

12. Minowa A., Toda M. Stability analyses on a towed underwater vehicle motion control system using a high-gain observer, *Adv Control Appl.*, 2021, Vol. 3 (3), 3:e77.
13. Freidlin M.L., Wentzell A.D. Random Perturbations of Dynamical Systems. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Springer-Verlag, 2012, 460 p.
14. Dubovik S.A. Asimptoticheskaya semantizatsiya dannykh v sistemakh upravleniya [Asymptotic Semantization of Data in Control Systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2019, Issue 20 (8), pp. 461-471.
15. Kabanov A.A., Dubovik S.A. Methods of modeling and probabilistic analysis of large deviations of dynamic systems, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, Vol. 1661 (1), pp. 012044.
16. Schmid M., Crassidis J.L. A New Stochastic Control Paradigm Employing Large Deviations Theory, *AIAA Scitech 2019 Forum*. San Diego, California, Jan, 2019, pp. 1-29.
17. Dubovik S.A., Kabanov A.A. Funktsional'no ustoychivye sistemy upravleniya: asimptoticheskie metody sinteza [Functionally stable control systems: asymptotic methods of synthesis]. Moscow: INFRA-M, 2019, 249 p.
18. Do K., Pan, J. Control of Ships and Underwater Vehicles: Design for Underactuated and Non-linear Marine Systems. London: Springer-Verlag, 2009, 401 p.
19. Liceaga-Castro E., van der Molen G.M. Submarine H/sup  $\infty$ / depth control under wave disturbances, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 1995, Vol. 3 (3), pp. 338-346.
20. Shen C. Motion Control of Autonomous Underwater Vehicles Using Advanced Model Predictive Control Strategy. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of PhD. Victoria, BC, Canada: University of Victoria, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Крамарь.

**Дубовик Сергей Андреевич** – Севастопольский государственный университет; e-mail: duboviksa@gmail.com; г. Севастополь, Россия; тел.: +79787622582; д.т.н.; профессор.

**Кабанов Алексей Александрович** – Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79787622582; Севастопольский государственный университет; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Dubovik Sergey Andreevich** – Sevastopol State University; e-mail: duboviksa@gmail.com; Sevastopol, Russia; phone: +79787927340; dr. of eng. sc; professor.

**Kabanov Aleksei Alexandrovich** – Federal Research Center "Informatics and control" of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79787622582; Sevastopol State University; head of the department; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.52:004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-170-184

**И.В. Бычков, А.В. Давыдов, М.Ю. Кензин, Н.В. Нагул, А.А. Толстихин**

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ\***

*Рассматриваются различные задачи планирования стратегий и управления группой мобильных роботов в сложных динамических условиях при неполной информации о внешней среде. Представлены подходы к решению задач составления эффективного рабочего расписания в условиях непостоянного состава действующей группы, поиска источника нестационарного поля концентрации, супервизорного управления дискретно-событийными системами. Для задачи составления верхнеуровневого расписания групповой работы разработана оригинальная*

\* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект №121032400051-9.

математическая модель, сформулированная в терминах задач планирования рабочих смен, а также проблемно-ориентированная модификация эволюционных алгоритмов со специализированным набором эвристик для ее эффективного решения. Поиск и мониторинг источника нестационарного поля концентрации осуществляется с помощью децентрализованной мультиагентной стратегии управления, объединяющей элементы бионических и градиентных подходов, а также метода генерации искусственных потенциальных полей. Рассмотренная стратегия управления обладает низкой вычислительной сложностью, высокой вариативностью по отношению к типам обследуемых полей и легко масштабируется для управления любым доступным количеством мобильных роботов. Последнее имеет особое значение, в частности, при рассмотрении задачи параллельного и независимого мониторинга нескольких источников. Для решения различных задач теории супервизорного управления дискретно-событийными системами, используемыми на различных уровнях иерархической системы управления робототехническими комплексами, предложено использовать средства логического вывода, а именно, автоматическое доказательство теорем в исчислении позитивно-образованных формул. Особенности исчисления позволяют эффективно решать сложные задачи управления динамическими системами, а также осуществлять обработку и контроль событий на основе данных об окружающей среде в режиме реального времени в процессе логического вывода. Основанный на позитивно-образованных формулах подход позволяет исследовать свойства дискретно-событийных систем в автоматной форме, синтезировать и моделировать конечные автоматы для построения и реализации монолитных и модульных супервизоров. Предложена общая схема, объединяющая рассмотренные подходы к управлению группой мобильных роботов на различных уровнях и масштабах времени в рамках единой иерархической системы управления.

Децентрализованные стратегии управления; позитивно-образованная формула; логический вывод; дискретно-событийная система; супервизорное управление; обследование поля концентрации; задача составления расписания; эволюционные алгоритмы.

**I.V. Bychkov, A.V. Davydov, M.Yu. Kenzin, N.V. Nagul, A.A. Tolstikhin**

#### **INTELLIGENT STRATEGY PLANNING AND CONTROL OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION**

*Different problems of strategy planning and control of a mobile robot group under complex dynamic conditions with incomplete information about the external environment are considered. Approaches to solving problems of effective work scheduling under conditions of inconstant active group composition, searching for the source of a nonstationary concentration field, supervisory control of discrete-event systems are presented. An original mathematical model formulated in terms of work-shift scheduling problems and a problem-oriented modification of evolutionary algorithms with a specialized set of heuristics for its efficient solution are developed for the problem of scheduling top-level group work. Searching and monitoring the source of the nonstationary concentration field is carried out using a decentralized multi-agent control strategy that combines elements of bionic and gradient approaches, as well as a method for generating artificial potential fields. The considered control strategy has low computational complexity, high variability with respect to the types of fields surveyed, and is easily scalable to control any available number of mobile robots. The latter is of special importance, in particular when considering the problem of parallel and independent monitoring of multiple sources. It is proposed to use the means of logical inference, namely automatic theorem proving in the calculus of positively constructed formulas, to solve various problems of the supervised control theory of discrete-event systems used at different levels of the robotic complex hierarchical control system. Features of the calculus allows solving complex problems of dynamic systems control, as well as processing and controlling events based on environmental data in real time in the process of logical inference efficiently. The approach based on positively constructed formulas allows studying the properties of automata-based discrete-event systems, as well as to synthesize and model finite automata for the construction and realization of monolithic and modular supervisors. A general scheme combining the considered approaches for controlling a group of mobile robots at different levels and time scales within a single hierarchical control system is proposed.*

