

## Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-110-120

**А.И. Савельев, В.В. Лебедева, И.В. Лебедев, К.В. Камынин, Л.Д. Кузнецов,  
А.Л. Ронжин**

### **УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ БПЛА ПРИ ОТРАБОТКЕ КРИЗИСНЫХ ПОЛЕТНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕШЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ\***

*В работе обоснована актуальность разработки алгоритмов управления группой БПЛА при возникновении кризисных ситуаций, влияющих на выполнение поставленной задачи по доставке грузов в труднодоступные места. Описан алгоритм автономного коллективного (децентрализованного) управления группой БПЛА при выполнении целевой задачи транспортировки грузов, а также комбинированного управления при возникновении кризисных ситуаций, когда режим автономного управления невозможно реализовать в полном объеме. Подробно описан алгоритм отработки кризисной ситуации при нехватке энергетического ресурса на борту БПЛА и возврате агентов группы на стартовую позицию. Представлены результаты моделирования движения группы БПЛА мультироторного и самолетного типов и отработки кризисной ситуации по управлению группой БПЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов. В ходе проведения экспериментов итеративно выполнялся расчет остатка топлива при движении БПЛА в точку посадки, а также количества топлива, доступного БПЛА в данный момент времени. В результате экспериментов было выявлено, что время расчета остатка энергетического ресурса не превышает 6,792 мс. В случае, если топливо заканчивается у лидера, миссия транспортировки груза завершается досрочно, поскольку не может быть выполнена без участия лидера. При выходе из строя нескольких ведомых миссия может быть продолжена в том случае, если их количество не превышает заданного значения, критичного для продолжения миссии доставки груза. Приведены результаты экспериментальных исследований моделированию полета БПЛА с грузом, в ходе которых выполнялось построение полетной маршрута, имитирующего криволинейную траекторию движения в городских условиях от точки старта до конечной точки, где происходит посадка БПЛА и передача груза. В экспериментах использовались разработанные БПЛА и бортовая система крепления термоконтейнера. При проведении летных испытаний средняя скорость горизонтального движения БПЛА была задана 10 м/с. Протяженность полета составляла 5350 м. Время, затраченное на полет, составило 13 мин. 51 с.*

*Групповое управление; БПЛА; автономного управления; транспортные задачи; полетный маршрут; робототехника; контроллеры; полезная нагрузка.*

**A.I. Savelyev, V.V. Lebedeva, I.V. Lebedev, K.V. Kamynin, L.D. Kuznetsov,  
A.L. Ronzhin**

### **UAV GROUP MANAGEMENT WHEN WORKING OUT OF CRISIS FLIGHT SITUATIONS IN SOLVING TRANSPORT PROBLEMS**

*The relevance of the development of algorithms for managing a group of UAVs in the event of crisis situations that affect the performance of the task is substantiated. An algorithm for autonomous collective (decentralized) control of a group of UAVs is described when performing the target task of transporting goods, as well as combined control in the event of crisis situations when the autonomous*

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда: РНФ № 20-79-10325.

*control mode cannot be fully implemented. The algorithm for working out a crisis situation in case of a lack of energy resources on board the UAV and the return of group agents to the starting position is described in detail. The results of modeling the movement of a group of UAVs of multirotor and aircraft types and working out a crisis situation for managing a group of UAVs based on information about the reserves of energy or fuel resources are presented. During the experiment, iteratively calculated the remaining fuel when the UAV moved to the landing point, as well as the amount of fuel available to the UAV at a given time. As a result of the experiments, it was found that the time for calculating the balance of the energy resource does not exceed 6.792 ms. If the leader runs out of fuel, the cargo transportation mission ends ahead of schedule, since it cannot be completed without the participation of the leader. If several slaves fail, the mission can be continued if their number does not exceed a predetermined value, which is critical for the continuation of the cargo delivery mission. The results of experimental studies on modeling the flight of an UAV with a load are presented, during which a flight route was built that simulates a curvilinear trajectory of movement in urban conditions from the starting point to the end point, where the UAV is landing and transferring the cargo. In the experiments, the developed UAV and the onboard fastening system of the thermal container were used. During flight tests, the average horizontal speed of the UAV was set to 10 m/s. The length of the flight was 5350 m. The flight time was 13 minutes. 51 seconds.*

*Group control; UAV; autonomous control; transport tasks; flight route; robotics; controllers; payload.*

**Введение.** Управление группой БПЛА является перспективной задачей, так как её применение существенно повышает скорость выполнения полетного задания, при этом многие задачи упрощаются. Появляется возможность проведения мониторинга больших территорий за короткое время без упущения важных деталей, что очень вероятно при использовании одиночных БПЛА.

