерами и камерами

технического зрения. Перечисленное оснащение расположено в передней части робота.

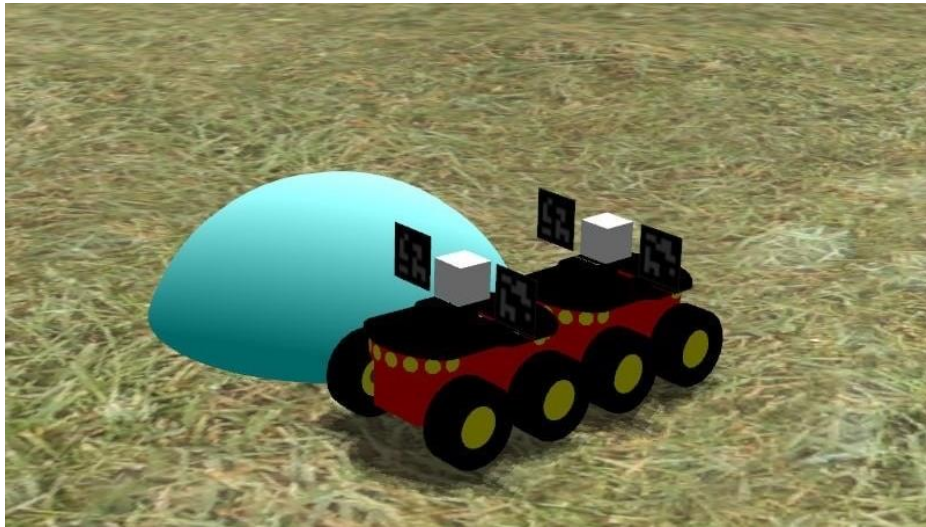


Рисунок 41 – Модель четырехколесного наземного робота

При работе группы с перераспределением ресурсов в соответствии с алгоритмом определяются точки заряда на траектории движения роботов-рабочих и формируются задачи пополнения энергетических ресурсов для роботов-заряжающих. Задачи пополнения энергетических ресурсов для роботов-заряжающих обозначаются в области рабочего пространства следующим образом (рисунок 42):

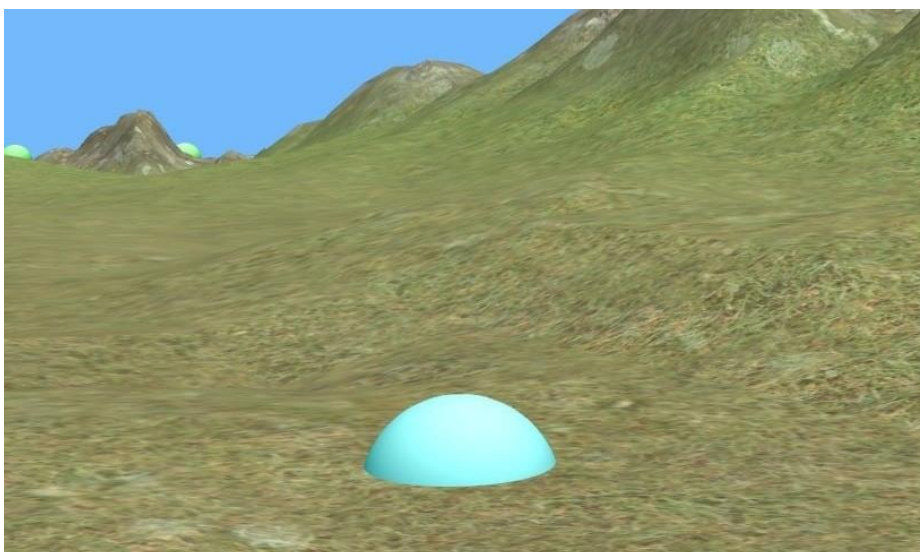


Рисунок 42 – Обозначение точки выполнения задачи пополнения энергетических ресурсов

Основной задачей моделирования является определение общего времени выполнения определённого количества целевых задач группами роботов, функционирующими с перераспределением ресурсов и без него. В соответствии с поставленной задачей разработаны следующие сценарии функционирования группы роботов:

- **Сценарий 1.** Группа роботов выполняет задачи без перераспределения ресурсов. Число роботов равно 6. На начальный момент времени роботы находятся в определённых местах рабочего пространства и имеют максимальный уровень заряда. Число задач варьируется от 6 до 15, соответственно проводится 10 экспериментов для определенного среднего значения расстояния от зарядной станции до задач. Все задачи являются выполнимыми и находятся в определённых местах рабочего пространства. Необходимо зафиксировать время, за которое роботы выполняют все поставленные задачи. Посредством предварительного планирования с применением венгерского алгоритма задачи распределяются между роботами. После выполнения задачи робот следует на зарядную станцию и пополняет запас энергетических ресурсов. После этого робот вновь может участвовать в распределении задач.
- **Сценарий 2.** Группа роботов выполняет задачи с перераспределением ресурсов. Число роботов-рабочих равно 3, роботов-заряжающих равно 3. На начальный момент времени роботы находятся в соответствующих местах рабочего пространства, определённых в первом сценарии, и имеют максимальный уровень заряда. Число задач, их расположение и количество экспериментов аналогично первому сценарию. Необходимо зафиксировать время, за которое роботы выполняют все поставленные задачи. Посредством предварительного планирования с применением венгерского алгоритма задачи распределяются между роботами-рабочими. Далее на траекториях роботов-рабочих осуществляется

определение точек заряда. Задачи пополнения энергетических ресурсов аналогично посредством венгерского алгоритма распределяются между роботами заряжающими. После выполнения задачи роботом-рабочим, он вновь участвует в распределении невыполненных задач. Робот-заряжающий после передачи энергии роботу-рабочему следует на зарядную станцию для пополнения собственных ресурсов. После чего может вновь участвовать в распределении задач пополнения энергетических ресурсов роботов-рабочих.

При моделировании в начальный момент времени роботы и задачи в двух представленных сценариях располагаются на одинаковых местах в области рабочего пространства. Ввиду этого на первой итерации выполнения задач роботами-рабочими на их траекториях движения точки заряда будут располагаться в непосредственной близости от точки выполнения задачи, а передача энергии между роботами будет осуществляться непосредственно после выполнения задачи роботом-рабочим. Также описанный вариант размещения точки заряда будет использоваться в случае, если расстояние между роботом-рабочим и следующей задачей мало, и не требует размещения промежуточных точек пополнения заряда на траектории.

Моделирование проводится с целью определения и последующего сравнения времени выполнения задач группой, ввиду чего необходимо связать рабочие параметры роботов со временем. Для создания модели, имеющей высокий уровень соответствия реальному процессу, были проведены замеры потребляемой мощности реального робота (рисунок 43) в различных состояниях.

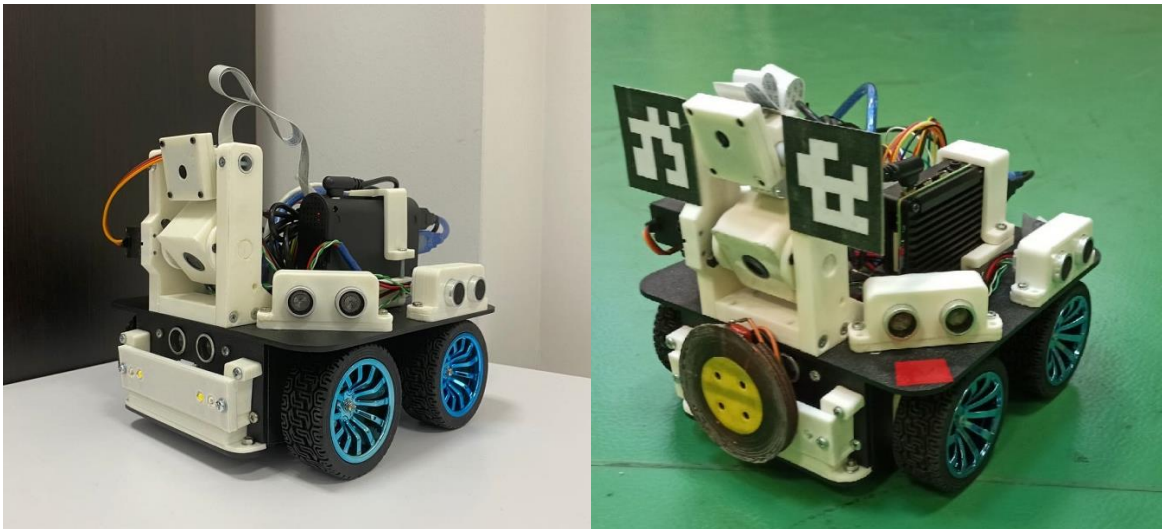


Рисунок 43 – Прототип наземной робототехнической платформы

Прототип наземной робототехнической платформы, представленный на рисунке 43 предназначен для учебных и исследовательских задач в области группового управления, и имеет размеры  $220 \times 220 \times 195$  мм. Аккумуляторная батарея робота имеет номинальное рабочее напряжение 7,4 В и ёмкость 5 А·ч. Базовая комплектация платформы обеспечивает автономное движение по заранее заданному маршруту, преодоление препятствий, передачу видеопотока с обзорной камеры, распознавание различных маркеров с использованием камеры технического зрения.

В экспериментальных целях одна из версий платформы оборудовалась двунаправленной БСПЭ. Был проведен ряд экспериментов, направленных на апробацию разработанных аппаратных и программных решений для энергетического обмена между роботами. Роботы функционировали в области рабочего поля, на котором кругами различных цветов были отмечены точки условных задач и точки обмена энергетическими ресурсами (рисунок 44).



Рисунок 44 – Рабочее поле для проведения экспериментов по энергетическому обмену между роботами

Белыми кругами в области рабочего поля обозначены точки обмена энергетическими ресурсами. Роботы выполняли позиционирование в данных точках (рисунок 45), и один из роботов передавал другому энергетические ресурсы посредством двунаправленной БСПЭ.

