

УДК 004.021

## ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГООБЪЕКТНЫМИ СИСТЕМАМИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

С.М. ДЫМКОВ, А.В. МАРКОВ, В.И. СИМАНЬКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 5 октября 2017*

**Аннотация.** Проведен обзор некоторых задач, возникающих при построении систем управления группами беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассмотрены возможные пути решения.

**Ключевые слова:** многообъектные системы управления, беспилотные летательные аппараты, транспортная задача, линейная задача о назначениях.

**Abstract.** Some problems arising in the construction of control systems for groups of unmanned aerial vehicles were analysed. Possible solutions are considered.

**Keywords:** multiobject control systems, unmanned aerial vehicles, transport problem, linear assignment problem.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 114, No. 4, pp. 11-17**

**Problems of management of multiobject systems  
of unmanned aerial vehicles and the ways of their solution  
S.M. Dymkov, A.V. Markov, V.I. Simankov**

### Введение

В настоящее время расширяется применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных сферах человеческой деятельности. В начале развития беспилотной авиации каждый аппарат управлялся дистанционно операторами-пилотами. Человек как оператор ценен тем, что может принять решение в нестандартной ситуации, где автоматическая система даст сбой. Вместе с тем в контур управления вносится задержка человеческой реакции и возможность ошибки либо неоптимального решения. С развитием технических возможностей датчиков увеличивается количество БПЛА, решающих одну задачу. Это приводит к увеличению объемов передаваемой информации. Появляется необходимость в объединении и систематизации данных, передаваемых аппаратами, чтобы получить общую картину. С этой целью в настоящее время разрабатывается подход с использованием искусственного интеллекта и алгоритмов обработки больших объемов данных. Это позволяет решать задачу распознавания объектов, анализировать оперативную обстановку и оказывать помощь в принятии решений. Искусственный интеллект может предсказать вероятное развитие событий с учетом собранных данных.

На более низком уровне существует задача автоматического планирования маршрутов и управления БПЛА.

Необходимо производить расчет требуемого количества аппаратов, их типов в зависимости от вида задачи. Планировать маршруты таким образом, чтобы сэкономить время и ресурсы, а также избежать столкновений между БПЛА и окружающей средой. Чем больше количество объектов управления системы, тем сложнее организовать эффективный информационный обмен между операторами, если каждый БПЛА управляется вручную. Появляется необходимость в многообъектных автоматизированных системах управления (МОСУ) БПЛА. Предназначение таких систем состоит в том, чтобы снизить нагрузку

на оператора и повысить продуктивность каждого БПЛА и системы в целом по сравнению с ручным управлением. Снижение нагрузки достигается за счет делегирования задач на МОСУ, где участие человека не требуется либо менее эффективно. Например, планирование маршрутов для визуального наблюдения за множественными статичными наземными объектами; планирование траектории полета с учетом неголономных ограничений аппарата; прокладывание минимального пути с ограничением на радиус разворота и некоторые другие.

Рассмотрим более детальные формулировки задач для МОСУ БПЛА и возможные пути их решения.

### Распределение целей между БПЛА с минимизацией суммарного пути

Необходимо распределить  $m$  целей между  $n$  однотипными БПЛА таким образом, чтобы минимизировать суммарный путь. В такой постановке данная задача является линейной задачей о назначениях. Входные данные: начальные координаты БПЛА и расположение целей.

*Решение:* составить  $m \times n$  матрицу стоимости, элементами которой являются расстояния от начальных позиций БПЛА до целей. Найти минимум матрицы стоимости можно с использованием симплекс-методов, например, венгерского алгоритма, метода потенциалов. В зависимости от количества БПЛА и целей можно выделить два случая: а)  $m \leq n$ ; б)  $m > n$ , т. е. целей больше, чем БПЛА.

На рис. 1 приведено решение данной проблемы методом потенциалов для случая  $m \leq n$ .

