



Математическая модель и алгоритмы управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов

К. Д. Крестовников^а, младший научный сотрудник, orcid.org/0000-0001-6303-0344, k.krestovnikov@iias.spb.su
^аСанкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 191178, РФ

Введение: 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. **Цель:** повышение эффективности группы роботов, функционирующей на открытой местности с рельефной поверхностью, посредством перераспределения энергетических ресурсов внутри группы. **Результаты:** представлены математическая модель и алгоритмы функционирования группы роботов, часть которых определена рабочими, а другая часть – заряжающими. Роботы-рабочие направлены исключительно на выполнение поставленных целевых задач, а роботы-заряжающие пополняют их энергетические ресурсы. Предлагаемый подход учитывает ограниченный энергетический ресурс заряжающих роботов и потери при передаче энергии между роботами, что позволяет применять разработанные решения для роботов, оборудованных бесконтактными системами передачи энергии. Выбор точек, в которых осуществляется передача энергии, происходит с учетом рельефа поверхности рабочего пространства, что упрощает процесс позиционирования роботов и повышает эффективность передачи энергии бесконтактным способом. Посредством имитационного моделирования в среде Gazebo проведено сравнение общего времени выполнения задач группами, функционирующими с традиционными принципами и на основе представленного подхода. В группе без перераспределения ресурсов все роботы были рабочими и выполняли целевые задачи. Вторая группа была разделена поровну на роботов-рабочих и роботов-заряжающих. Полученные при моделировании результаты показывают общую тенденцию более быстрого выполнения задач группой, функционирующей с перераспределением ресурсов при увеличении расстояния до задач и их количества. **Практическая значимость:** предлагаемый подход к перераспределению ресурсов позволяет расширить область функционирования группы роботов и использовать ее для потенциально более энергоемких задач.

Ключевые слова – групповое управление роботами, роевые системы, перераспределение ресурсов в группе.

Для цитирования: Крестовников К. Д. Математическая модель и алгоритмы управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 6, с. 20–34. doi:10.31799/1684-8853-2023-6-20-34, EDN: QFJGNR

For citation: Krestovnikov K. D. Mathematical model and control algorithms for a group of ground robots with energy resource redistribution. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 6, pp. 20–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-6-20-34, EDN: QFJGNR

Введение

Исследования способов перераспределения ресурсов в группах робототехнических средств сосредоточены на биологически инспирированных подходах к управлению группами роботов [1, 2], оптимизации распределения целевых заданий [3, 4] и перемещения роботов [5], а также на вспомогательных сервисных задачах [6]. Научные проблемы энергетического обеспечения и планирования при групповом управлении рассматриваются со стороны поддержания энергетических параметров роботов и распределения задач соответствующим образом.

Группа наземных роботов на открытом пространстве может выполнять различные задачи: составление карты, мониторинг местности, поиск объектов интереса, доставка оборудования и обеспечение его функционирования. Выполнение задач и движение по маршруту расходует ресурс

аккумуляторной батареи робота, которого может быть недостаточно для выполнения всей миссии в целом. Для экономии времени и расширения области функционирования в случаях ограниченного энергетического запаса агентов имеет смысл разделять роботов на группы по специализации и использовать заряжающих роботов, которые будут восполнять ресурсы роботов-рабочих.

В ходе анализа существующих решений проблемы определения точек местоположения заряжающих станций или роботов были найдены методы, разработанные преимущественно для разведывательных операций или доставки товаров в городских условиях беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и управляемыми транспортными средствами с ограниченным запасом энергии.

Задача планирования маршрута для электро-мобиля с временными интервалами и ожидани-

ем заряда на станции рассмотрена в работе [7]. Транспортное средство может находиться в ожидании из-за большого числа клиентов и малого количества зарядных устройств. Для решения небольших подобных задач авторы предлагают 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 и решения смешанной целочисленной программы [8].

В работе [9] представлено решение задачи планирования маршрута электрокара с учетом запаса его энергии и временных окон доставки товара. Авторы разработали оптимизированный муравьиный алгоритм, 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 предложенном алгоритме, которая учитывает влияние расстояния между точками и временными интервалами. Кроме того, разработанный алгоритм позволяет сравнить три способа заряда (полный, частичный, замена аккумулятора) и выбрать оптимальный относительно времени посещения всех точек и стоимости электроэнергии.

Применение муравьиного алгоритма для поиска стратегии поведения группы мобильных роботов на рабочем поле с препятствиями рассмотрено в работах [10, 11]. Авторы предложили 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.

Автоматизация сервисного обслуживания БПЛА является актуальной научной задачей [12, 13]. Авторами [14] 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. Аналогичные задачи рассмотрены в работах [15–17].

В [18] представлено решение задачи для нескольких БПЛА и одного наземного робота с неограниченным запасом топлива, предназначенного для их дозаправки. Предложенный подход предполагает оптимизацию траектории наземного робота путем поиска центроидов кластеров, найденных с помощью метода k -средних среди всех целевых точек, и оптимизацию траекторий БПЛА с учетом распределенных между ними задач и точек дозаправки, найденных в первом этапе. Подход учитывает ограниченное количество топлива у БПЛА и время остановки наземного робота в точках дозаправки.

В рассмотренных решениях зарядные станции либо статичны, либо считается, что 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 и потери при передаче энергии между роботами. Для снижения потерь при передаче энергии между роботами с использованием бесконтактных методов и упрощения процесса позиционирования точки пополнения заряда роботов-рабочих выбираются с учетом рельефа поверхности рабочего пространства.

Математическая модель управления энергоснабжением группы наземных роботов

В данной работе рассматривается задача управления группой гомогенных роботов, функционально разделенных на рабочих и заряжающих, которым необходимо выполнить ряд предметных целевых задач с определенными координатами, расположенных в области рабочего пространства, описанного картой высот. Рабочие и заряжающие роботы не имеют отличий в основной аппаратной части и дополнительном оснащении, а также имеют одинаковую энергоемкость аккумуляторных батарей. В начальный момент времени роботы находятся в определенных точках рабочего пространства. Энергоснабжение группы обеспечивает стационарная зарядная станция с неограниченным запасом энергии, установленная в рабочем пространстве по известным координатам. Группа имеет централизованную систему управления. Энергетические ресурсы батарей роботов-рабочих расходуются на преодоление пути до места расположения задания и на его выполнение. Энергетические ре-

сурсы роботов-заряжающих расходуются на пополнение заряда роботов-рабочих и преодоление пути до места, в котором осуществляется передача энергии. Необходимо обеспечить выполнение всех целевых задач роботами-рабочими за минимально возможное время.

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель динамического управления группой наземных роботов, учитывающая параметры наземных роботов и группы в целом, необходимые для распределения задач и энергетических ресурсов. Пусть даны точки карты высот рабочего пространства $\mathbf{b}_u = [x_u, y_u, z_u]$, $\mathbf{b}_u \in \mathbf{B}$, $u = 1, \dots, m$, а также множество роботов \mathbf{R} , состоящее из множества роботов-рабочих \mathbf{W} и заряжающих роботов \mathbf{C} : $\mathbf{R} = \{\mathbf{W}, \mathbf{C}\}$. Множество роботов-рабочих представляется в виде $\mathbf{W} = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_m\}$, где i – номер робота, $i \in [1, m]$. Каждый робот-рабочий описан кортежем параметров $w_i = \langle \mathbf{cr}_i, er_i, sr_i \rangle$, где $\mathbf{cr}_i = [x_i, y_i, z_i]$ – координаты робота-рабочего в пространстве, er_i – значение его текущего запаса энергии в относительных единицах и параметр его статуса sr_i , принимающий значение 0, если робот не занят выполнением миссии, и 1, если занят. Множество заряжающих роботов $\mathbf{C} = \{c_1, \dots, c_k, \dots, c_z\}$, где z – число заряжающих роботов. При этом робот-заряжающий аналогично описан кортежем параметров $c_i = \langle \mathbf{cr}_k, er_k, sr_k \rangle$.