Под группой БПЛА понимается совокупность летательных аппаратов, которые обладают определенными правилами взаимодействия внутри группы. Такие аппараты способны выдерживать свое место в строю на прямолинейных и криволинейных участках полета всей группы в целом, реагировать на изменения окружающей среды и взаимодействовать друг с другом для решения единой целевой задачи, поставленной перед группой [1]. Часто в работах можно встретить методы управления формацией по принципу «лидер – ведомый» в различных вариациях [2], например, с использованием обмена информацией с бортовых датчиков для определения местоположения ведомой группы [3], а также использование виртуального лидера, который задаёт формацию для группы и отдаёт команды управления для её поддержания [4]. Также во многих случаях используется метод потенциальных полей для управления формацией при моделировании скоординированного управления группой БПЛА самолётного типа [5].

Разработанный в работе [6] распределенный скоординированный метод управления состоит из трех компонентов, а именно: согласованное движение по кругу на основе консенсуса (Consensus-based circling rendezvous), скоординированное управление по траектории для лидеров БПЛА в группах и скоординированное управление «лидер – ведомые» для ведомых БПЛА. В соответствии с согласованным движением по кругу на основе консенсуса БПЛА последовательно взлетают и готовятся к предстоящему созданию формации. Скоординированный подход к управлению с отслеживанием маршрута позволяет управлять лидерами БПЛА в каждой группе, а с помощью управления координацией «лидер – ведомые» позволяет лидеру направлять ведомые БПЛА по рассчитанному маршруту.

Правильно выбранные методы планирования, контроля и управления действиями группы БПЛА позволили бы наиболее эффективно использовать ресурсы (заряды аккумуляторов или запасы топлива, временные ресурсы, аппаратные вычислительные ресурсы БПЛА и навесное оборудование) и оперативно распределять поступающие в режиме реального времени новые транспортные задачи между отдельными аппаратами группы непосредственно в процессе выполнения заданий [7–9].

Полет группы БПЛА в фиксированном строю позволяет решить множество гражданских и военных задач. При выполнении полётных заданий в реальных условиях группа БПЛА должна реагировать на возникающие различные препятствия и кризисные ситуации [10, 11]. Целью исследования является повышение надежности управления группой БПЛА в кризисных ситуациях. Далее рассмотрим задачу движения группы БПЛА с иерархией «лидер-ведомые» в фиксированной формации на двумерной плоскости, так как движение БПЛА осуществляется на фиксированной высоте.

**Описание алгоритма движения группы БПЛА при возникновении кризисных ситуаций.** Для решения задачи движения группы БПЛА с иерархией «лидер-ведомые» в фиксированной формации на двумерной плоскости при движении БПЛА на фиксированной высоте разработана гибридная система управления группой, содержащая две подсистемы: программный модуль назначения ключевых точек глобальной траектории, строящий глобальную траекторию для лидера группы, и программный модуль координации поведения самоорганизующейся группы БПЛА, рассчитывающий траектории движения ведомой группы, таким образом, что все участники группы повторяют курс движения лидера с поправкой на собственную траекторию, а взаимное расположение корректируют посредством обмена данными между собой.

Для управления группой БПЛА в симуляции реализована стратегия «лидер-ведомый». В этом случае важно обеспечить путь без столкновений с препятствиями для лидера, а траектории ведомых определяются относительно позиции лидера.