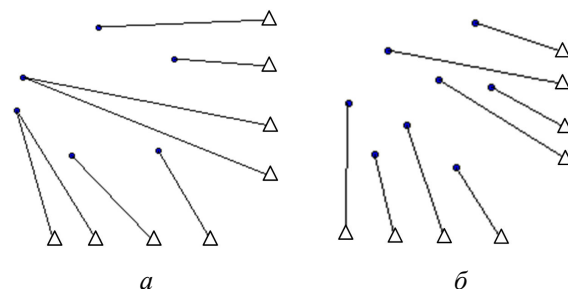


Рис. 1. Решение задачи назначения: а –  $m < n$ ; б –  $m \equiv n$

Как видно из рис. 1, решение не только обеспечивает минимальный суммарный путь, но и не содержит пересечений, что показано в [1].

Для случая  $m > n$  решение зависит от порядка обхода целей. Решение симплекс методом для матрицы  $m \times n$  таково, что маршруты прокладываются от исходной позиции БПЛА к цели. Если же БПЛА обходит цели без возврата на исходную позицию (рис. 2, пунктирная линия), то при движении к следующей цели точкой отправления является позиция текущей цели.

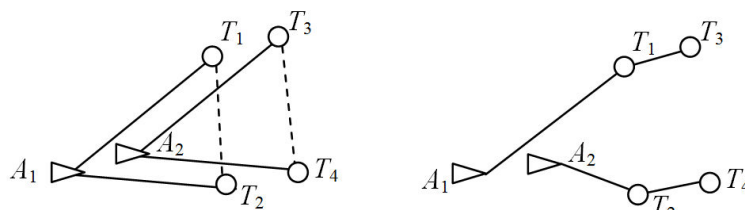


Рис. 2. Решение задачи назначения  $m > n$

Этот маршрут уже может пересекаться с другим. В предложенной матрице стоимости нет элементов маршрутов от цели к цели. Если в матрицу стоимости добавить эти элементы, то ее размерность вырастет на количество целей  $m$ , а количество элементов соответственно на  $m^2$ . Предлагается выполнить декомпозицию задачи и применить рекурсивный итерационный подход. Первой БПЛА выбирает цель с наименьшей стоимостью маршрута. Затем рассчитывается новая матрица стоимости, в которой координатами агентов будут координаты «занятых» на последней итерации целей. В качестве целей останутся только «свободные» цели. Далее происходит решение задачи на основе новой матрицы стоимости со штрафами на пересечение предыдущих маршрутов. И так до тех пор, пока не останется «свободных» целей [1]. В случае  $m > n$  появляется задача устранения пересечений маршрутов.

### Устранение пересечений маршрутов

*Решение 1.* Для решения этой задачи можно применить жадный метод с использованием выпуклой оболочки. На каждом шаге назначаются цели для одного БПЛА из отсортированного списка. Сортировка должна быть такой, чтобы маршрут БПЛА, построенный на предыдущем шаге, не пересекался с маршрутом текущего БПЛА. Строится выпуклая оболочка по координатам БПЛА и целей. Текущему БПЛА назначается  $[n/m]$  целей, расположенных следом за ним на выпуклой оболочке по часовой или против часовой стрелки в зависимости от вида сортировки. Пример решения показан на рис. 3.

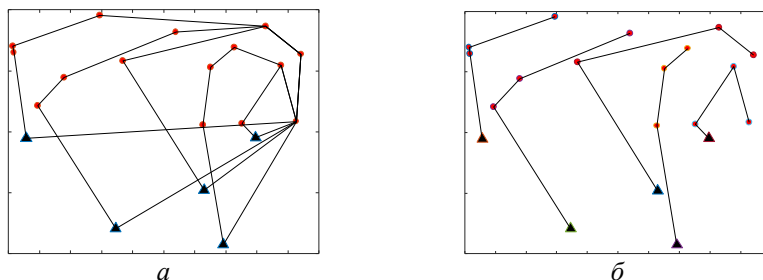


Рис. 3. Решение задачи назначения с помощью выпуклой оболочки  $m > n$ : *a* – выпуклые оболочки, построенные на всех шагах; *б* – назначение БПЛА (▲), целей (●)

Данная задача может иметь ограничения. Например, разнородные цели и соответствующие им БПЛА; ограничение на максимальный пройденный БПЛА путь; ограничение на радиус действия БПЛА. В данном случае эффективно применение подходов из целочисленного линейного программирования с ограничениями.