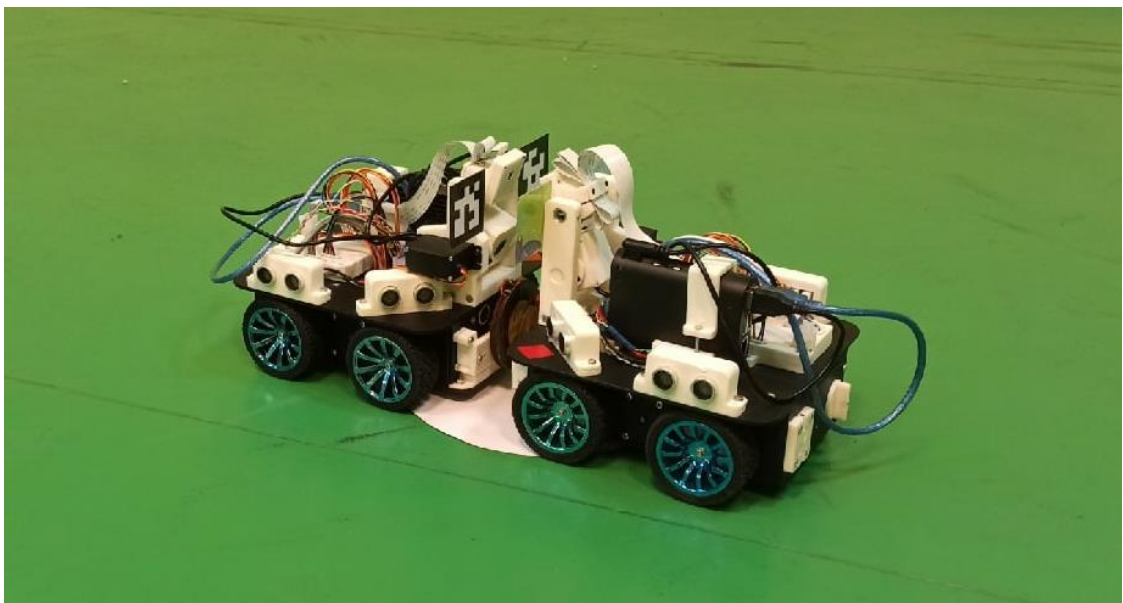


Рисунок 45 – Передача энергии между роботами в обозначенных точках рабочего поля

Исходные данные, полученные в процессе экспериментов, описанных выше, и расчётные значения потребляемой мощности приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Потребляемая мощность прототипа наземной робототехнической платформы в различных состояниях

Состояние робота	Потребители	U, В	I, А	P, Вт
Простой	Вычислители в простое	5,0	0,5	2,5
Перемещение	Колесные приводы	7,4	0,5	3,7
	Вычислители	5,0	1,2	6,0
Выполнение задачи (рабочий)	Дополнительное оборудование	7,4	2	14,8
	Вычислители	5,0	1,2	6,0
Выполнение задачи (заряжающий)	БСПЭ	7,4	6,25	46,3
	Вычислители в простое	5,0	0,5	2,5
Процесс заряда	Робот-рабочий	7,4	5	37,0
	Робот-заряжающий	7,4	5	37,0

В таблице 7 приведены состояния выполнения задачи для роботов рабочих и заряжающих. Значение тока потребления в данных состояниях выбрано следующим образом. Для робота-рабочего использовано значение среднего тока потребления малогабаритной манипуляционной системы. Так как задачей робота-заряжающего является передача энергии роботу-рабочему, то потребителем энергии его аккумуляторной батареи является БСПЭ. Эффективность работы БСПЭ принята равной 80%. Соответственно для обеспечения процесса заряда, для которого значение тока принято равным 5 А, расчётное значение тока потребления БСПЭ составляет 6,25 А.

В соответствии с предложенной математической моделью, рассчитанные значения потребляемой роботом мощности для дальнейшего использования необходимо перевести в относительные единицы. 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 8):

Таблица 8 – Энергопотребление прототипа наземной робототехнической платформы в относительных единицах

Состояние робота	Потребители	$P_t, \% \cdot \text{ч}$	$P_t, \% \cdot \text{с}$
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 8, представляют величину расхода заряда аккумуляторной батареи робота за время.

Размеры рабочего пространства определяются исходя из параметров роботов. Рабочее пространство ограничено окружностью с определенным радиусом вокруг зарядной станции. Для того что бы роботы, работающие без перераспределения энергетических ресурсов, могли выполнить сценарий функционирования, радиус рабочего пространства должен быть ограничен следующим образом (57):

$$r_w \leq \frac{d_u(e_{max} - e_{minw} - et_j)}{2e_m} \quad (57)$$

Примем что  $d_u = 1$  м, тогда значение  $r_w$  также будет рассчитано в метрах. Для всех сценариев моделирования и экспериментов применялись следующие параметры (таблица 9):

Таблица 9 – Параметры моделирования

Максимальный уровень заряда роботов ( $e_{max}$ ), %	100
Минимальный уровень заряда роботов-рабочих ( $e_{minw}$ ), %	15
Минимальный уровень заряда роботов-заряжающих ( $e_{minc}$ ), %	5
Радиус работы группы ( $r_w$ ) не более, м	230
Максимальная скорость робота, м/с	0,1
Время выполнения задачи ( $\tau_j$ ), с	2000

На начальный момент времени роботы в области рабочего пространства расположены рядом с зарядной станцией следующим образом (рисунок 46):

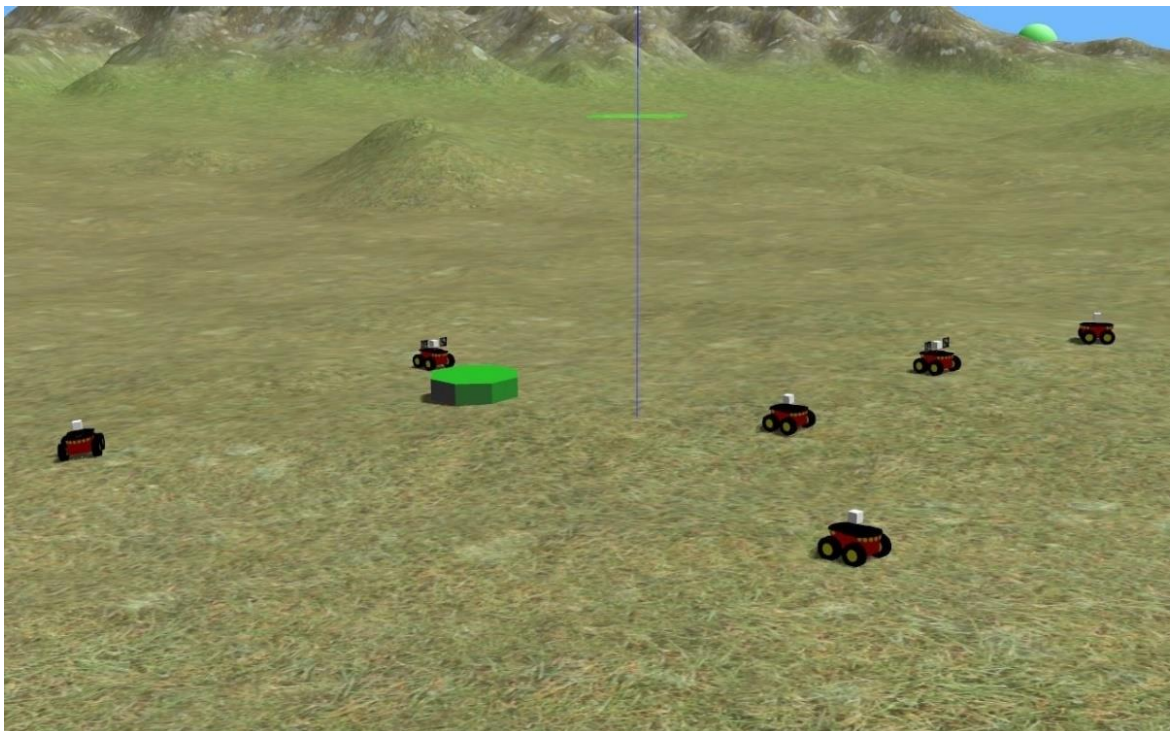


Рисунок 46 – Расположение роботов на начальный момент времени

Расстояние от зарядной станции до каждой целевой задачи определено для каждого эксперимента и представлено в таблице 10:

Таблица 10 – Расстояния от зарядной станции до каждой целевой задачи

Эксперимент №1								
Задача, №	1	2	3	4	5	6	7	8
Расстояние, м	226	222	222	229	226	227	224	225
Задача, №	9	10	11	12	13	14	15	Среднее
Расстояние, м	227	226	222	227	226	220	221	225
Эксперимент №2								
Задача, №	1	2	3	4	5	6	7	8
Расстояние, м	211	190	181	229	203	179	204	214
Задача, №	9	10	11	12	13	14	15	Среднее
Расстояние, м	230	202	180	183	174	195	175	197
Эксперимент №3								
Задача, №	1	2	3	4	5	6	7	8
Расстояние, м	160	144	82	86	114	83	186	93
Задача, №	9	10	11	12	13	14	15	Среднее
Расстояние, м	197	89	183	128	150	132	123	130

Как следует из таблицы среднее значение расстояния от зарядной станции до задач существенно отличается в экспериментах, что позволит выявить влияние данного параметра на общее время выполнения задач. В соответствии с ранее представленными сценариями проведено моделирование, результаты которого представлены в таблице 11:

Таблица 11 – Результаты моделирования

Количество целевых задач, шт.	Общее время выполнения задач сценарий 1, мин			Общее время выполнения задач сценарий 2, мин		
	1	2	3	1	2	3
Эксперимент №:						
6	165,20	165,93	125,56	176,15	179,67	163,45
7	321,86	322,70	267,37	243,73	245,82	230,42
8	325,45	322,70	267,37	243,93	251,59	237,86
9	331,19	328,88	267,37	246,34	251,59	237,86
10	334,21	328,88	267,37	315,30	317,06	312,65
11	334,21	328,88	272,85	316,05	323,92	312,65
12	334,21	328,88	272,85	316,05	323,92	312,65
13	500,07	462,70	397,10	388,72	390,72	386,74
14	500,07	482,99	397,10	388,72	390,75	386,74
15	500,07	482,99	397,10	388,72	396,02	386,74