В решении задачи управления группой БПЛА предложен вариант, когда лидер и направляемая им группа после взлёта и до конца совершения миссии по доставке груза функционируют на высоте, которая не изменяется с течением времени, поэтому примем условие, что БПЛА движутся в двумерной плоскости. Состояние  $i$ -го БПЛА (и лидера и ведомого) можно описать как:

$$[x_i, y_i, \theta_i]^T,$$

где  $x$  и  $y$  – координаты на плоскости  $O_{xy}$   $i$ -го БПЛА в инерциальной системе координат;  $\theta_i$  – курсовой угол  $i$ -го БПЛА. Соответственно, такой БПЛА будет двигаться по следующему закону движения:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \end{cases}$$

где  $v_i$  – поступательная скорость  $i$ -го БПЛА;  $\omega_i$  – угловая скорость  $i$ -го БПЛА. БПЛА подчиняются ограничениям на входные управляющие сигналы:

$$0 < v_{min} \leq v_i \leq v_{max},$$

где  $v_{max}$  – максимальная скорость движения БПЛА;  $v_{min}$  – минимальная скорость движения БПЛА.

Полетная миссия движения группы до целевого района описывается последовательностью путевых точек. Начиная со своего текущего местоположения, лидер БПЛА должен последовательно перемещаться к каждой путевой точке в своем списке.

На рис. 1 представлена схема задачи следования БПЛА по заданному пути. Точка  $p_i$  – проекция лидера БПЛА на направленный путь  $\Gamma_i$ . Точка  $P_i$  – текущее местоположение лидера БПЛА. Угол  $\psi_i$  – соответствует углу рыскания данного БПЛА. Согласно предложенному в работе решению задачи движения БПЛА вдоль запланированной траектории посредством полетного контроллера ошибка следования по траектории лидера БПЛА стремится к нулю.

При проведении летного эксперимента при построении фиксированных формаций целесообразно применять вертикальное эшелонирование БПЛА самолетного типа для исключения эффекта попадания в спутный след впереди идущего БПЛА.

В связи с тем, что группа БПЛА, выполняющая задание, является открытой системой, взаимодействующей со стохастической средой с возмущениями, возможно возникновение незапланированных и кризисных ситуаций [12–16]. В общем случае под кризисными ситуациями понимаются случаи, когда режим автономного управления невозможно реализовать в полном объеме. Выявление невозможности выполнения задания на этапе первичного планирования и целеполагания, например, в связи с отсутствием достаточных энергетических ресурсов, не является кризисной ситуацией.

С точки зрения выполнимости задачи можно разделить кризисные ситуации на две группы:

- 1) не имеющие прямого влияния на выполнение поставленной задачи:
  - ◆ истощение топливного и/или энергетического ресурса БПЛА, что делает невозможным его возвращение на точку завершения операции;
  - ◆ выход из строя навигационных и/или коммуникационных устройств, когда БПЛА не могут отправлять/получать команды от других БПЛА;
- 2) имеющие влияние на выполнимость поставленной задачи в целом или её части:
  - ◆ потеря лидера БПЛА в группе, что делает невозможной автономную координацию данной группы БПЛА;
  - ◆ потеря связи БПЛА с наземным пунктом управления.

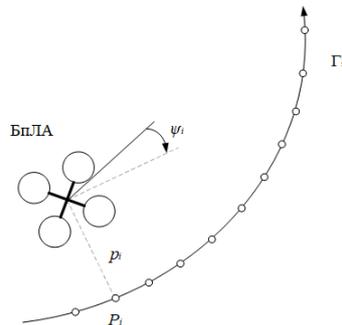


Рис. 1. Описание задачи следования БПЛА по пути

При этом в зависимости от обстановки ситуации из первой группы могут привести к невыполнимости поставленной задачи в полностью автономном режиме. В случае возникновения кризисной ситуации по радиоканалу наземному пункту передается информация об источнике кризисной ситуации и ожидается ответ оператора. На рис. 2 приведена общая схема алгоритма обработки кризисной ситуации при управлении БПЛА. В случае, если ответ оператора не получен за заданное время, то продолжается автономная (децентрализованная) обработка кризисного сценария – перепланирование задания с проверкой выполнимости. В случае невозможности выполнения поставленной задачи БПЛА прекращают выполнение задания и возвращаются на точку завершения миссии.

Оператор наземного пункта управления, в случае получения статуса возникновения кризисной ситуации может, используя радиоканал, перейти к отмене возврата БПЛА на точку завершения миссии и перейти в централизованный (ручной) режим управления БПЛА с использованием радиоканала.

На рис. 3 представлен алгоритм разрешения кризисной ситуации по управлению группой БпЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов.



