Чуев Кирил Витальевич – e-mail: Kirill.chuew@gmail.com; тел.: +79805288097; инженер.

Скитова Валерия Михайловна – e-mail: Petrenko_lera1995@mail.ru; тел. +79606256006; инженер.

Voloshkin Artem Aleksandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79524349277; research engineer.

Rybak Larisa Alexandrovna – e-mail: rlbgtu@gmail.com; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor; director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Malyshev Dmitry Ivanovich – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; phone: +79507134397; junior researcher.

Chuev Kirill Vitalievich – e-mail: Kirill.chuew@gmail.com; phone: +79805288097; engineer.

Skitova Valeria Mikhailovna – e-mail: Petrenko_lera1995@mail.ru; phone: +79606256006; research engineer.

УДК 681.51, 62-503.54 DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-146-154

С.Ю. Курочкин, А.А. Тачков, Е.И. Борисенков

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрена задача параметрического синтеза системы управления согласованным движением группы мобильных роботов (МР) строем по заданному опорному маршруту. Архитектура системы управления рассматриваемых МР соответствует принципам блочно-модульного построения на основе унифицированных программных компонентов, совместное функционирование которых реализует связующее программное обеспечение, например, Robot Operating System. Стохастическая природа условий применения МР, случайные ошибки в информационно-измерительной системе и использование упрощенных моделей движения МР приводят к возникновению в системе управления МР ошибок, влияющих на скорость его движения. Влияние условий функционирования на качество работы системы связи и системы управления МР отражают вероятностно-временные характеристики (ВВХ): время доставки сообщений в сети и интенсивность остановок МР. Проводимое имитационное моделирование позволяет учесть влияние указанных ВВХ и динамики МР с учетом системы управления приводным уровнем на качество выполнения группой МР поставленной задачи. Согласованное движение группы МР строем по заданному маршруту обеспечивается методом децентрализованной виртуальной структуры. Качество выполнения групповой задачи оценивается двумя показателями: отклонение формы строя от заданной и время выполнения поставленной задачи. Приведен пример вычисления оптимального параметра метода виртуальной структуры, при котором для заданных ВВХ будет обеспечиваться прохождение группой из трех МР опорного маршрута за наименьшее время при минимальных отклонениях текущей формы строя от требуемой. Оптимизационная задача решена при помощи метода золотого сечения, статистическое имитационное моделирование выполнено с использованием пакетов MATLAB Simulink и Parallel Computing Toolbox. Выполнено имитационное моделирование движения однородной группы из трех МР, которой ставится задача движения по маршруту в строю формы «шеренга» с интервалом 5 метров с рекомендуемой скоростью 3 м/с. Качество работы системы автономного управления движением МР обеспечивает безаварийное движение робота с интенсивностью остановок 1,2 остановки в минуту. Система связи и обмена информацией с полносвязной топологией обеспечивает обмен информацией между мобильными роботами с частотой не более 10 Гц, запаздывания в канале связи варьируются в интервале от 0,1 до 0,5 с.

Мобильный робот; группа роботов; групповое управление; имитационное моделирование; система автоматического управления движением.

S.Yu. Kurochkin, A.A. Tachkov, E.I. Borisenkov

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A MULTI-ROBOT FORMATION CONTROLLER USING THE STATISTICAL SIMULATION MODELLING

The article proposes a parametric synthesis method of a multi-robot formation controller. The movement of the formation is carried out along the route set by a human operator. Robot's control system corresponds to the modular-assembly principle based on common software, the joint functioning of which is implemented by middleware, for example, Robot Operating System. Errors in the mobile robot control system are caused by: probabilistic application conditions, data-measuring system random errors, using simplified dynamic model within the development process. The influence of the operating conditions on the communication system and the mobile robot autonomous driving system performance reflects by the probabilistic-temporal characteristics: communications and information system delay and the intensity of mobile robot's stops. A method of statistical simulation modeling allowed taking into account the probabilistic-temporal characteristics of the mobile robot communication and the autonomous driving systems, as well as mobile robot dynamics. The coordinated movement of the multi-robot formation along a given path is provided by the method of a decentralized virtual structure. The task execution quality is evaluated by two indicators: the deviation of the form from the given one and the task-performance time. As an example, we consider the task of the movement of three robots along the route in a row-shaped formation, in which, for a given probabilistic-temporal characteristics, a multi-robot formation accomplish the given task in the shortest time with minimal deviations of formation shape from the given one. Optimization solution allowed us to determine the optimal parameter of the formation control system. The optimization problem was solved using the golden section method, statistical simulation was performed using MATLAB Simulink and Parallel Computing Toolbox packages. A simulation of a homogeneous group of three mobile robots movement was performed for the task of driving along the route in the row-shaped formation with an interval of 5 m and a desired speed of 3 m/s. The quality of the autonomous driving system ensures accident-free motion with an intensity of 1,2 stops per minute. The communications and information system with fully connected network topology provides communications flow between mobile robots with a frequency of no more than 10 Hz. Communications system delay vary in the range from 0.1 to 0.5 s.