*Decentralized control strategy; concentration field survey; scheduling problem; evolutionary algorithm; discrete-event system; supervisory control; positively constructed formula; logical inference.*

**Введение.** Робототехнические комплексы на базе нескольких автономных мобильных роботов (АМР) все чаще находят применение в различных сферах человеческой деятельности, включая разведывательные, спасательные и поисково-исследовательские миссии. Однако, сложности выработки совместных стратегий и неспособность оперативно вырабатывать согласованные решения не позволяют рассматривать их в качестве удобного и гибкого инструмента для выполнения широкого спектра работ. В статье рассматриваются проблемы планирования и интеллектуального принятия решений группой из нескольких АМР в сложных заранее неизвестных средах: задача планирования эффективного рабочего расписания в условиях непостоянного состава действующей группы АМР, задача обследования поля концентрации с целью определения его параметров, а также оригинальный подход к анализу и синтезу управляемых логических дискретно-событийных систем (ДСС), применяемых на нижних уровнях реализации процесса принятия совместных решений.

В общем случае, целью робототехнических операций является посещение группой роботов набора ключевых локаций с целью проведения там работ в соответствии с заданными требованиями [1]. Сопутствующую задачу распределения заданий и ресурсов принято формулировать в терминах задач групповой маршрутизации. В реальных условиях такая модель будет включать сложный набор взаимосвязанных пространственно-временных и технических ограничений, что делает невозможным ее решение в явном виде и за разумное время [2]. В этом контексте, наиболее “проблемными” принято считать энергетические (топливные) и коммуникационные требования.

Большинство представленных в литературе подходов, как правило, инкорпорирует эти ограничения сразу в многоатрибутную модель задачи маршрутизации, что приводит к значительным потерям в скорости решения, а также к необходимости разработки дополнительных проблемно-ориентированных схем оптимизации [3]. Более того, согласно [4], лишь малое количество работ рассматривает эти ограничения в рамках моделей с функционально и параметрически разнородными группами роботов. В качестве альтернативного подхода можно назвать различные гарантирующие методы, обеспечивающие строгое выполнение данных ограничений на основе геометрических или графо-теоретических моделей (построение цепочек роботов, удержание формаций и др.) [5]. Основным недостатком таких методов является их низкая эффективность в нестандартных ситуациях, а также тот факт, что они заметно ограничивают групповое движение из-за жесткого требования связности всей сети роботов [6].

В то же время, на практике чаще всего применяется децентрализованный подход, когда АМР принимают большинство решений самостоятельно на основе правил и в зависимости от своего текущего состояния, а распределение общих ресурсов осуществляется путем локальных переговоров [7]. Основным недостатком подхода заключается в том, что он обращает внимание только на состояние конкретного робота и игнорирует как текущее, так и прогнозируемое состояние всей группы, жертвуя эффективностью работы в пользу отказоустойчивости, общей надежности и простоты. Таким образом, сохраняется потребность в разработке гибкого и универсального интеллектуального подхода, лишенного ключевых недостатков перечисленных методов, который обеспечивал бы эффективную организацию и координацию работы разнородной группы АМР в динамических условиях [8].

Другой важной задачей, связанной с использованием робототехнических комплексов, является обследование нестационарных полей концентрации [9]. Данный термин описывает широкий спектр объектов, явлений и процессов, частными примерами которых могут служить термическое поле, образованное одним или

несколькими подводными термальными источниками, поле солёности или распространение некоторого биологического вида по ограниченной области. Выделяют три основные постановки задачи обследования подобных полей: поиск источника [10], восстановление заданной линии уровня поля [11] и его картографирование [12]. Несмотря на то, что данные постановки имеют свои фундаментальные и прикладные приложения, задача локализации и мониторинга источников поля концентрации обладает в настоящее время наибольшей актуальностью. Одним из основных подходов к решению данной задачи является галсовый поиск [13], обладающий рядом недостатков, главным из которых является низкая результативность при обследовании нестационарных полей. Это приводит к необходимости разработки новых мультиагентных стратегий поиска источников полей концентрации, например, основывающихся на градиентных [14] или биологических [15] подходах, а также их гибридах.

Удобным формализмом, позволяющим описывать изменение состояния системы вследствие наступления некоторых событий, является формализм дискретно-событийных систем [16], в частности, логических ДСС, когда время наступления событий может не учитываться. Для ограничения функционирования логических ДСС в настоящее время активно применяется теория супервизорного управления (ТСУ) [17], позволяющая управлять поведением системы в заданных рамках. Для интеллектуализации процесса решения задач ТСУ предлагается подход, основанный на автоматическом доказательстве теорем (АДТ) в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ). АДТ является активно развивающейся областью искусственного интеллекта, основанной на методах математической логики, что делает его наиболее формализованным направлением дедуктивного построения и автоматизированного вывода. Исчисление ПОФ введено в [18, 19] и разработано как полный метод для АДТ с функциональными символами в [20] и [21]. Его основные приложения лежат в области управления динамическими и интеллектуальными системами, и включают ориентацию телескопа [19], групповое управление рулями высоты, преследование целей [22], достижимость набора целей [23]. Благодаря своим особенностям, исчисление ПОФ позволяет совмещать автоматический поиск логических выводов со специальными эвристиками, настраиваемыми для решаемой задачи.

Общая структура предлагаемого подхода к управлению группой представлена на рис. 1. Планировщик верхнего уровня отвечает за составление расписания рабочих периодов с учетом энергетических ограничений и требований к регулярности связи. На среднем уровне решаются задачи построения маршрутов и траекторий для подгрупп роботов, действующих на каждом рабочем периоде при выполнении текущих задач. Сюда могут входить как задачи распределения целей и заданий между индивидуальными АМР [24], так и задачи планирования путей и траекторного управления для связанных коалиций из нескольких роботов [25], например, при движении формациями, обследовании полей концентрации и др. Наконец, на нижнем уровне располагается обработчик событий, отвечающий, среди прочего, за переключение режимов работы всей группы и индивидуальных роботов в зависимости от текущих условий рабочей среды. В последующих разделах кратко представлены методы решения задач на каждом из трех уровней.

