Приложение к итоговому отчету о выполнении проекта № 19-08-01215 «Теоретические основы двунаправленной беспроводной передачи энергии и алгоритмы построения автоматического перераспределения энергоресурсов в группе роботов»

Целью проекта является разработка теоретических основ и алгоритмов построения автономных робототехнических средств для перераспределения энергетических ресурсов на основе технологии беспроводной передачи энергии при выполнении групповых задач. Реализация поставленной цели исследование разработку предполагает И технологических основ беспроводной передачи энергии между агентами роевых систем, разработку структурных и схемотехнических решений беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ), получение её характеристик и анализ ограничений. В ходе первого этапа проекта был проведен анализ современного состояния проблемы беспроводной передачи энергии И перераспределения робототехническими энергетических ресурсов между автономными средствами. Определены направления исследований, нацеленные на решение проблемы перераспределения энергии в группе роботов и увеличение времени автономной работы роботов за счет оптимизации маршрутов движения агентов роя. Проведены анализ и классификация методов перераспределения энергетических ресурсов автономными робототехническими между средствами. Выявлены основные недостатки рассмотренных БСПЭ, в частности, существующие решения в большинстве случаев являются однонаправленными и позволяют осуществлять пополнение заряда агентов роя только от стационарных док-станций, что приводит к увеличению времени выполнения задач роевой системой. Также использование однонаправленных БСПЭ для перераспределения энергии не является эффективным решением, поскольку для передачи энергии от одного агента к другому требуется

установка приемной и передающей частей устройства на каждого робота. Более эффективным решением данной задачи являются двунаправленные БСПЭ, в которых каждая часть системы может использоваться в качестве передающей и приемной. Также в рамках первого этапа проекта были разработаны теоретические и технологические основы двунаправленной передачи энергии непосредственно между агентами роя с применением специализированной системы управления беспроводной передачей энергии, обеспечивающей защиту от недопустимых режимов работы, контроль рабочих параметров и взаимодействие с пользователем. Разработаны решения, которые обеспечат работу передающего и приемного колебательных контуров режиме резонанса, что позволит добиться наилучших показателей В эффективности передаваемой мощности при любом взаимном И расположении частей устройства. Результаты первого года исследований представлены на 3 международных конференциях. Опубликовано 3 научных статьи в изданиях, индексируемых в базе Scopus/WoS.

В ходе второго этапа проекта была разработана структура И схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи (БСПЭ). Проведено SPICE-моделирование энергии разработанного схемотехнического решения и получены его теоретические характеристики. Особенностями разработанной системы является интегрированная система управления режимом передачи энергии и силовая часть системы, не требующая специализированной системы управления, выполненная в виде резонансного автогенератора. Применение резонансного автогенератора и идентичных контуров в приемной и передающей частях позволяет системе работать в резонансном режиме и не требует подстройки рабочей частоты, независимо от расстояния и смещений между магнитосвязанными катушками, что позволяет повысить эффективность и передаваемую мощность системы. Данная особенность обеспечивает использование системы при низкой точности совмещения между приемной и передающей катушками, что актуально в автономной робототехнике. Одним из преимуществ

разработанной структуры и схемотехнического решения БСПЭ является возможность получать значение напряжения на выходе системы, работающей в режиме приема энергии, равным или выше значения напряжения источника питания системы, работающей в режиме передачи энергии.

Поскольку правильный выбор параметров катушек резонансных контуров в индуктивных системах передачи энергии в значительной степени влияет на эффективность и передаваемую мощность данных систем, была разработана методика расчета геометрических и электрических параметров и подход к выбору оптимального количества витков плоских спиралевидных катушек, используемых в БСПЭ с параллельным резонансным контуром. Применение оптимальных вариантов катушек, рассчитанных в соответствии с разработанной методикой, позволило увеличить передаваемую мощность прототипа системы на 33,8 %, а эффективность на 5,9%. Результаты исследований представлены на 1 международной конференции, труды которой индексируются в Scopus. Опубликовано 2 научные статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ.

В ходе выполнения проекта был проведен анализ рабочих ограничений существующих систем беспроводной передачи энергии, который выявил эффективностью работы системы, передаваемой взаимосвязи между мощностью и геометрическим расположением приемной и передающей катушек. Исследование эксплуатационных ограничений БСПЭ, связанных с относительным расположением приемной и передающей частей системы проведено на реальном прототипе системы, реализованном на основе разработанных структурных и схемотехнических решений. 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 получены зависимости эффективности системы от передаваемой мощности для 6 фиксированных расстояний

передачи энергии в диапазоне от непосредственной близости катушек друг к другу до 25 мм. График зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных расстояний – *L* передачи энергии представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных расстояний между катушками

Кривые на рисунке 1 имеют схожую форму, при *L*=0 и *L*=5 мм практически совпадают. Увеличение расстояния между приемной и передающей катушками ведет к снижению максимальной мощности нагрузки.

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 смещении между катушками - *H*. Зависимости были получены для 5 осевых смещений и представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных смещений между катушками

При сравнении графиков на рисунках 1 и 2 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 ~3.5 раза.

Последующая обработка экспериментальных результатов позволила вывести закономерности, которые связывают параметры передаваемой мощности и эффективности работы системы в зависимости от расстояния или осевого смещения между катушками. Выведенные системы уравнений необходимы системе управления роем роботов для определения актуальности передачи энергии между агентами при достигнутом взаимном положении агентов. Данная информация позволит эффективно распределять энергетические ресурсы в рое роботов посредством двунаправленной системы беспроводной передачи энергии. Для создания программного обеспечения, реализующего работу группы роботов, были разработаны алгоритмы на основе которых функционирует вся система. В основе разработанных алгоритмов лежит математическая модель, которая описывает реальную систему в параметрах и переменных. Базируясь на ранее представленной математическая модели [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. р. 13-23. DOI: 10.1007/978-3-030-37841-7_2], была разработана новая математическая модель, учитывающая параметры агентов и группы роботов необходимые для распределения задач и энергетических ресурсов.

Предлагаемая математическая модель базируется на элементах теории множеств. Пусть даны точки карты высот рабочего пространства $b_u = \{x_u, y_u, z_u\}|b_u \in B, u = 1, ..., um$, а также множество роботов N, состоящее из множества роботов-рабочих R_w и заряжающих роботов R_p : $N = \{R_w, R_p\}$. Множество роботов-рабочих представляется в виде $R_w = \{w_1, ..., w_m\}$, где $w_i \in R_w, m$ – число роботов-рабочих, i – номер робота. Каждому w_i принадлежит параметр координаты робота-рабочего в пространстве c_i и значение его текущего запаса энергии e_i , то есть $\{c_i, e_i\} \in w_i$. Множество заряжающих роботов представляет собой множество $R_p = \{p_1, ..., p_z\}$, где $p_i \in R_p$, z – число заряжающих роботов. При этом также $\{c_i, e_i\} \in p_i$.