Formation control; virtual structure approach; mobile robot; unmanned autonomous vehicle; optimization problem.

Введение. Массовое применение мобильных роботов (МР), объединенных в группы, является актуальным направлением развития робототехники. Область применения групп мобильных роботов охватывает широкий диапазон прикладных задач как гражданского [1–2], так и специального назначения [3–5]. Одной из приоритетных научных задач групповой робототехники на сегодняшний день является задача управления согласованным движением мобильных роботов с сохранением ими заданной геометрии строя, например, управление движением автоколонн беспилотных автомобилей по дорогам общего пользования (англ. Cooperative Adaptive Cruise Control) [1, 6, 7], переноска крупногабаритных объектов группами мобильных роботов [8], поиск различных объектов [9]. Как отмечается в [10], важным условием функционирования системы группового управления является надежная работа системы связи и обмена информацией. Другим важным фактором, влияющим на качество совместного движения группы МР, согласно [11], является эффективность работы системы автономного управления движением (САУД) МР.

Архитектура системы управления рассматриваемых в данной работе МР соответствует принципам блочно-модульного построения на основе унифицированных программных компонентов, совместное функционирование которых реализует связующее программное обеспечение, использующее технологию «издатель-подписчик», например, Robot Operating System (ROS) [12]. Система управления МР, структура которой изображена на рис. 1, включает компоненты: аппаратного

уровня (драйверы приводного уровня и сенсорных устройств), программно-алгоритмические модули САУД, системы логического управления групповыми действиями и обмена информацией с оператором и другими МР. САУД МР содержит взаимосвязанные модули, выполняющие следующие функции: 1) решение навигационной задачи; 2) построение локальной карты; 3) обеспечение безопасности при автономном движении; 4) планирование и выбор траектории; 5) обработка сенсорной информации; 6) траекторное управление.

Рис. 1. Структура системы управления мобильным роботом

Стохастическая природа условий применения МР, случайные ошибки в информационно-измерительной системе и использование упрощенных моделей движения МР приводят к возникновению в САУД МР ошибок, снижающих скорость его движения [13]. Влияние условий функционирования на качество работы системы связи и САУД отражают вероятностно-временные характеристики (ВВХ) указанных систем. Основной ВВХ системы связи является время доставки сообщений в сети, САУД – интенсивность остановок МР.

В настоящей статье рассматривается метод параметрического синтеза системы управления согласованным движением группы МР с сохранением заданной геометрии строя, учитывающий ВВХ САУД и системы связи и обмена информацией, а также динамику МР. Влияние ВВХ данных систем на качество движения группы мобильных роботов исследуется при помощи статистического имитационного моделирования.

Описание имитационной модели. Рассматривается задача движения группы МР по опорному маршруту с поддержанием заданной формы строя. Задача формируется оператором [14] и формально представляется кортежем $Task =< \mathbf{W}, V_{max}, \bar{V}, \mathbf{F} >$, где $\mathbf{W} = \left(\mathbf{tr}_j\right)_{j=1}^{m}$ – опорный маршрут движения, описываемый последовательностью точек $\mathbf{tr}_j = \left(x_j, y_j, \theta_j\right)$, где $\left(x_j, y_j\right) \in \mathbb{R}^2$ – j-я точка, $\theta_j \in S^1$– требуемая ориентация в точке $\left(x_j, y_j\right)$, V_{max} – максимальная скорость движения МР, $\bar{V}$ – желаемое значение средней скорости движения МР, $\mathbf{F} = (\mathbf{fm}_i)_{i=1}^{N}$ – описание формы строя при помощи последовательности точек, заданных в полярных координатах: $\mathbf{fm}_i = (D_i, \Phi_i)$, где $D_i \in \mathbb{R}$ – радиальная координата желаемого положения МР в строю, $\Phi_i \in S$ – угловая координата, где i – порядковый номер МР в группе, N – количество МР, входящих в группу.

