

В.С. ЛАЗАРЕВ, Д.Э. АГАДЖАНОВ  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ГРУППЫ ПОДВИЖНЫХ  
ОБЪЕКТОВ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ**

---

*Лазарев В.С., Агаджанов Д.Э. Использование графоаналитических методов для формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде.*

**Аннотация.** Рассматривается задача формирования траекторий движения группы подвижных объектов, функционирующих в двумерной среде с неподвижными препятствиями. Эта задача решалась графоаналитическими методами, основанными на алгоритмах Дейкстры, Беллмана-Форда и A\*. Поставлен эксперимент, включающий компьютерное моделирование, результатами которого явились данные о времени движения группы подвижных объектов по траекториям. На основании данных результатов моделирования произведено их сравнение, которое позволило сделать вывод об эффективности различных методов решения задачи, и помогло выявить наиболее оптимальный.

**Ключевые слова:** Групповое управление, подвижный объект, графоаналитические методы, алгоритм Дейкстры, алгоритм Беллмана-Форда, алгоритм A\*.

*Lazarev V.S., Agadjanov D.E. Using Graphic-Analytical Methods for Robots Group Movement Trajectories Formation in the Two-Dimensional Environment.*

**Abstract.** The problem of movement trajectories formation of a vehicle robots group, functioning in the two-dimensional environment with motionless obstacles, is considered. For the solution of this task, it is possible to use graphic-analytical methods. These methods are based on Dijkstra's algorithms, Bellman-Ford and A\*. We carry out experiment including 100 iterations of computer modeling. The results of modeling are data on time of vehicle robots group movement on trajectories developed by means of the algorithms. On the basis of the modeling results was made a comparison of methods. This comparison has allowed revealing the most optimum of methods.

**Keywords:** Robots group control; vehicle; graphic-analytical methods; Dijkstra's algorithm; Bellman-Ford algorithm; A\* algorithm.

---

**1. Введение.** В настоящее время актуальной проблемой является создание групп роботов, автономно функционирующих в неопределенной среде и эффективно решающих задачи противодействия роботам противника, выполняющим как одиночные, так и групповые миссии. Решение указанной проблемы требует разработки методов планирования поведения роботов, включающих формирование целей и критериев движения, адаптивное распределение и перераспределение целей и функций в группе. Одной из первоочередных задач в рамках данной проблемы является планирование траектории автономного подвижного объекта [1]. Актуальность развития автоматизации управления движением также подчеркивается в работе [2] и в работах XII всероссийского совещания по проблемам управления [3].

Для решения задачи планирования траектории используются методы позиционно-траекторного управления [4], методы потенциал-

ных полей, графоаналитические методы, а также методы, основанные на использовании интеллектуальных и нейросетевых технологий, генетических алгоритмов и неустойчивых режимов [5]. В свою очередь, графоаналитические методы, например, часто включают элементы теории потенциальных полей и алгоритмы поиска путей на графе. Примерами могут служить работы [6, 7], где метод потенциальных полей [8] используется совместно с алгоритмами  $A^*$  и  $DF^*$ . В данной работе рассмотрены графоаналитические методы и проведено их сравнение, используя сочетание модели кинематики подвижного объекта и алгоритмов поиска кратчайшего пути на графе.

### 1. Описание сравниваемых графоаналитических методов.

Рассмотрим подвижные объекты, уравнения кинематики которых имеют вид (рисунок 1).

$$\dot{y}_{1i} = V_i \cos \varphi_i, \quad \dot{y}_{2i} = V_i \sin \varphi_i, \quad (1)$$

где  $y_{1i}$   $y_{2i}$  — координаты подвижного объекта;  $V_i$  — скорость подвижного объекта;  $\varphi_i$  — угол курса подвижного объекта;  $i = \overline{1, n}$ .