Группе роботов-рабочих назначаются задачи $t_j \in T = \{t_1, ..., t_n\}$, где j – номер задачи, n – число задач. Каждой задаче t_j принадлежит параметр координаты точки выполнения задачи d_j и энергия e_j , которая необходима для выполнения роботом-рабочим задачи t_j , то есть $\{d_j, e_j\} \in t_j$.

Для всех роботов определены значения их энергетических параметров: *e_{max}* – максимально возможный запас энергии робота, обусловленный физическими характеристиками источника питания и соответствующий уровню полного заряда, *e_{minw}* – заданное минимальное значение запаса энергии робота-рабочего, при котором требуется его пополнение, e_{minp} – заданное минимальное значение запаса энергии робота-заряжающего. В процессе движения робот расходует энергетические ресурсы на перемещение, величина e_r определяет затраты энергетических ресурсов на преодоление роботом единичного расстояния O_l . Коэффициент расхода энергетических ресурсов на преодоление сформулой (1).

$$k_r = 100\% \cdot \frac{e_r}{e_{max}}.$$
 (1)

Коэффициент k_r позволяет оценивать расход энергии на преодоление единичного расстояния O_l в процентах от максимально возможного запаса энергии робота e_{max} .

Коэффициент расхода энергии робота на выполнение задачи вычисляется по формуле (2).

$$k_t = 100\% \cdot \frac{e_j}{e_{max}}.$$
 (2)

С помощью коэффициента k_t определяется сколько энергии в процентах от максимально возможного запаса энергии робота e_{max} будет израсходовано на выполнение задачи.

При $e_i \leq e_{minw}$ роботу требуется пополнение энергетических ресурсов. В предлагаемой модели принято, что процесс пополнения энергетических ресурсов роботов всегда осуществляется до заданного максимального значения e_{s_max} , при этом $e_{minw} < e_{s_max} \leq e_{max}$. Также принимается, что текущий уровень запаса энергетических ресурсов c_i определяется как процентное соотношение текущего значения запаса к максимальному, что вычисляется в соответствии с формулой (3).

$$c_i = 100\% \cdot \frac{e_i}{e_{max}}.$$
(3)

Аналогично (3), заданный минимальный уровень запаса энергетических ресурсов находится по формуле (4).

$$c_{minw} = 100\% \cdot \frac{e_{minw}}{e_{max}}.$$
(4)

Для роботов-заряжающих заданный минимальный уровень запаса энергетических ресурсов определяется аналогично (4) в соответствии с формулой (5).

$$c_{minp} = 100\% \cdot \frac{e_{minp}}{e_{max}}.$$
 (5)

При этом примем, что $c_{minp} < c_{minw}$, так как роботу-заряжающему необходимо преодолеть путь от начальной точки до точки заряда и от точки заряда до зарядной станции.

Заданный уровень запаса энергетических ресурсов, который требуется для пополнения, зависит от заданного максимального значения запасов e_{s_max} и определяется в соответствии с формулой (6).

$$c_{max} = 100\% \cdot \frac{e_{s max}}{e_{max}}.$$
 (6)

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

Роботы-рабочие имеют три режима функционирования: следование по маршруту, выполнение задачи и режим заряда аккумуляторной батареи. В режиме следования по маршруту робот последовательно движется к каждой точке маршрута, пока не достигнет конечной точки или точки заряда (при ее наличии). При достижении точки заряда робот-рабочий останавливается до тех пор, пока не прибудет заряжающий робот и не восполнит заряд его батареи. При достижении точки выполнения задачи робот переходит в режим выполнения задачи — останавливается на некоторое время и расходует определенный заряд батареи на ее выполнение.

Заряжающие роботы имеют пять режимов функционирования: следование по маршруту, ожидание робота-рабочего, позиционирование для передачи энергии, передача энергии роботу-рабочему, восполнение заряда собственных батарей. Режим следования по маршруту заряжающих роботов

аналогичен роботам-рабочим за исключением отсутствия остановок в ожидании собственного заряда. При достижении заряжающим роботом точки ожидания робота-рабочего он переходит в режим ожидания и находится на месте до тех пор, пока робот-рабочий не прибудет в данную точку для заряда аккумуляторной батареи, после чего заряжающий робот переходит в режим позиционирования для передачи энергии. В режиме позиционирования заряжающий робот движется по локальному пути до конечной точки, в которой осуществляется передача энергии роботу-рабочему. Локальный путь построен посредством алгоритма построения кривых Дубинса [Dubins, L.E. "On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents". American Journal of Mathematics. 79 (3): 497-516. 1957], который обеспечивает необходимый конечный угол поворота при позиционировании с роботом-рабочим. После успешного позиционирования с роботом-рабочим заряжающий робот переходит в режим передачи энергии. В данном режиме он расходует свою батарею на восполнение заряда основной батареи робота-рабочего до достижения ее полного заряда. По завершении передачи энергии, заряжающий робот остается на месте до тех пор, пока робот-рабочий не будет на безопасном расстоянии. После этого заряжающий робот производит перемещение на базу для восполнения заряда своих батарей. После достижения базы заряжающий робот переходит в режим заряда батарей и находится в ожидании пока основная и дополнительная батареи не достигнут полного заряда.

Распределение задач между роботами группы выполняется посредством алгоритма, реализованного на основе венгерского алгоритма (рисунок 3). Блоки 2 и 4 алгоритма распределения задач содержат вложенные отдельные алгоритмы, первый из которых (рисунок 4) предназначен для определения достижимых точек выполнения задач, а второй – для определения длин путей роботов-рабочих до отобранных достижимых точек выполнения задач (рисунок 5).



Рисунок 3 – Алгоритм распределения задач между роботами-рабочими

На вход алгоритма подаются множества роботов-рабочих R_w и роботовзаряжающих R_p , а также множество задач T, подлежащих выполнению. Также в алгоритме используется множество, которое в начальный момент времени является пустым $W = \emptyset$. В данное множество будут добавляться рабочие точки, которые представляют собой элемент множества, включающий в себя параметры: номер робота-рабочего и координату определенной точки выполнения задачи.

На первом этапе алгоритма, посредством вложенного алгоритма, представленного на рисунке 4, отбираются достижимые точки выполнения

задач t_j , которые помещаются во множество T_e . Затем для всех роботоврабочих, строятся траектории и вычисляются длины путей до каждой точки выполнения задачи, что представлено в виде отдельного алгоритма на рисунке 5, после работы которого образуется множество $L = \{l_{11}, l_{12}, ..., l_{ij}, ..., l_{nnn}\}$, в котором отражаются длины путей до достижимых точек выполнения задач. Данное множество используется венгерским алгоритмом при распределении задач между роботами-рабочими.