Движение группы МР, выполняющих сформированную оператором задачу, исследуется с использованием разработанной имитационной модели, структура которой приведена на рис. 2 [15]. Рассматриваемая модель включает следующие блоки: имитационная модель САУД и приводного уровня МР [16], модуль управ-

ления движением МР в группе, имитационная модель системы связи и обмена информацией. Также в модель входит блок подготовки исходных данных, который имитирует постановку задачи оператором.

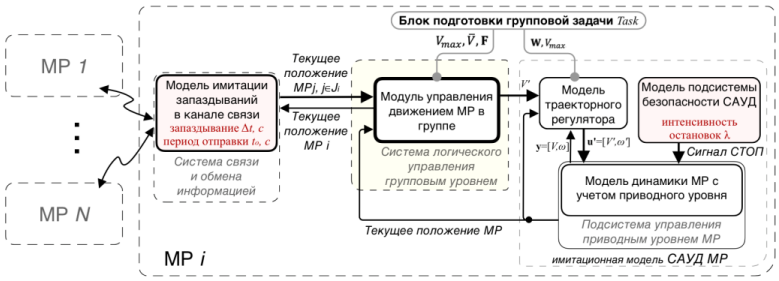

Рис. 2. Структура модели группы МР

Динамика МР с учетом приводного уровня задается при помощи двух линеаризованных моделей с запаздыванием, описывающих прямолинейное движение и поворот МР [16]. При моделировании движения МР принимается допущение, что робот движется без проскальзывания. ВВХ САУД, интенсивность остановок МР, учитывается в блоке подсистемы безопасности САУД, в состав которого входит функция генерации сигналов остановки мобильного робота (требуемая линейная скорость МР равна нулю). Сигналы об остановке МР рассматриваются как последовательность однородных событий, наступающих одно за другим в случайные промежутки времени – ординарный поток без последствия. Интенсивность потока λ задает количество остановок в единицу времени. Время τ, через которое наступит событие, определяется по следующей формуле:

$$\tau = -1/\lambda \cdot ln(r),$$

где r – случайное число, равномерно распределенное в интервале от 0 до 1, получаемое при помощи генератора псевдослучайных чисел. Величина интенсивности потока λ определяется экспериментально по результатам обработки данных, записанных в процессе движения одного МР по маршруту.

Запаздывание, которое вносит система связи, рассматривается как случайно изменяющаяся величина, равномерно распределенная в интервале от минимально возможного запаздывания t_{min} до максимально возможного t_{max}. Интервал выбирается по результатам обработки данных или на основе экспертной оценки. В рамках проводимого статистического имитационного моделирования частота обмена информацией рассматривается как постоянная величина. Также принимается допущение, что в процессе движения топология связи между МР не изменяется.

Параметрический синтез метода группового управления согласованным движением группы мобильных роботов. В качестве метода группового управления, обеспечивающего согласованное движение группы МР в строю заданной формы, выбран метод децентрализованной виртуальной структуры, подробно описанный в публикациях [17] и [18]. Получив задачу от оператора, группа МР, находящаяся на исходном рубеже (рис. 3), начинает движение по маршруту, обмениваясь друг с другом информацией о своем текущем местоположении. Благодаря информационному обмену, каждый МР вычисляет предполагаемое положение полюса группы, желаемое положение МР корректируется правилом консенсуса [19].