Исходя из данных, представленных в таблице 11, следует, что при числе задач равном количеству роботов минимальное время выполнения достигается в сценарии 1, где все роботы являются рабочими и группа функционирует без перераспределения ресурсов. Данный факт обусловлен параметрами моделирования, а именно максимальным уровнем заряда всех роботов на начальный момент времени. Роботам не требуется пополнять собственные энергетические ресурсы для выполнения данного количества задач. На основе данных, полученных при моделировании построены графические зависимости для каждого эксперимента. Результаты эксперимента №1 представлены на рисунке 47:

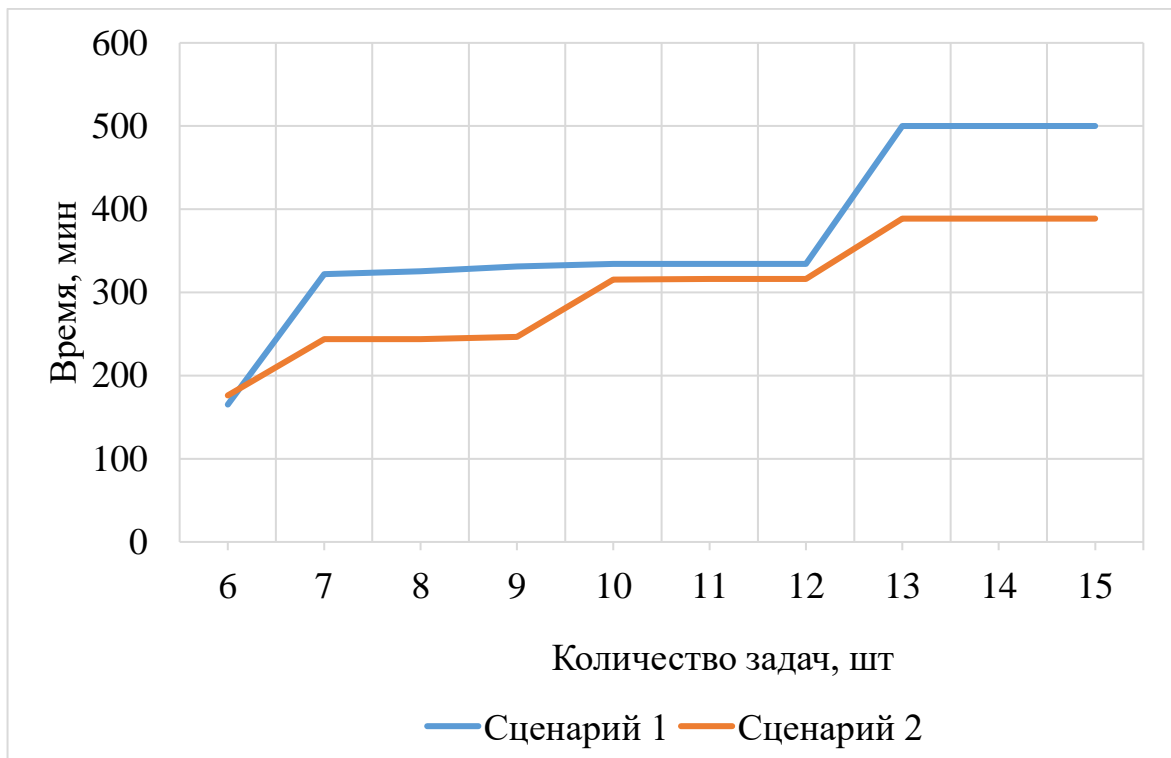


Рисунок 47 – График зависимости времени выполнения задач от их количества при среднем расстоянии до точки выполнения задачи 225 м

Исходя из графика следует, что тенденция более быстрого выполнения задач группой, функционирующей по второму сценарию, сохраняется при числе задач, превышающем общее количество роботов. Это можно объяснить тем, что роботы-рабочие, функционирующие по сценарию 2, расходуют

значительно меньше времени на перемещение. Также сокращается время заряда каждого робота, так как роботам-рабочим требуется передать меньше энергии, ввиду сокращения ее расходов на перемещение. Максимальная разница во времени выполнения задач группами достигается при их количестве от 13 до 15 и составляет более 25 %.

Результаты эксперимента №2, в котором среднее расстояние от зарядной станции до задачи составляло 197 м представлены на рисунке 48:

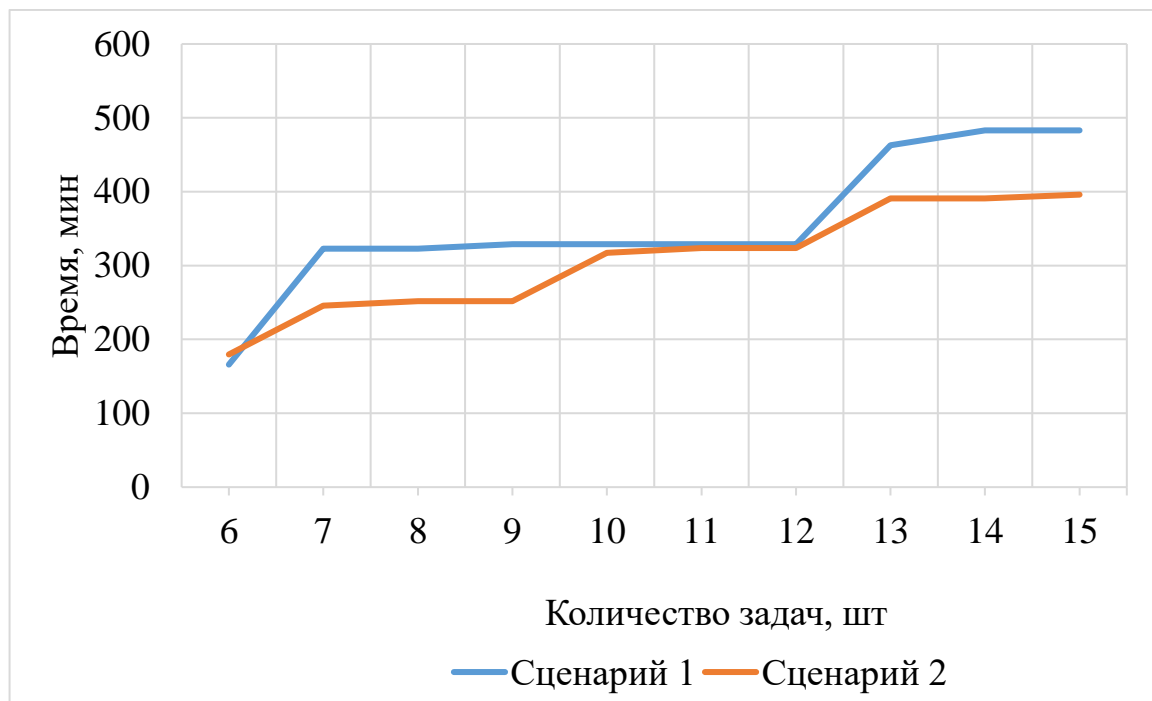


Рисунок 48 – График зависимости времени выполнения задач от их количества при среднем расстоянии до точки выполнения задачи 197 м

Тенденция более быстрого выполнения задач группой с перераспределением ресурсов сохраняется для эксперимента №2. При количестве задач от 10 до 12 разница во времени выполнения задач при различных сценариях функционирования группы становится не существенной. Данный факт обусловлен количеством роботов в группе. Для группы, функционирующей без перераспределения ресурсов общее время выполнения задач при их количестве от 7 до 12 изменяется не значительно ввиду того, что на момент выполнения данных задач заряд всех роботов находится в завершающей

стадии после выполнения первых 6 задач. Максимальная разница в общем времени выполнения задач достигается при их количестве равном 14 и составляет 20%.

График, отражающий результаты эксперимента №3 представлен на рисунке 49:

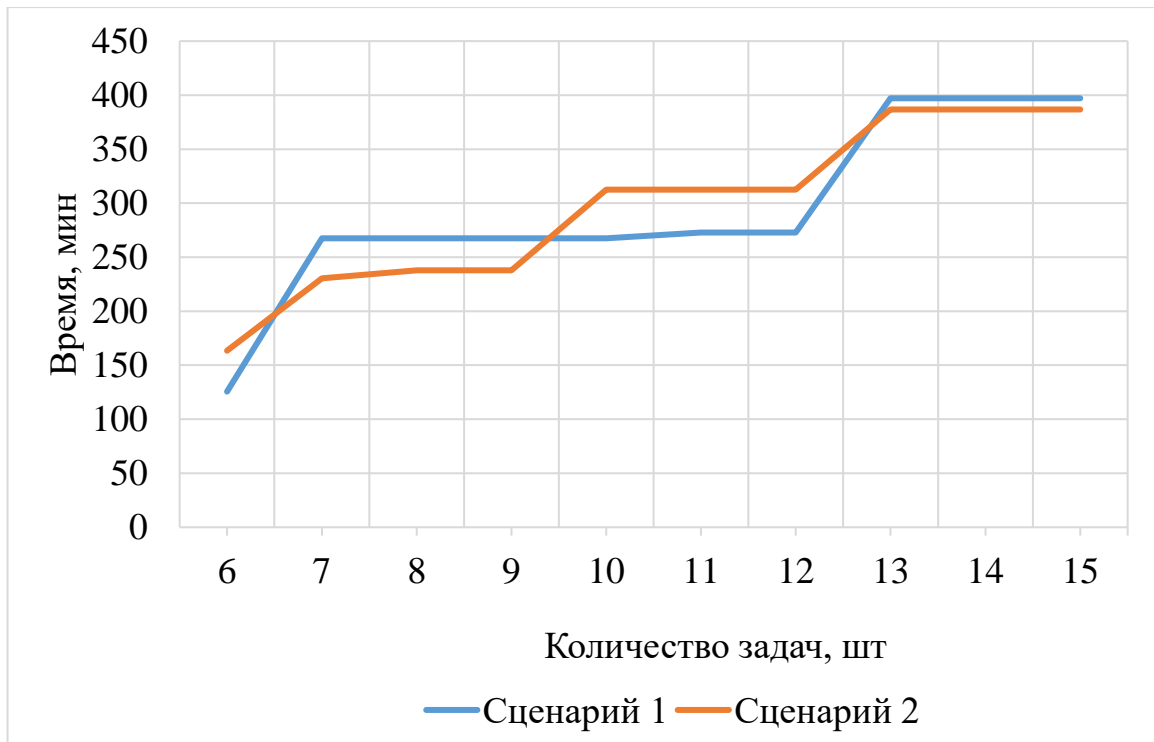


Рисунок 49 – График зависимости времени выполнения задач от их количества при среднем расстоянии до точки выполнения задачи 130 м

Как видно из графиков на рисунке 49 при среднем расстоянии до задачи равным 130 м, группа без перераспределения ресурсов выполняет задачи быстрее в случае их количества от 9 до 12. Также, как и в предыдущих двух экспериментах время выполнения 6 задач больше у группы, функционирующей по второму сценарию.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что при уменьшении среднего расстояния до задач преимущество во времени их выполнения постепенно переходит к группе роботов, функционирующей без перераспределения ресурсов. Это обусловлено снижением общего времени

перемещения роботов. Не мало важную роль для групп функционирующей без перераспределения ресурсов играет зарядная станция с неограниченным количеством постов передачи энергии. Все роботы группы могут одновременно пополнять свой заряд. Возможно предположить, что сокращение постов заряда оказало бы значительное влияние на общее время выполнения задач в данном сценарии функционирования.