После распределения задач образуется множество рабочих точек W { $i;d_j$ }, i = 1...m, j = 1...n. Венгерский алгоритм позволяет находить оптимальное соответствие между роботом-рабочим и выполняемой задачей, исходя из длины пути l_{ij} между *i*-роботом и *j*-задачей. Матрица, с которой оперирует венгерский алгоритм, имеет следующий вид (7):

В случае, когда $|R_w| \ge |T_e|$, то производится построение матрицы размерностью $|R_w| \times |R_w|$, где алгоритмом распределения будут учитываться только первые $|T_e|$ строк (остальные – фиктивные задачи). Отобранные пары номеров роботов-рабочих и координаты задач добавляются элементом во множество рабочих точек W.

Далее производится проверка количества элементов множества T_e . Если количество задач во множестве больше 0, то координата точки выполнения задачи d_j присваивается координате c_i тех роботов во множестве R_w , задачи между которыми были ранее распределены. Затем из множества достижимых задач удаляются те t_j , d_j которых присутствуют во множестве W, то есть определяются нераспределенные задачи, и снова отрабатываются этапы алгоритма, связанные с получением длин путей роботов-рабочих до точек выполнения задач и распределение роботов по данным задачам. Данная часть алгоритма повторяется до тех пор, пока не закончатся задачи, которым не назначен робот-рабочий, в случае, когда $|T_e| = 0$, алгоритм заканчивает свою работу.

Достижимость точек выполнения задач определяется по всему множеству роботов-заряжающих с помощью алгоритма, показанного на рисунке 4. Если был определен хотя бы один робот-заряжающий, который потенциально может переместиться до точки выполнения задачи, то данная точка добавляется во множество T_e .



Рисунок 4 – Алгоритм определения достижимых точек выполнения задач

На первом этапе работы алгоритма для робота-заряжающего строится траектория до точки выполнения задачи, затем определяется длина построенного пути *tp*_{ij}. Проверка достижимости заключается в проверке условия выраженного в виде неравенства (8).

$$\frac{2k_{\underline{r}}tp_{\underline{i}\underline{i}}}{O_{l}} < \frac{1}{y_{p}} \begin{pmatrix} c & -c \\ minw & minp \end{pmatrix}.$$
(8)

Данное условие позволяет отобрать потенциально достижимые точки выполнения задач роботами-заряжающими. Левая часть неравенства (8) означает, что роботу-заряжающему необходимо преодолеть удвоенное количество единичных расстояний, поскольку требуется, чтобы роботзаряжающий вернулся на базу для пополнения заряда аккумулятора. Правая часть неравенства соответствует тому уровню заряда, который роботзаряжающий должен передать роботу-рабочему с учетом заданных ограничений и эффективности передачи энергии между ними. Параметр потенциальной эффективности передачи энергии между роботами – η_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 агентами роя, что является особенностью использования БСПЭ. Для устойчивой работы реальной системы параметр η_p для работы алгоритма следует задавать либо как предполагаемое среднее значение эффективности передачи энергии между агентами, либо как предполагаемое минимальное значение. В соответствии с условием (8) образуется множество T_e выполнимых задач по критерию достижимости роботом-заряжающим их координат.

Для построения траектории каждого робота группы была выбрана модификация алгоритма LRLHD-A* (Local Roughness Local Height Difference A*) [K. Zakharov, A. Saveliev, O. Sivchenko. Energy-efficient Path Planning Algorithm on Three-dimensional Large-scale Terrain Maps for Mobile Robots. Proceedings of 5th International Conference ICR 2020. 2020], в который введено ограничение на угол поворота при выборе новой вершины пути. Данный

алгоритм позволяет находить энергоэффективные пути движения наземных роботов по неоднородной поверхности, что является необходимым при ограниченном заряде батареи робота. Использованная модификация позволяет строить для наземного робота путь, кривизна которого не будет превышать заданного значения модуля угла a_{bd} . Это позволяет роботу двигаться по проложенному маршруту без остановок и резких поворотов, на которые затрачивается дополнительное время и энергия аккумуляторной батареи. Пусть b_1 и b_2 – предпоследняя и последняя точка текущей траектории, а b_3 – точка, рассматриваемая на добавление к маршруту. Если модуль угла между векторами (b_1 , b_2) и (b_2 , b_3) больше, чем значение a_{bd} , то точка b_3 не может быть добавлена к траектории движения робота. Если модуль угла между векторами (b_1 , b_2) и (b_2 , b_3) меньше или равен значению a_{bd} , то точка b_3 добавляется к траектории движения робота.

Определение длин путей роботов-рабочих, операция, представленная в блоке 4 алгоритма распределения задач, осуществляется по следующему алгоритму (рисунок 5):



Рисунок 5 – Алгоритм определения длин путей от роботов-рабочих до достижимых точек выполнения задач

В алгоритме на рисунке 5 для каждого робота строится траектория перемещения от точки c_i до точки выполнения каждой задачи d_j . Затем по координатам промежуточных точек траектории определяется длина пути l_{ij} , которую необходимо преодолеть роботу-рабочему, чтобы достигнуть точки выполнения задачи. Затем во множество *L* добавляется новое значение длины пути. Алгоритм выполняется, пока не будут рассмотрены все точки выполнения задач 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. При этом для выполнения всех задач, назначенных роботу-рабочему, полного заряда аккумуляторной батареи может быть недостаточно. Из этого возникает необходимость определения точек пополнения заряда батареи на построенных для роботов-рабочих траекториях и распределения их между группой роботов-заряжающих.

Общий алгоритм распределения точек заряда между заряжающими роботами изображен на рисунке 6. На вход данного алгоритма подается множество рабочих точек *W*, множества роботов-рабочих *R_w* и роботов-заряжающих *R_p*.



Рисунок 6 – Общий алгоритм распределения точек заряда между заряжающими роботами

Первым этапом алгоритма является построение траектории перемещения в точку выполнения задачи t_j для каждого робота-рабочего w_i в соответствии с полученным множеством рабочих точек W. Данные траектории помещаются во множество $P_w = \{B_{ij}\}$, где $b_u \subset B_{ij}$, и представляет собой набор

точек от координат положения *i*-робота-рабочего до координат точки выполнения *j*-задачи.

Следующим этапом алгоритма является определение точек заряда, реализованное в виде отдельного алгоритма, блок-схема которого приведена на рисунке 7. На выходе данного алгоритма образуется множество $T' = \{t_1, ..., t_q'\}; d_g', c_g' \in t_g',$ где g – номер точки заряда, q – число точек заряда, d_g' – координаты точки заряда, c_g' – уровень энергии, который необходимо пополнить роботу-рабочему от робота-заряжающего.