Алгоритм достижения консенсуса для робота под номером i, получающего координаты от роботов, номера которых перечислены в векторе $\mathbf{J}_i$, записывается следующим образом:

$$\mathbf{e}_i = \frac{1}{|\mathbf{J}_i|}\sum_{j\in\mathbf{J}_i}\gamma_r(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j),$$

где $\mathbf{e}_i$ – ошибка, которую необходимо компенсировать *i*-му роботу, чтобы достичь общепринятого значения, $\mathbf{P}_i$ – координаты предполагаемого полюса группы для *i*-го робота, $\mathbf{P}_j$ – координаты предполагаемого полюса группы для МР под номером *j*, где $j \in \mathbf{J}_i$, $\gamma_r > 0$ – константа, использующаяся для настройки алгоритма. Координата предполагаемого полюса $\mathbf{P}_j(x_{pj}, y_{pj})$ вычисляется роботом под номером *i*, исходя из полученного положения робота под номером *j* и известной форме строя **F**.

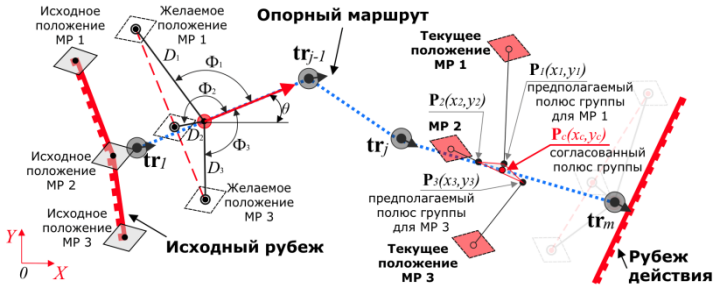

Рис. 3. Пример описания формы строя и постановки задачи группе МР

Считается, что группа роботов достигла консенсуса, сформировала строй, в том случае, если оценки местоположения полюса строя, выполненные каждым роботом, достигают одного общепринятого значения $\mathbf{P}_i \to \mathbf{P}_j \to \mathbf{P}_c$ (рис. 3).

Качество выполнения поставленной группе МР задачи оценивается при помощи двух показателей: отклонение формы строя от заданной в процессе движения и время выполнения поставленной задачи. Для оценки отклонения от заданной формы вычисляется евклидово расстояние d_{io} между центром строя $\mathbf{P}_i \in \mathbb{R}$ для *i*-го МР и геометрическим центром (пространственной медианой) $\mathbf{O} = (x_O, y_O)$:

$$d_{io} = \|\mathbf{P}_i - \mathbf{O}\|_2.$$

Геометрический центр **O** вычисляется по формуле:

$$\mathbf{O} = \arg\min_{\mathbf{Y}_e\in\mathbb{R}} \sum_{i=1}^{N}\|\mathbf{P}_i - \mathbf{Y}_e\|_2,$$

где $\mathbf{Y}_e$ – точка, для которой сумма всех евклидовых расстояний до $\mathbf{P}_i$ минимальна, *N* – количество роботов.

Изменение среднего значения расстояний $d_o = {}^1\!/_N \sum_{i=1}^{N} d_{io}$ для *N* МР, входящих в группу, позволяет оценить искажение формы строя в процессе движения по маршруту. Результирующее значение искажения формы строя записывается следующим образом:

$$d_{\text{рез}} = \frac{1}{N_{\text{изм}}}\sum_{k=1}^{N_{\text{изм}}} d_{ok},$$

где $N_{\text{изм}}$ – количество измерений, выполненных в процессе выполнения задачи.

Второй показатель качества – время выполнения поставленной задачи, оценивается, как разница между моментом времени $t_{\text{с}}$, в который группа начала движения по маршруту, и момент времени $t_{\text{ф}}$ – время достижения последней точки маршрута последним роботом.

Задача параметрического синтеза заключается в выборе такого настраиваемого параметра γ_r метода виртуальной структуры, при котором для заданных ВВХ САУД и системы связи будет обеспечиваться прохождение опорного маршрута **W**

за наименьшее время $t_{\text{дв}}$ при минимальных отклонениях $d_{\text{рез}}$ текущей формы строя от требуемой **F**. Рассматриваемая оптимизационная задача является двухкритериальной и заключается в минимизации двух целевых функций: $f_t(\gamma_r)$ – целевая функция по критерию $t_{\text{дв}}$; $f_d(\gamma_r)$ – целевая функция по критерию $d_{\text{рез}}$. Для того, чтобы найти компромиссное решение, сведем оптимизационную задачу к однокритериальной. Для нормализации значений целевых функций введены коэффициенты ζ_1 и ζ_2, значения которых определяются экспертом. Таким образом, целевая функция приобретает вид:

$$f(\gamma_r) = \zeta_1 \cdot f_t(\gamma_r) + \zeta_2 \cdot f_d(\gamma_r).$$

Задача глобальной минимизации записывается следующим образом:

$$\min_{\gamma_r \in \mathbb{R}} f(\gamma_r) = f(\gamma_r{}^*) = f^*,$$

где $f(\gamma_r)$ – скалярная целевая функция; $f(\gamma_r{}^*) = f^*$– искомый глобальный минимум; γ_r – варьируемый параметр в пространстве $\mathbb{R}$.