Рис. 2. Схема отработки кризисной ситуации

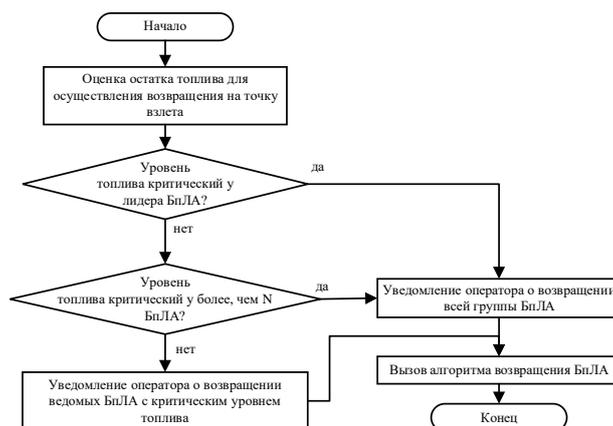


Рис. 3. Алгоритм разрешения кризисной ситуации по управлению группой БпЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов

В начале работы алгоритма на основании оставшегося количества топлива БпЛА и его траектории прогнозируется количество топлива, которое останется после возвращения БпЛА на точку посадки.

Если остаток топлива у БпЛА лидера группы ниже того уровня, который определен оператором в параметрах миссии, то оператор уведомляется о том, что лидер и ведомые возвращаются. То же самое происходит при превышении критического уровня остатка топлива у  $N$  ведомых. Число  $N$  задается в параметрах миссии до ее начала. Если менее, чем у  $N$  ведомых спрогнозированный остаток топлива ниже критического значения, то происходит уведомление оператора о возвращении  $N$  ведомых. Если ни одно из условий выше не выполнилось, то считается, что кризисной ситуации по энергетическим или топливным ресурсам не наступило.

Для возвращения группы БПЛА используется алгоритм, описанный на рис. 4, который обеспечивает построение траекторий до точки доставки груза, точки посадки в автономном режиме и уведомление оператора о необходимости перехода в ручной режим.

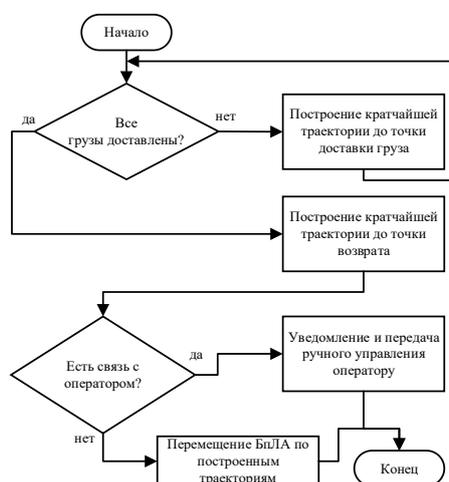


Рис. 4. Алгоритм возврата БПЛА

При возникновении кризисных ситуаций, и если по каким-либо причинам ситуация не была стабилизирована, группа БПЛА также завершает свою работу согласно данному алгоритму возврата БПЛА (рис. 4), который строит наикратчайшую траекторию движения в зависимости от наличия доставляемого груза.

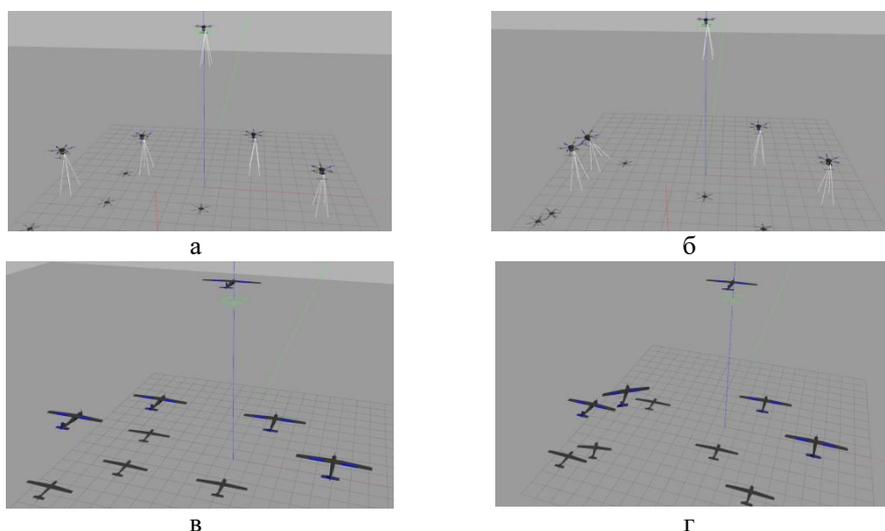
**Результаты экспериментов.** Для апробации предложенных алгоритмов было проведено моделирование движения группы БПЛА мультироторного и самолетного типов и отработки кризисной ситуации по управлению группой БПЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов [17–18]. Моделирование группового полета по предложенной стратегии и алгоритмам отработки кризисной ситуации проводилась в среде для моделирования Gazebo. Результаты моделирование представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты моделирование группового движение и кризисной ситуации**