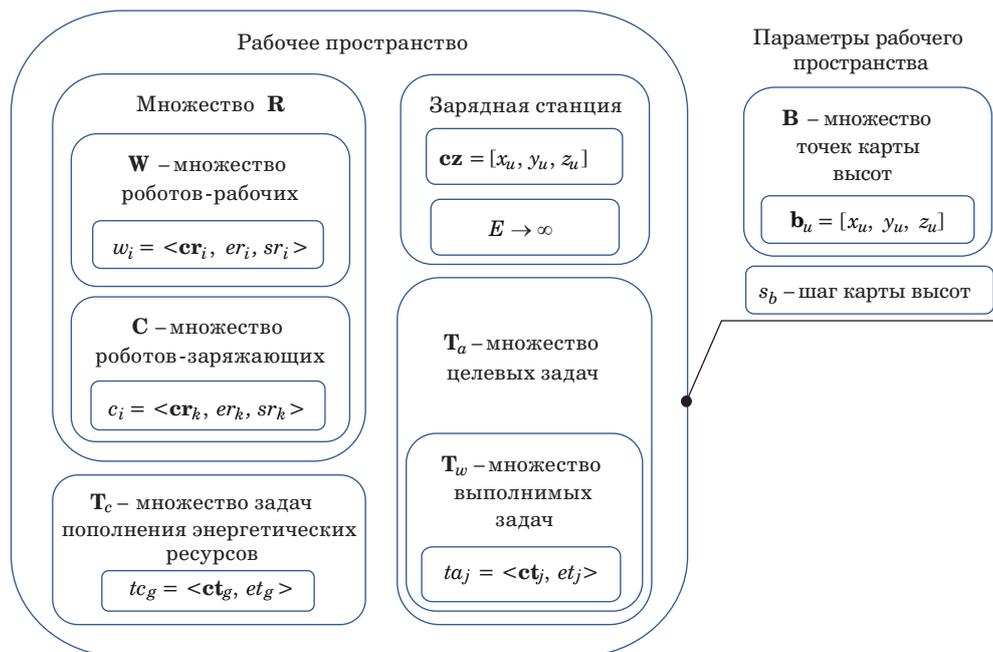
Группе роботов-рабочих назначаются целевые задания (задачи) ta_j , представленные во

множестве $\mathbf{T}_a = \{ta_1, \dots, ta_j, \dots, ta_n\}$, где номер задачи $j \in [1, n]$. Каждая задача описана кортежем параметров $ta_j = \langle \mathbf{ct}_j, et_j \rangle$, где $\mathbf{ct}_j = [x_j, y_j, z_j]$ – 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 \mathbf{T}_c . Данное множество аналогично по структуре множеству \mathbf{T}_a : $\mathbf{T}_c = \{tc_1, \dots, tc_g, \dots, tc_q\}$, где номер задачи $g \in [1, q]$. Каждая задача описана кортежем параметров $tc_g = \langle \mathbf{ct}_g, et_g \rangle$, где \mathbf{ct}_g – координаты задачи, а et_g – количество энергии в относительных единицах, которое необходимо передать роботу-рабочему от робота-заряжающего.

Взаимосвязи описанных выше множеств и параметров можно представить в графическом виде (рис. 1).

Для всех роботов определено значение E_{\max} – максимально возможный запас энергии робота [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 на преодоление единичного расстояния в относительных единицах определяется как $e_m = E_m/E_{\max} \cdot 100\%$. Значение e_m позволяет



■ **Рис. 1.** Взаимосвязи множеств и параметров в графическом виде
 ■ **Fig. 1.** Relationships between sets and parameters in graphical form

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 аналогичным образом: $et_j = E_j/E_{\max} \cdot 100\%$. Параметр et_j определяет, 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 процентное соотношение текущего значения запаса энергии к максимальному E_{\max} . Аналогично определяется заданный минимальный уровень запаса энергетических ресурсов в относительных единицах для роботов-рабочих — $e_{\min w}$ и роботов-заряжающих — $e_{\min c}$. При $er_i \leq e_{\min w}$ роботу требуется пополнение энергетических ресурсов.

В предлагаемой модели принято, что пополнение энергетических ресурсов роботов всегда осуществляется до заданного максимального значения e_{\max} , при этом должно выполняться неравенство $e_{\min w} < e_{\max} \leq 100\%$. Также примем, что $e_{\min c} < e_{\min w}$, так как роботу-заряжающему необходимо преодолеть путь от начальной точки до точки заряда и от точки заряда до зарядной станции. По значениям $e_{\min w}$, $e_{\min c}$ 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 режима функционирования: следование по маршруту, выполнение задачи и режим заряда аккумуляторной батареи. В режиме следования по маршруту робот последовательно движется к каждой точке траектории, пока не достигнет конечной точки или точки заряда (при ее наличии). По достижении точки заряда робот-рабочий останавливается до тех пор, пока не прибудет заряжающий робот и не восполнит заряд его батареи. Достигнув координат точки задачи, робот приступает к ее выполнению. Процесс непосредственно выполнения роботом предметной задачи в рамках данной работы не рассматривается, так как не оказывает прямого влияния на процессы функционирования группы и перераспределения ресурсов.

Заряжающие роботы имеют четыре режима функционирования: следование по маршруту, позиционирование для передачи энергии, передача энергии роботу-рабочему, восполнение заряда собственной батареи. Режим следования по маршруту заряжающих роботов аналогичен режиму роботов-рабочих за исключением отсутствия остановок в ожидании собственного заряда. При достижении точки заряда робота-рабочего заряжающий робот 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. В режиме позиционирования заряжающий робот движется по локальной траектории до конечной точки, в которой начинается передача энергии роботу-рабочему. После удачного позиционирования робот-заряжающий переходит в режим передачи энергии и расходует свой запас энергии на восполнение заряда батареи робота-рабочего. По завершении передачи энергии заряжающий робот остается на месте и ожидает, пока робот-рабочий окажется на безопасном расстоянии. После этого заряжающий робот перемещается к зарядной станции для восполнения заряда собственной батареи.

Каждый робот имеет относительно низкие вычислительные мощности, поэтому управление группой осуществляется внешней централизованной системой управления. Между централизованной системой управления и роботами группы R осуществляется информационный обмен (рис. 2).

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 cr_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 $cz = [x_u, y_u, z_u]$.



■ **Рис. 2.** Информационный обмен между роботами и системой управления группой

■ **Fig. 2.** Information exchange between robots and group control system

Постановку задачи исследования можно представить в виде математической модели задачи о назначениях с дополнительными ограничениями:

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

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}.$$

Поскольку задач может быть больше, чем роботов, модель задачи о назначениях является открытой:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tau_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

где F — значение целевой функции; τ_{ij} — элемент матрицы затрат времени \mathbf{P} ; x_{ij} — элемент матрицы назначений \mathbf{Z} .

В соответствии с поставленной задачей матрица затрат времени \mathbf{P} имеет размерность $m \times n$ и состоит из элементов τ_{ij} . Матрица назначений \mathbf{Z} имеет аналогичную размерность и состоит из элементов x_{ij} :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \cdots & \tau_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{m1} & \cdots & \tau_{mn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix},$$

где m — число роботов; n — число задач; факт назначения i -робота на j -задачу соответствует $x_{ij} = 1$.