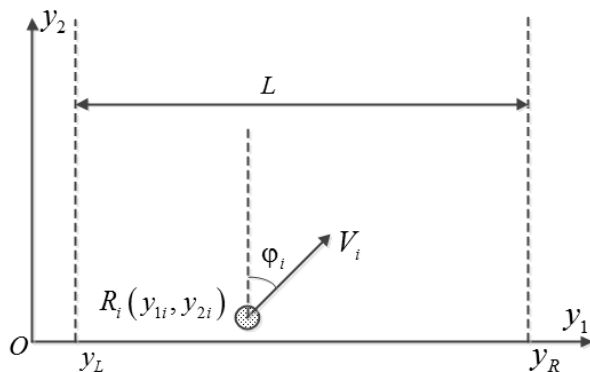


Рис. 1. Параметры подвижного объекта

Положение подвижного объекта характеризуется координатами  $y_{1i}$   $y_{2i}$ . Скорость  $V_i$  и курсовой угол  $\varphi_i$  являются управлениями. Каждый подвижный объект имеет информацию о координатах  $y_L$   $y_R$  области  $L$ , в которой функционирует группа [9]. Число  $n$  подвижных объектов в группе может быть неизвестным. Ставится задача перемещения группы, состоящей из нескольких подвижных объектов, от начальной координаты к конечной координате, осуществляя при этом обход препятствий, встречающихся на пути.

В рамках задачи область, в которой движутся подвижные объекты, представлена в виде сетки-графа. Роль препятствий на пути движения подвижного объекта (ПО) играют отсутствующие ребра и/или вершины, в зависимости от размеров и формы препятствия. Этот подход может использоваться в сочетании с картографированием, что дает возможность роботу двигаться по заранее заданной траектории [10].

Аналогичный способ представления области функционирования ПО применяется при анализе траекторий движения людей [11], облете препятствий в воздухе, перемещении груза автокранами [12] и в различных задачах с использованием мультиагентных технологий. В вышеперечисленных работах подчеркивается, что для решения задачи кратчайшего пути наиболее часто используются алгоритмы Дейкстры, Беллмана-Форда и  $A^*$ .

Таким образом, ставится задача сравнения трех графоаналитических методов:

1. метода, сочетающего модель кинематики ПО (1) и алгоритм Дейкстры [13];
2. метода, сочетающего модель кинематики ПО (1) и алгоритм Беллмана-Форда [14];
3. метода, сочетающего модель кинематики ПО (1) и алгоритм  $A^*$  [15-16].

Критерием сравнения данных методов будет выступать время, за которое подвижные объекты доберутся до конечной точки.

**3. Компьютерное моделирование работы алгоритмов.** Эксперимент был проведен с помощью средств языка программирования Python, используя библиотеку для работы с графами networkx [17].

В эксперименте описывалось три робота (подвижных объекта). Их модели кинематики описываются уравнениями (1).

В качестве поля был выбран граф величиной  $25 \times 25$  вершин. Каждый метод проведен 100 экспериментов, результаты которых использовались для формирования среднего значения времени прохождения траектории. Точки старта и финиша в каждом из 100 экспериментов изменялись, но находились в одной области (точки старта не далее, чем на одну вершину друг от друга, точки финиша соответственно). Были заданы и координаты препятствий.

При старте программы инициализируются роботы. Задаются их начальные координаты и координаты точки назначения. После этого происходит создание графа. Задаются его размеры, координаты препятствий с последующим их созданием на готовом графе. Создание препятствий представляет собой удаление вершин графа и ребер ее с графом соединяющих. Далее происходит поиск и построение оптимальной траектории движения для роботов. После отображается пройденная роботами траектория.

На рисунке 3 представлен граф с созданными препятствиями, среди которых роботам предстоит искать траекторию движения. Также на рисунке 4 представлены вариации прохождения пути тремя роботами от начальных вершин к конечным. Для того чтобы различить траектории роботов на рисунке, можно опираться на маркеры, обозначающие данные траектории. Подробное описание маркеров приведено на рисунке 2.