### 4.3 Экспериментальное исследование максимального радиуса функционирования группы с перераспределением ресурсов

Одним из преимуществ предлагаемого обеспечения для управления группой роботов с перераспределением ресурсов является увеличение максимального радиуса её функционирования. Под радиусом функционирования группы в данном случае следует понимать максимальное допустимое расстояние от зарядной станции до точки выполнения задачи, при котором задача будет выполнима (см. алгоритм определения выполнимых задач). Подтвердить данный факт возможно посредством вычислительного эксперимента.

Функционирование робота-рабочего, работающего в группе без перераспределения энергетических ресурсов, поясняется рисунком 50:

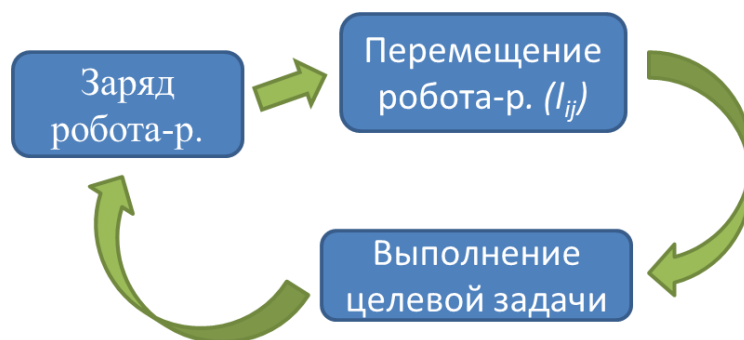


Рисунок 50 – Упрощенная диаграмма функционирования робота-рабочего в группе без перераспределения энергетических ресурсов

Перемещение робота-рабочего осуществляется между задачами и зарядной станцией, таким образом робот расходует энергию на перемещение и выполнение задачи. Уравнение энергетического баланса для робота в данном случае имеет следующий вид (58):

$$er'_{max} = e_{max} - e_{minw}, \quad (58)$$

где  $er'_{max} = \frac{2l_{ij}e_m}{d_u} + et_j$ ,  $er'_{max}$  – максимальное количество энергии доступное роботу-рабочему.

Функционирование рабочих и заряжающих роботов, работающих в группе с перераспределением энергетических ресурсов, поясняется рисунком 51:

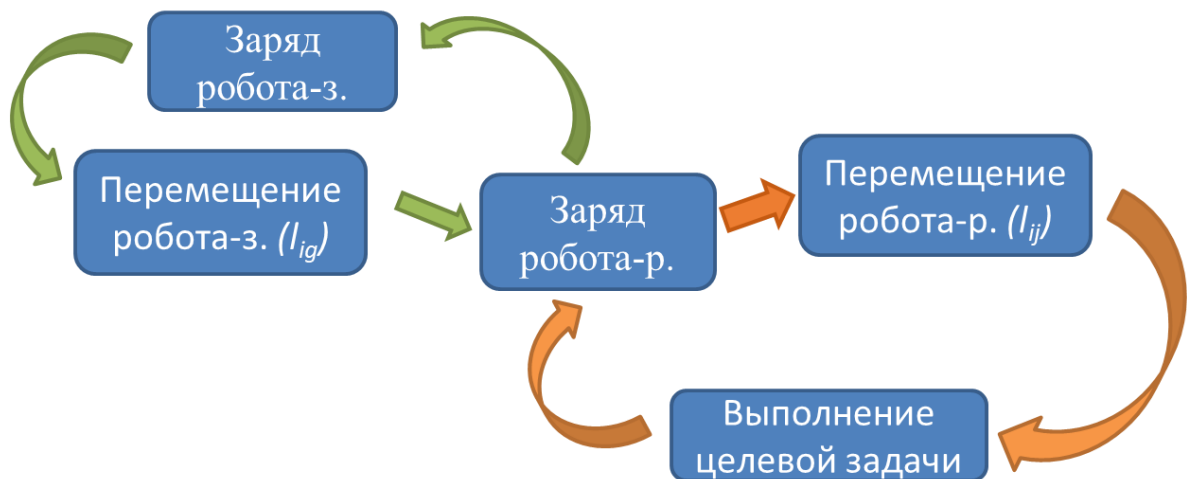


Рисунок 51 – Упрощенная диаграмма функционирования роботов в группе с перераспределением энергетических ресурсов

Для случая функционирования группы с перераспределением ресурсов робот-рабочий осуществляет выполнение задачи и перемещение между точкой заряда и местом выполнения задачи. Робот-заряжающий перемещается между точкой заряда робота-рабочего и зарядной станцией. Уравнение энергетического баланса для робота-рабочего, функционирующего по данному принципу, имеет следующий вид (59):



$$er'_{max} = e_{max} - e_{minw} + \eta_p \left( e_{max} - e_{minc} - \frac{2l_{ig}e_m}{d_u} \right). \quad (59)$$

Из представленных уравнений можно видеть, что робот-рабочий, функционирующий в группе с перераспределением ресурсов, благодаря роботу-заряжающему обладает большим приведенным запасом энергии.

Цель вычислительного эксперимента заключается в установлении разницы в максимальном радиусе функционирования групп с перераспределением ресурсов и без него для различных затрат энергии на выполнение задачи ( $et_j$ ). Расчёт значений, представленных в таблице 12, выполнен при:  $e_{max} = 1$ ;  $e_{minw}, e_{minc} = 0,1$ ;  $e_m = 0,01$ ;  $d_u=1$  м;  $\eta_p=0,8$ .

Таблица 12 – Результаты вычислений

$et_j$	$Sw_{max}$ , м	$Sc_{max}$ , м	$r_w$ , м	$r_w'$ , м	$r_w/r_w'$
0,2	70	46	35	58	1,66
0,4	50	59	25	54	2,18
0,6	30	71	15	51	3,38
0,8	10	84	5	47	9,38

В Таблице 12 используются следующие переменные:  $Sw_{max}$  и  $Sc_{max}$  – максимальные расстояния, которые могут преодолеть робот-рабочий и робот-заряжающий соответственно,  $r_w$  – радиус функционирования роботов-рабочих,  $r_w'$  – приведенный радиус функционирования роботов-рабочих при функционировании в группе с перераспределением ресурсов.

Представленные результаты вычислений характеризуют случай, в котором перемещение робота-рабочего осуществляется от последней точки заряда до точки выполнения задачи, а робот-заряжающий перемещается до данной точки заряда и выполняет передачу соответствующего количества энергии роботу-рабочему. Данный вариант совместной работы роботов допустим, так как промежуточных точек заряда может быть столько, сколько необходимо.

Из таблицы 12 следует, что при расходе 20 % запаса энергии работа на выполнение задачи радиус функционирования 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. Наглядно изменение радиуса функционирования в единичных расстояниях ( $d_u$ ) в зависимости от затрат энергии на выполнение задачи в относительных единицах представлено на рисунке 52:

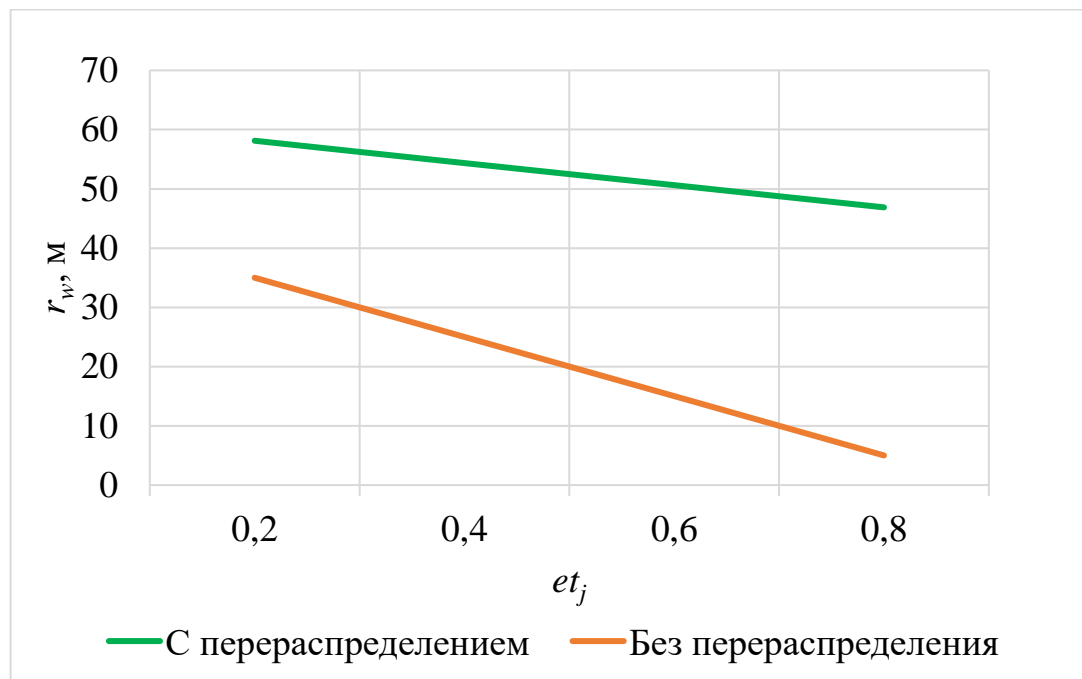


Рисунок 52 – Максимальный радиус функционирования группы в зависимости от расхода энергии на выполнение задачи

Из рисунка 52 следует, что увеличение затрат энергии на выполнение задачи влияет на максимальный радиус более значительно у группы, функционирующей без перераспределения ресурсов. Так при изменении затрат энергии на выполнение задачи на 60% радиус работы группы с перераспределением ресурсов снижается на ~ 20%, а без на ~ 86%.