С учетом предложенных режимов функционирования роботов-рабочих общее время выполнения j -задачи i -роботом складывается из следующих составляющих:

$$\tau_{ij} = \tau_s + \tau_r + \tau_{tx} + \tau_{exp} + \tau_j,$$

где τ_{ij} — общее время выполнения j -задачи i -роботом; τ_s — время принятия решений системой управления; τ_r — время перемещения i -робота к j -задаче; τ_{tx} — общее время передачи энергии от робота-заряжающего к роботу-рабочему; τ_{exp} — время ожидания робота-заряжающего; τ_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 $\tau_s = \text{const}$. Процесс непосредственно выполнения роботом предметной задачи в рамках данной работы не рассматривается, ввиду чего примем $\tau_j = \text{const}$. При этом задачи ставятся извне (\mathbf{T}_a), и для стабильного функционирования группы необходимо проверить их выполнимость:

$$\mathbf{T}_w = f_1(\mathbf{ct}_j, \mathbf{cz}, e_{\max}, e_{\min w}, e_{\min c}, e_m, \delta e, \eta_p),$$

$$j \in \{1, n\}.$$

Значение τ_j зависит от скорости движения робота, рельефа рабочего пространства и длины траектории. Скорость движения по траектории и ее максимальное значение являются параметрами, зависящими от конструктивных решений конкретного робота. Примем, что роботы перемещаются в рабочем пространстве с максимальной возможной скоростью, ограниченной их конструктивными параметрами. Тогда время перемещения i -робота-рабочего к j -задаче зависит от длины определенной 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:

$$\mathbf{L}_w = f_2(\mathbf{B}, \mathbf{ct}_j, \mathbf{cr}_i), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\};$$

$$\langle \mathbf{P}_w, \mathbf{D}_w \rangle = f_3(\mathbf{T}_w, \mathbf{W}),$$

где \mathbf{L}_w — множество длин траекторий роботов-рабочих; \mathbf{P}_w — множество траекторий роботов-рабочих до точек выполнения задач; $\mathbf{D}_w = \{(i, j)\}$, $i = 1, \dots, m, j = c, \dots, d$ — множество с элементами номеров роботов и назначенных им задач.

Общее время передачи энергии от робота-заряжающего к роботу-рабочему τ_{tx} зависит от числа точек заряда pm , эффективности передачи энергии между роботами η_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 \mathbf{T}_c и кортежа точек заряда i -робота \mathbf{cr}_i :

$$\mathbf{T}_c = f_4(\mathbf{p}_{ij}, \mathbf{ct}_j, er_i, et_j, e_{\max}, e_{\min w}, e_m,$$

$$\delta e, d_u, s_b, nb), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\};$$

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

где η_{\max} — максимальная возможная эффективность передачи энергии; $L_{rel}, H_{rel}, P_{rel}$ — расстояние, смещение, передаваемая мощность системы передачи энергии в относительных единицах.

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

$$L_c = f_2(\mathbf{B}, \mathbf{ct}_g, \mathbf{cr}_k), g \in \{1, q\}, k \in \{1, z\};$$

$$\langle \mathbf{P}_c, \mathbf{D}_c \rangle = f_6(\mathbf{T}_c, \mathbf{C}),$$

где L_c – множество длин траекторий роботов-заряжающих; \mathbf{P}_c – множество траекторий роботов-заряжающих до задач пополнения энергетических ресурсов; $\mathbf{D}_c = \{(k, g)\}, k = 1, \dots, z; g = 1, \dots, q$ – множество с элементами номеров роботов-заряжающих и назначенных им задач.

Примем, что на момент начала работы группы количество рабочих и заряжающих роботов известно и постоянно: $|\mathbf{W}| = \text{const}, |\mathbf{C}| = \text{const}$.

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 τ_{ij} будет зависеть от того, как сформированы миссии каждого робота группы:

$$\mathbf{M}_i = f_7(\mathbf{P}_w, \mathbf{T}_c, \mathbf{T}_w), j \in \{c, d\}, i \in \{1, m\};$$

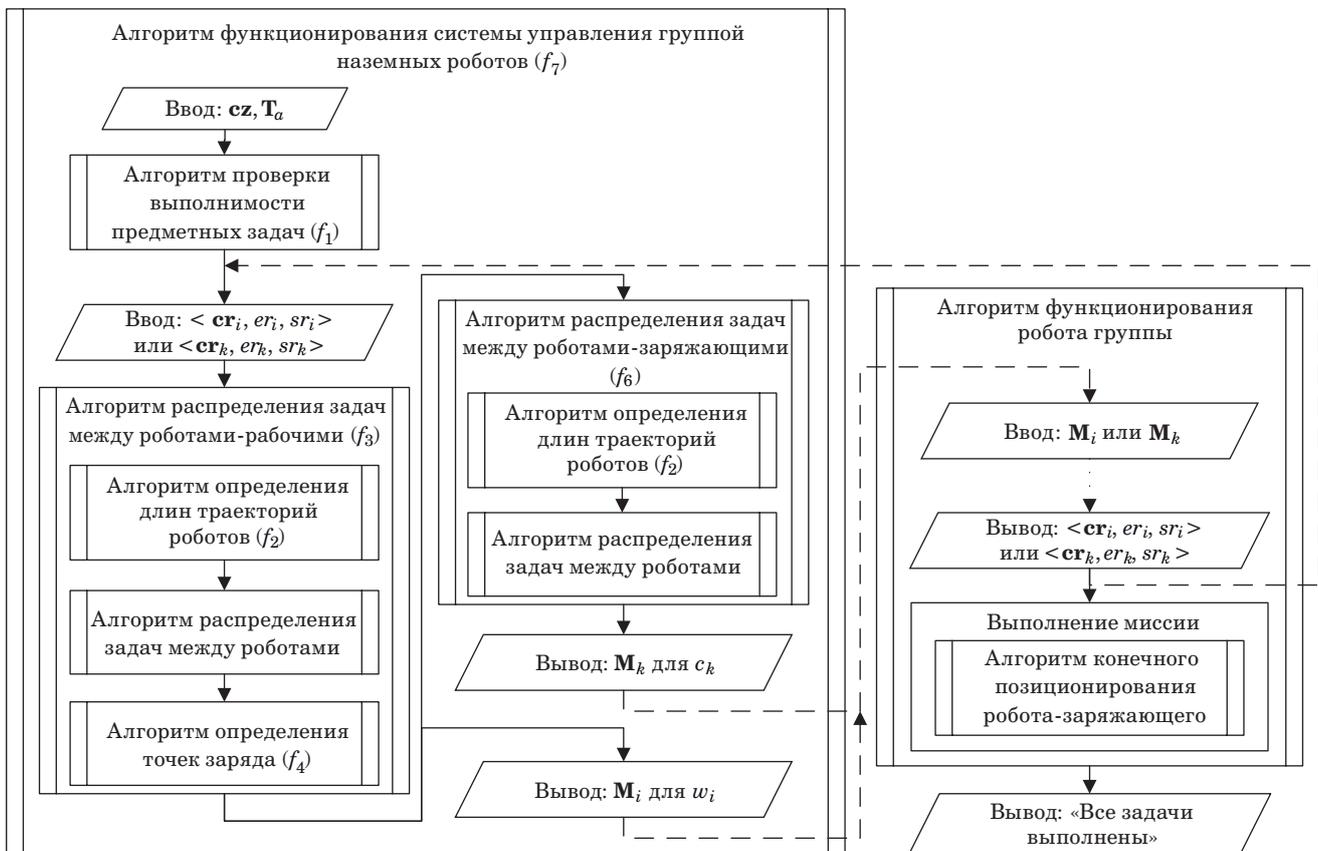
$$\mathbf{M}_k = f_7(\mathbf{P}_c, \mathbf{T}_c, \mathbf{cz}), g \in \{1, q\}, k \in \{1, z\}.$$