-  - точка финиша
-  - траектория первого робота
-  - траектория второго робота
-  - траектория третьего робота

Рис. 2. Маркеры обозначений траекторий роботов

Отсутствующие вершины являются препятствиями, выбранными заранее и неизменными в рамках эксперимента.

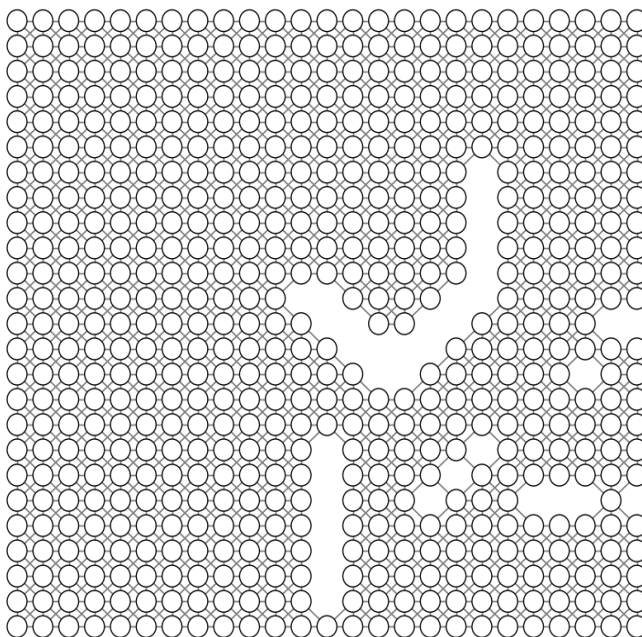


Рис. 3. Граф с препятствиями

Также следует отметить, что расстояние между соседними вершинами одинаково независимо от их взаимного расположения. Таким

образом, расстояние, проходимое по диагонали равно расстоянию, проходимому строго вдоль одной из осей.

Движение роботов происходит благодаря перемещению через вершины по связывающим их ребрам. Следовательно, препятствия, являющиеся собой отсутствующие узлы, уничтожают также и ребра, связывающие их с остальным графом, не позволяя роботу пройти напрямую через препятствие. Так при отсутствии возможности перемещения робот ищет обходной путь, чтобы миновать препятствие.

Для нахождения оптимального пути происходит вычисление траектории от точки старта к точке финиша. Вычисляется длина получившейся траектории и сравнивается с предыдущей. И если новый путь короче, то он и становится приоритетным. Таким образом, подбором вычисляется наиболее короткий путь для каждого отдельного робота, тем самым сокращая суммарную траекторию движения роботов. Так происходит до момента перебора всех возможных путей. Далее представлен процесс выбора оптимальной траектории для робота. Происходит перебор различных траекторий до момента нахождения оптимальной. На рисунке 4 представлены траектории движения роботов по полю от стартовой точки к конечной точке.

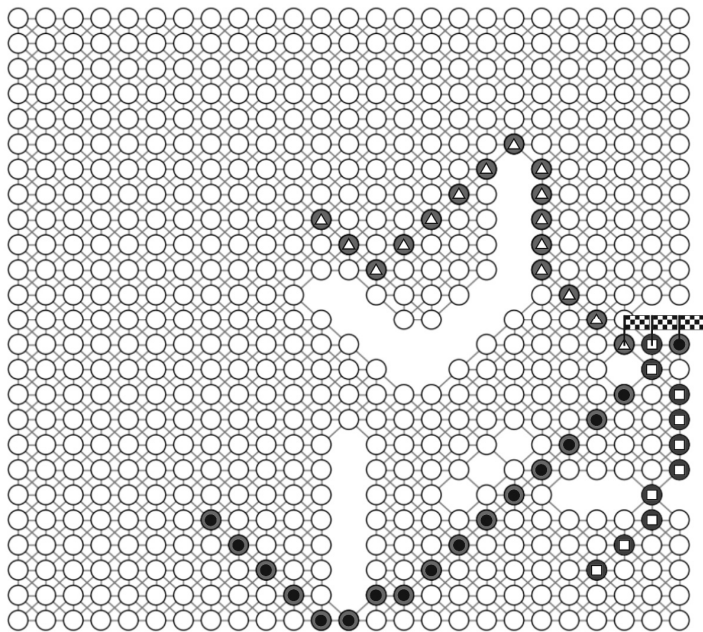


Рис. 4. Пример траектории движения роботов

Далее на рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма работы программы, созданной для проведения эксперимента.