#### 4.4 Выводы по четвертой главе

В экспериментальной части работы проведено сравнение между группой, функционирующей с традиционными принципами и на основе разработанного авторского обеспечения. Имитационное моделирование проведено в среде Gazebo. 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 с пропорцией 1/1 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. 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. При уменьшении среднего расстояния до 56% от максимального снижается общее время перемещения роботов, и при количестве задач от 10 до 12 группа без перераспределения ресурсов выполняет их за меньшее время. Дальнейшее уменьшение среднего расстояния от зарядной станции до задачи постепенно выводит группу, функционирующую без перераспределения ресурсов в лидеры по времени выполнения любого количества задач. Полученные при моделировании результаты показывают общую тенденцию более быстрого выполнения задач

группой, функционирующей с перераспределением ресурсов при увеличении расстояния до задач и их количества.

Одним из преимуществ разработанного алгоритмического обеспечения является расширение области функционирования группы. Подтверждение данного факта проведено посредством вычислительного эксперимента. 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.

**Положения, выносимые на защиту, соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»:** 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».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 416 с.
2. Craig J. J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3rd Edition), Pearson, 2004.
3. Beni G. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics // Swarm Robotics SAB 2004 International Workshop, Santa Monica, CA, USA, July 17, 2004, Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science Vol. 3342, 2005). Springer. P. 1—10
4. Sahin E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. // Swarm Robotics. Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3342/2005. P. 10—20
5. Mondada F., Guignard A., Bonani M., Bär D., Lauria M., Floreano D. SWARMBOT: From Concept to Implementation. // In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003, IEEE Press. P. 1626—1631
6. Андрианов, Ю. Д., Бобриков, Э. П., Гончаренко, В. Н. и др. Робототехника / под ред. Е. П. Попова, Е. И. Юревича / Ю. Д. Андрианов, Э. П. Бобриков, В. Н. Гончаренко. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
7. Carrillo, M., Gallardo, I., Del Ser, J., Osaba, E., Sanchez-Cubillo, J., Bilbao, M. N., ... & Iglesias, A. (2018, May). A bio-inspired approach for collaborative exploration with mobile battery recharging in swarm robotics. In International Conference on Bioinspired Methods and Their Applications (pp. 75-87). Springer, Cham.
8. Couture-Beil, A., Vaughan, R.T.: Adaptive mobile charging stations for multi-robot systems. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (2009) 1363–1368
9. Shamsuddin, A. Z. M., Ahsan, T., Rahman, I., & Momen, S. (2016, December). Trophallaxis and energy optimization in swarms of robots. In 2016 19th

- International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) (pp. 490-495). IEEE.
10. Schioler, H., Ngo, T.D.: Trophallaxis in robotic swarms-beyond energy autonomy. In: IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. (2008) 1526–1533
  11. Shen, Y., Jie, Z., Guo, B., & Hao, S. (2015, July). Energy-saving task assignment for robotic fish sensor network based on artificial fish swarm algorithm. In 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI) (Vol. 1, pp. 536-540). IEEE.
  12. Zhou, X., & Kinny, D. (2013, November). Energy-Based Particle Swarm Optimization: Collective Energy Homeostasis in Social Autonomous Robots. In Proceedings of the 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)-Volume 02 (pp. 31-37). IEEE Computer Society.
  13. Mostaghim, S., Steup, C., & Witt, F. (2016, December). Energy aware particle swarm optimization as search mechanism for aerial micro-robots. In 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) (pp. 1-7). IEEE.
  14. Bartashevich, P., Koerte, D., & Mostaghim, S. (2017). Energy-saving decision making for aerial swarms: PSO-based navigation in vector fields. In 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) (pp. 1-8). IEEE.
  15. Shen, Y., & Guo, B. (2015, August). Energy-efficient cluster-head selection with fuzzy logic for robotic fish swarm. In 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) (pp. 513-518). IEEE.
  16. Arif, A. F., Ramli, A. R., Samsudin, K., & Hashim, S. J. (2011, December). Energy management in mobile robotics system based on biologically inspired honeybees behavior. In 2011 IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE) (pp. 32-35). IEEE.



- 17.S. Sahni, T. Gonzalez. P-complete approximation problems. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 23: 555–565. 1976
- 18.M.L. Fisher, R. Jaikumar. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11: 109–124. 1981
- 19.A. Baykasoglu, L. Ozbakir, P. Tapkan. Artificial bee colony algorithm and its application to generalized assignment problem. *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. 2007
- 20.M. Mahmoudi, X. Zhou. Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state–space–time network representations. *Transportation Research Part B: Methodological* Volume 89. 2016
- 21.A. Przybylski, X. Gandibleux, M. Ehrgott. A two phase method for multi-objective integer programming and its application to the assignment problem with three objectives. *Discrete Optimization* Volume 7, Issue 3. 2010
- 22.Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem // *Naval research logistics quarterly*. – 1955. – T. 2. – №. 1-2. – C. 83-97
- 23.R. Jonker, T. Volgenant. Improving the Hungarian assignment algorithm. *Operations Research Letters* Volume 5, Issue 4. 1986
- 24.Q. Rabbani, A. Khan, A. Quddoos. Modified Hungarian method for unbalanced assignment problem with multiple jobs. *Applied Mathematics and Computation* Volume 361. 2019
- 25.P. Hahn, T. Grant, N. Hall. A branch-and-bound algorithm for the quadratic assignment problem based on the Hungarian method. *European Journal of Operational Research* Volume 108, Issue 3. 1998
- 26.M. Vilà, J. Pereira. A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & Operations Research* vol. 44. 2014
- 27.J.D.C. Little, K.G. Murty, D.W. Sweeney, C. Karel. An Algorithm for the Traveling Salesman Problem // *Operations Research*. 1963. No 11. P. 972–989

28. Keskin, Merve & Laporte, Gilbert & Çatay, Bülent. (2019). Electric Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Waiting Times at Recharging Stations. *Computers & Operations Research*. 107. 10.1016/j.cor.2019.02.014
29. Mao, Huiting & Shi, Jianmai & Zhou, Yuzhen & Zhang, Guoqing. (2020). The Electric Vehicle Routing Problem With Time Windows and Multiple Recharging Options. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.3003000
30. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Использование муравьиного алгоритма для поиска стратегии поведения группы мобильных роботов на рабочем поле с препятствиями. *Многофазные системы*. 2022. Т. 17. № 3-4. С. 177-186. DOI: 10.21662/mfs2022.3.016
31. Oleg D., Airat M. Multi-criteria Optimization of the Mobile Robot Group Strategy Using the Ant Algorithm // *Electromechanics and Robotics: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER (ZR) 2021)*, St. Petersburg, Russia, 14–17 April 2021. – Springer Singapore, 2022. – С. 97-108.
32. Keskin, Merve & Çatay, Bülent & Laporte, Gilbert. (2020). A Simulation-Based Heuristic for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Stochastic Waiting Times at Recharging Stations. *Computers & Operations Research*. 125. 105060. 10.1016/j.cor.2020.105060
33. Zhou, Yuzhen & Huang, Jincan & Shi, Jianmai & Wang, Rui & Huang, Kuihua. (2021). The electric vehicle routing problem with partial recharge and vehicle recycling. *Complex & Intelligent Systems*. 7. 10.1007/s40747-021-00291-3
34. Yu, Kevin & Budhiraja, Ashish & Tokekar, Pratap. (2017). Algorithms for Routing of Unmanned Aerial Vehicles with Mobile Recharging Stations and for Package Delivery
35. David Applegate, ROBERT Bixby, Vasek Chvatal, and William Cook. Concorde tsp solver. URL <http://www.tsp.gatech.edu/concorde>, 2006
36. Ахмеров Ш. Р., Фетисов В. С. Подбор последовательности вылетов мультикоптеров для дежурства над объектом с применением различных

- технологий // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации. – 2019. – С. 408-413.
- 37.Медведев М. Ю. и др. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение перспективной системы энергосбережения автономной группы БПЛА // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2022. – №. 5 (229). – С. 230-243.
- 38.Новикова К. О., Фетисов В. С., Овчинников А. В. Автоматические сервисные станции для обслуживания беспилотных летательных аппаратов // Научные исследования, разработки и практические внедрения. – 2022. – С. 332-335.
- 39.Seyedi, Sepehr & Yazicioğlu, Yasin & Aksaray, Derya. (2019). Persistent Surveillance With Energy-Constrained UAVs and Mobile Charging Stations. IFAC-PapersOnLine. 52. 193-198. 10.1016/j.ifacol.2019.12.157
- 40.Booth, Kyle & Piacentini, Chiara & Bernardini, Sara & Beck, J.. (2020). Target Search on Road Networks With Range-Constrained UAVs and Ground-Based Mobile Recharging Vehicles. IEEE Robotics and Automation Letters. PP. 1-1. 10.1109/LRA.2020.3015464
- 41.S. Ramasamy, J. -P. F. Reddinger, J. M. Dotterweich, M. A. Childers and P. A. Bhounsule, «Cooperative route planning of multiple fuel-constrained Unmanned Aerial Vehicles with recharging on an Unmanned Ground Vehicle,» 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2021, pp. 155-164, doi: 10.1109/ICUAS51884.2021.9476848
- 42.Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
- 43.Handbook of Robotics. Editors: Bruno Siciliano, Oussama Khatib. Springer. 2016, <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-32552-1>
- 44.Ren, W. Consensus seeking, formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control / W. Ren. – Brigham: Brigham University, 2004. – 141 с.