№ эксперимента	Входные параметры		Оцениваемые параметры			
	Количество ведомых БПЛА, у которых закончилось топливо, шт	Наличие топлива у лидера группы (есть/нет)	Количество столкновений, шт	Средний остаток топлива у возвращающихся БПЛА, %	Миссия завершена досрочно? (Да, Нет)	Время расчета, мс
БПЛА мультироторного типа						
1	1	Нет	0	9,67	Нет	1,278
2	7	Нет	0	9,80	Нет	1,954
3	13	Нет	2	13,61	Да	1,803
4	0	Да	0	19,45	Да	5,260
БПЛА самолетного типа						
5	1	Нет	0	9,98	Нет	2,136
6	7	Нет	2	9,92	Нет	6,792
7	13	Нет	4	13,81	Да	0,880
8	0	Да	0	19,29	Да	3,411

Симуляция в Gazebo производилась со моделями БПЛА мультироторного типа и БПЛА с фиксированным крылом (рис. 5).



*Рис. 5. Примеры столкновения пары БПЛА при возврате на точку взлета в условиях кризисной ситуации по топливу: а – мультироторные БПЛА в формации «клин» до столкновения, б – мультироторные БПЛА в формации «клин» в момент столкновения, в – БПЛА самолетного типа в формации «клин» до столкновения, г – БПЛА самолетного типа в формации «клин» в момент столкновения*

Для проведения экспериментов по отработке кризисных ситуаций за расстояние между лидером и точкой посадки было взято 1178 метров. В качестве граничного значения остатка топлива было взято 10 %. В момент запуска эксперимента количество топлива у БПЛА, которые должны переместиться к точке посадки, равнялось 10 %, а у БПЛА, значение уровня топлива которых не было близко к граничному, равнялось 20 %. В ходе проведения эксперимента итеративно выполнялся расчет остатка топлива при движении БПЛА в точку посадки, а также количества топлива, доступного БПЛА в данный момент времени.

В ходе проведения экспериментов было выявлено, что время расчета не превышает 6,792 мс. В случае, если топливо заканчивается у лидера, миссия транспортировки груза завершается досрочно, поскольку не может быть выполнена без участия лидера. При выходе из строя нескольких ведомых миссия может быть продолжена в том случае, если их количество не превышает заданного значения, критичного для продолжения миссии доставки груза.

Также моделирование показало, что при работе группы БПЛА на одной высоте возможны коллизии при возвращении БПЛА на точку посадки в кризисной ситуации, что ведет к дополнительным потерям в группе, связанными со столкновениями с другими БПЛА [19–22]. Решение данной ситуации может быть обеспечено за счет набора или понижения высоты в момент возникновения кризисной ситуации. Такое решение позволит безопасно покинуть формацию и осуществить возврат БПЛА. Другой ситуацией, которая ведет к полной потере единицы БПЛА, попавшего в кризисную ситуацию, является столкновение с препятствием [23]. Для её разрешения в момент возникновения кризисной ситуации необходимо построить траекторию возвращения, которая учитывает текущее местоположение БПЛА и препятствия или переместить БПЛА на высоту, которая обеспечит его движение без возникновения столкновений со статическими объектами.

Для проверки предложенного алгоритма движения лидера группы был разработан беспилотный летательный аппарат с бортовой системой крепления и фиксации термоконтейнера для перевозки различных компонентов, показанный на рис. 6.