*Решение 2.* Разрешение конфликтов маршрутов на этапе планирования путем добавления промежуточных точек. Если планирование без конфликтов в пространстве невозможно или нерационально, тогда решение задачи заключается в поиске альтернативных маршрутов путем добавления дополнительных или распределения конфликтующих маршрутов на разные уровни высоты. Их количество должно быть также минимальным.

Данные о пересечении маршрутов могут быть представлены в виде матрицы пересечений  $C[m][m] \in [0, 1]$ , то есть, если элемент  $C_{ij} = 1$ , значит маршруты  $i$ -го и  $j$ -го агентов пересекаются. Другой способ представления пересечения маршрутов это граф. Здесь вершинами графа являются БПЛА, а ребра соединяют БПЛА, маршруты которых пересекаются. Эту задачу можно решить простым перебором, если количество агентов небольшое, и получить приемлемое решение. Можно применить алгоритм расцветки вершин графов. Алгоритм и его практическая реализация описаны в книге С.П. Иглина [2]. Решением этого алгоритма является назначение каждой вершине цветов (или в общем случае меток) таким образом, что любые две смежные вершины имеют разный цвет. В случае с маршрутами БПЛА цвета означают уровни высот. То, что смежные вершины имеют разные цвета, означает, что БПЛА с пересекающимися маршрутами будут иметь разные высоты. Пример использования алгоритма расцветки графов представлен на рис. 4. Вместо цветов используются фигуры.

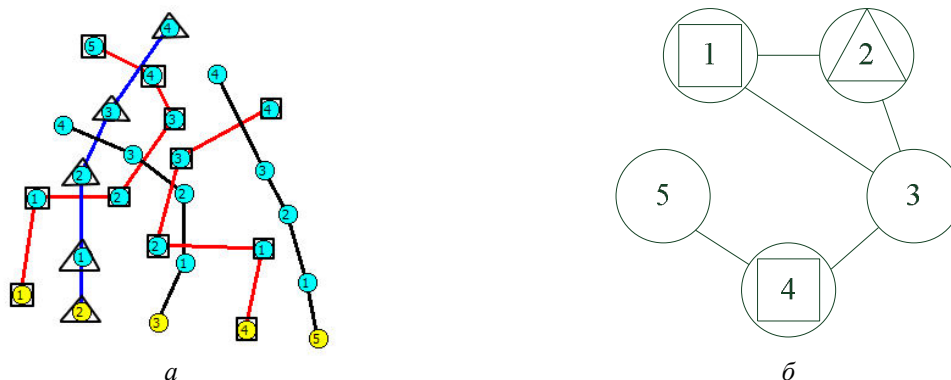


Рис. 4. Разрешение конфликтов маршрутов разнесением по высотам с помощью алгоритма расцветки графов: *a* – маршруты; *б* – соответствующий граф

Чтобы разрешить конфликты маршрутов без разнесения по разным высотам, можно применить алгоритм выпуклой оболочки. Для этого нужно построить выпуклую оболочку, охватывающую точки пересекающихся маршрутов, и добавить ее точки в маршрут одного из БПЛА так, чтобы он огибал маршрут другого. На каждой итерации разрешается конфликтная ситуация между двумя БПЛА. А именно, выбирается путь, который не приводит к новым пересечениям и не создает новых пересечений с другими маршрутами на соответствующей высоте. Возможны четыре комбинации: обход по часовой стрелке или против нее для каждого из двух БПЛА. Например, на рис. 5 построена выпуклая оболочка по точкам двух маршрутов и по ней построен альтернативный маршрут с добавлением точки  $P_1$ .