Алгоритмы функционирования группы роботов

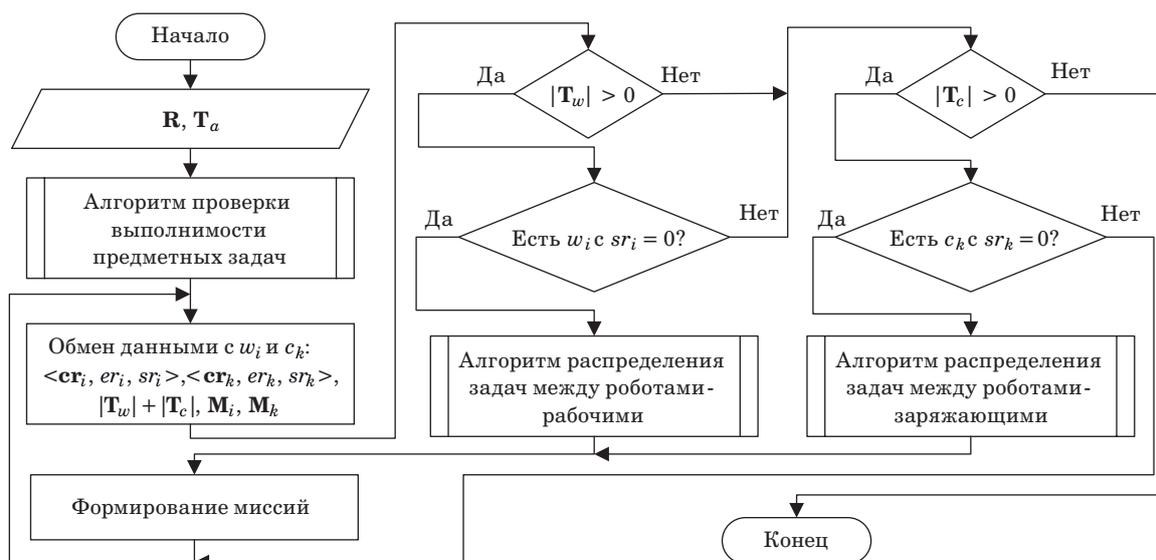
Взаимосвязи между разработанными алгоритмами функционирования системы управления группой наземных роботов показаны на рис. 3.

Далее рассмотрим разработанные алгоритмы более подробно. Алгоритм функционирования системы управления группой наземных роботов представлен на рис. 4.

На первом этапе посредством вложенного алгоритма отбираются выполнимые задачи ta_j , которые помещаются во множество \mathbf{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 \mathbf{T}_w , а в случае если оно пустое, то множества \mathbf{T}_c , которое содержит в себе задачи пополнения энергетических ресурсов. Если множество задач \mathbf{T}_w пустое, а множество \mathbf{T}_c имеет элементы, то система управления группой проверяет наличие свободного робота-заряжающего. Посредством алгоритма распределения задач пополнения энергетических ресурсов между ро-



■ **Рис. 3.** Комплекс алгоритмов управления группой наземных роботов
 ■ **Fig. 3.** Complex of control algorithms for a group of ground robots



■ **Рис. 4.** Алгоритм функционирования системы управления группой наземных роботов
 ■ **Fig. 4.** Algorithm for the operation of a control system for a group of ground robots

ботами-заряжающими освободившемуся роботу назначается точка, в которой он должен пополнить заряд робота-рабочего. Далее формируются миссии и снова осуществляется обмен данными с роботами. Если множество задач \mathbf{T}_w не пустое, то система управления группой проверяет наличие свободного робота-рабочего. Далее в соответствии с алгоритмом распределения задач между роботами-рабочими осуществляется выбор задачи для данного робота, поиск точек пополнения энергетических ресурсов, а затем формируется миссия. Алгоритм работы системы управления группой наземных роботов завершает свою работу в случае, когда множество задач \mathbf{T}_w и множество задач пополнения энергетических ресурсов \mathbf{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 рис. 5.

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 не может.

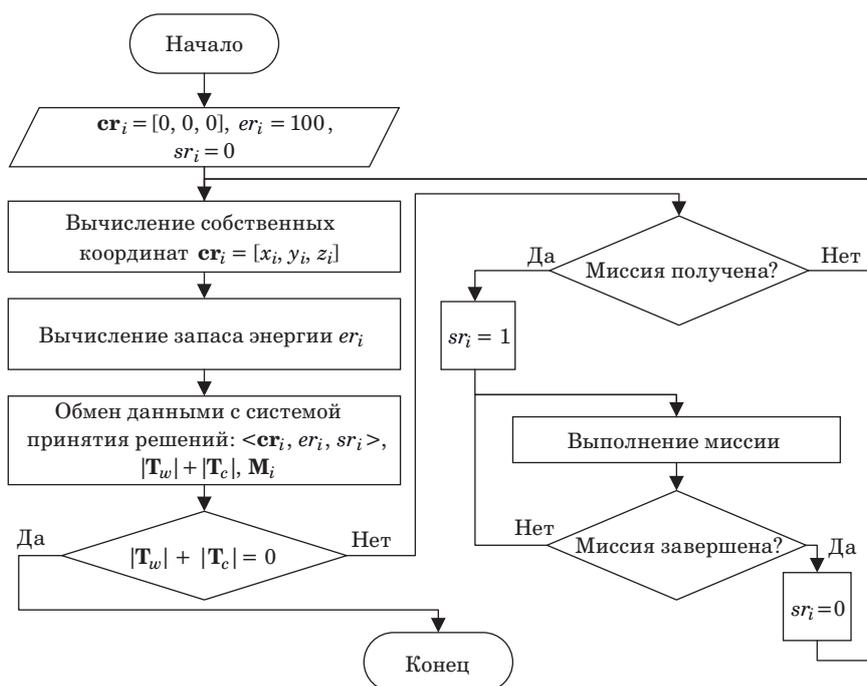
Роботы группы, а соответственно, и группа в целом имеют функциональные ограничения, связанные с физическими параметрами. Ввиду того, что задачи группе роботов ставятся извне, энергетические ресурсы, необходимые для их выполнения, могут превышать допустимые значения. Для стабильного функционирования группы необходимо исключить постановку роботам невыполнимых миссий.