Полученное множество точек заряда используется далее в алгоритме распределения роботов-заряжающих между точками заряда, данный алгоритм изображен на рисунке 9. После выполнения этого этапа получается множество $W' \supset \{i; d_g'\}$, каждый элемент которого представляет собой объединение двух параметров: номера робота-заряжающего и координаты точки заряда, где g = 1...q.

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 которых выбирается исходя из размера роботов.



Рисунок 7 – Алгоритм определения точек заряда

На первом этапе данного вложенного алгоритма определяется количество точек на траектории, необходимое для позиционирования роботов

при передаче энергии исходя из их размера, связанного с местом установки катушек БСПЭ (см. рисунок 8).



Рисунок 8 – Позиционирование роботов для передачи энергетических

ресурсов

Исходя из рисунка 8 количество точек *ns* определяется по длине робота *a* в соответствии с (9).

$$ns = \frac{2a}{s_b} \tag{9}$$

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

Затем для каждой траектории B_{ij} роботов-рабочих выполняется поиск участков траектории и выбор точек заряда. На первой итерации цикла вычисляется номер Q позиции элемента множества B_{ij} соответствующий точке траектории, с которой начинается поиск участков траектории для точек пополнения энергетического запаса роботов-рабочих. Диапазон поиска точек заряда соответствует следующему диапазону уровня заряда аккумулятора робота-рабочего: (c_{minw} ; $c_{minw} + dc$), где dc – заданный параметр, позволяющий определить верхнюю границу диапазона заряда аккумуляторной батареи, при котором разрешено пополнение энергетического запаса робота-рабочего. Параметр dc ограничен условием (10).

$$0 < dc < c_{max} - c_{minw} - k_t. \tag{10}$$

При позиционировании роботов для передачи энергии необходимо ns точек траектории. Позиционирование роботов недопустимо в точке выполнения задачи, а также точки, находящиеся за пределами точки выполнения задачи, отсутствуют во множестве B_{ii}, что не позволяет рассчитывать отклонение по *z*-координате между ними. Для учета данных ограничений при расчете номера элемента множества Q, с которого начинается поиск участка траектории для заряда, из Q вычитается ns точек траектории. Наименьшая разница между координатами z участка траектории точек определяется путем вычисления среднеквадратического ИЗ ns отклонения Z_{min} между точками z_Q...z_{Q+ns}. Вычисленное значение Z_{min} далее сравнивается с предыдущим минимальным значением Z_{minPrev}: если Z_{min} < $Z_{minPrev}$, то $Z_{minPrev} = Z_{min}$. Далее определяется длина пути до точки Q и уровень заряда аккумулятора после преодоления данного пути. Если заряд аккумуляторной батареи больше минимального уровня c_{minw}, то будет рассматриваться следующая точка траектории, иначе во множество Т' добавляется новый элемент, состоящий из координат точки области позиционирования и количество заряда относительных В единицах $C_i = c_{max} - k_r l_{begin...O} / O_l$, которое робот-заряжающий должен передать роботурабочему. Также новый элемент добавляется во множество Т' в том случае, когда номер Q становится больше разности $|B_{ij}|$ и ns, поскольку последующие точки не позволят провести позиционирование роботов для передачи энергетических ресурсов. После добавления нового элемента в Т' проводится проверка, достаточно ли энергетических ресурсов робота-рабочего для преодоления им расстояния до точки выполнения задачи, выполнения этой задачи и возвращения обратно до данной точки заряда. Если заряда аккумулятора достаточно, то производится поиск точек заряда для следующей траектории из множества *P_w*. В противном случае обновляется текущий уровень заряда ($c_i = c_{max}$), номер текущей точки *Q* и производится поиск следующей точки заряда для оставшегося участка траектории. Таким образом

определяются точки заряда для роботов-заряжающих на траекториях движения роботов-рабочих.

После завершения алгоритма определения точек заряда выполняется алгоритм распределения роботов-заряжающих между данными точками. Алгоритм приведен на рисунке 9 и принимает на вход множество роботов-заряжающих R_c и множество точек заряда T'.



Рисунок 9 – Алгоритм распределения роботов-заряжающих между точками заряда

На первом этапе алгоритма строятся траектории для роботовзаряжающих до каждой точки заряда. Далее определяются длины путей построенных траекторий роботов-заряжающих, которые записываются во множество $H = \{h_{11}, h_{12}, ..., h_{zq}\}$. Затем выполняется распределение роботовзаряжающих между точками заряда посредством венгерского алгоритма, аналогично алгоритму распределения роботов-рабочих между точками выполнения задачи. На выходе данного блока образуется множество W', которое будет пополняться до тех пор, пока не закончатся точки заряда. Общее время выполнения задач роботами-рабочими, помимо времени, которое тратится на выполнение самой задачи и перемещение, зависит также от времени затрачиваемого на передачу энергии между роботами для заряда аккумулятора каждого робота-рабочего. В свою очередь, время передачи энергетических ресурсов зависит от эффективности работы БСПЭ, на которую влияет точность конечного позиционирования, а также энергетические параметры агента: необходимый для пополнения уровень энергии и передавая мощность.

Для оценки общего времени выполнения задач с учетом процесса заряда аккумулятора робота-рабочего разработан метод, позволяющий оценить время процесса заряда с помощью БСПЭ. Данный метод оценки состоит из следующих этапов:

- 1. Выполнение алгоритма конечного позиционирования роботарабочего и робота-заряжающего.
- 2. Оценка смещений между роботами.
- 3. Расчет эффективности на основе смещений, полученных в п.2.
- Определение времени заряда с учетом п.3 и энергетических параметров БСПЭ робота-заряжающего.

Для сближения роботов В окрестности точки конечного дальнейшей оценки смещений позиционирования И по результатам проведенного анализа разработан алгоритм, использующий планирование траектории, а также алгоритмы обработки изображений для поиска ArUcoмаркеров и получения их положения и ориентации относительно системы отсчета камеры. Для увеличения точности определения относительной ориентации и положения роботов окрестности В точки конечного позиционирования предлагается использовать два ArUco-маркера на передней части робота-рабочего. Разработанный алгоритм начинает свою работу после того, как система технического зрения определяет маркеры, затем в процессе робота-заряжающего перемещения корректируется его ориентация относительно точки конечного позиционирования. При этом также возможно

обновление глобальной траектории движения роботов. После конечного позиционирования по пространственным характеристикам ArUco-маркеров определяются линейные смещения между роботами (второй этап), затем результат передается на третий этап предлагаемого метода.

Расчет эффективности производится с учетом полученных линейных смещений между приемной и передающей частями БСПЭ на основании модели энергетических характеристик представленной в [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils // Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31.].

