

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.И. Бесхмельнов

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

В статье рассматриваются алгоритмы формирования траекторий движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении поисково-спасательных и ликвидационных операций. Описаны методы и алгоритмы управления движением группы БПЛА в строю, при развертывании в линию, при развертывании в шеренгу, при поворотах, в колонне. Управление осуществляется с помощью альтернативных алгоритмов коллективной адаптации, основанных на идеях коллективного поведения. Рассмотрены принципы функционирования одного автомата адаптации. Целью управления ведомыми роботами является минимизация отклонений. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана структура процесса альтернативной коллективной адаптации параметров, под контролем которых осуществляется движение группы БПЛА в строю. Разработаны оригинальные правила управления параметрами, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими методами: полная децентрализация управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов, задающих положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейную скорость робота соответственно. Предложена структура маневра, выполняемого роботом для коррекции отклонений параметров. Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации, что позволяет эффективно обрабатывать внештатные ситуации, такие как выход агентов из строя, изменения числа агентов вследствие выхода из строя или внезапного приобретения связи с очередным агентом, а также в условиях наличия ошибок измерений и шумов, удовлетворяющих определенным ограничениям.

Группа беспилотных летательных аппаратов; движение строя; групповое управление; децентрализованное управление; траектория; альтернативная коллективная адаптация; объект адаптации; роевые алгоритмы.

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.I. Beskhmelnov

DECENTRALIZED CONTROL OF A GROUP OF AUTONOMOUS MOBILE OBJECTS WHEN FORMING A TRAJECTORY OF MOVEMENT

The article considers algorithms for generating unmanned aerial vehicles motion trajectories during search and rescue and liquidation operations. The methods and algorithms for controlling the motion of a unmanned aerial vehicles group in formation, when deployed in a line, when deployed in a rank, when turning, in a column are described. Control is carried out using alternative collective adaptation algorithms based on the ideas of collective behavior. The operating principles of one adaptation machine are considered. The purpose of controlling slave robots is to minimize deviations. To implement the adaptation mechanism, the parameters of the vector are matched with adaptation machines that model the behavior of adaptation objects in the environment. A structure has been developed for the process of alternative collective adaptation of parameters that control the motion of a group of unmanned aerial vehicles in formation. Original rules for controlling parameters have been developed that have a number of advantages over other methods: complete decentralization of control in combination with dynamic correction of robot parameters that set the position and orientation of the robot in an absolute coordinate system, and the linear velocity of the robot, respectively. A structure of a maneuver performed by a robot to correct parameter deviations is proposed. Control is performed using an alternative collective adaptation algorithm based on the ideas of collective behavior of adaptation objects, which allows for efficient processing of emergency situations, such as agent failure, changes in the number of agents due to failure or sudden acquisition of communication with the next agent, as well as in conditions of measurement errors and noise that satisfy certain restrictions.

Group of unmanned aerial vehicles; formation movement; group control; decentralized control; trajectory; alternative collective adaptation; adaptation object; swarm algorithms.

Введение. Для понимания актуальности вопросов управления движением группы БПЛА следует отметить, что современные технологии и автоматизированные системы сделали революционный скачок в различных сферах, таких как сельское хозяйство, логистика и оборона. Математические методы, основанные на машинном обучении, получили

существенный толчок благодаря возможности проводить сложные вычисления в реальном времени с помощью современных средств анализа данных. Такая синергия технологий привела к полной трансформации отраслей, повышая их эффективность и способствуя автономному решению различных задач [1].

Управление группой БПЛА представляет собой комплексную задачу, задействующую различные методы и алгоритмы для обеспечения координированного движения и выполнения общих задач. Отдельно взятые БПЛА уже обладают достаточной степенью автономности, но эффективное управление группой требует гораздо большего – от синхронизации данных в реальном времени до реализации сложных маневров и стратегий распределения задач между аппаратами. В основе подходов к управлению лежат алгоритмы машинного обучения, теории управления и алгоритмические стратегии, позволяющие аппаратам самостоятельно адаптироваться к изменению исполняемых задач и среды. Централизованное и децентрализованное управление представляют собой два основных подхода, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Важно не только обеспечивать взаимодействие между БПЛА, но и поддерживать их способность к самостоятельному принятию решений в случаях, когда связь с центральным управлением ограничена [1, 2].

Активное применение беспилотных аппаратов с искусственным интеллектом в оборонной сфере уже стало стандартом. Разведывательные операции и выполнение военных задач – главные функции таких устройств. В свою очередь, развитие дронов и автоматизация интерфейсов машин становится более ускоренным благодаря прогрессу интеграции машинного обучения [1, 2].

В разных областях применения от обороны до космических аппаратов машинное обучение становится ключевым элементом, который содействует совершенствованию связи между дронами. Эти беспилотники совершенствуют свои маршруты полета, экономят энергию и обеспечивают своевременные поставки, благодаря использованию искусственного интеллекта. Растущие возможности технологии дронов приводятся в движение развивающимся машинным обучением, которое делает их автономными и способными выполнять сложные задачи без непосредственного участия человека. Машинное обучение революционизировало механизмы и в целом приборостроение, повысив технологичность и снизив ресурсозатраты [3–5].