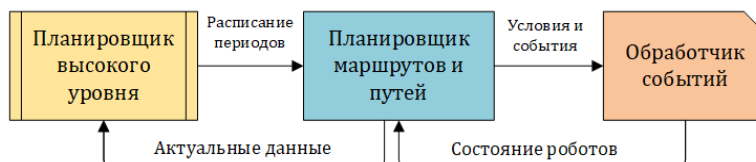


Рис. 1. Схема системы группового управления АМР в динамических условиях

**Планирование высокоуровневых групповых стратегий.** Планирование высокоуровневых групповых стратегий предлагается базировать на двух основных факторах, объединяющих наиболее реалистичные комплексные модели группового управления – коммуникационных и энергетических ограничениях. Это определяет основную концепцию предложенного подхода: разбить миссию на последовательность рабочих периодов, на каждом из которых будет действовать группировка с постоянным составом, а все изменения состава будут осуществляться в рамках запланированных групповых сборов (рандеву) в конце каждого такого периода. Проведение сборов с требуемой частотой позволит роботам регулярно обновлять знания о среде и состоянии группы путем обмена накопленной информацией.

В этом случае, планирование миссии будет заключаться в том, чтобы найти эффективную стратегию в форме расписания групповых рандеву (рис. 2). При этом, каждому рандеву должно быть поставлено в соответствие одно или более событий двух различных типов: сбор группы для коммуникационных нужд и/или сбор для обновления состава группы (отправка части роботов на подзарядку или возвращение подзарядившихся роботов обратно в группу).

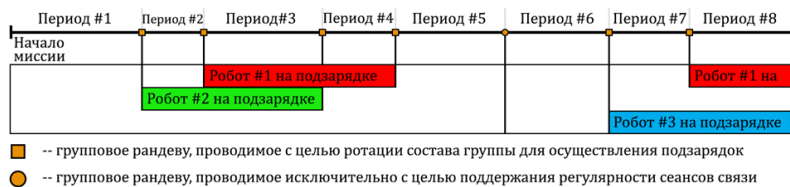


Рис. 2. Схема организации выполнения миссии на основе групповых рандеву

Последовательность рандеву с соответствующим набором событий должны быть сформированы таким образом, чтобы не только гарантировать требуемую регулярность сеансов связи и своевременную подзарядку всех роботов в группе, но и обеспечить максимальную работоспособность всех группировок роботов, действующих на протяжении миссии, в контексте их функциональных возможностей. Это позволит исключить вопросы связи и пополнения энергии из задачи планирования индивидуальных задач роботов на каждом рабочем периоде. Такая задача планирования является в некотором роде обратной вариацией задачи составления расписания рабочих смен (shift scheduling problem) [26]. В отличие от классической постановки, где требуется сформировать разнородную команду рабочих и построить для них расписание, гарантированно покрывающее заданную потребность в рабочей силе при наименьших затратах, в нашем случае, наоборот, команда роботов задана и фиксирована, а составление расписания смен (рабочих периодов) требуется в контексте максимизации качества конечного покрытия и удовлетворения потребностей самих роботов (рис. 3).

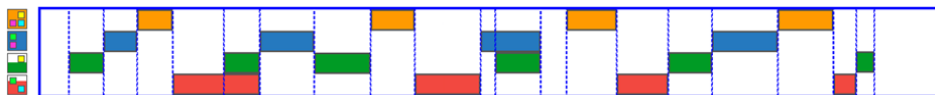


Рис. 3. Пример рабочего расписания для группы из четырех разнородных роботов

Таким образом, можно сформировать следующую постановку задачи. Пусть для выполнения миссии длительностью  $T$  (горизонт планирования) дана группа из  $n$  АМР, различающихся по крейсерской скорости  $v_i$ , емкости батарей  $b_i$  и набору установленного исследовательского оборудования (сонары, камеры и др.)

$\{u_i^{(j)}\} \in \{0,1\}, j = 1, \dots, l, i = 1, \dots, n$ . Подзарядка батарей АМР производится на специальной станции, оснащенной  $w$  зарядными доками и расположенной на расстоянии  $d$  от области группового сбора, со средней скоростью  $c$ .

Обозначим за  $Q_{ij} = (t_{ij1}, t_{ij2})$   $j$ -ый период подзарядки  $i$ -го робота как временной отрезок, на котором АМР покидает группу, перемещается к станции зарядки, пополняет запас энергии батарей и возвращается обратно. Следуя той же логике, интервал между двумя последовательными периодами зарядки АМР назовем его рабочей сменой. Ставится задача поиска наиболее эффективного расписания рабочих смен для всей группы действующих роботов на период  $T$ :

$$S = \{Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{21}, Q_{12}, \dots, Q_{n1}, Q_{n2}, \dots, Q_{nq}\},$$

где эффективность расписания определяется следующим набором критериев [27]:

- 1) своевременная подзарядка для всех роботов в группе;
- 2) максимальное покрытие рабочих потребностей на протяжении миссии;
- 3) равномерное распределение рабочей силы группы во времени;
- 4) минимальное количество необязательных (излишних) рандеву, поскольку каждое из них отвлекает роботов от выполнения текущих целей.

В условиях необходимости планирования и корректировки расписаний в режиме, близком к реальному времени, наиболее применимыми представляются различные метаэвристические методы. Несмотря на большое разнообразие существующих подходов к составлению расписаний, эволюционные алгоритмы остаются одним из наиболее часто используемых методов на протяжении многих лет. В среднем, они работают быстрее и масштабируются лучше, чем любые другие метаэвристические подходы. Кроме того, их структура позволяет легко встраивать дополнительные специализированные эвристики и алгоритмические схемы для учета особенностей конкретных задач из прикладной области.

Таким образом, предлагается использование гибридной модификации эволюционных алгоритмов с набором проблемно-ориентированных эвристик и генетических операторов, а также встроенным блоком локального поиска. Эффективность подхода подтверждена серией вычислительных экспериментов на двух наборах тестовых задач: первый включает постановки для групп малого размера до с априори известным значением оптимума, а второй набор содержит задачи большой размерности с высокой степенью разнородности АМР. Подход демонстрирует хорошую масштабируемость, он способен генерировать эффективные расписания для параметрически и функционально разнообразных групп из нескольких десятков роботов за несколько минут фоновых вычислений.