Рис. 6. Беспилотный летательный аппарат с зафиксированным контейнером

На данном этапе исследования экспериментально апробировались все этапы подготовки и полета БПЛА с грузом, включая построение полетной миссии, имитирующей криволинейную траекторию движения в городских условиях от точки старта до конечной точки, где происходит посадка БПЛА и передача груза, а также сам полет. В табл. 2 приведены основные условия и результаты эксперимента.

На рис. 7,а показана траектория полета БПЛА, заданная в планировщике полетных миссий, а на рис. 7,б реальная траектория, взятые из бортового журнала БПЛА. При проведении испытаний средняя скорость горизонтального движения БПЛА составила 10 м/с. Протяженность полета составляла 5350 м. Время, затраченное на полет, составило 13 мин. 51 с.

Таблица 2

**Параметры и результаты экспериментов**

Масса полезной нагрузки (кг)	8кг
Длина пройденного пути (м)	5350м
Высота полета (м)	35м
Расчетное время полета	11мин 29с
Реальное время полета	13мин 51с
Заданная горизонтальная скорость (м/с)	10м/с
Масса полезной нагрузки (кг)	8кг
Длина пройденного пути (м)	5350м

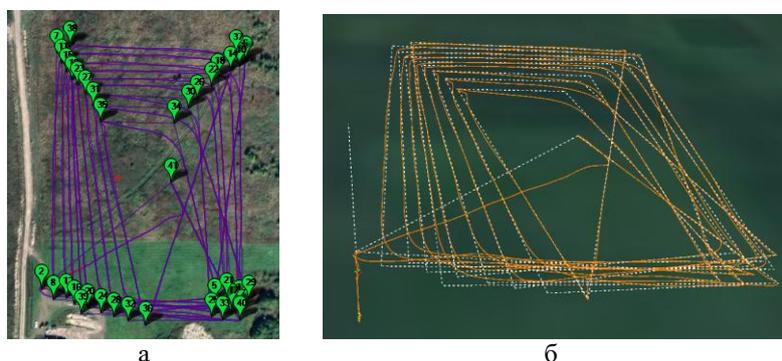


Рис. 7. Траектории полета БПЛА: а – расчетные; б – реальные

**Заключение.** Разработанный алгоритм управления полетом в кризисных ситуациях, возникающих в полете, позволяет определить степень автономности управления в текущих условиях. Разработанное программно-аппаратное обеспечение БПЛА апробировано для решения транспортных задач. Проведенные эксперименты подтверждают надежную работу БПЛА при перемещении в условиях, приближенных к городским. Дальнейшие исследования будут посвящены детальной проработке децентрализованного управления БПЛА при доставке грузов и решению других гражданских задач.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Н.А. Оптимизация параметров строя группы ЛА по условиям безопасности при преодолении ПВО // Полет. – 2007. – №. 9. – С. 21-25.
2. 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.
3. Park C. et al. Formation flight of multiple uavs via onboard sensor information sharing // Sensors. – 2015. – Vol. 15, No. 7. – P. 17397-17419.
4. Zhang M., Liu H.H.T. Formation flight of multiple fixed-wing unmanned aerial vehicles // 2013 American Control Conference. – IEEE, 2013. – P. 1614-1619.
5. Nagao Y., Uchiyama K. Formation flight of fixed-wing UAVs using artificial potential field // 29th Congress of the International Council of the Aerospace Sciences. – 2014.
6. Wang X., Shen L., Liu Z., Zhao S., Cong Y., Li, Z., Wang Y. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments // In: Science China Information Sciences. – 2019. – Vol. 62 (11). – P. 1-17.
7. Шапкина К.М., Девитт Д.В. Система группового управления бпла для решения задачи построения и удержания формаций в полете // Modern Science. – 2021. – №. 6-2. – С. 402-406.
8. Vinokursky D.L. et al. Model predictive control for path planning of UAV group // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1155, No. 1. – P. 012092.
9. Muslimov T.Z., Munasypov R. A. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping // Aerospace science and technology. – 2021. – Vol. 109. – P. 106416.
10. Campion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV swarm communication and control architectures: a review // Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2018. – Vol. 7, No. 2. – P. 93-106.
11. Luna M.A. et al. A New Algorithm Using Hybrid UAV Swarm Control System for Fire-fighting Dynamical Task Allocation // 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2021. – P. 655-660.
12. Mehalleque N., Djellab M., Loukhaoukha K. Efficient Use of UAVs for Public Safety in Disaster and Crisis Management // Wireless Personal Communications. – 2021. – Vol. 116, No. 1. – P. 369-380.
13. Calabrò A., Giuliano R. Integrated Wi-Fi and LoRa network on UAVs for localizing people during SAR operations // 2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). – IEEE, 2021. – P. 1-6.
14. Croce V., Diamantidis D., Šykora M. Seismic damage evaluation and decisions on interventions supported by UAV-based surveys // International Conference on Protection of Historical Constructions. – Springer, Cham, 2021. – P. 206-221.
15. Boubeta-Puig J. et al. An autonomous UAV architecture for remote sensing and intelligent decision-making // IEEE Internet Computing. – 2018. – Vol. 22, No. 3. – P. 6-15.
16. Шальнев И.О. Объектно-ориентированный подход к описанию взаимодействия группы робототехнических средств на основе распределенной виртуальной машины // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №. 1 (218). – С. 125-137.
17. Izhboldina V., Lebedev I. Method for inspecting high-voltage power lines using UAV, based on the RRT algorithm Electromechanics and Robotics. – 2021. – DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6\_16.
18. Lebedev I., Lebedeva V. Analysis of «Leader – Followers» Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs. Lecture Notes in Networks and Systems // Software Engineering Application in Informatics. – 2021. – Vol. 232. – P. 870-884. – DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68. – DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68.