Основные методы навигации и планирования маршрутов для управления движением группы БПЛА включают использование автономных алгоритмов, основанных на предварительном и в реальном времени расчете траекторий. Важной частью является интеграция картины местности и учет препятствий при маршрутизации, что достигается через применение ГИС-технологий и датчиков дистанционного зондирования. Алгоритмы виртуальных точек и потенциальных полей позволяют моделировать поведение группы БПЛА как единого роя, оптимизируя пути обхода препятствий и минимизируя риски коллизий. Широко применяются также методы искусственного интеллекта и машинного обучения для адаптации полетных задач в зависимости от меняющихся условий и целей миссии. Эти подходы повышают эффективность использования групп БПЛА в различных областях, от военных операций до мониторинга и сельскохозяйственных работ [1–4].

Для обеспечения безопасности и надежности дронов и наземных станций управления важно автоматизировать их взаимодействие через разработку сложных алгоритмов машинного обучения. Они способны эффективно координировать действия десятков или сотен дронов одновременно, предотвращая столкновения и обеспечивая бесперебойную работу системы. Проблемы, связанные с безопасностью, вопросами ее регулирования и созданием надежных систем, могут быть успешно решены путем применения таких инновационных решений [4].

В современном мире искусственный интеллект находит новые области для своего применения, развивая ключевую роль в важных сферах. Взаимодействие и сотрудничество дронов в процессе выполнения сложных задач, вдохновленное коллективным поведе-

нием социальных насекомых, например муравьев и пчел, представляет собой хороший пример применения машинного обучения. В этом контексте особенно значимы БПЛА, эффективно применяемые для мониторинга линий электропередач, дорог и государственных границ [6].

Благодаря их уникальным возможностям такие аппараты применяются для различных целей. Например, их используют для поиска лесного огня, оперативной ликвидации чрезвычайных ситуаций и наблюдения за теми, кто нарушает правила дорожного движения. Также эти устройства очень полезны в ситуациях бедствия природного характера, так как их способность охватывать огромные территории позволяет идентифицировать людей, которым нужна помощь, и организовывать доставку необходимых материалов в этих местах [5, 6].

Исследование в области управления роботами под командованием находится под влиянием теории группового управления, которая активно исследует методы роя и стаи для управления роботами в групповой среде. Новая область управления робототехникой получает особое внимание в рамках этой теории. Роевые алгоритмы, основанные на локальном взаимодействии однородных роботов, обеспечивают скоординированное направление к цели, умелый обход препятствий и другие операции. Стайные алгоритмы, в свою очередь, предполагают взаимодействие роботов на основе их общих знаний и индивидуальных правил поведения в стае [6, 7].

Данная работа посвящена совершенствованию механизмам управления автономных БПЛА на основе децентрализованного управления. В результате, было разработано правило для группы агентов, моделирующих мобильных роботов, обеспечивающее их движение с заданной геометрической структурой строя, выраженной удержанием взаимного расстояния, с учетом требований полной автономности и получения информации от ближайших соседей [2, 5–7].

Движение группы беспилотных летательных аппаратов. Управление движением группы БПЛА в строю представляет собой сложную и актуальную задачу в области авиационной техники. Современные технологии позволяют создавать эффективные системы управления, которые обеспечивают синхронное и безопасное перемещение нескольких БПЛА в одном формировании [2, 8].

Организация движения группы БПЛА требует точного расчета траекторий полета, учета параметров окружающей среды и мгновенного реагирования на изменяющиеся условия. В данной статье рассмотрим основные принципы управления такими группами, возможности использования автопилотов и систем связи для координации действий между БПЛА, а также перспективы развития данной области в будущем [2, 8, 9].

Основные принципы управления группой БПЛА в строю включают в себя координацию действий между отдельными аппаратами, обеспечение их безопасного перемещения и выполнение поставленных целей с минимальной вероятностью коллизий. Для эффективного управления группой БПЛА необходимо четко определить роль каждого участника, задать коммуникационные протоколы и установить строгие процедуры взаимодействия. Ключевыми элементами успешного управления такой группой являются поддержка передачи данных между БПЛА, адаптация к изменяющимся условиям полета и организация тактического взаимодействия для достижения общих целей [2, 10].

Для этого детально описаны алгоритмы, которые можно использовать для построения траекторий движения БПЛА при мониторинге в ходе поисково-спасательных и ликвидационных операций. Используемые алгоритмы можно реализовывать для перемещения роботов в зоны без препятствий и согласованного распределения команды роботов в рабочем пространстве [2]. На рис. 1 показаны основные траектории, которые можно использовать для перемещения группы БПЛА.

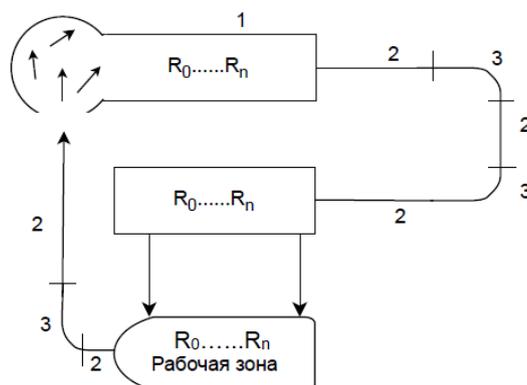


Рис. 1. Перемещение группы БПЛА при выполнении работ

На участке 1 формируется строй в линию. На участке 2 перемещение группы БПЛА, развернутых в линию. На участке 3 перемещение группы БПЛА на повороте.