**Мультиагентная стратегия управления мобильными агентами при решении задачи обследования поля концентрации.** Под полем концентрации (рис. 4) будем понимать объект, явление или процесс, описываемый, в общем виде, некоторой функцией  $f(t, q): T \times Q \rightarrow R, Q \subseteq R^p, p \geq 2, T = [0, \infty)$ . Источниками поля концентрации называются такие точки  $q_j^e(t) \in L$ , которые являются локальными экстремумами  $f(t, q)$ . В случае нестационарного поля, источники могут изменять как абсолютное значение функции поля, так и свое местоположение. Соответственно, необходимо ввести следующее ограничение, без которого их локализация и мониторинг невозможны:

$$\forall t_1, t_2 \in T, q^e \in L: \|q^e(t_1) - q^e(t_2)\| < |v(t_2 - t_1)|,$$

где  $v$  – максимальная скорость движения агентов.

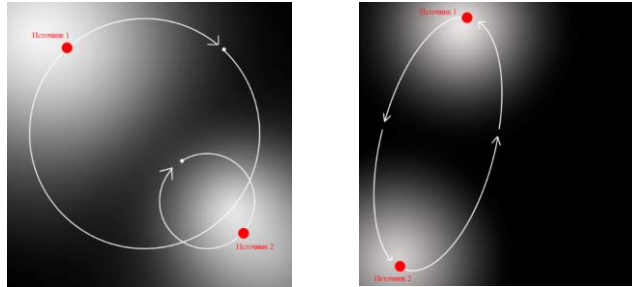


Рис. 4. Примеры моделей нестационарных полей концентрации (стрелками обозначены траектории движения источников)

Пусть доступные мобильные агенты являются интеграторами второго порядка, динамика которых описывается следующей системой уравнений:

$$\dot{q}_i = v_i, \quad \dot{v}_i = u_i, \quad i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, n\},$$

где  $q_i \in R^p$ ,  $v_i \in R^p$  и  $u_i \in R^p$  – соответственно, положение, скорость и управление  $i$ -го агента. Агенты способны производить замеры величины поля (функции  $f(t, q)$ ), но ограничены при этом только своими текущими координатами. Также предположим, что ограничения на дальность установки стабильного канала связи между агентами не накладываются, что позволяет им беспрепятственно обмениваться данными о своих текущих координатах и проведенных замерах. Таким образом, задачу локализации и мониторинга источников можно свести к подбору такого  $u$ , при котором критерий качества обследования принимал минимальное значение. В данной работе рассматривается критерий  $M(t) = \max_{j \in L} \min_{i \in \Gamma} \|q_i(t) - q_j^e(t)\|$ , где  $n_e$  – количество источников. В данном случае критерий минимален только в том случае, когда в малой окрестности каждого источника находится хотя бы один агент.

Для решения поставленной задачи предложен подход, названный стратегией управления кластеризованной популяцией. Предполагается, что множество агентов  $\Gamma$  разбито на  $m$  ( $m \geq n_e$ ) непересекающихся кластеров

$$\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\} \forall j, k: j \neq k \rightarrow \tau_j \cap \tau_k = \emptyset.$$

Пусть разбиение  $\tau$  сбалансировано, т. е.  $\forall j, k: |\tau_j| \approx |\tau_k| \geq 3$ , а состав кластеров не изменяется в процессе решения задачи. Агенты, принадлежащие разным кластерам, находятся между собой в конкурентных отношениях. Более правильным с точки зрения биологической природы предложенной стратегии управления является термин «аменсализм», т.е. одни агенты оказывают негативное эффект на других, не испытывая со стороны последних ни положительного, ни негативного влияния. Таким образом, группа, находящаяся ближе других к источнику, отталкивает другие кластеры, не позволяя им приближаться.

Управление каждого агента строится как взвешенная сумма трех сил: кооперирующей  $F_i^c$ , градиентной  $F_i^g$  и сегрегирующей  $F_i^s$ :

$$u_i = c_1 F_i^c + c_2 F_i^g + c_3 F_i^s,$$

где  $c_1, c_2, c_3 \in R^+$  – некоторые положительные коэффициенты. В основе построения сил лежит применение метода искусственных потенциальных полей [28], при этом, каждая из них отвечает за свою часть решения задачи.

Градиентная сила направляет робота вдоль рассчитанной оценки градиента к ожидаемому экстремальному значению поля и определяется как

$$F_i^g = \sum_{j \in \tau_k} F_{ij}^g = \sum_{j \in \tau_k} \left( \frac{q_{ij}(s_j - s_i)}{\|q_{ij}\|} \right), \quad i \in \tau_k, \quad (1)$$

где  $\|q_{ij}\|$  – евклидова норма вектора  $q_{ij} = q_i - q_j$ ,  $s$  – текущий замер величины поля концентрации в текущих координатах агента.

Согласно (1), направление поиска выбирается путем сравнения измеренных значений поля, полученных роботом и его соседями. Таким образом, если  $s_i$  меньше, чем  $s_j$ , то соответствующая составляющая силы  $F_i^g$  направлена в сторону робота  $j$ . Что характерно, компоненты  $F_{ij}^g$  и  $F_{ji}^g$  градиентной силы равны. Благодаря этому достигается самоорганизация движения группы, при которой каждый робот движется в том же направлении и с той же скоростью, что и его соседи, имея лишь незначительные отклонения, которые гасятся кооперирующей силой и на достаточно большом отрезке времени стремятся к нулю.