На четвертом этапе метода вычисляется время передачи энергии с учетом полученных ранее результатов, а также данных о количестве энергии необходимой для пополнения уровня заряда аккумулятора робота.

Предложенный метод возможно применять для получения набора оценок времени заряда по разному количеству точек конечного позиционирования с помощью моделирования. В результате моделирования процесса позиционирования и применения метода оценки времени передачи энергии создается набор данных из оценок времени, на основе которых возможен поиск точек конечного позиционирования, которые обеспечат сокращение времени процесса заряда аккумулятора робота-рабочего. Далее подробнее рассмотрены этапы предложенного метода.

Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ на основе ArUco-маркеров 10. Предлагаемый приведен на рисунке алгоритм предназначен для управления процессом позиционирования, роботазаряжающего относительно робота-рабочего на этапе движения, когда робототехнические средства находятся на расстоянии до 1 м при размере маркеров 45 мм × 45 мм.



Рисунок 10 – Алгоритм конечного позиционирования мобильных роботов на основе ArUco-маркеров

Предлагаемый алгоритм, как часть метода оценки времени передачи энергоресурсов, начинает свою работу в тот момент времени, когда система технического зрения определяет маркеры. До этого момента роботзаряжающий перемещается по глобальной траектории.

Если два ArUco-маркера с заранее известными идентификаторами не были определены на изображении с камеры технического зрения, то поиск повторяется снова до тех пор, пока не будет превышено заданное время ожидания обнаружения маркеров. При этом алгоритм уведомляет систему управления о превышении времени обнаружения, после чего роботзаряжающий входит в режим ожидания новых команд.

В случае успешного определения ArUco-маркеров вычисляются координаты точки конечного позиционирования в трехмерном пространстве. Для этого сперва необходимо определить векторы сдвига каждого маркера в пространстве относительно системы отсчета *C*, связанной с камерой, которая

неподвижно закреплена на роботе-заряжающем. На рисунке 11 показаны данные векторы P_{C-M1} и P_{C-M2} , направленные в точки M1 и M2 соответственно, обозначающие геометрический центр каждого ArUco-маркера. Посредством библиотеки компьютерного зрения OpenCV по изображениям и параметрам камеры (коэффициенты дисторсии и др.) определяются координаты векторов сдвига $P_{C-M1} = (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1})^T$ и $P_{C-M2} = (x_{M2}, y_{M2}, z_{M2})^T$ 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 $P_{C-N} = (x_N, y_N, z_N)^T$ будет указывать на середину между центрами двух маркеров в пространстве (11).

Для вычислений ориентации и положения была введена прямоугольная система координат, поскольку именно в таком представлении используемая библиотека OpenCV позволяет определить пространственные характеристики центров маркеров.



Рисунок 11 – Определение координат точки конечного позиционирования

Далее с учетом дополнительных данных о взаимном положении агентов обновляется траектория движения робота-заряжающего до точки конечного позиционирования. По сгенерированной траектории определяется ближайшая

точка (вершина полученного маршрута), к которой затем перемещается роботзаряжающий. Данные об ориентации и положении, полученные с помощью технического зрения, позволяют уточнить направление движения роботазаряжающего к точке конечного позиционирования и корректировать его при значительном отклонении, величина которого задается отдельно. Движение продолжается, пока робот-заряжающий не достигнет точки конечного позиционирования с заданной точностью. В алгоритме это реализовано циклически, с проверкой достижения заряжающим роботом точки конечного позиционирования: если точка не достигнута, то определяется ближайшая точка траектории, к которой затем направляется робот. В случае, если система технического зрения перестанет определять маркеры, робот-заряжающий будет перемещаться по глобальной траектории. В таком случае это может повлиять на точность конечного позиционирования, при условии, что маркеры так И не будут обнаружены. При достижении точки конечного позиционирования параллельность между агентами достигается за счет использования данных об ориентации робота-заряжающего 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 [Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. – Pearson Education India, 2009. 408 р.] 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 (12) становится единичной (13):

$$c \alpha s \gamma - s \alpha c \beta s \gamma - c \alpha s \gamma - s \alpha c \beta c \gamma \quad s \alpha s \beta$$

$$R = (s \alpha c \gamma + c \alpha c \beta s \gamma - s \alpha s \gamma + c \alpha c \beta c \gamma - c \alpha s \beta), \qquad (12)$$

$$s \beta s \gamma \qquad s \beta c \gamma \qquad c \beta$$

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

$$R|_{\alpha=0,\beta=0,\gamma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ (0 & 1 & 0) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(13)

Тогда параллельность агентов возможно проверять по тому признаку, что матрицы поворота стремятся к единичной. Ориентацию и относительное положение роботов необходимо изменять для достижения параллельности между ними в процессе конечного позиционирования, данная информация используется в дальнейшем расчете эффективности передачи энергии с помощью беспроводной системы.

В соответствии с приведенными в [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils // Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31.] уравнениями по продольному смещению L и поперечному смещению H (рисунок 12) определяются два значения эффективности, соответственно, эффективность только при продольном смещении η_L и эффективность только при поперечном смещении η_{H} .



Рисунок 12 – Определение смещений между приемной и передающей катушками БСПЭ

Итоговая эффективность вычисляется путем перемножения полученных эффективностей при продольном и поперечном смещениях (14):

$$\eta_s = \eta_L \eta_H. \tag{14}$$

Уравнения, представленные в [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement

of Coils // Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31.], были получены на основе характеристик разработанного прототипа двунаправленной БСПЭ, что позволяет с высокой точностью составлять прогноз эффективности на основе смещений.

Время заряда аккумулятора робота-рабочего зависит от итоговой эффективности η_s , остаточного заряда в Вт·ч, типа аккумулятора, а также от мощности зарядного устройства.

Значение остаточного заряда в Вт·ч аккумулятора C_t вычисляется по формуле (15):

$$C_t = C \left(1 - \frac{p}{100}\right), \tag{15}$$

где C — полная энергоемкость в Вт·ч аккумулятора робота-рабочего; p — значение энергоемкости аккумулятора в процентах, при которой необходим заряд.

Передаваемая мощность $P_{1(max)}$ может быть определена посредством измерения или расчета, итоговая эффективность η_s является расчетным параметром. Тогда после определения C_t возможно найти время передачи энергии. В общем виде зависимость данного времени от упомянутых параметров представляется как (16).

$$t_E = f(P_{1(max)}, \eta_s, C_t).$$
(16)

Форма характеристики зависимости времени заряда может варьироваться при изменении любого параметра. Форма кривой заряда аккумулятора зависит также от применяемых алгоритмов, реализуемых специализируемыми контроллерами или иными схемотехническими решениями.