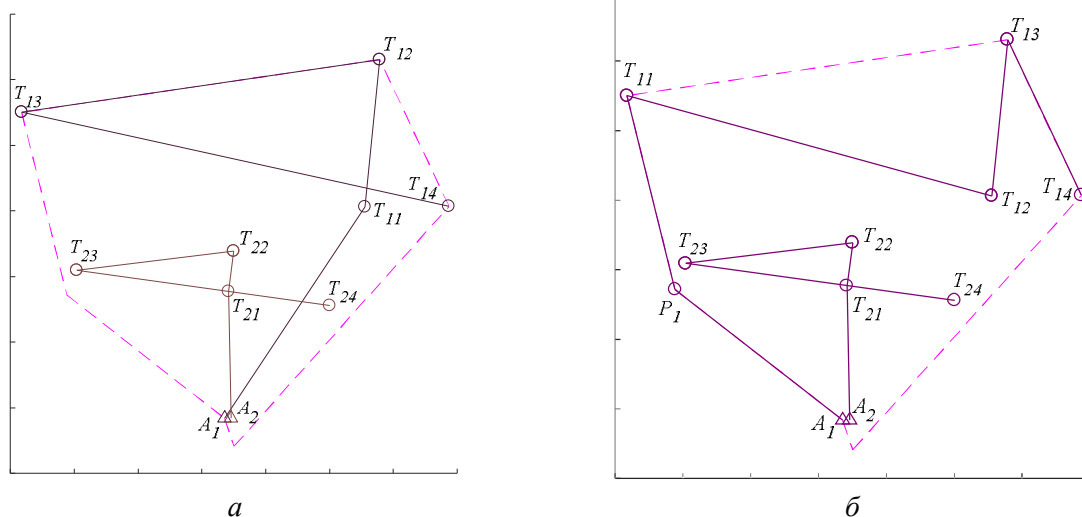


Рис. 5. Разрешение конфликтов изменением маршрутов с помощью алгоритма выпуклой оболочки:  $a$  – исходные маршруты на разных высотах;  $b$  – измененные маршруты на одной высоте

*Решение 3.* Также возможно применить теорию кос [3] для разрешения конфликтов (рис. 6). Алгоритм работает по принципу расчески. Расческа последовательно проходит между косами. Если косы спутаны, то расческа выправляет их. Применительно к маршрутам, процесс «расчесывания» выполняется алгоритмом линии развертки (sweep line algorithm). Вертикальная линия последовательно и дискретно перемещается по оси  $x$ , останавливаясь на точках пересечения и изменения направления маршрутов. В этих точках производятся манипуляции с маршрутами для исключения их пересечений.

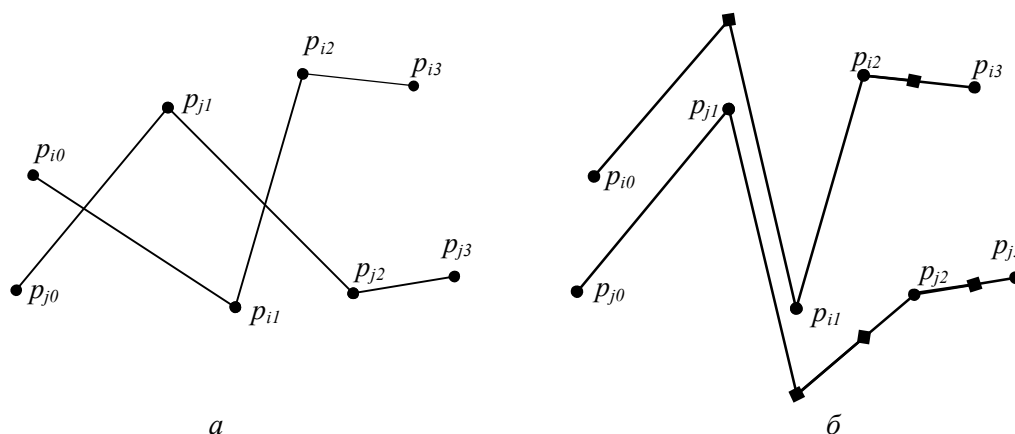


Рис. 6. Разрешение конфликтов изменением маршрутов с помощью алгоритма, использующего теорию кос:  $a$  – исходные маршруты;  $b$  – измененные маршруты