19. Titkov I.P., Karpunin A.A. Collision-aware formation assignment of quadrotors // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Vol. 186. – P. 727-735.
20. Vinokursky D.L. et al. Model predictive control for path planning of UAV group // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1155, No. 1. – P. 012092.
21. Luo L. et al. GrpAvoid: Multigroup Collision-Avoidance Control and Optimization for UAV Swarm // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2021.
22. Кутахов В.П., Мецзяков Р.В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // *Проблемы управления*. – 2022. – № 1. – С. 67-74.
23. Banerjee P., Gorospe G., Ancel E. 3D Representation of UAV-obstacle Collision Risk Under Off-nominal conditions // *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. – IEEE, 2021. – P. 1-7.

#### REFERENCES

1. Baranov N.A. Optimizatsiya parametrov stroya gruppy LA po usloviyam bezopasnosti pri preodolenii PVO [Optimization of the parameters of the formation of an aircraft group according to safety conditions when overcoming air defense], *Polet [Flight]*, 2007, No. 9, pp. 21-25.
2. 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.
3. Park C. et al. Formation flight of multiple uavs via onboard sensor information sharing, *Sensors*, 2015, Vol. 15, No. 7, pp. 17397-17419.
4. Zhang M., Liu H.H.T. Formation flight of multiple fixed-wing unmanned aerial vehicles, *2013 American Control Conference*. IEEE, 2013, pp. 1614-1619.
5. Nagao Y., Uchiyama K. Formation flight of fixed-wing UAVs using artificial potential field, *29th Congress of the International Council of the Aerospace Sciences*, 2014.
6. Wang X., Shen L., Liu Z., Zhao S., Cong Y., Li, Z., Wang Y. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments, *In: Science China Information Sciences*, 2019, Vol. 62 (11), pp. 1-17.
7. Shashkina K.M., Devitt D.V. Sistema gruppovogo upravleniya bpla dlya resheniya zadachi postroeniya i uderzhaniya formatsiy v polete [UAV group control system for solving the problem of building and holding formations in flight], *Modern Science [Modern Science]*, 2021, No. 6-2, pp. 402-406.
8. Vinokursky D.L. et al. Model predictive control for path planning of UAV group, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, Vol. 1155, No. 1, pp. 012092.
9. Muslimov T.Z., Munasypov R. A. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping, *Aerospace science and technology*, 2021, Vol. 109, pp. 106416.
10. Campion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV swarm communication and control architectures: a review, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2018, Vol. 7, No. 2, pp. 93-106.
11. Luna M.A. et al. A New Algorithm Using Hybrid UAV Swarm Control System for Fire-fighting Dynamical Task Allocation, *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2021, pp. 655-660.
12. Mehallegue N., Djellab M., Loukhaoukha K. Efficient Use of UAVs for Public Safety in Disaster and Crisis Management, *Wireless Personal Communications*, 2021, Vol. 116, No. 1, pp. 369-380.
13. Calabrò A., Giuliano R. Integrated Wi-Fi and LoRa network on UAVs for localizing people during SAR operations, *2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*. IEEE, 2021, pp. 1-6.
14. Croce V., Diamantidis D., Sýkora M. Seismic damage evaluation and decisions on interventions supported by UAV-based surveys, *International Conference on Protection of Historical Constructions*. Springer, Cham, 2021, pp. 206-221.
15. Boubeta-Puig J. et al. An autonomous UAV architecture for remote sensing and intelligent decision-making, *IEEE Internet Computing*, 2018, Vol. 22, No. 3, pp. 6-15.
16. Shal'nev I.O. Ob"ektно-orientirovanny podkhod k opisaniyu vzaimodeystviya gruppy robototekhnicheskikh sredstv na osnove raspredelennoy virtual'noy mashiny [An object-oriented approach to describing the interaction of a group of robotic tools based on a distributed virtual machine], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2021, No. 1 (218), pp. 125-137.