Апробация и первичное тестирование разработанных алгоритмов и метода проведена в симуляторе Gazebo. В качестве моделей роботов использованы модификации моделей Pioneer 3-AT. На модели робота-

рабочего размещены ArUco-маркеры, на модели роботов-заряжающих – камера. В качестве поверхности для движения роботов использовалась модель карты высот, созданная из изображения рабочего поля в оттенках серого. Были проведены эксперименты для оценки выполнения роботами их базовых функций и всей задачи в целом. Было принято, что в начальный момент времени у каждого робота-рабочего текущий запас заряда батареи равен максимальному $c_i = c_{max}$. Результаты показали, что роботы корректно и последовательно выполняют свои базовые функции (выполнение задачи, позиционирование, процесс заряда, использование ресурса батареи) и возвращаются на базу по завершению задания. На рисунке 13 показано движение группы роботов.



Рисунок 13 – Движение группы роботов

Выполнение задачи роботом-рабочим представлено на рисунке 14. Зеленым шаром представлена точка, в которой находится задача.



Рисунок 14 – Выполнение задачи роботом-рабочим

На рисунке 15 представлен момент позиционирования роботазаряжающего с роботом-рабочим для передачи энергетических ресурсов.



Рисунок 15 – Позиционирование робота-заряжающего с роботом-рабочим для передачи энергетических ресурсов

Для проверки выполнения задачи были проведены эксперименты с разным расстоянием L между базой и областью расположения задач. Стартовая область и область задач представлены в виде квадрата со сторонами $a_s = 50$ м и $a_g = 70$ м соответственно. Для коэффициентов расхода заряда батарей были выбраны следующие значения: $k_m = 0,3$ % и $k_t = 75$ %. Далее представлены результаты трех тестов для проверки выполнения задания:

- 1. Тест 1: L = 82 м, |T| = 10, $|R_w| = 6$, $|R_c| = 6$. Результат все задачи выполнимы.
- 2. Тест 2: L = 110 м, |T| = 10, $|R_w| = 6$, $|R_c| = 6$. Результат 8/10 задач выполнимы.
- 3. Тест 3: L = 145 м, |T| = 10, $|R_w| = 6$, $|R_c| = 6$. Результат все задачи невыполнимы.

Следующим этапом в работе были проведены эксперименты для определения оптимального соотношения количества роботов-заряжающих и количества роботов-рабочих. Последующие эксперименты рассматривают распределение роботов-рабочих на |T| = 6 задач. Для данных экспериментов использовались следующие значения переменных: L = 69 м, $k_m = 0,3\%$, $k_t = 75\%$, $a_s = 70$ м, $a_g = 70$ м. На рисунке 16 представлен график зависимости времени выполнения задания от количества роботов-рабочих при |T| = 6 и $|R_c| = 12$.



Рисунок 16 – Зависимость времени выполнения задания от количества роботов-рабочих

Как видно из рисунка 16, наиболее быстро выполнит задание группа, состоящая из 10-12 роботов-рабочих (~12 минут). Увеличение числа роботов незначительно влияет на время выполнения задания, так как группа из 1 робота-рабочего и 12 роботов-заряжающих выполнит задание за ~16 минут,

что в 1,33 раза превышает минимальное время. Уменьшение времени выполнения миссии при $|R_w| > |T|$ обусловлено тем, что в распределении задач участвует большее число роботов-рабочих и из них выбираются те, для которых общее время движения до задач будет минимальным.

На рисунке 17 представлена зависимость времени выполнения задания от количества роботов-заряжающих при |T| = 6 и $|R_w| = 12$.



Рисунок 17 – Зависимость времени выполнения задания от количества роботов-заряжающих

Как видно из рисунка 17, минимальное время выполнения задания (~11 мин) обеспечивается для группы роботов, состоящей из $|R_c| = |T|$ роботовзаряжающих. Дальнейшее увеличение числа роботов-заряжающих не влияет на расчетное время выполнения задания. Увеличение числа роботовзаряжающих значительно снижает время выполнения задания, так как группа из 12 рабочих и 1 робота-заряжающего выполнит задание за ~90 минут, что приблизительно в 9 раз больше минимального времени.

Результаты экспериментов показывают, что для достижения наименьшего времени выполнения задания при заданных параметрах моделирования необходимо использовать не менее |*T*| роботов-рабочих и |*T*| роботов-заряжающих. Данные результаты являются частным случаем для выбранных параметров модели: верхняя граница запаса энергии – 100%,

нижняя граница запаса энергии – 15%, скорость заряда батареи – 5%/с, запас энергии, необходимый на выполнение задачи – 75%, расход энергии – 0,3%/м, необходимое время на выполнение задачи – 5 с, максимальная линейная скорость движения роботов – 0,3 м/с, максимальная линейная скорость движения робота в режиме стыковки – 0,01 м/с. С учетом принятых параметров модели оптимальное соотношение роботов-рабочих к роботам-заряжающим достигается для групп, в составе которых 50% роботов-рабочих и 50% роботов-заряжающих.

Также были проведены эксперименты с моделированием процесса позиционирования и оценкой времени заряда аккумуляторов роботоврабочих. Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ реализован на языке программирования Python, для распознавания маркеров на изображении с камеры технического зрения использована библиотека OpenCV.

Было принято, что зависимость (16) в экспериментах будет иметь потенциально возможный линейный вид:

$$t_E = \frac{100C_t}{P_{1(max)}y_s} \tag{17}$$

В числителе (17) множитель 100 необходим для перевода значения эффективности передачи энгергии, представляемой в процентах.

В ходе экспериментов использовалась карта высот, ранее применяемая для моделирования в экспериментах, описанных выше. На данной карте высот было задано 14 случайных точек с различными координатами. В окрестности данных точек устанавливался заряжающий робот и робот-рабочий, после чего проводилась симуляция позиционирования двух платформ (см. рисунок 18). В соответствии с предложенным методом, после позиционирования определялось относительное положение платформ, затем вычислялась эффективность передачи энергетических ресурсов. На основе полученных данных определялось время заряда аккумулятора робота-рабочего.



Рисунок 18 – Конечное позиционирование двух мобильных платформ Pioneer 3-AT

В симуляции позиционирования платформ в соответствии с предложенным алгоритмом остановка роботов производилась в момент, когда расстояние между камерой и маркерами становилось менее 0,54 м. Выбор данного порогового значения обусловлен длиной мобильной платформы, расположением камеры технического зрения и маркеров.

Камера и маркеры на роботах расположены по центру каждой мобильной платформы, следовательно, минимальное возможное расстояние между камерой и маркерами в момент касания платформ составляет 0,508 м. В качестве расстояния, учитывающего толщину приемной и передающей частей БСПЭ, было принято значение 0,022 м. Таким образом, в момент, когда расстояние между камерой и маркерами равно 0,54 м, платформы находятся на расстоянии от 0 до 0,01 м, что позволит получить близкую к максимальному значению эффективность передачи энергии. Возможный запас по расстоянию в 0,01 м был принят для того, чтобы избежать столкновений платформ при остановке.