45. Jensen, K., Nielsen, S. H., Joergensen, R. N., Boegild, A., Jacobsen, N. J., Joergensen, O. J., & Jaeger-Hansen, C. L. (2012, July). A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research. In Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture.
46. Nielsen, J., & Lund, H. H. (2008). Modular robotics as a tool for education and entertainment. *Computers in Human Behavior*, 24(2), 234–248. doi:10.1016/j.chb.2007.01.011
47. Zykov, V., Phelps, W., Lassabe, N., & Lipson, H. (2008, September). Molecubes extended: Diversifying capabilities of open-source modular robotics. In IROS-2008 Self-Reconfigurable Robotics Workshop (pp. 22-26).
48. Zykov, V., Chan, A., & Lipson, H. (2007, November). Molecubes: An open-source modular robotics kit. In IROS-2007 Self-Reconfigurable Robotics Workshop (pp. 3-6).
49. White, P. J., Kopanski, K., & Lipson, H. (2004, April). Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 (Vol. 3, pp. 2888-2893). IEEE.
50. Lyder, A. H., Stoy, K., García, R. F. M., Larsen, J. C., & Hermansen, P. (2013). On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics. In *Intelligent Autonomous Systems 12* (pp. 649-661). Springer, Berlin, Heidelberg.
51. Parrott, C., Dodd, T. J., & Groß, R. (2014, September). HiGen: A high-speed genderless mechanical connection mechanism with single-sided disconnect for self-reconfigurable modular robots. In 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 3926-3932). IEEE.
52. Lyder, A., Garcia, R. F. M., & Stoy, K. (2008, September). Mechanical design of odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. In 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 883-888). IEEE.

- 53.Фетисов, В. С., Ахмеров, Ш. Р., Сизоненко, Р. В., Красноперов, Р. А. (2014). Наземные станции подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов на основе открытых контактных площадок. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 10(2).
- 54.Фетисов В. С., Ахмеров Ш. Р., Сизоненко Р. В., Оценка схем построения контактных устройств в посадочных платформах для подзарядки электрических БПЛА с вертикальным взлетом-посадкой // *Вестник УГАТУ*. 2015. №2 (68).
- 55.Фетисов Владимир Станиславович, Мельничук Ольга Васильевна Моделирование электрических цепей интеллектуальной контактной матрицы // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2015. №4.
- 56.Ngo, T. D., & Schioeler, H. (2006, June). Probabilistic distributed energy for long-lived group of mobile robots. In 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (pp. 1-6). IEEE.
- 57.Zhang, J., Song, G., Li, Y., Qiao, G., & Li, Z. (2013). Battery swapping and wireless charging for a home robot system with remote human assistance. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59(4), 747–755. doi:10.1109/tce.2013.6689685
- 58.Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil and Seth Copen Goldstein, Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 24, No. 7, July, (2009)
- 59.Yu, C., Lu, R., Cui, S., and Su, C. (2011). Research on resonance based wireless energy transfer device for small mobile equipments. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. doi:10.1109/icems.2011.6073536
- 60.Deyle, T., & Reynolds, M. (2008, May). Surface based wireless power transmission and bidirectional communication for autonomous robot swarms.

- In 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 1036-1041). IEEE.
61. Wang, J., Liang, Z., & Zhang, Z. (2017, April). Energy-encrypted contactless charging for swarm robots. In 2017 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG) (pp. 1-1). IEEE.
  62. Farshad Arvin, Simon Watson, Ali Emre Turgut, Jose Espinosa, Tomas Krajnik, Barry Lennox, Perpetual Robot Swarm: Long-term Autonomy of Mobile Robots Using On-the-fly Inductive Charging, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, December 2018, Volume 92, Issue 3–4, pp 395–412
  63. Farshad Arvin, Simon Watson, Ali Emre Turgut, Jose Espinosa, Tomas Krajnik, Barry Lennox, Perpetual Robot Swarm: Long-term Autonomy of Mobile Robots Using On-the-fly Inductive Charging, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, December 2018, Volume 92, Issue 3–4, pp 395–412
  64. The Qi Wireless Power Transfer System Power Class 0 Specification. Part 4: Reference Designs/ Wireless Power Consortium, 2016.
  65. The Qi Wireless Power Transfer System Power Class 0 Specification. Part 4: Reference Designs/ Wireless Power Consortium, 2016.
  66. Pratik Dubal. Rezenca – Wireless Charging Standard based on Magnetic Resonance./ IJARCCCE, 2015.
  67. F. Pellitteri, V. Boscaino, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, and G. Capponi, “Experimental test on a Contactless Power Transfer system”, in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2014 Ninth International Conference on, 2014, pp. 1–6.
  68. Pellitteri, F. "Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries.": дис. кандидата в области электротехники, электроники и телекоммуникаций, Математика и автоматика, S.S.D.: ING-IND/32, ING-INF/01, 2016
  69. Pellitteri, F. "Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries.": дис. кандидата в области электротехники, электроники и телекоммуникаций, Математика и автоматика, S.S.D.: ING-IND/32, ING-INF/01, 2016

70. J.-I. Itoh, K. Noguchi, and K. Orikawa, "System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger," in *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*, 2014 International, 2014, pp. 2277–2284.
71. Noguchi K., Orikawa K., Itoh J. System Design of Electric Assisted Bicycle using the EDLCs as Power Source //2013 Japan-Korea Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Conversion. – 2013. – №. IEEJ-SPC-P2-21.
72. Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Design and Test of a High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 5, pp.1801–1812, May 2009
73. Hasan, N., Cocar, I., Amely, T., Wang, H., Zane, R., Pantic, Z., & Bodine, C. (2015). A practical implementation of wireless power transfer systems for socially interactive robots. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). doi:10.1109/ecce.2015.7310356
74. Samanta, S., Rathore, A. K., & Thrimawithana, D. J. (2017). Bidirectional current-fed half-bridge (C)(LC)–(LC) configuration for inductive wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 4053-4062
75. Madawala, U. K., & Thrimawithana, D. J. (2011). A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(10), 4789-4796.
76. Zhao, L., Thrimawithana, D. J., & Madawala, U. K. (2017). Hybrid bidirectional wireless EV charging system tolerant to pad misalignment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), 7079-7086
77. Neath, M. J., Swain, A. K., Madawala, U. K., Thrimawithana, D. J., & Vilathgamuwa, D. M. (2012, September). Controller synthesis of a bidirectional inductive power interface for electric vehicles. In *2012 IEEE*

- Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET) (pp. 60-65). IEEE.
78. Thrimawithana, D. J., & Madawala, U. K. (2009, September). A contactless bi-directional power interface for plug-in hybrid vehicles. In 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 396-401). IEEE.
79. Miskiewicz, R., & Moradewicz, A. (2011). Contactless power interface for plug-in electric vehicles in V2G systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 59(4), 561-568.
80. Miura, S., Nishijima, K., & Nabeshima, T. (2013, October). Bi-directional wireless charging between portable devices. In 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 775-778). IEEE.
81. Huang, M., Lu, Y., & Martins, R. P. (2018). A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(8), 7745-7753
82. Wu, H., Gu, B., Wang, X., Pickert, V., & Ji, B. (2019, March). Design and control of a bidirectional wireless charging system using GaN devices. In 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 864-869). IEEE.
83. Krestovnikov K., Cherskikh E., Ronzhin A. Mathematical Model of a Swarm Robotic System with Wireless Bi-directional Energy Transfer // *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. – Springer, Cham, 2020. – С. 13-23. doi: 10.1007/978-3-030-37841-7\_2
84. Каляев, И. А., Гайдук, А. Р., Капустян, С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Монография / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Изд. фирма «Физико-математическая литература», 2009. – 280 с.
85. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-efficient path planning algorithm on three-dimensional large-scale terrain maps for mobile robots



- //International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham, 2020. – С. 319-330.
- 86.Медведев М.Ю., Бросалин Д.О. Исследование алгоритмов глобального планирования маршрута. Мехатроника, автоматика и робототехника. 2023. № 11. С. 58-61. DOI: 10.26160/2541-8637-2023-11-58-61
- 87.Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 24. №4. С. 107–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>
- 88.Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. Pearson Education India. 2009. 408 p.
- 89.Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Smirnov, P. (2019, August). Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. In International Conference on Interactive Collaborative Robotics (pp. 193-203). Springer, Cham.
- 90.Савельев А.И., Крестовников К.Д., Солёный С.В. Разработка беспроводного зарядного устройства для мобильной робототехнической платформы // в сборнике: Интеллектуальные Энергосистемы. Материалы V Международного молодежного форума. 2017. С. 197-201.
- 91.Pavliuk N., Smirnov, P., Kovalev A.: Constructional and architectural solutions for service mobile platform with pluggable modules. Izvestiya Tula State University, Technical science, Vol. 10, 2019, pp. 181–193.
- 92.Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Исследование эффективности беспроводной системы передачи энергии при эксплуатации в воде и растворах. Датчики и системы. 2022. № 2 (261). С. 19-27. DOI: 10.25728/datsys.2022.2.3
- 93.Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Савельев А.И., Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов. Морские интеллектуальные

- технологии. 2022. №4 часть 1. С. 144-155. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>
94. K. Krestovnikov, E. Cherskikh, A. Ronzhin, Mathematical model of a swarm robotic system with wireless bi-directional energy transfer. *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms, Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 272. p. 13-23. DOI: 10.1007/978-3-030-37841-7
95. К.Д. Крестовников, А.А. Ерашов Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // *Робототехника и техническая кибернетика*. – Т. 10. - № 3. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2022. – С. 201-212. DOI 10.31776/RTSJ.10305
96. Abdolkhani, A., Hu, A. P., & Tian, J. (2015). Autonomous Polyphase Current-Fed Push–Pull Resonant Converter Based on Ring Coupled Oscillators. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(2), 568–576. doi:10.1109/jestpe.2014.2377171
97. Abdolkhani, A., & Hu, A. P. (2014). Improved autonomous current-fed push–pull resonant inverter. *IET Power Electronics*, 7(8), 2103–2110. doi:10.1049/iet-pel.2013.0749
98. Hu, A. P., & Si, P. (2004). A low cost portable car heater based on a novel current-fed push-pull inverter. In *Australasian Universities Power Engineering Conference*.
99. Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Pavliuk, N. (2019). Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system. *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*. doi:10.1109/eurocon.2019.8861856
100. Krestovnikov, K., Saveliev, A., Shabanova, A., & Vatamaniuk, I. (2020). Comparative study of synchronous and non-synchronous rectifiers for use in the receiving part of a wireless charging system. In *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”* (pp. 675-685). Springer, Singapore.