Очевидно, что построение альтернативных маршрутов увеличивает суммарный путь и разнесение по высотам имеет ограничения по количеству слоев. Однако можно повысить эффективность планирования с помощью имитационного моделирования полета по времени. Для этого требуется создать модель полетной миссии в специальной среде (Anylogic, MATLAB, GNU Octave и пр.). Входные данные – это координаты целей и исходные

координаты БПЛА. Задается минимальное безопасное расстояние, на которое могут сближаться БПЛА. Оно зависит от факторов неопределенности – ошибки контура управления положением, обусловленной неточностями измерения и управления, внешними возмущениями. Образуется некоторая окружность, содержащая множество возможных координат БПЛА в момент времени. В ходе моделирования выявляются аппараты, чьи окружности пересекаются. Затем задача разрешения конфликтов решается только для этих БПЛА.

### Распределение целей между БПЛА с оптимизацией по времени

Необходимо минимизировать максимальное значение длины маршрута. Смысл такой минимаксной задачи в том, чтобы снизить общее время миссии по достижению всех целей. Данная задача, в некотором смысле, – эквивалент линейной задачи о назначениях в узких местах.

*Решение.* Один из эффективных способов решения – это пороговый алгоритм Гарфинкеля. Он включает в себя проверку двудольного графа на наличие совершенного паросочетания. Можно использовать алгоритм Хопкрофта-Карпа для поиска наибольшего паросочетания с проверкой, является ли оно совершенным. Данная задача, алгоритм ее решения и его практическая реализация описаны в [4]. Также есть реализации на основе Венгерского алгоритма [5].

### Планирование временного графика обслуживания однородных целей

Задача состоит в том, чтобы, имея  $m$  БПЛА, обслужить  $n$  целей за минимальное время. Каждый БПЛА затрачивает на каждую цель время  $t_{ij} = t_{Tij} + t_{Sj}$ , где  $i = 1 \dots m, j = 1 \dots n$ ;  $t_{Tij}$  – время на достижение  $j$ -й цели  $i$ -м БПЛА,  $t_{Sj}$  – время обслуживания  $j$ -й цели.

*Решение.* Решением задачи является временной график для каждого БПЛА. Одним из эффективных способов решения данной задачи является алгоритм аукционов на основе консенсуса между парой БПЛА (consensus-based auction algorithm – СВАА) и его обобщения на проблему множественного назначения (consensus-based bundle algorithm – СВВА) [6]. Эти алгоритмы используют рыночную стратегию принятия решений как механизм децентрализованного выбора и используют консенсусную процедуру, основанную на локальной связи, в качестве механизма разрешения конфликта для достижения соглашения между БПЛА о выигрышных значениях критериев качества и соответствующих назначениях. Оба алгоритма обеспечивают бесконфликтное назначение, как видно на рис. 7, а. На рис. 7, б представлен временной график для каждого БПЛА.