С другой стороны, кооперирующая сила обеспечивает реализацию агентами стаинового поведения, в частности, избегание столкновений и центрирование стаи. Было предложено определять данную силу следующим образом:

$$F_i^c = - \sum_{j \in \tau_k} (\nabla_{q_i} U_{ij}^c(\|q_{ij}\|)), \quad i \in \tau_k, \quad (2)$$

где  $U_{ij}^c(\|q_{ij}\|)$  – искусственная потенциальная функция, которая определяет взаимодействие агентов,  $\nabla_{q_i}$  обозначает градиент относительно компонент вектора  $q_i$ . В качестве потенциальной функции  $U_{ij}^c: R^+ \rightarrow R^+$  предлагается функция

$$U_{ij}^c(\|q_{ij}\|) = \alpha \left( \frac{1}{2} (\|q_{ij}\| - d_{ij}^A)^2 + \beta \ln \ln \|q_{ij}\| + \beta \frac{d_{ij}^A}{\|q_{ij}\|} \right), \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta \in R^+$  – некоторые управляющие параметры;  $d_{ij}^A > 0$  – определяет желаемое расстояние между агентами. Функция (3) построена на основе потенциальной функции, предложенной в [28], путем добавления параметра  $\beta$ , позволяющего варьировать размер области, на которой эта функция является строго выпуклой. Таким образом, под воздействием данной силы агенты одного кластера стремятся образовать формацию, которая в случае минимального необходимого количества агентов имеет вид правильного треугольника со сторонами длиной  $d_{ij}^A$ .

Наконец, сегрегирующая сила отвечает за вышеописанное взаимодействие между различными кластерами и задается следующим образом:

$$F_i^s = - \sum_{j \notin \tau_k} (\nabla_{q_i} U_{ij}^s(\|q_{ij}\|)), \quad i \in \tau_k. \quad (4)$$

$$U_{ij}^s(\|q_{ij}\|) = \begin{cases} 0, & \text{при } (\|q_{ij}\| > d_{ij}^B) \vee (s_i > s_j), \\ \alpha \left( \frac{1}{2} (\|q_{ij}\| - d_{ij}^B)^2 + \beta \ln \|q_{ij}\| + \beta \frac{d_{ij}^B}{\|q_{ij}\|} \right), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где  $d_{ij}^B \gg d_{ij}^A$  – минимальное желаемое расстояние между кластерами. Сила  $F_i^s$  строится по тем же принципам, что и кооперирующая, за исключением двух факторов:

1)  $F_i^s$  прикладывается только к агентам кластера с меньшими значениями величины поля, что побуждает их искать источник, который еще не находится под наблюдением какого-либо кластера агентов.

2)  $F_i^s$  выталкивает агентов за пределы радиуса  $d_{ij}^B$ , но не заставляет кластеры выдерживать между собой расстояние  $d_{ij}^B$ .

Для оценки качества работы предложенной стратегии управления произведено несколько серий модельных испытаний, различающихся, в том числе, начальными условиями и моделями обследуемых полей концентрации. В большинстве



проведенных тестов группе агентов удавалось достигнуть поставленной задачи за относительно малое время (150-500 секунд модельного времени). При этом, после локализации всех источников амплитуда отклонения критерия при дальнейшем мониторинге не превышала 15 модельных метров, что является допустимой погрешностью, учитывая размер обследуемых областей в  $1000 \times 1000$  метров.

#### Логический подход к управлению дискретно-событийными системами.

На нижнем уровне предлагаемого подхода к групповому управлению АМР для обработки событий, возникающих в рабочей среде или внутри самой группы роботов, предлагается использовать логические дискретно-событийные системы (ДСС). ДСС может быть представлена [16] конечным автоматом  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ , где  $\Sigma$  – множество состояний  $q$ ;  $\Sigma$  – множество событий;  $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$  – функция переходов;  $q_0 \in Q$  – начальное состояние;  $Q_m \subset Q$  – множество маркированных состояний. Множество  $L(G) = \{w: w \in \Sigma^* \text{ и } \delta(w, q_0) \text{ определено}\}$  представляет собой язык, генерируемый  $G$ , а множество  $L_m(G) = \{w: w \in L(G) \text{ и } \delta(w, q_0) \in Q_m\}$  – язык, маркированный  $G$ . Маркированный язык используется для описания завершенных системой задач, например, миссии группы АМР, или заданной цепочки переключений режимов функционирования отдельного робота.

Теория супервизорного управления (ТСУ) [17] предполагает, что из множества событий выделено множество  $\Sigma_c \subseteq \Sigma$  управляемых событий, и  $\Sigma_{uc} = \Sigma \setminus \Sigma_c$  – неуправляемые события,  $\Sigma_c \cap \Sigma_{uc} = \emptyset$ . Супервизор как средство управления ДСС способен препятствовать возникновению управляемых событий с целью ограничить поведение системы в некоторых заданных рамках, определяемых регулярным языком, например,  $K$ . Например, при использовании робототехнических комплексов природа таких ограничений вытекает из внешней обстановки или изменении структуры группы роботов как взаимодействующих агентов. Обозначим  $L(J/G)$  формальный язык, генерируемый ДСС  $G$  в присутствии супервизора  $J$ . Пусть  $\bar{K}$  обозначает множество всех префиксов слов из  $K$ . Основная задача супервизорного управления (*basic supervisory control problem, BSCP*) заключается в построении такого супервизора, что  $L(J/G) \subseteq K$ . Известно, что условием существования решения этой задачи является управляемость  $K$ . Язык  $K$  управляем (относительно  $L(G)$  и  $\Sigma_{uc}$ ) если  $\bar{K}\Sigma_{uc} \cap L(G) \subseteq \bar{K}$ . Таким образом, для построения управления необходимо проводить проверку управляемости спецификации  $K$  как желаемых ограничений на ДСС.