Чтобы гарантировать точную координацию внутри группы, оптимальную совместимость и эффективное движение БПЛА в районе миссии, при их движении необходимо соблюдать геометрическую структуру формирования. В пространстве или на плоскости строй (формирование или соединение) является необходимой площадкой для установки БПЛА. Формулировка задачи формирования может различаться в зависимости от способа установления целевого образования, в зависимости от метода его определения. Для получения определенной геометрической формы группа автономных БПЛА управляет формированием путем получения заданной геометрической формы в управлении формированием группы. В процессе реализации задачи, от группы требуется поддержание формы, осуществляя действия как единое твердое тело [1, 2–10].

Применение алгоритмов машинного обучения и развитых техник искусственного интеллекта (ИИ) играет ключевую роль в управлении движением групп БПЛА. Эти методы позволяют автономно совершенствовать стратегии полётов, адаптируясь к изменяющимся условиям в реальном времени [11].

Координация полетов группы БПЛА предполагает грамотное управление движением каждого аппарата в строю. При этом важным техническим аспектом является обеспечение бесперебойной связи между всеми БПЛА с целью передачи данных о местоположении, скорости и других параметрах полета. Для эффективной координации полетов необходимо использовать специализированные системы управления, позволяющие оперативно анализировать информацию от каждого аппарата и принимать соответствующие решения для поддержания идеального строя. Технические средства координации полетов также включают в себя системы автоматического управления трассой полета и автоматической коррекции ошибок, что позволяет минимизировать риски столкновений и обеспечить безопасность полетов группы БПЛА [11, 12].

Алгоритмы машинного обучения могут обрабатывать большие объёмы данных с датчиков БПЛА, что улучшает способность к предсказанию и избеганию столкновений, оптимизирует маршруты и распределение задач между аппаратами в группе. Искусственный интеллект способствует в создании гибких и адаптивных управленческих систем, способных координировать сложные многоуровневые операции без постоянного вмешательства человека, что критически важно для выполнения задач в условиях, где скорость реакции и точность решений имеют первостепенное значение [13–15].

В простейшем случае целевой строй задается через координаты целевых положений БПЛА. Методы построения плоских и пространственных формаций в группах квадрокоптеров рассмотрены в ряде современных отечественных и зарубежных работ [1–5, 13–15]. Формирование траекторий движения предполагает постоянный учет координат в рабочем пространстве.

Представленные выше траектории (рис. 1) передвижения группы БПЛА предполагают следующее:

- ◆ Формирование строя, развернутого в линию, что позволяет перегруппировать несколько БПЛА и перейти в порядке движения к строю, определяемому как «конвой».
- ◆ Перемещение группы БПЛА, развернутых в линию, что позволяет обеспечить движение ведущего БПЛА автономно, а остальные, при этом, осуществляют слежение за ним, рис. 2. Группе допускается совершить остановку и перезапуск процесса конвоирования в следствие динамики внешней среды, а также группа может продолжать движение при неисправности одного или нескольких роботов, исключая ведущего.
- ◆ Перемещение коллектива мобильных БПЛА, выстроенных в шеренгу, относительно базовой линии в процессе мониторинга, рис. 3.

Некоторые подходы, используемых в решении задач управления строем, применяют понятия виртуальных формаций и/или виртуальных лидеров [2].

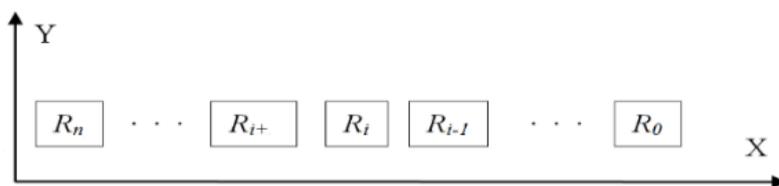


Рис. 2. Схема движения группы БПЛА, развернутых в линию

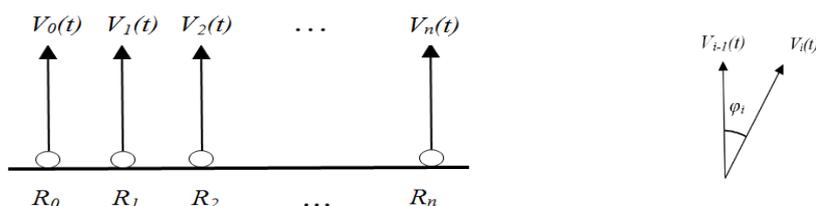


Рис. 3. Схема движения группы БПЛА, развернутых в шеренгу

Этот подход основан на том, что каждый робот в формировании следует за назначенной точкой – виртуальным лидером, который меняет координаты в соответствии с предопределенным правилом. Эти координаты определяются внешними вычислениями и служат входными параметрами для агента. В этой структуре каждому агенту назначается виртуальное формирование, которое диктует геометрию всего формирования. Агенту дается определенная пронумерованная точка внутри этого виртуального формирования, а также траектория движения, которая определяет структуру формирования. Для этого рассматриваются системы, в которых агенты перемещаются в евклидовом пространстве с квантованными временными интервалами [2, 13–15].

Операторы играют ключевую роль в управлении групповыми полетами (БПЛА). Их задачи включают в себя определение маршрутов полета, контроль за выполнением задач каждым БПЛА в группе, а также обеспечение согласованности и синхронизации действий между ними. Операторы должны обладать высокой квалификацией и уметь принимать решения быстро и эффективно. Кроме того, они отвечают за обеспечение безопасности полетов, оперативное реагирование на любые непредвиденные ситуации и обмен информацией с другими участниками процесса. Важно, чтобы операторы были хорошо координированы и обладали хорошими коммуникационными навыками для успешного управления движением группы БПЛА в строю [16].