Для отбора выполнимых задач разработан алгоритм (рис. 6), основанный на счетном цикле, внутри которого каждая задача из множества \mathbf{T}_a проверяется по двум условиям. Первое проверяемое условие, представленное неравенством

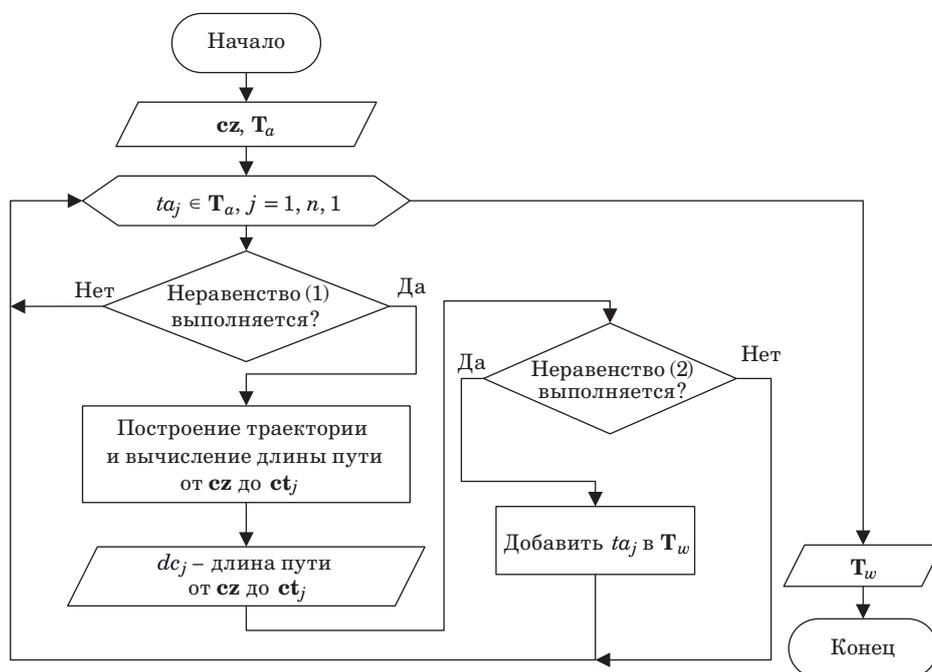
$$et_j \leq e_{\max} - (e_{\min w} + \delta e), \quad (1)$$

соблюдается в случае, если значение энергии, необходимой для выполнения задачи, не превышает значение энергетических ресурсов, доступных роботу-рабочему для использования.

Роботы-заряжающие имеют возможность неограниченно пополнять собственные энергетические ресурсы на зарядной станции, расположенной в рабочем пространстве группы. Предполагается, что робот-заряжающий пополняет свой запас энергетических ресурсов до значения e_{\max} , 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



■ **Рис. 5.** Алгоритм функционирования робота группы
 ■ **Fig. 5.** Algorithm for the functioning of a robot from a group



■ **Рис. 6.** Алгоритм проверки выполнимости предметных задач
 ■ **Fig. 6.** Algorithm for possibility checking of performing subject tasks

задачи для проверки ее достижимости роботом-рабочим. Количество энергии, доступное роботу-рабочему, с учетом той, которую ему передаст робот-заряжающий, должно быть до-

статочным для преодоления пути от зарядной станции до задачи и для ее выполнения. Для проверки данного требования выведено неравенство

$$2e_m \frac{dc_j}{du} + et_j \leq e_{\max} - e_{\min w} + \frac{1}{\eta_p} (e_{\max} - e_{\min c}), \quad (2)$$

где dc_j — длина пути от зарядной станции до точки выполнения задачи.

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 роботами группы, что является особенностью использования бесконтактных систем передачи энергии. Также η_p возможно использовать для учета расхода энергии роботом-рабочим во время получения энергии от робота-заряжающего. Для устойчивой работы реальной системы параметр η_p следует задавать как предполагаемое минимальное значение эффективности передачи энергии между роботами. Если неравенство (2) выполняется, то в соответствии с представленным алгоритмом задача добавляется во множество $\mathbf{T}_w = \{tw_c, \dots, tw_j, \dots, tw_d\}$, где номер задачи $j \in [c, d]$.

Для оптимального распределения выполнимых задач между роботами-рабочими используется венгерский алгоритм. Венгерский алгоритм позволяет находить оптимальное соответствие между роботом-рабочим и выполняемой задачей исходя из длины траектории l_{ij} между i -роботом и j -задачей. Для построения траектории каждого робота была выбрана модификация алгоритма LRLHD-A* (Local Roughness Local Height Difference A*) [19, 20].

Алгоритм определения точек заряда направлен на поиск участков на траекториях движения роботов-рабочих, на которых будет осуществляться позиционирование между роботами-рабочими и роботами-заряжающими для передачи энергетических ресурсов. Выбор данных участков осуществляется по принципу поиска наименьшего отклонения между координатами z соседних точек траектории. Диапазон поиска точек заряда соответствует следующему диапазону уровня заряда аккумулятора робота-рабочего: $(e_{\min w}; e_{\min w} + \delta e)$, где δe — заданный параметр, позволяющий определить верхнюю границу диапазона заряда аккумуляторной батареи, при котором разрешено пополнение энергетического запаса робота-рабочего. Количество точек nb на траектории, необходимое для позиционирования роботов при передаче энергии, определяется исходя из их размера, связанного с местом установки системы передачи энергии. Определенные точки заряда формируют множество задач пополнения энергетических ресурсов \mathbf{T}_c и подлежат опти-

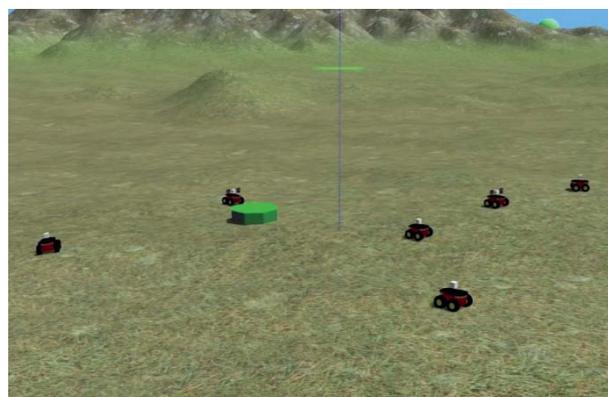
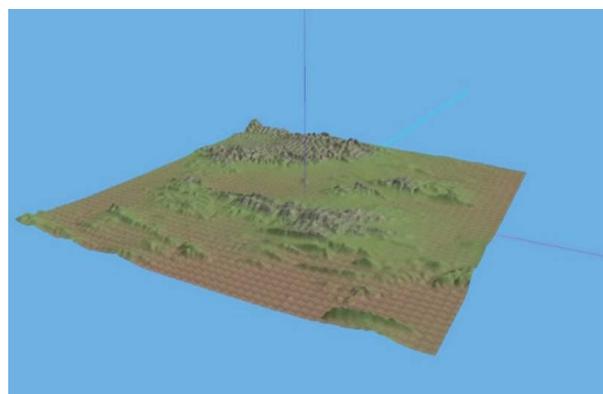
мальному распределению между роботами-заряжающими.

Экспериментальные результаты

Для получения статистически значимых результатов апробация предложенного подхода к функционированию группы роботов с перераспределением ресурсов проведена посредством имитационного моделирования в среде Gazebo. Рабочее пространство, в области которого находятся группа наземных роботов, задачи и зарядная станция, представляет собой рельефную поверхность (рис. 7).

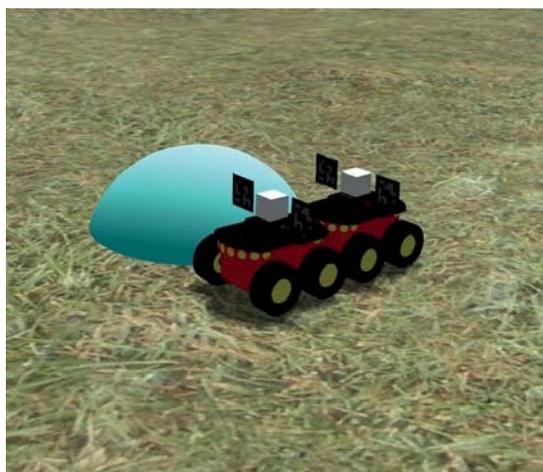
Зарядная станция имеет количество постов передачи энергии для роботов, превышающее их количество, что убирает ограничение на число одновременно заряжающихся роботов в модели.