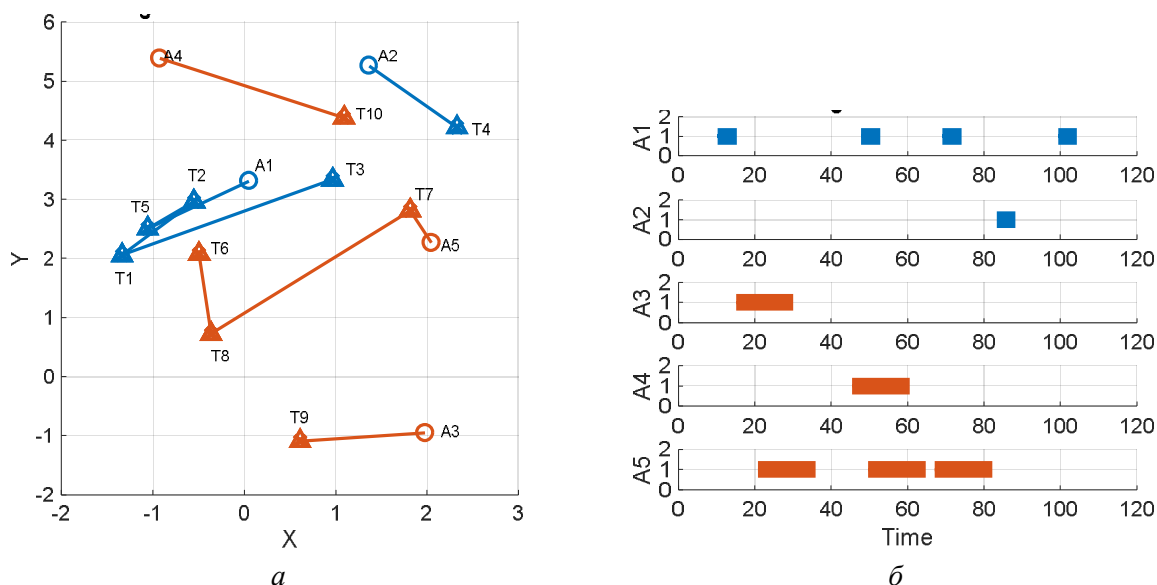


Рис. 7. Выход алгоритма СВВА: а – маршруты БПЛА; б – расписание

СВАА и СВВА алгоритмы обеспечивают эффективные решения, без конфликтов, которые являются устойчивыми как к несоответствиям в ситуационной осведомленности по отношению к другим БПЛА группы, так и к изменениям в топологии их сети связи.

### Оперативное разрешение конфликтов

Предыдущие задачи решаются на этапе планирования миссии. Возможны непредусмотренные конфликты, которые требуется разрешать оперативно. Например, появление другого летательного аппарата, не принадлежащего группе. Существуют алгоритмы, прогнозирующие столкновения между БПЛА на основе данных систем распознавания, и основываясь на их текущих скоростях, положениях и курсах. План полета оперативно меняется с учетом возникшей обстановки, чтобы избежать столкновения.

*Решение.* Один из таких алгоритмов – Reciprocal Velocity Obstacle (RVO) [7], концепция которого представлена на рис. 8.

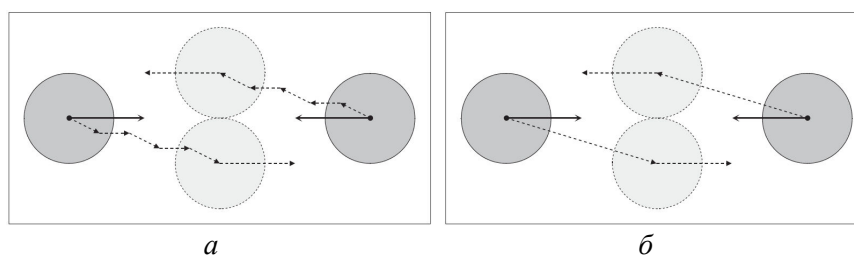


Рис. 8. Траектории оперативного разрешения конфликтов БПЛА с противоположными курсами полета:  
а – Velocity Obstacle; б – Reciprocal Velocity Obstacle

Данный алгоритм является модификацией алгоритма Velocity Obstacle (VO) [8]. RVO не содержит нежелательных колебаний траектории, характерных для VO.

### Заключение

Сложная миссия в своей исходной постановке может оказаться слишком трудной, если решать ее прямо как одну большую задачу. Уменьшить сложность задачи можно методом декомпозиции, то есть разложить ее на более простые подзадачи, которые рассматриваются в данной статье. Предложенные к ним решения не являются универсальными, а одними из возможных, подходящих для конкретной ситуации. Нельзя предсказать, какой из методов окажется оптимальным в определенных условиях.

Некоторые задачи в отрыве от основной миссии являются достаточно абстрактными. Их самостоятельное применение в реальных условиях весьма ограничено. Обычно они являются частью сложной миссии.