Рис. 5. Блок-схема работы программы

Модуль path используется для поиска и построения оптимального пути. Описание структуры программы приводится на рисунке 6.

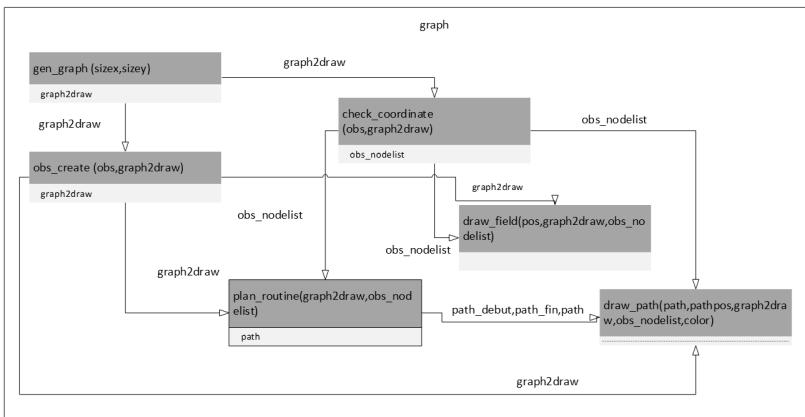


Рис. 6. Описание структуры программы

В результате проведенного эксперимента было выявлено время, затрачиваемое на поиск и построение оптимальной траектории движения трех роботов для трех различных алгоритмов. В процессе эксперимента оставались неизменными препятствия на поле и размеры графа. На рисунках 7-9 приведены графики, где  $t$  — потраченное на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения, и  $n$  — номер эксперимента. Каждый график связан с определенным алгоритмом.

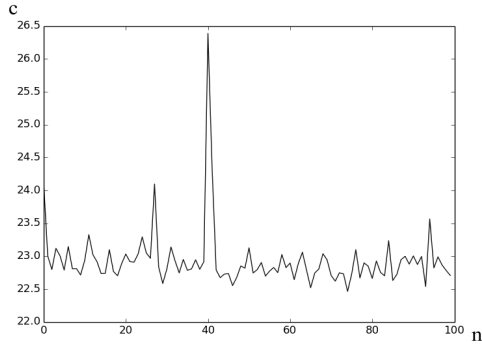


Рис. 7. Данные о времени, затрачиваемом на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения с использованием алгоритма Дейкстры

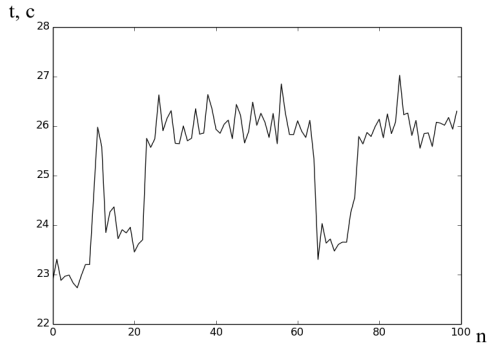


Рис. 8. Данные о времени, затрачиваемом на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения с использованием алгоритма A\*