Основной целью является разработка системы управления группы БПЛА в строю, когда ведущий БПЛА движется автономно, а ведомые БПЛА повторяют траекторию своего ведущего БПЛА с некоторым временным запаздыванием t , а также способы, связанные с изменением топологии группы. На рис. 4 и 5 показано перемещение формации группы БПЛА, развернутых в линию, по прямому пути и при повороте.

с обратной связью, минимизирующих эти отклонения. Для управления движением БПЛА по траектории предшествующего БПЛА использовались кинематические уравнения в переменных состояния, описывающие цели управления, при этом задача локализации робота решалась с использованием их относительного положения.

Рассмотрим схему движения при условии мониторинга группы БПЛА, развернутых в шеренгу (рис. 3). Известен вектор состояния каждого из БПЛА в абсолютной системе координат, $W_i=(x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i)$,

где (x_i, y_i) – координаты места расположения БПЛА,

V_i – скорость передвижения робота,

α_i – угол между вектором V_i и базовой линией,

h_i – модуль вектора V_i .

Заданы α_0 – для ведущего БПЛА и D – расстояние в линии между соседними БПЛА R_i и R_{i-1} .

Перейдем к задаче управления ведомыми БПЛА, цель можно формализовать как достижение следующих равенств:

1. $V_{i-1}(t) = V_i(t)$.
2. $h_{i-1}(t) = h_i(t)$.
3. $x_{i-1}(t) - x_i(t) = D$.
4. $y_i(t) = y_{i-1}(t)$.
5. $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}(t) = \alpha_0$.
6. $\varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ – угол между $V_{i-1}(t)$ и $V_i(t)$.

(1)

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения каждого БПЛА R_i , движущегося параллельно с соседним БПЛА R_{i-1} . Ошибкой БПЛА R_i является: $\delta_i = k_1$.

Ошибка перемещения роботов: $\Delta = \sum_i \delta_i$.

Максимальные значения отклонения скорости: $\delta V = V_i(t+1) - V_i(t)$ и угла «рыскания» $\varphi_{i,i-1}(t+1) - \varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Разработаны правила устранения расхождения курса робота R_i с курсом робота R_{i-1} .

Если существуют отклонения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_h &= h_i(t) - h_{i-1}(t), \varepsilon_y = y_i(t) - y_{i-1}(t), \varepsilon_x = x_i(t) - x_{i-1}(t), \varepsilon_h = \\ &= h_i(t) - h_{i-1}(t), \varphi_i(t) > 0, \end{aligned} \quad (2)$$

то выполняется коррекция. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x| - D)$.

Предложена структура маневров, выполняемого БПЛА для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала БПЛА R_i изменяет значение параметра $\alpha_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_t БПЛА передвигается с новым значением параметра $\alpha_i^*(t) = \alpha_i(t) + \delta_i$. По истечении времени δ_t возвращается исходное значение параметра, с которым БПЛА продолжает движение.

Рассмотрим схему движения группы БПЛА, развернутых в линию. Известен вектор $V_i=(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ состояния каждого из БПЛА в абсолютной системе координат. В скобках $(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ положение и ориентация БПЛА в абсолютной системе координат, и линейная скорость БПЛА соответственно. S_0 – фиксированная дистанция (расстояние) между любой парой соседних в линии роботов R_i и R_{i+1} в абсолютной системе координат. Пусть

$S_i(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_{i-1}(t))^2 + (y_i(t) - y_{i-1}(t))^2}$ – расстояние между двумя соседними роботами R_i и R_{i+1} .

$\omega_{i,i-1} = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ – угол между осями $\theta_i X_i$ и $\theta_{i-1} X_{i-1}$ связанных систем координат соседних роботов R_i и R_{i+1} .

$V_i(t)$ – линейная скорость передвижения робота R_i момент времени t .

Рассмотрим теперь соответствующие модели. Кинематическая модель каждого из БПЛА имеет вид:

$$\omega_{i,i-1}(t+1) = \omega_{i,i-1}(t) + \delta_{\omega}\omega_{i,i-1}(t). \quad (3)$$

$$V_i(t+1)\cos\omega_{i,i-1}(t+1) = V_{i-1}(t+1) + \delta_V V_{i-1}(t+1). \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x x_i(t). \quad (5)$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y y_i(t). \quad (6)$$

Рассмотрим теперь задачу управления ведомыми роботами. Главная идея состоит в том, что целью управления ведомыми роботами является достижение равенств:

$$\omega_{i,i-1}(t+1) = 0. \quad (7)$$

$$V_i(t+1)\cos\omega_{i,i-1}(t) = V_{i-1}(t). \quad (8)$$

$$S_i = S_0. \quad (9)$$

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения роботов, следующих за роботом R_{i+1} .

Ошибкой БПЛА R_i является:

$$\delta_{S_i} = S_i(t) - S_0, \omega_{i,i-1}(t) > 0, \delta_{x_i}, \delta_{y_i} - \text{отклонения от базовой точки.}$$

Задача состоит в том, чтоб R_i точно следовал за БПЛА R_{i-1} .