В качестве примера рассмотрим ДСС, которая используется для решения задачи управления роботом в неизвестной среде [29]. Предполагается, что робот должен следовать по заданному пути, покидая его, чтобы избежать столкновения с встречающимися препятствиями, и возвращаясь на него после выполнения маневров уклонения (рис. 5). ДСС имеет следующие состояния, соответствующие режимам работы робота: PF (следование по заданному пути), DOL (обход обнаруженного препятствия с левой стороны), DOR (обход обнаруженного препятствия с правой стороны), NRP (поиск заданного пути), SOL (поиск препятствия слева), SOR (поиск препятствия справа). Состояние PF маркировано, чтобы показать, что робот всегда должен возвращаться на заданный путь. Событиями ДСС являются: NOR – 'справа нет препятствий', OF – 'обнаружено препятствие далеко', RPR – 'робот вышел на заданный путь', и наборы событий  $AL_i, AR_i, i = \overline{1, 5}$ , обозначающие переход в режимы обхода препятствий из других режимов. Некоторые из событий  $AL_i, AR_i$  являются композиционными, т.е. определяются несколькими атомарными событиями, запускаемыми условиями окружающей среды. Например,  $AL_1$ , так как переход в режим обхода препятствия слева от него является результатом события  $eOLNF$  с одним из событий  $eORN, eORNf$  или  $eON$ , где  $eOLNF, eORN, eORNf, eON$  объясняются в табл. 1. Пусть спецификацию задает автомат  $H$ , генерирующий язык спецификации  $K$  (рис. 6). Требуемая стратегия поведения АНПА может быть выражена

следующим образом: стараться не попасть туда, откуда невозможно выбраться, используя стандартные алгоритмы уклонения от препятствий; не менять выбранное направление уклонения от препятствия, пока АНПА не вернется к исходному пути (правило левой или правой руки); перестраивать путь только в случае крайней необходимости [29]. События RPR, NOR, NOD, OF неуправляемы.

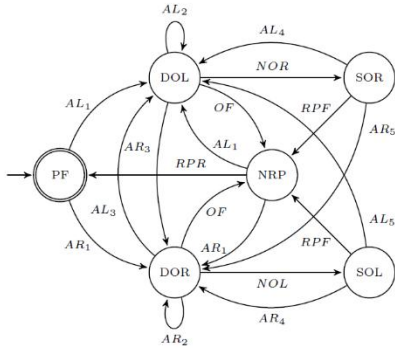


Рис. 5. ДСС  $G$

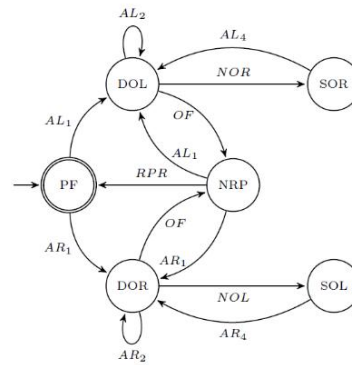


Рис. 6. Автомат  $H$ , задающий спецификацию  $K$  на функционирование  $G$

Для анализа и синтеза супервизорного управления в рамках ТСУ предлагается использовать автоматическое доказательство теорем (АДТ) в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ) [19]. Язык ПОФ представляет собой первопорядковый логический язык, состоящий из формул, построенных из атомарных с помощью связок  $\vee$ ,  $\&$ , кванторов  $\forall$  и  $\exists$ , констант true и false. В общем виде ПОФ состоит из базы фактов и так называемых вопросов к базе, ответами на которые являются подстановки известных фактов вместо переменных вопроса. Консеквент вопроса, на который нашелся ответ, попадает в базу с соответствующей подстановкой. В результате построения вывода ПОФ как некоторой теоремы, в базе накапливаются факты, представляющие собой, например, план действий или, как в случае с ДСС, последовательность событий, произошедших в системе. Множество таких последовательностей образует формальный язык, описывающий функционирование системы. Для АТР на основе ПОФ-исчисления был разработан пружер Boofrost, который специализируется на выводе ПОФ без неограниченных переменных. Разработаны эффективные алгоритмы поиска логического вывода для этого класса формул. Исходный код проекта, реализованный на языке Rust, можно найти на странице GitHub (<https://github.com/snigavik/boofrost>). Основанный на ПОФ подход к работе с ДСС позволяет, среди прочего, обеспечить проверку управляемости заданного языка спецификации, построение наибольшего управляемого подязыка неуправляемого языка, реализацию монолитных и модульных супервизоров для систем, состоящих из  $m$  подсистем и  $n$  спецификаций. Например, для рассмотренного примера на рис. 5-6 пружер Boofrost проверяет управляемость  $K$  за 22 шага. С помощью логического вывода в исчислении ПОФ на основе автоматов  $G$  и  $H$ , генерирующих  $L(G)$  и  $K$ , может быть построен наибольший управляемый подязык  $K^{\uparrow C}$  спецификации  $K$  во время процедуры проверки ее управляемости [30]. В случае, если  $K^{\uparrow C} \neq \emptyset$ , конечный автомат  $S$ , распознающий  $K^{\uparrow C}$ , может быть выбран в качестве супервизора  $J$  для  $G$ , являясь решением BSCP, причем  $L(J/G) = L(S||G)$ , что гарантирует максимально возможную реализацию ограничений на функционирование ДСС  $G$ , заданных спецификацией  $K$ . Здесь  $S||G$  обозначает параллельную композицию автоматов  $S$  и  $G$ .