В качестве исходной модели для роботов использована модификация Pioneer 3-AT. Мобильные четырехколесные роботы (рис. 8) оснащены двунаправленной беспроводной системой передачи энергии [21, 22], ArUco-маркерами и камерами технического зрения. Все расположено в передней части робота.



■ **Рис. 7.** Рельефная поверхность рабочего пространства группы

■ **Fig. 7.** Embossed surface of the group workspace



■ **Рис. 8.** Модель мобильного четырехколесного робота
 ■ **Fig. 8.** Mobile robot model with four wheels

В соответствии с поставленными задачами моделирования разработаны следующие сценарии функционирования группы роботов.

Сценарий 1. Группа роботов выполняет задачи без перераспределения ресурсов. Число роботов равно шести. На начальный момент времени роботы находятся в определенных местах рабочего пространства и имеют максимальный уровень заряда. Число задач варьируется от шести до 15, соответственно, проводится 10 экспериментов для определенного среднего значения расстояния от зарядной станции до задач. Все задачи являются выполнимыми и находятся в определенных местах рабочего пространства. Необходимо зафиксировать время, за которое роботы выполняют все поставленные задачи. По предварительному планированию с применением венгерского алгоритма задачи распределяются между роботами. Выполнив задачу, робот следует на зарядную станцию и пополняет запас энергетических ресурсов, после чего вновь может участвовать в распределении задач.

Сценарий 2. Группа роботов выполняет задачи с перераспределением ресурсов. Число роботов-рабочих равно трем, роботов-заряжающих — тоже трем. На начальный момент времени роботы находятся в соответствующих местах рабочего пространства, определенных 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. По предварительному планированию с применением венгерского алгоритма задачи распределяются между роботами-рабочими. Далее на траекториях роботов-рабочих определяются точки заряда. Задачи пополнения энергетических ресурсов

также посредством венгерского алгоритма распределяются между роботами-заряжающими. После выполнения задачи робот-рабочий 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.

Моделирование проводится в целях 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 [23] в различных режимах работы. Ввиду того, что потребляемую мощность необходимо связать со временем, рассчитанные величины приведены к энергопотреблению и переведены в относительные единицы (таблица).

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

Во всех экспериментах применялись следующие параметры: максимальный уровень заряда роботов e_{\max} — 100 %; минимальный уровень заряда роботов-рабочих $e_{\min w}$ — 15 %; минимальный уровень заряда роботов-заряжающих $e_{\min c}$ — 5 %; радиус работы группы r_w , не более — 230 м; максимальная скорость робота — 0,1 м/с; время выполнения задачи — 2000 с. Расстояние

■ Энергопотребление мобильной автономной робототехнической платформы

■ Energy consumption of a mobile autonomous robotic platform

Режим работы	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)	Передача энергии	131,8	0,0366
	Вычислители в простое		
Процесс заряда	Робот-рабочий	100,0	0,0278
	Робот-заряжающий	100,0	0,0278

от зарядной станции до каждой задачи определено для каждого эксперимента. При этом среднее значение расстояния от зарядной станции до задач существенно отличается в экспериментах: для набора экспериментов № 1 – 225 м, для набора экспериментов № 2 – 197 м, для набора экспериментов № 3 – 130 м.

В соответствии с рассмотренными сценариями проведено моделирование, по результатам которого построены графики. Результаты набора экспериментов № 1 представлены на рис. 9, а.

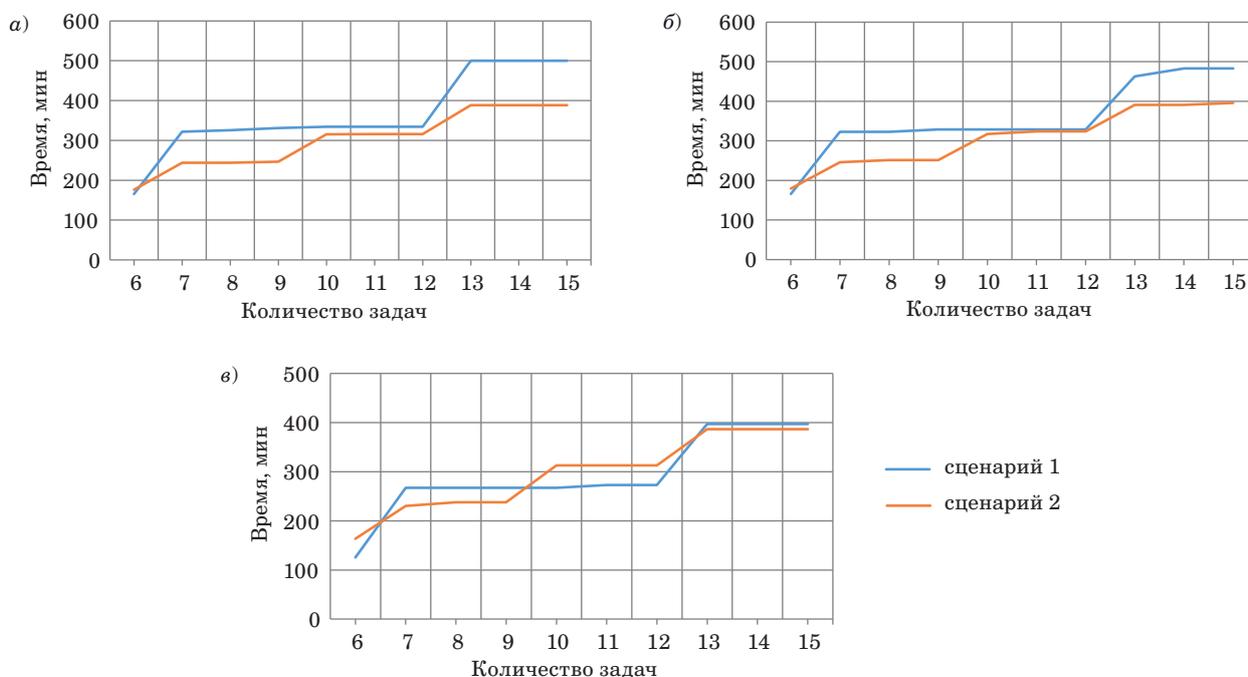
Из графика следует, что тенденция более быстрого выполнения задач группой, функционирующей по второму сценарию, сохраняется при числе задач, превышающем общее количество роботов. Это можно объяснить тем, что роботы-работчие, функционирующие по сценарию 2, расходуют значительно меньше времени на перемещение. Также сокращается время заряда каждого робота, так как роботам-работчим 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 набора экспериментов № 2 представлены на рис. 9, б. Тенденция более быстрого выполнения задач группой с перераспределением ресурсов сохраняется для набора экс-

периментов № 2. При количестве задач от 10 до 12 разница во времени выполнения задач при различных сценариях функционирования группы становится несущественной. Данный факт обусловлен количеством роботов в группе. Для группы, функционирующей без перераспределения ресурсов, общее время выполнения задач при их количестве от семи до 12 изменяется незначительно ввиду того, что на момент выполнения данных задач заряд всех роботов находится в завершающей стадии после выполнения первых шести задач. Максимальная разница в общем времени выполнения задач достигается при их количестве, равном 14, и составляет 20 %.

График, отражающий результаты набора экспериментов № 3, представлен на рис. 9, в. При среднем расстоянии до задачи 130 м группа без перераспределения ресурсов выполняет задачи быстрее в случае их количества от шести до 12. Так же, как и в предыдущих двух наборах экспериментов, время выполнения шести 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 перераспреде-



■ **Рис. 9.** Зависимость времени выполнения целевых задач от их количества при среднем расстоянии до задачи 225 м (а); 197 м (б); 130 м (в)

■ **Fig. 9.** Dependence of task execution time on their number at an average distance to the task of 225 m (a); 197 m (б); 130 m (в)

ния ресурсов. Это обусловлено снижением общего времени перемещения роботов. Важную роль для группы, функционирующей без перераспределения ресурсов, играет зарядная станция с неограниченным количеством постов передачи энергии. Все роботы группы могут одновременно пополнять свой заряд. Можно предположить, что сокращение постов заряда оказало бы значительное влияние на общее время выполнения задач в данном сценарии функционирования.