Максимальные значения скорости $V_i(t+1)$ и угла рыскания $\omega_{i,i-1}(t+1)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Приведем применяемые продукционные правила в порядке приоритета их исполнения.

Правило 1 (коррекция отклонения курса робота R_{i+1}):

Если $\omega_{i,i-1}(t) > 0$, система выполняет адаптацию и корректировку угла между осями $0_i X_i$ и $0_{i-1} X_{i-1}$ с целью его снижения, в соответствии с выражением (2).

Правило 2: если отклонение и время отработки данного отклонения не больше определенных заранее порогов, то выполняется коррекция скорости $V_i(t+1)$ движения по текущему отклонению от траектории следования псевдоцели, в соответствии с выражением (2).

Первое правило предназначено для решения задач управления, которые оказывают существенное влияние на направление движения агента, тогда как второе правило фокусируется на ситуациях, когда управляющие воздействия существенно влияют на скорость агента. Для каждого правила управления предоставляется дискретный аналог.

Оптимизация тактики и стратегии управления группой БПЛА играет ключевую роль в повышении эффективности и безопасности их действий в строю. Для достижения оптимальных результатов необходимо учитывать различные факторы, такие как скорость и направление движения, условия окружающей среды и цели миссии. Современные системы управления БПЛА позволяют автоматизировать процессы координации и взаимодействия между отдельными аппаратами, что обеспечивает более точное выполнение задач и снижает вероятность столкновений. Применение новейших технологий и алгоритмов обеспечивает быструю адаптацию тактики управления к изменяющимся условиям, что повышает гибкость и эффективность работы группы БПЛА в строю [2, 20–22].

Формирование БПЛА анализируется как многоагентная система, включающая N автономных агентов, где $N \geq 2$. Изначально БПЛА могут располагаться на любом расстоянии от конечного пункта назначения, а архитектура их взаимодействия может быть представлена в виде связного графа, иллюстрирующего траектории ведущего и ведомого роботов [2, 11–20].

Алгоритмы управления движением группы беспилотных летательных аппаратов. В современном мире БПЛА находят широкое применение в различных сферах, начиная от военных операций и заканчивая сельским хозяйством. Особенно актуальным становится вопрос координации действий группы БПЛА, способных действовать согласованно и эффективно. Управление движением группы БПЛА в строю представляет со-

бой сложную задачу, которая включает в себя разработку алгоритмов взаимодействия, обеспечивающих высокую точность, надёжность и безопасность выполнения полётных заданий [10–16].

Разработка механизмов управления движением группы БПЛА требует комплексного подхода, включающего в себя не только аспекты управления и навигации, но и обработку информации, получаемой от датчиков в реальном времени. Это позволяет каждому аппарату в группе не только сохранять заданное положение относительно других БПЛА, но и адаптироваться к изменениям внешней среды, обеспечивая тем самым гибкость и автономность действий группы. Введение в эксплуатацию таких систем управления открывает новые перспективы для применения БПЛА в сложных и динамичных условиях [21, 22].

Управление движением группы БПЛА в строю осуществляется с помощью альтернативного алгоритма коллективной адаптации, вдохновленного принципами коллективного поведения в адаптивных системах [2, 7].

Для эффективного управления движением группы БПЛА в строю ключевым аспектом является координация маневров. Современные технологии предоставляют широкие возможности для синхронизации действий отдельных аппаратов. Принципы распределённого контроля позволяют каждому БПЛА действовать как самостоятельный узел в объединённой сети, в то же время поддерживая общие цели и задачи группы. Основываясь на данных *GPS* и инерционных измерительных систем, БПЛА могут определять своё положение и корректировать траекторию в соответствии с изменениями в их окружении и действиями соседних аппаратов. Алгоритмы машинного обучения позволяют предвидеть возможные столкновения и оптимизировать маршрут, обеспечивая высокую точность и безопасность полётов. Так, каждый БПЛА способен мгновенно реагировать на команды и изменять своё положение в строю, сохраняя оптимальные интервалы и скорости.

Для «догоняющего» робота R_i в строю БПЛА адаптивными параметрами являются компоненты вектора $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$, которые служат для управления положением робота, ориентацией в абсолютной системе координат и линейной скоростью. При движении группы БПЛА в строю для каждого БПЛА известен вектор состояния:

$$W_i = (x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i), \quad (10)$$

где α_i – угол между вектором V_i и базовой линией,

h_i – величина вектора V_i .

Угол α_0 заранее определен для ведущего БПЛА, а D представляет собой расстояние между соседними БПЛА R_i и R_{i-1} в строю.

Для реализации механизма адаптации каждый вектор $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ связан с машинами адаптации (МА) – a^o_i, a^{xy}_i, a^V_i , которые моделируют поведение адаптивных элементов в среде. Каждая МА имеет две группы состояний: $C_1 = \{c_{1i} | i=1, 2, \dots, g\}$, соответствующие альтернативе A_1 (настроить параметр), и $C_2 = \{c_{2i} | i=1, 2, \dots, g\}$, соответствующие альтернативе A_2 (сохранить параметр).

Выходной алфавит МА $A = \{A_1, A_2\}$. Количество состояний в каждой группе определяется параметром g , представляющим глубину памяти. Входной алфавит $Q = \{+, -\}$ включает возможную обратную связь от среды: «вознаграждение» или «наказание». Сигнал «вознаграждение» или «наказание» подается в МА на основе состояния адаптивного элемента (векторного параметра V_i) в среде. Знак «+» обозначает переходы в МА из-за сигнала «вознаграждение», а знак «-» переходы из-за сигнала «наказание».