Результаты имитационного моделирования. В качестве примера рассмотрим однородную группу из трех мобильных роботов, которой ставится задача движения по маршруту в строю формы «шеренга» с интервалом 5 метров с рекомендуемой скоростью $\bar{V} = 3$ м/с. Максимальная скорость роботов составляет $V_{max} = 5$ м/с, качество работы САУД робота обеспечивает безаварийное движение робота с интенсивностью остановок $\lambda = 1{,}2$ остановки в минуту. Система связи и обмена информацией с полносвязной топологией обеспечивает обмен информацией между мобильными роботами с частотой не более 10 Гц, запаздывания в канале связи варьируются в интервале от 0,1 до 0,5 с.

Для тестирования методики параметрического синтеза и решения задачи оптимизации выбран метод золотого сечения, являющийся одним из наиболее простых в реализации и в то же время эффективным среди методов одномерной оптимизации [20]. На каждой итерации вычисление целевых функций $f_t(\gamma_r)$ и $f_d(\gamma_r)$ выполняется при помощи статистического имитационного моделирования:

$$f_t(\gamma_r) = \frac{1}{N_{\text{сим}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{сим}}} f_{tj}(\gamma_r);$$

$$f_d(\gamma_r) = \frac{1}{N_{\text{сим}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{сим}}} f_{dj}(\gamma_r),$$

где $N_{\text{сим}}$ – количество симуляций, проводимых на одной итерации. Например, для доверительного интервала 95% и уровня значимости 0,05 требуется выполнение не менее 384 симуляций.

Имитационное моделирование проводилось с использованием пакетов MATLAB Simulink и Parallel Computing Toolbox. Условием остановки симуляции является сигнал о том, что все роботы доехали до рубежа действия, максимально возможное время моделирования составляет 600 секунд. Для параметра γ_r, изменяющегося от 0 до 0,5, выполнены оценки значений целевой функции (рис. 4).

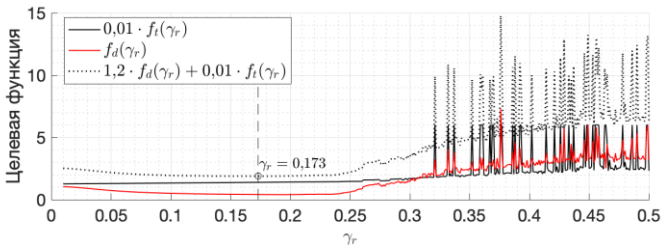

Рис. 4. Оценки значений целевой функции

В результате проведенного вычислительного эксперимента было получено оптимальное значение искомого параметра $\gamma_r = 0{,}173$ для коэффициентов $\zeta_1 = 1{,}2$ и $\zeta_2 = 0{,}01$. На рис. 5 представлены результаты моделирования движения группы из трех МР: изображен опорный маршрут, траектории МР, которые соединены черными линиями, имитирующими текущую форму строя. В процессе движения группы МР промоделирована случайная остановка МР под номером 2, вызвавшая деформацию строя.

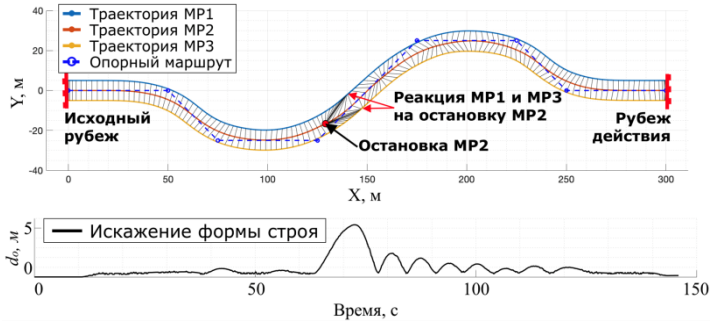

Рис. 5. Результат моделирования движения группы МР по маршруту в строю «Шеренга»

Можно отметить, что предложенный метод параметрического синтеза с использованием статистического имитационного моделирования позволил подобрать оптимальные настройки метода управления групповым согласованным движением МР для заданных ВВХ системы связи и САУД МР.