На рисунке 19 приведен вид с камеры заряжающего робота. В левом верхнем углу рисунка показано расстояние до центральной точки между маркерами, а также расстояние до левого и правого маркеров соответственно. Кроме того, на маркерах и центральной точке изображено направление осей привязанных систем отсчета, которые наглядно демонстрируют их ориентацию в пространстве.



Рисунок 19 – Вид с камеры заряжающего робота

Для вычисления эффективности БСПЭ были приняты следующие величины:

- максимальная эффективность: 80%;
- диаметр катушки: 0,08 м;
- максимальная передаваемая мощность: 20 Вт.

В таблице 1 приведены средние расчетные значения эффективности и смещений по каждой точке позиционирования. В таблице 2 также показаны углы наклона поверхности относительно горизонта в точках конечного позиционирования роботов. Значения, приведенные в данных таблицах и на изображениях далее, определялись с точностью до 15 знака.

Таблица 1 – Расчетные данные экспериментов по конечному позиционированию роботов

№ точки	Продольное смещение, м	Поперечное смещение, м	Эффективность, %	Абсолютное отклонение от <i>η_{max}</i> , %
1 2	0,0175	0,0206	63,39 66,29	16,61

3	0,0177	0,0154	65,97	14,03
4	0,0164	0,0187	64,67	15,33
5	0,0168	0,0172	66,15	13,85
6	0,0169	0,0127	67,14	12,86
7	0,0181	0,0062	67,76	12,24
8	0,0182	0,0045	68,22	11,78
9	0,0177	0,0083	67,84	12,16
10	0,0180	0,0108	66,82	13,18
11	0,0164	0,0286	61,91	18,09
12	0,0175	0,0298	58,11	21,89
13	0,0158	0,0239	63,78	16,22
14	0,0184	0,0296	60,58	19,42

Наименьшее отклонение от максимальной эффективности, составившее в среднем 11,78%, зафиксировано в точке №8, при этом видно, что продольное смещение между приемной и передающей частями катушек БСПЭ не является наименьшим среди других расчетных значений. На итоговое значение эффективности в большей степени повлияло поперечное смещение, которое среди экспериментов в среднем получилось меньше, чем в других точках. Это обусловлено тем, что в точке №8 была наиболее ровная поверхность позиционирования. Также это подтверждается значениями углов наклона поверхностей позиционирования из таблицы 2.

Таблица 2 – Углы наклона поверхностей в точках конечного позиционирования

№ точки	Угол наклона поверхности, град	№ точки	Угол наклона поверхности, град
1	17,42	8	0
2	12,05	9	1,12
3	14,53	10	10,01
4	14,89	11	18,77
5	12,65	12	19,99
6	6,83	13	17,08
7	6,59	14	19,33

В точке позиционирования №8 поверхность имеет наклон 0°, то есть конечное позиционирование платформ происходило на ровной поверхности. Ближайшее значение угла наклона поверхности к точке №8 имеет точка №9. Также можно наблюдать, что разница между наклонами поверхностей позиционирования несопоставима с разницей изменения эффективности в этих точках. Это может быть обусловлено наличием локальных неровностей в окрестности точки позиционирования мобильных роботов.

Алгоритм конечного позиционирования, как составляющее метода оценки времени заряда аккумулятора, позволил в среднем получить абсолютное отклонение от η_{max} , равное примерно 15%.

На рисунке 20 приведены средние значения эффективности и смещений по каждому эксперименту.



Рисунок 20 – Графическое представление расчетных значений эффективности в зависимости от смещений

Полученная зависимость имеет схожий нелинейный характер, что и характеристики, представленные в [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils // Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31.]. Из представленного рисунка видно, что изменение поперечного смещения меньше сказывается на

эффективности, чем изменение продольного смещения между приемной и передающей катушками.

Также с помощью технического зрения и ArUco-маркеров были определены продольные и поперечные углы смещения катушек относительно друг друга. Третий угол, который отвечает за поворот относительно оси симметрии катушки, не влияет на эффективность передачи энергии, поскольку в БСПЭ применены плоские спиралевидные катушки. Диаграмма со средними величинами эффективности, соответствующими каждой точке, приведена на рисунке 21. Данные углы были учтены при расчете эффективности.



смещениями

Из представленной выше диаграммы следует, что заряжающий робот останавливался со средним значением продольного углового смещения 0,05°, в случае с поперечным угловым смещением среднее значение составило 0,16°. При этом максимальное продольное угловое смещение среди всех экспериментов составило 2,58°, поперечное – 4,86°.

Также была произведена оценка времени заряда в каждом эксперименте по всем 14 точкам. По формуле (17) и усредненным данным, полученным после симуляций, было определено среднее время заряда робота-рабочего для 14 вариантов точек, что приведено в виде диаграммы на рисунке 22. Для расчетов было принято, что $C_t = 70 \text{ Вт} \cdot \text{ч}, P_{1(max)} = 20 \text{ Вт}.$ Отметим, что величина C_i при этом была принята 60%.



расчетных значений эффективности БСПЭ

По представленной выше диаграмме c помощью применения разработанного метода можно предварительно оценить, сколько времени необходимо для заряда аккумулятора мобильного робототехнического средства. Так, по диаграмме видно, что может потребоваться более 5 часов для заряда с учетом того, что заряжающий робот двинется из точки №12, при эффективности 58,11%. Наиболее быстро процесс заряда может пройти в точках №7-9, в данных точках в среднем были получены наибольшие значения эффективности ввиду отсутствия значительных локальных неровностей поверхности конечного позиционирования.

Таким образом, разработанный метод позволяет предварительно оценить передачу энергетических ресурсов и в дальнейшем уменьшить время заряда робота-рабочего путем выбора точек конечного позиционирования, в которых значительно (более, чем на 5%) отличается эффективность передачи энергии. Кроме того, с помощью разработанного метода возможно корректирование положений робототехнических средств после конечного позиционирования.

Тестирование в реальных условиях разработанных алгоритмов управления роем роботов при выполнении задач с перераспределением энергетических ресурсов между агентами было проведено с использованием автономных мобильных платформах собственной разработки (рисунок 23), оборудованных двунаправленной БСПЭ.



Рисунок 23 – Автономные мобильные платформы

Мобильные платформы имеют четырехколесную кинематическую схему с неповоротными колесами. Колеса попарно связанны и приводятся в движение отдельными электроприводами. Платформа оборудована четырьмя ультразвуковыми датчиками и двумя камерами. Одна из камер предназначена для общего обзора и установлена статично. Вторая камера установлена на поворотной горизонтальной оси, угол которой задается сервоприводом. Данная камера предназначена для распознавания маркеров на поверхности движения платформы и на поверхностях других платформ. Идентификация, определение расстояния и положения на плоскости перемещения одних платформ другими осуществляется с помощью алгоритмов технического зрения, реализованных на основе открытой библиотеки OpenCV. В качестве центрального вычислителя мобильной платформы применяется Raspberry Pi 4 Model B.