В основе управления движением группы БПЛА в строю лежат алгоритмы, позволяющие эффективно формировать и поддерживать формацию в различных условиях. Эти алгоритмы обеспечивают координированные действия БПЛА при изменении скорости, направлении движения и при маневрировании. Распространенным методом является использование виртуальных структур, где каждый БПЛА занимает заранее оговоренное место относительно ведущего аппарата или фиксированной точки в пространстве. Для адаптации к динамически изменяющейся обстановке применяются алгоритмы на основе искусственных нейронных сетей и методов машинного обучения, позволяющие БПЛА

самостоятельно корректировать полет в соответствии с текущими условиями и поведением остальных участников группы. Это обеспечивает высокую степень автономности и эффективность выполнения задач [2, 11, 13].

Работа следует следующим принципам: первоочередно стартует в одном из своих начальных состояний. На каждом этапе действия разворачиваются в четыре цикла. В первом цикле для каждого R_i фиксируются текущие значения векторных параметров V_i . Во втором цикле, если текущий параметр p_i отклоняется от запрограммированного значения, адаптационная машина a_i получает сигнал «наказание» (-) от окружающей среды; в противном случае она получает сигнал «вознаграждение» (+). В третьем цикле каждый МА a_i переходит в новое состояние на основе полученной реакции окружающей среды q_i . В четвертом цикле для каждого адаптивного элемента выполняется альтернативное действие в соответствии с выходами АМ. Если МА $a_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы C_{ij}^2 , параметр p_i остается неизменным. Если $a_i(t+1)$ находится в состоянии внутри группы C_{ij}^1 , то $|p_i(t+1)| = |p_i| - \delta_{\omega} |p_i|$. Процесс настройки параметров вектора $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ заключается в минимизации расхождения между текущими и запрограммированными значениями.

Исследование эффективности механизмов управления движением группы БПЛА в строю остается критически важным аспектом для обеспечения успешного выполнения сложных задач. Анализ различных управляющих алгоритмов, таких как роевые алгоритмы, стратегии, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении, позволяет оценить их способность к адаптации в динамичных условиях и эффективность в координации действий между единицами. Важную роль играет также изучение взаимодействия между БПЛА с точки зрения распределения задач и обмена информацией в реальном времени, что напрямую влияет на их способность к маневрированию и поддержанию оптимального строя при различных внешних воздействиях. Оптимизация этих механизмов способствует повышению не только надежности, но и безопасности полетов группы БПЛА [2, 11, 13–19].

Экспериментальные исследования. Повышение эффективности выполнения задач группой БПЛА в структурированном строю может быть достигнуто путем объединения и разработки методов, основанных на процедурах искусственного интеллекта. Основная цель экспериментального исследования – уточнение различных подходов и выявление оптимальной стратегии управления группой БПЛА с минимальной коммуникацией между ними. В данном исследовании были реализованы алгоритмы на основе эволюционной памяти и адаптивных автоматов, опирающиеся на принципы коллективного поведения адаптивных систем. Оператор определяет количество задач, параметров, их значения и возможность реализации автоматических режимов для минимизации необходимости ручных корректировок, стремясь к полной автоматизации группы БПЛА. Полетное задание состоит из набора абстрактных параметров высокого уровня:

- ◆ Тип строя.
- ◆ Тип задачи.
- ◆ Заданная область или точные координаты цели.
- ◆ Максимальная или точная высота.
- ◆ Базовые координаты (при необходимости).

Для моделирования движения группы БПЛА с сохранением определенного геометрического строя в ходе экспериментального исследования в основном использовались многороторные БПЛА, со следующими характеристиками:

- ◆ Количество двигателей – 4 двигателя.
- ◆ Максимальный габарит – не более 0,5 м.
- ◆ Масса – не более 2,5 кг.

Тип автопилота и базовое программное обеспечение – ArduPilot. (открытый исходный код на C++ по лицензии GNU General Public License v3.0).

Демонстрация проходила в робототехническом 3D симуляторе Gazebo – (открытый исходный код на C++ по лицензии Apache License 2.0).

При этом GNU GPL v3.0 и Apache License 2.0 – подходят под закрытое и коммерческое использование при сохранении открытости исходных частей кода и копировании лицензионного соглашения.

Для тестирования и отладки разработанного программного обеспечения для управления группой автономных БПЛА были заданы следующие условия полетного задания: Автоматический горизонтальный полет на постоянной высоте из заданной точки до цели с обходом препятствий и возвратом в исходную точку. Группа состоит из шести БПЛА. Расстояние между БПЛА в группе составляет от 1 метра до 50 метров. Цель располагается на расстоянии до 1 километра от исходной точки. Скорость полета может достигать 100 км/ч. Типы препятствий включают прямоугольные формы (имитирующие здания) или более округлые формы (имитирующие лес), рис. 6. Группа БПЛА в полете образует различные геометрические фигуры, например колонну или треугольник, рис. 7.