Эксперименты проводились с гомогенными группами наземных роботов, ввиду чего возможности группы, функционирующей с перераспределением ресурсов, раскрыты не полностью. Если роботов-заряжающих, в соответствии с их функциональным назначением, оснастить дополнительной аккумуляторной батареей или батареей с большей емкостью, что будет аналогично оснащению дополнительным оборудованием роботов-рабочих, затраты времени на выполнение задач будут меньше, чем в представленных результатах экспериментов.

Заключение

В работе представлено описание разработанных математической модели и алгоритмов 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 обме-

на между роботами посредством бесконтактных систем передачи энергии. Модель описывает принципы функционирования роботов-рабочих и роботов-заряжающих и их взаимодействия. Разработанные алгоритмы функционирования группы роботов отличаются реализацией процессов перераспределения энергетических ресурсов на основе результатов предварительного планирования внешней централизованной системой управления. Экспериментально проведено сравнение между группами, функционирующими с традиционными принципами и на основе представленного подхода. Имитационное моделирование проведено в среде Gazebo 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 изменялось количество задач от шести до 15. Каждый набор экспериментов отличался расположением задач в области рабочего пространства и средним расстоянием от зарядной станции до задачи. Максимальная разница во времени выполнения задач группами достигается при среднем расстоянии от зарядной станции до задачи 225 м, количестве задач от 13 до 15 и составляет более 25 %.

Результаты проведенного моделирования подтверждают работоспособность и эффективность разработанного подхода. Перераспределение энергетических ресурсов позволяет значительно расширить область функционирования группы роботов и использовать ее для потенциально более энергоемких задач.

Литература

1. Shamsuddin A. Z. M., Ahsan T., Rahman I., Momen S. Trophallaxis and energy optimization in swarms of robots. *19th Intern. Conf. on Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2016, pp. 490–495. doi:10.1109/ICCITECHN.2016.7860247
2. Zhou X., Kinny D. Energy-based particle swarm optimization: collective energy homeostasis in social autonomous robots. *Proc. of the 2013 IEEE/WIC/ACM Intern. Joint Conf. on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)*, 2013, vol. 02, pp. 31–37. doi:10.1109/WI-IAT.2013.87
3. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений. *Информатика и автоматизация*, 2022, № 21(4), с. 729–757. doi:10.15622/ia.21.4.4
4. Arif A. F., Ramli A. R., Samsudin K., Hashim S. J. Energy management in mobile robotics system based on biologically inspired honeybees behavior. *IEEE Intern. Conf. on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE)*, 2011, pp. 32–35. doi:10.1109/ICCAIE.2011.6162099
5. Bartashevich P., Koerte D., Mostaghim S. Energy-saving decision making for aerial swarms: PSO-based navigation in vector fields. *IEEE Symp. Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2017, pp. 1–8. doi:10.1109/SSCI.2017.8285178
6. Ismail A. R., Desia R., Zuhri M. F. R. The initial investigation of the design and energy sharing algorithm using two-ways communication mechanism for swarm robotic systems. *Proc. of the Fourth INNS Symposia Series on Computational Intelligence in Information Systems*, 2015, vol. 331, pp. 61–71. doi:10.1007/978-3-319-13153-5_7
7. Keskin M., Laporte G., Çatay B. Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 2019, vol. 107, pp. 77–94. doi:10.1016/j.cor.2019.02.014. <https://www.sciencedirect.com/sci->

- ence/article/abs/pii/S030505481930053X (дата обращения: 15.05.2023).
8. **Keskin M., Laporte G., Çatay B.** A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 2020, vol. 125, 105060. doi:10.1016/j.cor.2020.105060. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054820301775> (дата обращения: 15.05.2023).
 9. **Мао Н., Shi J., Zhou Y., Zhang G.** The electric vehicle routing problem with time windows and multiple recharging options. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 114864–114875. doi:10.1109/ACCESS.2020.3003000
 10. **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. <http://mfs.uimech.org/?l=ru> (дата обращения: 15.05.2023).
 11. **Darintsev O., Migranov A.** Multi-criteria optimization of the mobile robot group strategy using the ant algorithm. *Proc. of 16th Intern. Conf. Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”*, Saint-Petersburg, April 14–17, 2021. Springer, Singapore, 2022, vol. 232, pp. 97–108. doi:10.1007/978-981-16-2814-6_9
 12. **Новикова К. О., Фетисов В. С., Овчинников А. В.** Автоматические сервисные станции для обслуживания беспилотных летательных аппаратов. *Научные исследования, разработки и практические внедрения: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф.*, Ставрополь, 2022, с. 332–335.
 13. **Yu K., Budhiraja A., Tokekar P.** Algorithms for routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations and for package delivery. *arXiv preprint arXiv:1704.00079*, 2017, vol. 15. <https://arxiv.org/abs/1704.00079> (дата обращения: 15.05.2023).
 14. **Seyedi S., Yazicioğlu Y., Aksaray D.** Persistent surveillance with energy-constrained UAVs and mobile charging stations. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, iss. 20, pp. 193–198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319320087> (дата обращения: 20.05.2023).
 15. **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: материалы II Междунар. науч.-техн. конф.*, 2019, с. 408–413.
 16. **Booth K. E., Piacentini C., Bernardini S., Beck J. C.** Target search on road networks with range-constrained UAVs and ground-based mobile recharging vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 6702–6709. doi:10.1109/LRA.2020.3015464
 17. **Медведев М. Ю., Костюков В. А., Бутенко М. Ю., Гисцов В. Г., Евдокимов И. Д.** Аппаратно-алгоритмическое обеспечение перспективной системы энергосбережения автономной группы БПЛА. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 2022, № 5 (229), с. 230–243.
 18. **Ramasamy S., Reddinger J. P. F., Dotterweich J. M., Childers M. A., Bhounsule P. A.** Cooperative route planning of multiple fuel-constrained Unmanned Aerial Vehicles with recharging on an Unmanned Ground Vehicle. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2021, pp. 155–164. doi:10.1109/ICUAS51884.2021.9476848
 19. **Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O.** Energy-efficient path planning algorithm on three-dimensional large-scale terrain maps for mobile robots. *Proc. V Intern. Conf. “Interactive Collaborative Robotics” (ICR 2020)*, Saint-Petersburg, October 5–7, 2020, vol. 12336, pp. 319–330. doi:10.1007/978-3-030-60337-3_31
 20. **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
 21. **Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A.** Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics. *Radio-engineering*, 2021, vol. 30, no. 1, pp. 142–149. doi:10.13164/re.2021.0142
 22. **Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O.** Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 171–192. doi:10.2298/SJEE2102171KM
 23. **Крестовников К. Д., Ерашов А. А.** Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2022, т. 10, № 3, с. 201–212. doi:10.31776/RTCJ.10305