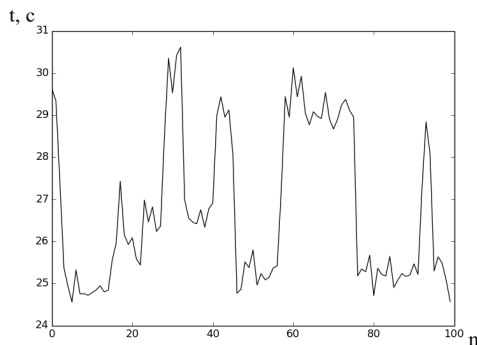


Рис. 9. Данные о времени, затрачиваемом программой на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения с использованием алгоритма Беллмана-Форда

**4. Анализ результатов эксперимента.** На графиках (рисунках 7-9) показаны значения времени для каждого из алгоритмов. На основании этих графиков можно сделать вывод о среднем времени движения группы роботов по траекториям, рассчитанным при помощи алгоритмов. Данное время будет равным:

- алгоритм Дейкстры –  $22,487 \pm 0,0548$  сек (при доверительной вероятности 0,95);
- алгоритм A\* –  $24,7994 \pm 0,0948$  сек (при доверительной вероятности 0,95);
- алгоритм Беллмана-Форда –  $25,284 \pm 0,0305$  сек (при доверительной вероятности 0,95).

Исходя из полученных данных, видно, что затрачиваемое на поиск оптимального пути время меньше у метода с использованием алгоритма Дейкстры, что говорит преимуществе данного алгоритма перед другими представленными. Однако разница во времени между алгоритмами в среднем от 1 до 2 секунд, что не слишком много.

Данные алгоритмы, как уже было сказано, часто используются для решения задач планирования траектории или поиска пути. В работе [12] осуществлялся поиск оптимального пути перемещения груза автокраном, в ней сравнивались методы с применением алгоритмов Беллмана-Форда и Дейкстры. Изначально в эксперименте итоговый путь, рассчитанный с помощью алгоритма Дейкстры, был длиннее на 7-11%. Однако после оптимизации результаты по алгоритму Беллмана-Форда стали на 2-3% хуже, чем по алгоритму Дейкстры. Авторы назвали разницу в пути незначительной, такую же оценку можно найти в работе [18].

Аналогичная нашему случаю карта, использовалась в работе [11] с целью моделирования движения людей. Было указано, что алгоритм Дейкстры в таких условиях предпочтительнее алгоритма Беллмана-Форда. В условиях же города, где область больше по размеру и с большим количеством препятствий [19] алгоритм Беллмана-Форда дает выигрыш во времени при условии, что число вершин  $n$  больше числа ребер  $m$  графа ( $n > m$ ), что обуславливает использование его в механических транспортных системах [20]. При большей сложности графа, более эффективным является алгоритм A\* [21]. Он дает кратное числу вершин  $n$  уменьшение вычислительной сложности поиска.

Таким образом, результаты поставленного эксперимента согласуются с работами ученых, что позволяет сделать вывод об эффективности метода, использующего алгоритм Дейкстры перед другими алгоритмами, рассмотренными в работе.

**5. Заключение.** В статье предложены и проанализированы графоаналитические методы планирования траектории группы подвижных объектов. Методы отличаются использованием модели кинематики подвижных объектов в группе и одного из трех алгоритмов: алго-



ритм Дейкстры, алгоритм Беллмана-Форда и алгоритм A\*. При помощи программы, реализованной средствами среды программирования Python, в частности благодаря библиотеке network, было проведено 100 экспериментов, каждый из которых предоставлял данные о времени, затрачиваемом на построение и прохождение кратчайшей траектории от начальных к конечным точкам роботов. В результате полученных данных был сделан вывод об эффективности алгоритма Дейкстры перед остальными, представленными в работе, что подтверждает данные, получаемые другими учеными.

Графоаналитический метод, использующий алгоритм Дейкстры и показавший лучший результат, может применяться в разработке траекторий групп роботов в условиях противодействия.