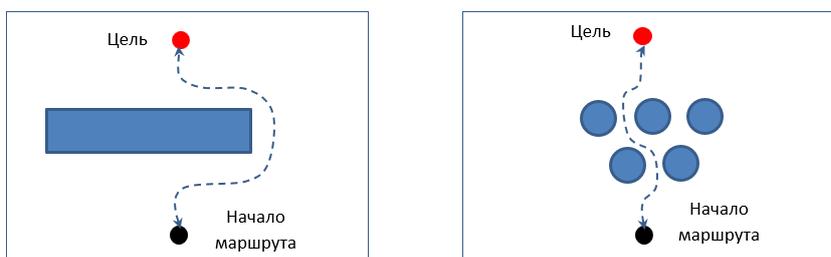


Рис. 6. Прямоугольное препятствие и группа круглых препятствий



Рис. 7. Построение группы БПЛА в колонну и треугольник

Основными показателями при выполнении движения группой БПЛА являются: Длина траектории (P_L), Показатель безопасности (S_m), Время выполнения задания (t_m), Коэффициент успешности миссии (M).

Сравнение значений этих показателей, полученных с использованием разработанного метода для системы управления группой БПЛА в строе на тестовых примерах, показало, что применение данного метода позволило повысить эффективность выполнения полетного задания на 20-24%. Общая оценка временной сложности разработанного подхода лежит в пределах $O(n^2) - O(n^3)$.

Заключение. Исследование сосредоточено на разработке алгоритмов для планирования траектории БПЛА во время поисково-спасательных операций и операций по ликвидации последствий стихийных бедствий. Были введены новые математические методы для моделирования движения дронов. Исследование детально рассматривает методы и алгоритмы управления движением группы БПЛА в различных формациях, включая колонные и линейные формации, а также во время маневров, например, таких как повороты. Стратегия управления включает в себя постоянное перепланирование параметров движения каждого робота в группе в каждый момент времени t , гарантируя, что каждый робот движется параллельно своим соседним коллегам. Основная цель управления роботами-ведомыми – минимизировать отклонения от желаемой траектории. На основе данного исследования разработаны новые правила управления этими параметрами, которые предлагают несколько преимуществ по сравнению с существующими методами. Эти

преимущества включают в себя полную децентрализацию управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов. Это позволяет точно регулировать положение и ориентацию роботов в абсолютной системе координат, а также линейную скорость каждого робота.

Была предложена конкретная структура маневрирования, которую роботы могут выполнять для исправления любых отклонений в своих параметрах. Эта структура маневрирования имеет решающее значение для поддержания желаемого строя и траектории, особенно в динамических средах. Управление реализовано с использованием алгоритма, основанного на альтернативных принципах коллективной адаптации, вдохновленных коллективным поведением адаптивных систем. Такой подход позволяет системе эффективно справляться с непредвиденными ситуациями, такими как отказ отдельных агентов, изменение количества агентов из-за поломки или внезапного добавления нового агента, а также наличие ошибок измерения и шума в определенных пределах. Адаптивная природа алгоритма позволяет группе БПЛА сохранять сплоченность и продолжать свою миссию даже в сложных и непредсказуемых условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бурдаков С.Ф., Сизов П.А.* Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2014. – № 6 (210). – С. 49-58.
2. *Котов Д.В., Лебедев О.Б.* Методы и алгоритмы управления движением группы беспилотных летательных аппаратов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов XII-й Международной научно-технической конференции. – Коломна: Универсум, 2024. – С. 236-248.
3. *Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11.
4. *Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Адаптивное управление передвижением коллектива мобильных роботов развернутых в линию // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов X-й Международной научно-технической конференции. – Смоленск: Универсум, 2021. – С. 238-246.
5. *Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В.* Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интеллектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 67-80.
6. *Костюков В.А., Медведев И.М., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х.* Численное моделирование роевого алгоритма планирования пути в двухмерной некартографированной среде // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 26-40.
7. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с.
8. *Кузнецов А.В.* Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 130-138.
9. *Муслимов Т.З., Мунасыпов Р.А.* Децентрализованное групповое нелинейное управление строем беспилотных летательных аппаратов самолетного типа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 1. – С. 43-50.
10. *Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Соловьев В.В., Финаев В.И.* Интеллектуальные технологии планирования перемещений подвижных объектов в трехмерных недетерминированных средах. – М.: Наука, 2017. – 232 с.
11. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 127-143.
12. *Пишихов В.Х. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пишихова. – М.: Физматлит, 2014.
13. *Гайдук А.Р., Мартынов О.В., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., Хамдан Н., Фархун А.* Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21 (8). – С. 470-479.
14. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011.

15. Иванов Д.Я. Распределение ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях на основе роевого взаимодействия // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2019. – № 78. – С. 23-45.
16. Пишихонов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. – 2015. – № 4. – С. 66-74.
17. Caro G.D., Ducatelle F. AntHocNet: An adaptive nature inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks // European Transactions on Telecommunications. – 2005. – No. 16 (5). – P. 443-455.
18. Chen S., Eshaghian M.M. A fast recursive mapping algorithm. Department of computer and information science. – New Jersey, USA: New Jersey, 2013. – P. 219-227.
19. Fatemeh K.P., Reza S.N. Comparing the Performance of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Algorithm for Mobile Robot Path Planning in the Dynamic Environments with Different Complexities // Journal of Academic and Applied Studies. – 2013. – Vol. 3 (2). – P. 29-44.
20. Hoefler T., Snir M. Generic Topology Mapping Strategies for Large-scale Parallel Architectures. – University of Illinois, 2011. – P. 75-85.
21. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. – Springer, Czech Republic, 2020. – Vol. 2. – P. 324-332.
22. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2.