101. Krestovnikov, K., Cherskikh, E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics // *Radioengineering*, Vol. 30, No. 1, p. 142-149, 2021 <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>
102. Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots. *SJEE*. 2021. vol. 18. no. 2. pp. 171-192. DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE2102171K>
103. Chavchanidze, G. D. *Electrical circuits of sine current*. MIIT, Moscow, 2007
104. Pshikhopov, V. K., & Medvedev, M. Y. (2018). Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes. *SPIIRAS Proceedings*, 5(60), 39-63. <https://doi.org/10.15622/sp.60.2>
105. Meinke H., Gundlach F. W. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer-Verlag, 1986. part B13-B15. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>
106. Wheeler, H. A. (1942). Formulas for the Skin Effect. *Proceedings of the IRE*, 30(9), 412–424. doi:10.1109/jrproc.1942.232015
107. de Queiroz, A. C. M. (2005). Mutual inductance and inductance calculations by Maxwell's Method. Home page of Dr. Antonio Carlos M. de Queiroz.
108. Wheeler, H. A. (1928). Simple inductance formulas for radio coils. *Proceedings of the institute of Radio Engineers*, 16(10), 1398-1400.
109. Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Bykov, A. (2020). Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 26(6), 17-24. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.6.26181>
110. Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils // *Electromechanics and Robotics*. – Springer, Singapore, 2022. – C. 359-369. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Таблица А1 – Параметры конфигурационного файла программного комплекса

Обозначение параметра	Наименование параметра	Тип значения параметра
Параметры роботов		
M	Число роботов-рабочих	int
Z	Число роботов-заряжающих	int
i	Идентификатор робота	int
robots_workers	Массив параметров роботов-рабочих	int robots_workers [M][7]{i, xi, yi, zi, ch_level, status}
robots_chargers	Массив параметров роботов-заряжающих	int robots_chargers [Z][7]{ i, xi, yi, zi, ch_level, status}
CH_LEVEL_MAX	Максимальный уровень заряда робота (%)	int
WORKERS_LEVEL_MIN	Минимальный уровень заряда роботов-рабочих (%)	int
CHARGERS_LEVEL_MIN	Минимальный уровень заряда роботов-заряжающих (%)	int
CHARGE_RANGE	Диапазон поиска точек заряда от workers_level_min (%)	int
MOVEMENT_SPEED	Максимальная скорость роботов (м/с)	float

DOWNTIME_RATE	Расход энергии в простое (%/с)	float
MOVEMENT_RATE	Расход энергии при перемещении (%/с)	float
WORKERS_TASK_RATE	Расход энергии при выполнении задачи робот-рабочий (%/с)	float
CHARGERS_TASK_RATE	Расход энергии при выполнении задачи робот-заряжающий (%/с)	float
CHARGING_RATE	Пополнение энергии при заряде роботов (%/с)	float
ROBOT_LENGTH	Длина робота (м)	int
Параметры среды функционирования		
DISTANCE_RATE	Расход энергии на преодоление расстояния между соседними точками карты высот	float
CHARGING_STATION	Координаты зарядной станции	int CHARGING_STATION [3]{xu, yu, zu}
Параметры целевых задач		
N	Число задач	int
ASSIGNED_TASKS	Массив координат целевых задач	int ASSIGNED_TASKS [N][3]{xj, yj, zj}
TASK_TIME	Время выполнения задач	int
TASK_RATE	Расход энергии на выполнение задачи	float

Таблица А2 – Параметры, создаваемые при работе модулей программного комплекса

Обозначение параметра	Наименование параметра	Тип значения параметра
-----------------------	------------------------	------------------------

Модуль построения траекторий		
movement_path	Траектория i-робота до задачи или траектория от зарядной станции до j-задачи	int movement_path [[2]{xu, yu}
workers_path	Массив траекторий роботов-рабочих до каждой задачи	int workers_path [[{movement_path}
chargers_path	Массив траекторий роботов-заряжающих до каждой задачи	int chargers_path [[{movement_path}
chargers_charge_path	Массив траекторий роботов-заряжающих от каждой задачи до зарядной станции	int chargers_charge_path [{movement_path}
tasks_charge_path	Массив траекторий от зарядной станции до каждой задачи	tasks_charge_path [{movement_path}
Модуль расчета длин траекторий		
path_length	Длина траектории i-робота до задачи или траектории от зарядной станции до j-задачи	int
workers_path_length	Массив длин траекторий	int workers_path_length [[{path_length}
chargers_path_length	Массив длин траекторий	int chargers_path_length [[{path_length}
tasks_charge_length	Массив длин траекторий от зарядной станции до каждой задачи	int tasks_charge_length [{path_length}
Модуль определения выполнимых задач		
workers_tasks	Массив координат выполнимых задач	int workers_tasks [[3]{xj, yj, zj}
Модуль оптимального распределения задач		
workers_tasks_length	Массив длин траекторий после поиска оптимального распределения роботов-рабочих между задачами	int workers_tasks_length [[{path_length}

chargers_tasks_length	Массив длин траекторий после поиска оптимального распределения роботов-заряжающих между задачами	int chargers_tasks_length [] [] {path_length}
Модуль определения точек заряда		
chargers_tasks	Массив координат задач пополнения энергетических ресурсов	int chargers_tasks [] [3] {xj, yj, zj}
Модуль формирования миссий		
workers_mission	Массив информации о предстоящей миссии робота-рабочего	int workers_mission [] {i, workers_path[] [], chargers_tasks[]}
chargers_mission	Массив информации о предстоящей миссии робота-заряжающего	int chargers_mission [] {i, chargers_path[] [], chargers_tasks[], chargers_charge_path[]}

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ 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/NIPR.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/МІТ.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:*

1. Крестовников К.Д., Беспроводная зарядная система / Савельев А.И., Крестовников К.Д. // Патент на изобретение №2698307 от 26.08.2019.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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

ПРИЛОЖЕНИЕ В. КОПИИ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ  
СВИДЕТЕЛЬСТВ И ПАТЕНТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2698307

**БЕСПРОВОДНАЯ ЗАРЯДНАЯ СИСТЕМА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН) (RU)*

Авторы: *Савельев Антон Игоревич (RU),  
Крестовников Константин Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2018132577

Приоритет изобретения 11 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в


Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 26 августа 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 сентября 2038 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иевлев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680118

### Образовательная облачная среда для программирования наземных робототехнических платформ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии науки" (RU)*

Авторы: *Савельев Антон Игоревич (RU), Камынин Константин Викторович (RU), Крестовников Константин Дмитриевич (RU), Черноусова Полина Михайловна (RU), Черских Екатерина Олеговна (RU)*



Заявка № 2022668320

Дата поступления 10 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 октября 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 68b95077614e2910a94e6b524145d5c7  
Владимира Зубова  
Действителен с 20.10.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2802056****Двунаправленная система беспроводной передачи энергии**

Патентообладатель: *Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (СПб ФИЦ РАН) (RU)*

Авторы: *Крестовников Константин Дмитриевич (RU), Савельев Антон Игоревич (RU), Ерашов Алексей Алексеевич (RU)*

Заявка № **2022118848**  
 Приоритет изобретения **11 июля 2022 г.**  
 Дата государственной регистрации  
 в Государственном реестре изобретений  
 Российской Федерации **22 августа 2023 г.**  
 Срок действия исключительного права  
 на изобретение истекает **11 июля 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
 по интеллектуальной собственности*

Электронный документ подписан электронной подписью  
 Сертификат 4296680613853364b4f96183b73b4aa7  
 Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
 Действителен с 19.02.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023669595

**Программное обеспечение для управления передающей частью беспроводной системы передачи энергии на базе резонансного автогенератора**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (RU)*

Авторы: *Савельев Антон Игоревич (RU), Крестовников Константин Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2023669029

Дата поступления **18 сентября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **18 сентября 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Электронный документ подписан электронной подписью  
Сертификат: 4296630fe28c3164ba96f83d79d4aa7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 2018 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023681828

**Программный модуль позиционирования робота по  
ArUco-маркерам**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (RU)*

Авторы: *Савельев Антон Игоревич (RU), Летенков Максим Андреевич (RU), Крестовников Константин Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2023681440

Дата поступления **19 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **19 октября 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 429b6ba0f61961364ca196183b73b4aa7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 19.10.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023686919

**Программный комплекс формирования миссий группы наземных роботов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (RU)*

Авторы: *Крестовников Константин Дмитриевич (RU), Аникин Дмитрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2023686992

Дата поступления 11 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 декабря 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 42916a016218621164b496183e73e4aa7  
Владислав Зубов Юрией Сергеевной  
Действителен с 10.08.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. КОПИИ АКТОВ ВНЕДРЕНИЯ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный научный центр  
«КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
(КБНЦ РАН)

360002, КБР, г. Нальчик, Долинск, ул. Балкарова, д. 2. Тел./факс (866-2) 42-65-62  
E-mail: kbncran@mail.ru, ОКПО 31842187, ОГРН 1020700760453, ИНН 0711026447

---

**А К Т**

**об использовании результатов диссертационной работы  
Крестовникова К.Д. на тему «Групповое управление наземными  
роботами с перераспределением энергетических ресурсов на  
динамически планируемых маршрутах»  
в научно-исследовательской деятельности Федерального  
государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный  
научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской  
академии наук»**

Комиссия в составе: председателя – к.ф.-м.н. заведующего лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы» (НАИС) КБНЦ РАН К.Ч. Бжихатлова, к.т.н. заведующего лабораторией «Бионаноробототехники» Института информатики и проблем регионального управления (ИИПРУ) КБНЦ РАН А.У. Заммоева и к.ф.-м.н. главного ученого секретаря КБНЦ РАН Ю.В. Савойского, рассмотрев представленные материалы:

1. Автореферат и диссертационную работу Крестовникова Константина Дмитриевича.
2. Техническую документацию к наземной робототехнической платформе на базе шасси с четырехколесной кинематикой дифференциального типа и распределенной трехуровневой архитектурой системы управления ее электротехническим оснащением.