Разнообразие постановок миссий для МОСУ можно объяснить тем, что каждая аппаратная платформа накладывает свои особенности. Также развивающиеся возможности техники постоянно меняют условия задач, некоторые из требований становятся неактуальными, появляются новые. Все это ведет к появлению задач, для которых еще не существует эффективного решения. Поэтому при описании типовых задач рассмотрены не только существующие опубликованные методы, но и некоторые идеи, потенциально эффективные при разработке решения новых задач или уже существующих, но в новой постановке.

### Список литературы

1. Дымков С.М., Марков А.В., Симаньков В.И. Решение транспортной задачи для многообъектной системы беспилотных аппаратов // Доклады БГУИР. 2017. № 7 (109). С. 73–77.
2. Иглин С.П. Математические расчеты на базе MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2005 640 с.
3. Сосинский А. Косы и узлы // Квант. 1989. № 2. С. 6–14.
4. Burkard R., Dell'Amico M., Martello S. Assignment Problems, Philadelphia, PA, USA, 2009. 386 p.
5. Pramendra Singh Pundir, Sandeep Kumar Porwal, Brijesh P. Singh. A New Algorithm for Solving Linear Bottleneck Assignment Problem // J. of Institute of Science and Technology. 2015. № 20(2). P. 101–102.

6. Choi H.-L., Brunet L., How J.P. Consensus-Based Decentralized Auctions for Robust Task Allocation // IEEE Transactions on Robotics. 2009. Vol. 25, № 4. P. 912–926.
7. Jur van den Berg, Ming C. Lin, Dinesh Manocha. Reciprocal Velocity Obstacles for Real-Time Multi-Agent Navigation // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543489.
8. Fiorini P., Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles // Int. J. of Robotics Research. 1998. Vol. 17, № 7. P. 760–772.

### References

1. Dymkov S.M., Markov A.V., Siman'kov V.I. Reshenie transportnoj zadachi dlja mnogoob'ektnoj sistemy bespilotnyh apparatov // Doklady BGUIR. 2017. № 7 (109). S. 73–77. (in Russ.)
2. Iglin S.P. Matematicheskie raschety na baze MATLAB. SPb.: BHV-Peterburg, 2005 640 s. (in Russ.)
3. Sosinskij A. Kosy i uzly // Kvant. 1989. № 2. S. 6–14. (in Russ.)
4. Burkard R., Dell'Amico M., Martello S. Assignment Problems., Philadelphia, PA, USA, 2009. 386 p.
5. Pramendra Singh Pundir, Sandeep Kumar Porwal, Brijesh P. Singh. A New Algorithm for Solving Linear Bottleneck Assignment Problem // J. of Institute of Science and Technology. 2015. № 20(2). P. 101–102.
6. Choi H.-L., Brunet L., How J.P. Consensus-Based Decentralized Auctions for Robust Task Allocation // IEEE Transactions on Robotics. 2009. Vol. 25, № 4. P. 912–926.
7. Jur van den Berg, Ming C. Lin, Dinesh Manocha. Reciprocal Velocity Obstacles for Real-Time Multi-Agent Navigation // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543489.
8. Fiorini P., Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles // Int. J. of Robotics Research. 1998. Vol. 17, № 7. P. 760–772.

### Сведения об авторах

Дымков С.М., научный сотрудник группы по контролю над наукой в лабораториях Темасек Национального университета Сингапура.

Марков А.В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Симаньков В.И., аспирант кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Dymkov S.M., research scientist of control science Group at Temasek laboratories of National university of Singapore.

Markov A.V., PhD, associate professor, head of control systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Simankov V.I., PG student of control systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-86-03;  
e-mail: markov@bsuir.by  
Марков Александр Владимирович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki st., 6  
Belarusian state university  
of informatics and radio electronics  
tel. +375-17-293-86-03;  
e-mail: markov@bsuir.by  
Markau Aliaksandr Uladzimiravich