REFERENCES

1. Burdakov S.F., Sizov P.A. Algoritmy upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota v zadache presledovaniya [Algorithms for controlling the motion of a mobile robot in a pursuit problem], *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Computer Science, Telecommunications and Management], 2014, No. 6 (210), pp. 49-58.
2. Kotov D.V., Lebedev O.B. Metody i algoritmy upravleniya dvizheniem gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Methods and algorithms for controlling the movement of a group of unmanned aerial vehicles], *Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov XII-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Collection of scientific papers of the XII International Scientific and Technical Conference]. Kolomna: Universum, 2024, pp. 236-248.
3. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Upravlenie dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v kolonne [Control of the movement of a group of mobile robots in a column], *Nauchno-prakticheskiy zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 7-11.
4. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Adaptivnoe upravlenie peredvizheniem kolektiva mobil'nykh robotov razvernutykh v liniyu [Adaptive control of the movement of a team of mobile robots deployed in a line], *Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov X-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Collection of scientific papers of the X-th International Scientific and Technical Conference]. Smolensk: Universum, 2021, pp. 238-246.
5. Guzik V.F., Pereverzev V.A., Pyavchenko A.O., Saprykin R.V. Printsipy postroyeniya ekstrapoliruyushchego mnogomernogo neyrosetevogo planirovshchika intellektual'noy sistemy pozitsionno-traektnornogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Principles of constructing an extrapolating multidimensional neural network planner for an intelligent system of position-trajectory control of moving objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 67-80.
6. Kostyukov V.A., Medvedev I.M., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh. Chislennoe modelirovanie roevogo algoritma planirovaniya puti v dvukhmernoy nekartografirovannoy srede [Numerical modeling of a swarm path planning algorithm in a two-dimensional unmapped environment], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2024, Vol. 16, No. 2, pp. 26-40.
7. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. 3rd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2021, 448 p.
8. Kuznetsov A.V. Model' dvizheniya i vzaimodeystviya sistemy intellektual'nykh agentov [Model of movement and interaction of a system of intelligent agents], *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [VSU Bulletin. Series: Systems analysis and information technology], 2018, No. 2, pp. 130-138.

9. *Muslimov T.Z., Munasyrov R.A.* Detsentralizovannoe gruppovoe nelineynoe upravlenie stroem bespilotnykh letatel'nykh apparatov samoletnogo tipa [Decentralized group nonlinear control of a formation of aircraft-type unmanned aerial vehicles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21, No. 1, pp. 43-50.
10. *Beloglazov D.A., Guzik V.F., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I.* Intellektual'nye tekhnologii planirovaniya peremeshcheniy podvizhnykh ob'ektov v trekhmernykh nedeterminirovannykh sredakh [Intelligent technologies for planning the movements of moving objects in three-dimensional non-deterministic environments]. Moscow: Nauka, 2017, 232 p.
11. *Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T.* Issledovanie evristicheskikh algoritmov v zadachakh prokladki i optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami [Study of heuristic algorithms in problems of route planning and optimization in an environment with obstacles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 127-143.
12. *Pshikhopov V.Kh. i dr.* Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob'ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014.
13. *Gayduk A.R., Mart'yanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., KHamdan N., Farkhud A.* Neyrosetevaya sistema upravleniya gruppoy robotov v neopredelennoy dvumernoy srede [Neural network control system for a group of robots in an uncertain two-dimensional environment], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, No. 21 (8), pp. 470-479.
14. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011.
15. *Ivanov D.Ya.* Raspreделение roley v koalitsiyakh robotov pri ogranichennykh kommunikatsiyakh na osnove roevogo vzaimodeystviya [Distribution of roles in robot coalitions with limited communications based on swarm interaction], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Control of large systems: Collection of works], 2019, No. 78, pp. 23-45.
16. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V.* Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traektornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami [Algorithms of adaptive position-trajectory control systems for moving objects], *Problemy upravleniya* [Problems of control], 2015, No. 4, pp. 66-74.
17. *Caro G.D., Ducatelle F.* AntHocNet: An adaptive nature inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks, *European Transactions on Telecommunications*, 2005, No. 16 (5), pp. 443-455.
18. *Chen S., Eshaghian M.M.* A fast recursive mapping algorithm. Department of computer and information science. New Jersey, USA: New Jersey, 2013, pp. 219-227.
19. *Fatemeh K.P., Reza S.N.* Comparing the Performance of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Algorithm for Mobile Robot Path Planning in the Dynamic Environments with Different Complexities, *Journal of Academic and Applied Studies*, 2013, Vol. 3 (2), pp. 29-44.
20. *Hoefler T., Snir M.* Generic Topology Mapping Strategies for Large-scale Parallel Architectures. University of Illinois, 2011, pp. 75-85.
21. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory, *Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms*. Springer, Czech Republic, 2020, Vol. 2, pp. 324-332.
22. *Makarenko S.I.* Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Robotic complexes for military purposes: current state and development prospects], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems], 2016, No. 2.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; д.т.н.; профессор.

Лебедев Олег Борисович – МИРЭА – Российский технологический университет; г. Москва, Россия; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Бесхмельнов Максим Игоревич – e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; тел.: 89252622177; кафедра информатики; ассистент.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia phone: +79282897933; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79085135512; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

Beskhmelnov Maxim Igorevich – e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; phone: +79252622177; the Department of Computer Science; assistant.