Выводы. Применение статистического имитационного моделирования позволило оценить качество работы системы группового управления согласованным движением МР по опорному маршруту с поддержанием заданной формы строя. В качестве вероятностно-временных характеристик системы связи и САУД выбраны, соответственно, величина запаздывания и интенсивность остановок МР в процессе автономного движения. Оптимальное значение метода управления групповым согласованным движением МР группового управления определено, благодаря решению однопараметрической двухкритериальной задачи оптимизации с использованием метода золотого сечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alonso-Mora J. et al.* Reactive mission and motion planning with deadlock resolution avoiding dynamic obstacles // Autonomous Robots. – 2018. – Vol. 42, No. 4. – P. 801-824.
2. *Girard A.R. et al.* A control architecture for integrated cooperative cruise control and collision warning systems // Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228). – IEEE, 2001. – Vol. 2. – P. 1491-1496.
3. *Young S., Kott A.* Control of small robot squads in complex adversarial environments: A review. – 2009.
4. *Назарова А.В., Мэйсинь Ч.* Организация спасательных команд роботов для ликвидации последствий стихийных бедствий // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – №. 1. – С. 21-28.
5. *Власов К.С., Тачков А.А., Данилов М.М.* Тактика группового применения наземных робототехнических комплексов при тушении пожаров в резервуарных парках // Пожарная безопасность. – 2020. – №. 2. – С. 28-35.
6. *Van Arem B., Van Driel C.J.G., Visser R.* The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. – 2006. – Vol. 7, No. 4. – P. 429-436.
7. *Sheikholeslam S., Desoer C.A.* Longitudinal control of a platoon of vehicles // 1990 American control conference. – IEEE, 1990. – P. 291-296.

8. *Trujillo M.A. et al.* Structure Assembly // Aerial Robotic Manipulation. – Springer, Cham, 2019. – P. 351-365
9. *Healey A.J.* Application of formation control for multi-vehicle robotic minesweeping // Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228). – IEEE, 2001. – Vol. 2. – P. 1497-1502.
10. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
11. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строем БЛА мультикоптерного типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
12. *Тачков А.А. [и др.].* Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 121-132.
13. *Iakovlev D.S.* Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2021. – P. 644-649.
14. *Максимов А.А., Тачков А.А., Малыхин А.Ю., Рудианов Н.А*. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. – 2017. – № 7-8 (109-110). – С. 88-96.
15. *Курочкин С.Ю., Тачков А.А.* Статистическая имитационная модель группового движения мобильных роботов с учетом вероятностно-временных характеристик системы связи и автономного управления движением // Экстремальная робототехника. – 2022. – Т. 1, № 1. – С. 123-129.
16. *Тачков А.А. [и др.].* Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 43-54.
17. *Beard R.W., Lawton J., Hadaegh F.Y.* A coordination architecture for spacecraft formation control // IEEE Transactions on control systems technology. – 2001. – Vol. 9, No. 6. – P. 777-790.
18. *Ren W.* Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations // IET Control Theory & Applications. – 2007. – Vol. 1, No. 2. – P. 505-512.
19. *Fax J.A., Murray R.M.* Information flow and cooperative control of vehicle formations // IFAC Proceedings Volumes. – 2002. – Vol. 35, No. 1. – P. 115-120.
20. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.