Катушка двунаправленной БСПЭ установлена в передней части платформы. Также на фронтальной поверхности платформы, на уровне

поворотной камеры, справа и слева от нее расположены ArUco-маркеры (рисунок 24), предназначенные для определения положения одной платформы относительно другой в процессе конечного позиционирования для передачи энергии.



Рисунок 24 – Катушка двунаправленной БСПЭ и ArUco-маркеры на мобильной платформе

Для проведения экспериментов использованы 10 мобильных платформ. Предварительно на поверхность рабочего поля платформ нанесены маркеры разных цветов, представляющие собой круг диаметром 25 см. Данные маркеры обозначают места выполнения задач для роботов-рабочих. Задача робота-рабочего – прибыть в точку выполнения задачи и осуществлять непрерывное перемещение по окружности в окрестности данной точки (рисунок 25).



Рисунок 25 – Мобильная платформа в точке выполнения задачи

Перед началом эксперимента мобильные платформы размещались в определенных местах рабочего поля. Далее использовался алгоритм распределения задач между роботами-рабочими. Для расчета траекторий посредством LRLHD-А* использовалась фиктивная карта высот. Каждой из платформ, определенной как робот-рабочий, присваивалась задача, обозначенная цветным маркером на поверхности рабочего поля. Так как энергоемкость аккумуляторной батареи платформы достаточно высокая, а площадь рабочего поля относительно мала (10×15 м), значение c_{min} принято равным 90%, $c_{max} = 95\%$. На выполнение задачи робот должен был расходовать 2% заряда батареи, а на преодоление единичного расстояния, принятого равным 1 м, – 0,3%. С учетом принятых параметров и фиктивной карты высот помощью предложенного алгоритма определялись точки заряда на С проложенных траекториях движения роботов-рабочих. Далее в соответствии с алгоритмом распределялись полученные точки заряда между платформами, определенными как роботы-заряжающие. Затем вычисленные точки заряда на рабочем поле обозначались маркерами белого цвета для обеспечения позиционирования роботов на рабочем поле с помощью технического зрения.

В определенной и обозначенной на рабочем поле точке заряда происходит встреча роботов-рабочих и роботов-заряжающих (рисунок 26).



Рисунок 26 – Мобильные платформы в точке заряда

Первый прибывший в точку заряда робот останавливается в ней и ожидает другого робота. После прибытия второго робота посредством технического зрения между ними осуществляется процесс позиционирования для передачи энергии посредством БСПЭ. При достижении заданной теоретически рассчитываемой передаваемой мощности и эффективности передачи энергии процесс позиционирования завершается и активируется передача энергии от робота-заряжающего к роботу-рабочему. После достижения уровня заряда *с*_{тах} аккумуляторной батареи робота-рабочего он первым начинает движение и продолжает следование по маршруту. Роботзаряжающий ожидает удаления робота-рабочего на безопасное расстояние, а затем следует к месту расположения стационарной зарядной станции для пополнения собственных энергетических ресурсов.

В первом виде экспериментов варьировалось количество роботоврабочих при неизменном количестве задач и роботов-заряжающих. Число роботов-заряжающих было равно 4, а количество роботов-рабочих изменялось от 1 до 6. Зависимость времени выполнения всех 4 задач при различном количестве роботов-рабочих представлены на графике (рисунок 27).



Рисунок 27 – Время выполнения всех задач в зависимости от числа роботоврабочих

Так как задачу единовременно может выполнять только один роботрабочий, увеличение их числа свыше количества задач влияет на время выполнения всех задач минимально, только за счет более оптимального распределения задач между роботами относительно их расположения на рабочем поле. Эксперимент повторялся более 10 раз при различном начальном положении роботов-рабочих в стартовом квадрате размером 3 × 3 м. Во всех экспериментах данного вида время выполнения всех задач при количестве роботов-рабочих, превышающем число задач, было практически неизменным, что свидетельствует о корректной и эффективной работе алгоритма распределения задач между роботами-рабочими. Аналогичные результаты были получены при изменении числа роботов-заряжающих при неизменном количестве задач и роботов-рабочих (рисунок 28).



Рисунок 28 – Время выполнения всех задач в зависимости от числа роботовзаряжающих

В данном эксперименте число роботов-рабочих и задач было равно 4, а количество роботов-заряжающих изменялось от 1 до 6. Распределение точек заряда роботами-заряжающими алгоритмически между выполняется аналогично распределению задач между роботами-рабочими, ввиду чего роботы-заряжающие использовали наиболее энергоэффективные траектории для достижения точек заряда. Однако стоит отметить большую зависимость времени выполнения всех задач от количества роботов-заряжающих, чем от количества роботов рабочих. Данный факт обусловлен физическими особенностями реальных мобильных платформ, а также спецификой работы роботов-заряжающих в предложенной модели. Пополнение заряда батареи мобильной платформы – процесс более длительный, чем его расход, что обусловлено особенностями реальных аккумуляторных батарей. Также роботзаряжающий, при заложенных параметрах расхода батареи на перемещение и верхней и нижней границах уровня заряда после пополнения энергии каждого робота-рабочего, должен возвращаться на стационарную зарядную станцию и пополнять собственный энергетический запас, что связано со значительными временными затратами. Данные особенности работы роботов-заряжающих свойственны гомогенному рою, где каждый агент имеет одинаковую

энергоемкость аккумуляторной батареи. Таким образом, значительное увеличение времени решения всех поставленных задач роем роботов при малом числе роботов-заряжающих не является показателем снижения эффективности разработанных алгоритмов.

Результаты проведенных реальных экспериментов аналогичны подтверждают работоспособность результатам моделирования И И эффективность разработанных алгоритмов и программного обеспечения для управления роем роботов при выполнении задач. Перераспределение энергетических ресурсов между агентами роя позволяет выполнять роботам задачи, которые при отсутствии такой возможности были бы для роботов недостижимы. Применение БСПЭ позволяет снизить требования к точности конечного позиционирования роботов, тем самым позволяет упростить сенсорную систему агентов, снизить затраты времени на данный процесс, и значительно повышает вероятность успешного обмена ресурсами между агентами роя. Совокупное использование разработанной системы БСПЭ и алгоритмов позволяет значительно расширить функциональные возможности роевой робототехнической системы и использовать ее для потенциально более энергоемких задач, а также снизить затраты времени за счет оптимального распределения функций и задач между агентами.