17. *Izhboldina V., Lebedev I.* Method for inspecting high-voltage power lines using UAV, based on the RRT algorithm *Electromechanics and Robotics*, 2021. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6\_16.
18. *Lebedev I., Lebedeva V.* Analysis of «Leader – Followers» Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs. *Lecture Notes in Networks and Systems, Software Engineering Application in Informatics*, 2021, Vol. 232, pp. 870-884. DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68. – DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68.
19. *Titkov I.P., Karpunin A.A.* Collision-aware formation assignment of quadrotors, *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 186, pp. 727-735.
20. *Vinokursky D.L. et al.* Model predictive control for path planning of UAV group, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, Vol. 1155, No. 1, pp. 012092.
21. *Luo L. et al.* GrpAvoid: Multigroup Collision-Avoidance Control and Optimization for UAV Swarm, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021.
22. *Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V.* Upravlenie gruppovym povedeniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: postanovka zadachi primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta [Management of group behavior of unmanned aerial vehicles: statement of the problem of application of artificial intelligence technologies], *Problemy upravleniya* [Problems of management], 2022, No. 1, pp. 67-74.
23. *Banerjee P., Gorospe G., Ancel E.* 3D Representation of UAV-obstacle Collision Risk Under Off-nominal conditions, *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. IEEE, 2021, pp. 1-7.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.В. Мещеряков.

**Савельев Антон Игоревич** – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»; e-mail: saveliev@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79522496544; к.т.н.; с.н.с.; руководитель лаборатории автономных робототехнических систем.

**Лебедева Валерия Валентиновна** – e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com; тел.: +7931314940; лаборатория автономных робототехнических систем; м.н.с.

**Лебедев Игорь Владимирович** – e-mail: igorlevedev@gmail.com; тел.: +79313589135; лаборатория автономных робототехнических систем; м.н.с.

**Камынин Константин Викторович** – e-mail: konstvictorovich@mail.ru; тел.: +79213599876; лаборатория автономных робототехнических систем; программист.

**Кузнецов Лев Дмитриевич** – e-mail: levaku@yandex.ru; тел.: +7952 2316087; лаборатория автономных робототехнических систем; программист.

**Ронжин Андрей Леонидович** – e-mail: ronzhin@iias.spb.su; тел.: +78123283311; д.т.н.; профессор, директор.

**Savelyev Anton Igorevich** – St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: saveliev@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79522496544; cand. of eng.; senior researcher; laboratory of autonomous robotic systems; head of the laboratory.

**Lebedeva Valeria Valentinovna** – e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com; phone: +7931314940; laboratory of autonomous robotic systems; junior researcher.

**Lebedev Igor Vladimirovich** – e-mail: igorlevedev@gmail.com; phone +79313589135; laboratory of autonomous robotic systems; junior researcher.

**Kamynin Konstantin Viktorovich** – e-mail: konstvictorovich@mail.ru; phone: +79213599876; laboratory of autonomous robotic systems; software engineer.

**Kuznetsov Lev Dmitrievich** – e-mail: levaku@yandex.ru; phone: +79522316087; laboratory of autonomous robotic systems; software engineer.

**Ronzhin Andrey Leonidovich** – e-mail: ronzhin@iias.spb.su; phone: +78123283311; dr. of eng. sc.; professor, director.