установила, что:

1. Математическая модель и алгоритмы группового управления наземными роботами, представленные в диссертационной работе Крестовникова К.Д., вошли в круг перспективных подходов, выявленных при аналитическом обзоре исследований интеллектуальных самообучающихся систем принятия решений и управления согласованным поведением автономных роботов.

2. Разработанная Крестовниковым К.Д. математическая модель динамического управления группой наземных роботов была использована при исследовании и разработке математической модели процесса управления коллективным поведением группы автономных роботов на основе обмена сообщениями.
3. Описанные в диссертационной работе Крестовникова К.Д. модельно-алгоритмические и программно-аппаратные средства группового управления наземными роботами и перераспределения энергетических ресурсов были использованы при исследованиях перспективных способов управления поведением автономных роботов в рамках научной темы № FMEW-2022-0025 «Разработка методов интеллектуального принятия решений и управления согласованным поведением автономных роботов в человеко-машинных коллективах на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур» КБНЦ РАН.

Председатель комиссии  
заведующий лабораторией  
НАИС КБНЦ РАН  
к.ф.-м.н.



К.Ч. Бжихатлов

Члены комиссии:  
заведующий лабораторией  
«Бионаноробототехники» ИИПРУ КБНЦ РАН  
к.т.н.



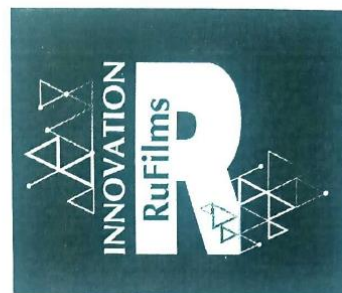
А.У. Заммиев

главный ученый секретарь КБНЦ РАН  
к.ф.-м.н.



Ю.В. Савойский

ОБЩЕСТВО  
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН"  
ИНН/КПП: 9709081285/770901001  
ОГРН 1227700300673 от 25.05.2022



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН»  
Алексей Владимирович Козуляев  
«02» мая 2023 г.

#### АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы младшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) Крестовникова Константина Дмитриевича в проектной деятельности ООО «РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН»**

Комиссия в составе: генерального директора А.В. Козуляева, членов коллектива: Е. А. Конотоповой и П. В. Андреевой, рассмотрев представленные материалы:

1. Автореферат и диссертационную работу Крестовникова Константина Дмитриевича.
2. Техническую документацию к программному продукту «Образовательная облачная среда для программирования наземных робототехнических платформ»

установили, что оригинальные научные результаты диссертационной работы

Крестовникова К.Д. на тему «Групповое управление наземными роботами с перераспределением энергетических ресурсов на динамически планируемых маршрутах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в проектах ООО «РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН», а именно:

1. Комплекс алгоритмов группового централизованного управления наземными роботами, отличающиеся реализацией процессов перераспределения энергетических ресурсов на маршрутах между контрольными точками местоположения целевых задач при передвижении на открытом пространстве с рельефной поверхностью, обеспечивающий уменьшение общего времени функционирования группы роботов.
2. Разработанные программные и технические решения, реализующие управление и взаимодействие наземных роботов, внедрены в образовательные комплексы наземной робототехники и расширяют набор технологий для учебной деятельности.

Разработанное материально-техническое обеспечение образовательного онлайн-курса наземной робототехники, включая наземные робототехнические платформы и наборы трасс, использующиеся в образовательных и научно-популярных мероприятиях, наглядно демонстрируют возможности группового управления робототехническими средствами.

Генеральный директор  
 ООО «РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН»  
 Алексей Владимирович Козуляев



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

### **А К Т**

#### **об использовании результатов диссертационной работы Крестовникова К.Д. на тему «Алгоритмы и программная система управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов» в НИР СПб ФИЦ РАН**

Комиссия в составе: председателя д.т.н., С.В. Кулешова, членов комиссии: к.т.н. А.И. Савельева и к.воен.н. Е.П. Силлы, рассмотрев представленные материалы:

1. Автореферат и диссертационную работу Крестовникова Константина Дмитриевича.
2. Отчетную документацию научно-исследовательских работ лаборатории автономных робототехнических систем.

установила, что:

1. Основные результаты, полученные Крестовниковым К.Д. в рамках диссертационной работы, были использованы при проведении НИР, выполняемых:

- по гранту РФФИ №19-08-01215А «Теоретические основы двунаправленной беспроводной передачи энергии и алгоритмы построения автоматического перераспределения энергоресурсов в группе роботов»;
- по гранту Президента РФ МК-3094.2022.1.6 «Подход к позиционированию подводного автономного аппарата для получения беспроводной электрической энергии от зарядной станции надводного аппарата»;
- по бюджетной теме «Теоретические основы и алгоритмические модели когнитивного управления, взаимодействия и анализа состояния групп гетерогенных робототехнических комплексов» шифр 0073-2019-0001, 2019-2021 гг.;
- по бюджетной теме «Теоретические основы взаимодействия групп гетерогенных робототехнических средств при выполнении совместных задач с применением биоподобных самообучающихся систем интеллектуальной обработки больших объемов нечеткой информации», шифр FFZF-2022-0001, 2022 г.

2. В диссертационной работе Крестовниковым К.Д. разработана математическая модель группового управления наземными роботами, обеспечивающая перераспределение энергетических ресурсов посредством беспроводной передачи энергии при выполнении целевых задач группой роботов. Модель систематизирует структурно-параметрические зависимости основных

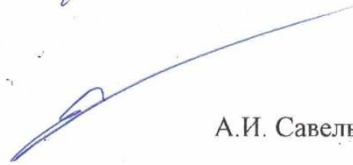
сущностей: прикладная задача, роботы и взаимодействие в группе в целом с точки зрения энергетических ресурсов и позволяет вычислять необходимое количество роботов-рабочих, роботов-заряжающих и время выполнения целевой задачи. Предложен алгоритм конечного позиционирования роботов и метод оценки затрачиваемого времени на обмен энергоресурсами. Алгоритм конечного позиционирования основан на применении системы технического зрения и позволяет с высокой точностью достигать необходимое взаимное положение роботов для эффективной передачи энергии. Перераспределение энергетических ресурсов повышает надежность функционирования группы роботов и позволяет выполнять задачи, которые были бы не реализуемы автономными независимыми роботами. Разработанная система беспроводной передачи энергии обеспечивает пониженные требования к точности конечного позиционирования роботов, тем самым позволяет упростить сенсорную систему роботов, снизить затраты времени на передвижение, и значительно повышает вероятность успешного обмена энергоресурсами. Использование разработанного математического, алгоритмического и аппаратного обеспечения позволяет значительно расширить функциональные возможности роевой робототехнической системы и использовать ее для потенциально более энергоемких задач.

Председатель комиссии  
Заместитель директора по научной работе,  
д.т.н.



С.В. Кулешов

Члены комиссии:  
Руководитель лаборатории  
автономных робототехнических систем,  
к.т.н.



А.И. Савельев

Ученый секретарь,  
к.т.н.



А.А. Зайцева



УТВЕРЖДАЮ

Протокол заседания

Н.А.Кострикова

2023 г.

## АКТ

об использовании результатов диссертационной работы младшего научного сотрудника лаборатории автономных робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) Крестовникова Константина Дмитриевича в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Мы, нижеподписавшиеся, проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «КГТУ», заведующий кафедрой цифровых систем и автоматики института цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ», канд. техн. наук, доцент Устич В.И., директор института цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ» канд. техн. наук, доцент Тристанов А.Б., заведующий кафедрой прикладной информатики института цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ» канд. экон. наук, доцент Соловей М.В. составили настоящий акт в том, что оригинальные научные результаты диссертационной работы Крестовникова К.Д. на тему «Групповое управление наземными роботами с перераспределением энергетических ресурсов на динамически планируемых маршрутах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс университета, а именно:



1. Математическая модель динамического управления группой наземных роботов, отличающаяся учетом новых параметров, описывающих энергетические характеристики рабочих и заряжающих роботов, обеспечивающая оптимизацию потребления ресурсов при движении в трехмерном пространстве и реализации целевых задач.

2. Комплекс алгоритмов группового централизованного управления наземными рабочими и заряжающими роботами, отличающиеся реализацией процессов перераспределения энергетических ресурсов на маршрутах между контрольными точками местоположения целевых задач при передвижении на открытом пространстве с рельефной поверхностью, обеспечивающий уменьшение общего времени функционирования группы роботов.

Указанные результаты вошли в материалы Отчета о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе «Разработка материально-технического и учебно-методического обеспечения образовательного онлайн курса наземной робототехники», подготовленного в рамках Договора №6/НИР/2022 от «08» июля 2022 г. между ФГБОУ ВО «КГТУ» и СПб ФИЦ РАН.

Разработанные программные и технические решения, реализующие управление и взаимодействие наземных роботов, используются в учебном процессе по направлению: 15.03.01 – «Автоматизация технологически процессов и производств» при выполнении выпускных квалификационных работ, в лекционном материале и лабораторном практикуме учебных курсов «Системы автоматизации и управления технологическими процессами», «Адаптивные и оптимальные системы управления».

Разработанное материально-техническое обеспечение образовательного онлайн-курса наземной робототехники, включая наземные робототехнические платформы и наборы трасс, использующиеся в натуральных экспериментах и

лабораторном практикуме, позволили наглядно продемонстрировать возможности группового управления роботами, способы проектирования систем управления роботов и повысить интерес обучаемых к предмету.

Проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
заведующий кафедрой цифровых систем  
и автоматики института цифровых  
технологий ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
канд. техн. наук, доцент



В.И. Устич

Директор института  
цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
канд. техн. наук, доцент



А.Б. Тристанов

Заведующий кафедрой прикладной  
информатики института  
цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
канд. экон. наук, доцент



М.В. Соловей