**Заключение.** Управление робототехническим комплексом, включающим в себя несколько взаимодействующих АМР, является сложной и комплексной задачей, в особенности, в условиях неполноты информации и высокой динамики внешних условий. Предложенный в данной работе трехуровневый подход к построению системы группового управления позволяет избежать ряда недостатков, характерных для существующих решений данной задачи. Его важной особенностью является низкая зависимость верхнего и нижнего уровней от конкретики предметной области, что позволяет использовать их для решения широкого спектра практических задач. В то же время, основная стратегия управления, нацеленная на непосредственное решение поставленной задачи, концентрируется на среднем уровне — планировщике маршрутов и путей. Таким образом, достигается высокая универсальность и вариативность применения подхода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N.* Self-adaptive coordination for fuel-constrained robot teams with periodic and aperiodic communications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2022. – Vol. 236 (17). – P. 9730-9742.
2. *Dutia D.* Multi-robot task allocation and scheduling with spatio-temporal and energy constraints // Master's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2019.
3. *Koc C., Bektaş T., Jabali O et al.* Thirty years of heterogeneous vehicle routing // European Journal of Operational Research. – 2016. – Vol. 249 (1). – P. 1-21.
4. *Asghari M., Mirzapour Al-e-hashem S.M.J.* Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review // International Journal of Production Economics. – 2021. – Vol. 231: 107899.
5. *Stephan J., Fink J., Kumar V. et al.* Concurrent control of mobility and communication in multirobot systems // IEEE Transactions on Robotics. – 2017. – Vol. 33(5). – P. 1248-1254.
6. *Kantaros Y., Guo M., Zavlanos M.* Temporal logic task planning and intermittent connectivity control of mobile robot networks // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2019. – Vol. 64 (10). – P. 4105-4120.
7. *Kannan B., Marmol V., Bourne J. et al.* The Autonomous Recharging Problem: Formulation and a market-based solution // Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2013. – P. 3503-3510.
8. *Selmair M., Hauers S., Gustafsson-Ende L.* Scheduling charging operations of autonomous AGVs in automotive in-house logistics // Proceedings of the Simulation in Production and Logistics 2019, Chemnitz, Germany. – 2019.
9. *Hwang J., Bose N., Fan S.* AUV Adaptive Sampling Methods // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-30.
10. *Pang S., Farrell J.A.* Chemical plume source localization // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B. – 2006. – Vol. 36. – P. 1068-1080.
11. *Zhang Y., Godin M.A. et al.* Using an autonomous underwater vehicle to track a coastal upwelling front // IEEE J. Ocean. Eng. – 2012. – Vol. 37. – P. 338-347.
12. *Zhang Y., Bellingham J.G. et al.* Autonomous Four-Dimensional Mapping and Tracking of a Coastal Upwelling Front by an Autonomous Underwater Vehicle // J. Field Robot. – 2016. – Vol. 33. – P. 67-81.
13. *Киселев Л.В., Медведев А.В.* Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – № 1 (11). – С. 24-31.
14. *Camilli R., Bingham B. et al.* Integrating in-situ chemical sampling with AUV control systems // In Proceedings of the Oceans 2004, Kobe, Japan, 9–12 November 2004. – 2004. – P. 101-109.
15. *Hayes A.T., Martinoli A., Goodman R.M.* Distributed odor source localization // IEEE Sens. J. – 2002. – Vol. 2. – P. 260-271.
16. *Cassandras C.G., Lafortune S.* Introduction to Discrete Event Systems. – 3rd ed. – Cham, Switzerland: Springer, 2021. – XXVI. – 804 p.
17. *Wonham W.M., Cai K.* Supervisory Control of Discrete-Event Systems. – NY: Springer, 2019. – 487 p.

18. *Vassilyev S.N.* Machine synthesis of mathematical theorems // *The Journal of Logic Programming*. – 1990. – Vol. 9 (2-3). – P. 235-266.
19. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федунов Е.А., Федосов Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит, 2000. – 352 с.
20. *Davydov A, Larionov A., Cherkashin E.* On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2011. – Vol. 45 (7). – P. 402-407.
21. *Larionov A., Davydov A., Cherkashin E.* The calculus of positively constructed formulas, its features, strategies and implementation // *Proc. of International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija 2013*. – 2013. – P. 1023-1028.
22. *Vassilyev S., Galyaev A.* Logical-optimization approach to pursuit problems for a group of targets // *Dokl. Math.* – 2017. – Vol. 95. – P. 299-304.
23. *Vassilyev S., Ponomarev G.* Automation methods for logical derivation and their application in the control of dynamic and intelligent systems // *Proc. Steklov Inst. Math.* – 2012. – Vol. 276. – P. 161-179.
24. *Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж.* Метод решения задачи распределения целей в группе БЛА сетевидной системой управления // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2016. – № 12 (185). – С. 55-70.
25. *Пишхопов В.Х., Медведев М.Ю.* Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строим БЛА мультикоптерного типа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
26. *Van den Bergh J., Beliën J. et al.* Personnel scheduling: A literature review // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – Vol. 226. – P. 367-385.
27. *Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N.* A Hierarchical Approach to Intelligent Mission Planning for Heterogeneous Fleets of Autonomous Underwater Vehicles // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10 (11):1639.
28. *Santos V.G.* Spatial segregative behaviors in robotic swarms using differential potentials // *Swarm Intelligence*. – 2020. – Vol. 14. – P. 259-284.
29. *Ulyanov S., Bychkov I., Maksimkin N.* Event-Based Path-Planning and Path-Following in Unknown Environments for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 21. – P. 7894.
30. *Davydov A., Larionov A., Nagul N.* The construction of controllable sublanguage of specification for DES via PCFs based inference // *Proc. of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2020, Irkutsk, Russia, July 6-7, 2020: CEUR-WS Proceedings*. – 2020. – Vol. 2638. – P. 68-78.
31. *Давыдов А.В., Нагул Н.В., Ларионов А.А.* Об обработке событий в формальном логическом подходе к управлению дискретно-событийными системами // *Вычислительные технологии*. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 89-100.

## REFERENCES

1. *Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N.* Self-adaptive coordination for fuel-constrained robot teams with periodic and aperiodic communications, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, Vol. 236 (17), pp. 9730-9742.
2. *Dutia D.* Multi-robot task allocation and scheduling with spatio-temporal and energy constraints, *Master's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2019*.
3. *Koc S., Bektas T., Jabali O et al.* Thirty years of heterogeneous vehicle routing, *European Journal of Operational Research*, 2016, Vol. 249 (1), pp. 1-21.
4. *Asghari M., Mirzapour Al-e-hashem S.M.J.* Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review, *International Journal of Production Economics*, 2021, Vol. 231: 107899.
5. *Stephan J., Fink J., Kumar V. et al.* Concurrent control of mobility and communication in multirobot systems, *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, Vol. 33 (5), pp. 1248-1254.
6. *Kantaros Y., Guo M., Zavlanos M.* Temporal logic task planning and intermittent connectivity control of mobile robot networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, Vol. 64 (10), pp. 4105-4120.