UDC 62-503.55

doi:10.31799/1684-8853-2023-6-20-34

EDN: QFJGNR

Mathematical model and control algorithms for a group of ground robots with energy resource redistributionK. D. Krestovnikov^a, Junior Researcher, orcid.org/0000-0001-6303-0344, k.krestovnikov@iias.spb.su^aSt. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Applying several homogeneous or heterogeneous robots for solving target problems provides advantages in terms of time reduction or increased functionality compared to a single robot. At the same time, the amount of resources required to ensure the operation of a group of robots also increases. **Purpose:** To increase the efficiency of a group of robots operating in rough terrain by redistributing energy resources within the group. **Results:** We present mathematical model and control algorithms for a group of robots, with some of the robots defined as workers, and the other part as chargers. Worker robots are aimed solely at completing assigned tasks, and charging robots replenish their energy resources. The proposed approach takes into account the limited energy resource of charging robots and losses during energy transfer between robots, which makes it possible to apply the developed solutions for robots equipped with contactless energy transfer systems. The selection of points at which energy is transferred takes into account the topography of the surface of the working space, which simplifies the process of robots positioning and increases the efficiency of contactless energy transfer. Using simulation modeling in the Gazebo environment, we have compared the total time for performing tasks by groups operating with traditional principles and that for groups based on the presented approach. In the group without redistribution of resources, all robots were workers and performed target tasks. The second group was divided equally into worker robots and charger robots. The results obtained in the simulation show a general trend towards faster completion of tasks by a group operating with a redistribution of resources when the distance to tasks and their number increases. **Practical relevance:** The proposed approach of the resource redistribution expands the operation area of a group robots and makes it possible to apply it for potentially more energy-intensive tasks.

Keywords – group control of robots, swarm systems, resource redistribution in a group of robots.

For citation: Krestovnikov K. D. Mathematical model and control algorithms for a group of ground robots with energy resource redistribution. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 6, pp. 20–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-6-20-34, EDN: QFJGNR

References

- Shamsuddin A. Z. M., Ahsan T., Rahman I., Momen S. Trophallaxis and energy optimization in swarms of robots. *19th Intern. Conf. on Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2016, pp. 490–495. doi:10.1109/ICCITECHN.2016.7860247
- Zhou X., Kinny D. Energy-based particle swarm optimization: collective energy homeostasis in social autonomous robots. *Proc. of the 2013 IEEE/WIC/ACM Intern. Joint Conf. on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)*, 2013, vol. 02, pp. 31–37. doi:10.1109/WI-IAT.2013.87
- Darintsev O., Migranov A. Analytical review of approaches to the distribution of tasks for mobile robot teams based on soft computing technologies. *Informatics and Automation*, 2022, vol. 4, iss. 21, pp. 729–757 (In Russian). doi:10.15622/ia.21.4.4
- Arif A. F., Ramli A. R., Samsudin K., Hashim S. J. Energy management in mobile robotics system based on biologically inspired honeybees behavior. *IEEE Intern. Conf. on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE)*, 2011, pp. 32–35. doi:10.1109/ICCAIE.2011.6162099
- Bartashevich P., Koerte D., Mostaghim S. Energy-saving decision making for aerial swarms: PSO-based navigation in vector fields. *IEEE Symp. Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2017, pp. 1–8. doi:10.1109/SSCI.2017.8285178
- Ismail A. R., Desia R., Zuhri M. F. R. The initial investigation of the design and energy sharing algorithm using two-ways communication mechanism for swarm robotic systems. *Proc. of the Fourth INNS Symposia Series on Computational Intelligence in Information Systems*, 2015, vol. 331, pp. 61–71. doi:10.1007/978-3-319-13153-5_7
- Keskin M., Laporte G., Çatay B. Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 2019, vol. 107, pp. 77–94. doi:10.1016/j.cor.2019.02.014. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030505481930053X> (accessed 15 May 2023).
- Keskin M., Laporte G., Çatay B. A Simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 2020, vol. 125, 105060. doi:10.1016/j.cor.2020.105060. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054820301775> (accessed 15 May 2023).
- Mao H., Shi J., Zhou Y., Zhang G. The electric vehicle routing problem with time windows and multiple recharging options. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 114864–114875. doi:10.1109/ACCESS.2020.3003000
- Darintsev O. V., Migranov A. B. Using the ant colony algorithm to find a strategy for the behavior of a group of mobile robots on a working field with obstacles. *Multiphase Systems*, 2022, vol. 17, no. 3-4, pp. 177–186. doi:10.21662/mfs2022.3.016. Available at: <http://mfs.uimech.org/?l=ru> (accessed 15 May 2023) (In Russian).
- Darintsev O., Migranov A. Multi-criteria optimization of the mobile robot group strategy using the ant algorithm. *Proc. of 16th Intern. Conf. Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”*, Saint-Petersburg, April 14–17, 2021. Springer, Singapore, 2022, vol. 232, pp. 97–108. doi:10.1007/978-981-16-2814-6_9
- Novikova K. O., Fetisov V. S., Ovchinnikov A. V. Automatic service stations for maintenance of unmanned aerial vehicles. *Materialy 7 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Nauchnyye issledovaniya, razrabotki i prakticheskiye unedreniya”* [Materials of the VII Intern. Scient. and Pract. Conf. “Scientific research, development and practical implementation”]. Stavropol, 2022, pp. 332–335 (In Russian).
- Yu K., Budhiraja A., Tokekar P. Algorithms for routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations and for package delivery. *arXiv preprint arXiv:1704.00079*, 2017, vol. 15. Available at: <https://arxiv.org/abs/1704.00079> (accessed 15 May 2023).
- Seyedi S., Yazicioğlu Y., Aksaray D. Persistent surveillance with energy-constrained UAVs and mobile charging stations. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, iss. 20, pp. 193–198. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319320087> (accessed 20 May 2023).
- Akhmerov Sh. R., Fetisov V. S. Selection of a sequence of multicopter departures for duty over an object using various technologies. *Problemy polucheniya, obrabotki i peredachi izmeritel’noy informatsii: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Materials of the 2nd Intern. Scient. and Tech. Conf. “Problems of obtaining, processing and transmitting measurement information”], 2019, pp. 408–413 (In Russian).
- Booth K. E., Piacentini C., Bernardini S., Beck, J. C. Target search on road networks with range-constrained UAVs and

- ground-based mobile recharging vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 6702–6709. doi:10.1109/LRA.2020.3015464
17. Medvedev M. Yu., Kostyukov V. A., Butenko M. Yu., Gistsov V. G., Evdokimov I. D. The concept of creating a promising system for recharging an autonomous group of UAVs. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2022, no. 5 (229), pp. 230–243 (In Russian).
 18. Ramasamy S., Reddinger J. P. F., Dotterweich J. M., Childers M. A., Bhounsule P. A. Cooperative route planning of multiple fuel-constrained Unmanned Aerial Vehicles with recharging on an Unmanned Ground Vehicle. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2021, pp. 155–164. doi:10.1109/ICUAS51884.2021.9476848
 19. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-efficient path planning algorithm on three-dimensional large-scale terrain maps for mobile robots. *Proc. V Intern. Conf. "Interactive Collaborative Robotics" (ICR 2020)*, Saint-Petersburg, October 5–7, 2020, vol. 12336, pp. 319–330. doi:10.1007/978-3-030-60337-3_31
 20. Medvedev M. Yu., Brosalin D. O. Study of global route planning algorithms. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*, 2023, no. 11, pp. 58–61 (In Russian). doi:10.26160/2541-8637-2023-11-58-61
 21. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics, *Radioengineering*, 2021, vol. 30, no. 1, pp. 142–149. doi:10.13164/re.2021.0142
 22. Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 171–192. doi:10.2298/SJEE2102171K
 23. Krestovnikov K. D., Erashov A. A. Development of architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for robotic complexes for various purposes. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2022, vol. 10, no. 3, pp. 201–212 (In Russian). doi:10.31776/RTCJ.10305
-