REFERENCES

1. *Alonso-Mora J. et al.* Reactive mission and motion planning with deadlock resolution avoiding dynamic obstacles, *Autonomous Robots*, 2018, Vol. 42, No. 4, pp. 801-824.
2. *Girard A.R. et al.* A control architecture for integrated cooperative cruise control and collision warning systems, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. IEEE, 2001, Vol. 2, pp. 1491-1496.
3. *Young S., Kott A.* Control of small robot squads in complex adversarial environments: A review, 2009.
4. *Nazarova A.V., Meysin' Ch.* Organizatsiya spasatel'nykh komand robotov dlya likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy [Organization of rescue teams of robots to eliminate the consequences of natural disasters], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2019, No. 1, pp. 21-28.
5. *Vlasov K.S., Tachkov A.A., Danilov M.M.* Taktika gruppovogo primeneniya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov pri tushenii pozharov v rezervuarnykh parkakh [Tactics of group application of ground-based robotic complexes when extinguishing fires in tank farms], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2020, No. 2, pp. 28-35.
6. *Van Arem B., Van Driel C.J.G., Visser R.* The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics, *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2006, Vol. 7, No. 4, pp. 429-436.
7. *Sheikholeslam S., Desoer C.A.* Longitudinal control of a platoon of vehicles, *1990 American control conference*. IEEE, 1990, pp. 291-296.
8. *Trujillo M.A. et al.* Structure Assembly, *Aerial Robotic Manipulation*. Springer, Cham, 2019, pp. 351-365

9. *Healey A.J.* Application of formation control for multi-vehicle robotic minesweeping, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. IEEE, 2001, Vol. 2, pp. 1497-1502.
10. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
11. *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.
12. *Tachkov A.A. [i dr.]*. Printsipy postroeniya sistem avtonomnogo upravleniya dvizheniem nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Principles of construction of autonomous motion control systems for ground-based robotic complexes of special purpose], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2022, Vol. 10, No. 2, pp. 121-132.
13. *Iakovlev D.S.* Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control, *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon),* 2021, pp. 644-649.
14. *Maksimov A.A., Tachkov A.A., Malykhin A.Yu., Rudianov N.A.* Podkhod k formalizatsii takticheskoy zadachi dlya gruppy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [An approach to the formalization of a tactical task for a group of ground-based robotic systems for military purposes], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16* [Issues of defense technology. Series 16], 2017, No. 7-8 (109-110), pp. 88-96.
15. *Kurochkin S.Yu., Tachkov A.A.* Statisticheskaya imitatsionnaya model' gruppovogo dvizheniya mobil'nykh robotov s uchetom veroyatnostno-vremennykh kharakteristik sistemy svyazi i avtonomnogo upravleniya dvizheniem [Statistical simulation model of the group movement of mobile robots taking into account the probabilistic and temporal characteristics of the communication system and autonomous motion control], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme robotics], 2022, Vol. 1, No. 1, pp. 123-129.
16. *Tachkov A.A. [i dr.]*. Realizatsiya traektornogo regulyatora nazemnogo robototekhnicheskogo kompleksa na osnove model'nogo prognoziruyushchego upravleniya [Implementation of a trajectory controller of a ground-based robotic complex based on model predictive control], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2022, Vol. 10, No. 1, pp. 43-54.
17. *Beard R.W., Lawton J., Hadaegh F.Y.* A coordination architecture for spacecraft formation control, *IEEE Transactions on control systems technology*, 2001, Vol. 9, No. 6, pp. 777-790.
18. *Ren W.* Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations, *IET Control Theory & Applications*, 2007, Vol. 1, No. 2, pp. 505-512.
19. *Fax J.A., Murray R.M.* Information flow and cooperative control of vehicle formations, *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, Vol. 35, No. 1, pp. 115-120.
20. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii [Modern search engine optimization algorithms]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014, 446 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Б. Парамонов.

Курочкин Семен Юрьевич – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), НУЦ «Робототехника»; e-mail: kurochkin.smn@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 89032161825; м.н.с.; аспирант.

Тачков Александр Анатольевич – e-mail: tachkov@bmstu.ru; к.т.н.; начальник отдела.

Борисенков Егор Игоревич – Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); e-mail: ei.borisenkov@yandex.ru; г. Москва, Россия; студент.

Kurochkin Semion Yurievich – Bauman Moscow State Technical University, Science and Educational Center “Robotics”; e-mail: kurochkin.smn@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79032161825; junior researcher; post-graduate student.

Tachkov Alexander Anatolyevich – e-mail: tachkov@bmstu.ru; cand. of eng. sc.; head of the department.

Borisenkov Egor Igorevich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: ei.borisenkov@yandex.ru; Moscow, Russia; student.