7. Kannan B., Marmol V., Bourne J. et al. The Autonomous Recharging Problem: Formulation and a market-based solution, *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 3503-3510.
8. Selmair M., Hauers S., Gustafsson-Ende L. Scheduling charging operations of autonomous AGVs in automotive in-house logistics, *Proceedings of the Simulation in Production and Logistics 2019, Chemnitz, Germany*, 2019.
9. Hwang J., Bose N., Fan S. AUV Adaptive Sampling Methods, *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9, pp. 1-30.
10. Pang S., Farrell J.A. Chemical plume source localization, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B*, 2006, Vol. 36, pp. 1068-1080.
11. Zhang Y., Godin M.A. et al. Using an autonomous underwater vehicle to track a coastal upwelling front, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2012, Vol. 37, pp. 338-347.
12. Zhang Y., Bellingham J.G. et al. Autonomous Four-Dimensional Mapping and Tracking of a Coastal Upwelling Front by an Autonomous Underwater Vehicle, *J. Field Robot*, 2016, Vol. 33, pp. 67-81.
13. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Modeli dinamiki i algoritmy upravleniya dvizheniem avtonomnogo podvodnogo robota pri traektornom obsledovanii anomal'nykh fizicheskikh poley [Dynamic models and algorithms for controlling the movement of an autonomous underwater robot during trajectory examination of anomalous physical fields], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2011, No. 1 (11), pp. 24-31.
14. Camilli R., Bingham B. et al. Integrating in-situ chemical sampling with AUV control systems, *In Proceedings of the Oceans 2004, Kobe, Japan, 9–12 November 2004*, 2004, pp. 101-109.
15. Hayes A.T., Martinoli A., Goodman R.M. Distributed odor source localization, *IEEE Sens. J.*, 2002, Vol. 2, pp. 260-271.
16. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to Discrete Event Systems. 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021, XXVI, 804 p.
17. Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. NY: Springer, 2019. – 487 p.
18. Vassilyev S.N. Machine synthesis of mathematical theorems, *The Journal of Logic Programming*, 1990, Vol. 9 (2-3), pp. 235-266.
19. Vasil'ev S.N., Zherlov A.K., Fedunov E.A., Fedosov B.E. Intellectnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami [Intelligent control of dynamic systems]. Moscow: Fizmatlit, 2000, 352 p.
20. Davydov A., Larionov A., Cherkashin E. On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2011, Vol. 45 (7), pp. 402-407.
21. Larionov A., Davydov A., Cherkashin E. The calculus of positively constructed formulas, its features, strategies and implementation, *Proc. of International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija 2013*, 2013, pp. 1023-1028.
22. Vassilyev S., Galyaev A. Logical-optimization approach to pursuit problems for a group of targets, *Dokl. Math.*, 2017, Vol. 95, pp. 299-304.
23. Vassilyev S., Ponomarev G. Automation methods for logical derivation and their application in the control of dynamic and intelligent systems, *Proc. Steklov Inst. Math*, 2012, Vol. 276, pp. 161-179.
24. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Usachev L.Zh. Metod resheniya zadachi raspredeleniya tseley v gruppe BLA setetsentricheskoy sistemoy upravleniya [A method for solving the problem of distributing goals in a group of UAVS by a network-centric control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 12 (185), pp. 55-70.
25. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sravnitel'nyy analiz tsentralizovannogo i detsentralizovannogo algoritmov dvizheniya stroem BLA mul'tikopternogo tipa [Comparative analysis of centralized and decentralized algorithms for the movement of a multicopter-type UAV system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 121-139.
26. Van den Bergh J., Beliën J. et al. Personnel scheduling: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 2013, Vol. 226, pp. 367-385.
27. Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N. A Hierarchical Approach to Intelligent Mission Planning for Heterogeneous Fleets of Autonomous Underwater Vehicles, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10 (11):1639.
28. Santos V.G. Spatial segregative behaviors in robotic swarms using differential potentials, *Swarm Intelligence*, 2020, Vol. 14, pp. 259-284.

29. Ulyanov S., Bychkov I., Maksimkin N. Event-Based Path-Planning and Path-Following in Unknown Environments for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles, *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10, No. 21, pp. 7894.
30. Davydov A., Larionov A., Nagul N. The construction of controllable sublanguage of specification for DES via PCFs based inference, *Proc. of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2020, Irkutsk, Russia, July 6-7, 2020: CEUR-WS Proceedings*, 2020, Vol. 2638, pp. 68-78.
31. Davydov A.V., Nagul N.V., Larionov A.A. Ob obrabotke sobytiy v fopmal'nom logicheskom podxode k upravleniyu dickpetno-cobytiynymi cistemami [On event processing in a formal logical approach to the management of discrete event systems], *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*, 2022, Vol. 27, No. 5, pp. 89-100.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.Б. Барахнин.

**Бычков Игорь Вячеславович** – Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения РАН; e-mail: idstu@icc.ru; г. Иркутск, Россия; тел.: 83952427100; академик; директор.

**Давыдов Артем Васильевич** – e-mail: artem@icc.ru; тел.: 83952453085; научный сотрудник.

**Кензин Максим Юрьевич** – e-mail: gorthauers@gmail.com; тел.: 83952453085; научный сотрудник.

**Нагул Надежда Владимировна** – e-mail: sapling@icc.ru; тел.: 83952453085; к.ф.-м.н.; с.н.с.

**Толстикхин Антон Артемович** – e-mail: madstayler93@gmail.com; тел.: 83952453085; м.н.с.

**Bychkov Igor Vyacheslavovich** – Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: idstu@icc.ru; Irkutsk, Russia; phone: +73952427100; academician; director.

**Davydov Artem Vasilievich** – e-mail: artem@icc.ru; phone: +73952453085; researcher.

**Kenzin Maxim Yurievich** – e-mail: gorthauers@gmail.com; phone: +73952453085; researcher.

**Nagul Nadezhda Vladimirovna** – e-mail: sapling@icc.ru; phone: +73952453085; senior researcher.

**Tolstikhin Anton Artemovich** – e-mail: madstayler93@gmail.com; phone: +73952453085; junior researcher.

УДК 614.842.47

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-184-197

**И.В. Образцов, В.П. Шкодырев**

### **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ (ОБЗОР)\***

*Информации о пожароопасных ситуациях, циркулирующей в контурах перечисленных систем и уровня технологий искусственного интеллекта, вполне достаточно, чтобы разработать научно-методический аппарат обнаружения пожароопасных ситуаций в корабельных помещениях, определения места их возникновения и факторов пожара, прогнозирования развития пожароопасной ситуации и разработать комплекс технологических решений с применением искусственного интеллекта для получения обоснованных рекомендаций по локализации и тушению пожаров на кораблях ВМФ. Это позволит значительно сократить время*

\* Работа выполняется в рамках научно-исследовательской работы «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей», включенная в научный план ВС РФ на 2023 год и плановый 2024 и 2025 года.