### Литература

1. Чернухин Ю.В., Пишихов В.Х., Писаренко С.Н., Трубочев О.Е. Программная среда для моделирования поведения адаптивных мобильных роботов с двухуровневой системой управления // Мехатроника. 2000. № 6. С. 26–30.
2. Алфимов С.М. Перспективные направления развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 2. С. 2–5.
3. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. Москва. 2014. С. 19.
4. Пишихов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами // Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. 183 с.
5. Гузик В.Ф. и др. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под редакцией В.Х. Пишихова // М.: Физматлит. 2014. 350 с.
6. Macek K., Petrovic I., Ivanjko E. An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots // In Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology. 2003. pp. 969–973.
7. Stentz A et. al. The Focussed D\* Algorithm for Real-Time Replanning // In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1995. vol. 95. pp. 1652–1659.
8. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // М.: Препринт Института прикладной математики АН СССР. 1974. 27 с.
9. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах // М.: Наука. 2011. 350 с.
10. Pozna C., Precup R.E., Kocsy L.T., Ballagi A. Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories // The IPSI Bgd Transactions on Inter-net Research. vol. 8. no 2. 2002. pp. 40–45.
11. Попел Е.В. Обработка информации о поле расстояний в задаче моделирования движения людей // Перспективы развития информационных технологий. 2012. № 10. С. 20–25.
12. Щербатов В.С., Корытов М.С. Использование алгоритмов поиска пути перемещения груза автокраном на графах // Вестник ВГТУ. 2009. № 5. С. 37–41.
13. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische mathematik. 1959. vol. 1. no. 1. pp. 269–271.
14. Bellman R. On a Routing Problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1958. vol. 16. no. 1. pp. 87–90.

15. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. no. 2. pp. 100–107.
16. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. Correction to «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths» // SIGART Newsletter. 1972. vol. 37. С. 28–29.
17. Hagberg A., Schult D., Swart P. NetworkX Reference Release 1.11 URL: <https://media.readthedocs.org/pdf/networkx/stable/networkx.pdf>. (Дата обращения: 31.01.16).
18. Кинер А.В., Станкевич Т.С. Система для выбора кратчайшего безопасного маршрута спасения людей из горящего здания на территории морского порта // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 144–152.
19. Сундетов Р.Н., Есламгалиев Т.Н. Обоснование выбора алгоритма поиска оптимального пути с расчетом показателей светофора в городской сети // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. № 5(29). С. 133–137.
20. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженюк А.В., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 5(154). С. 161–167.
21. Дубовик Н.Н., Лавров А.В., Ногин О.А., Туманов В.М. Анализ методов пространственной навигации и трассировки маршрутов с линейными ограничениями // МНИЖ. 2015. № 11–2(42). С. 35–42.

## References

1. Chernukhin Yu.V., Pshikhopov V.H., Pisarenko S.N., Trubachev O.E. [The program environment for modeling of adaptive mobile robots behavior with a two-level control system]. *Mehatronika – Mechatronics*. 2000. vol. 6. pp. 26–30. (In Russ.).
2. Alfimov S.M. [The perspective directions of development of basic military technologies in the field of creation of control systems and information processing]. *Mehatronika, avtomatizacija i upravlenie – Mechatronics, automation and control*. 2008. no. 2. pp. 2–5. (In Russ.).
3. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. [Mobile robots: problems of management and optimization of movements]. *Trudy XII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija* [Proceedings of the XII Russian Meeting On Problems Of Management]. Moscow. 2014. p. 19. (In Russ.).
4. Pshikhopov V. H. *Mobil'nye roboty: problemy upravlenija i optimizacii dvizhenij* [Position and trajectory control of mobile objects]. Taganrog. TTI SFU. 2009. 183 p. (In Russ.).
5. Guzik V.F. et al. *Intellektual'noe planirovanie traektorij podvizhnyh ob'ektov v sredah s prepjatsvijami* [Intellectual planning of mobile objects trajectories in environments with obstacles]. Ed. by V.H. Pshikhopov. Fizmatlit. 2014. 350 p. (In Russ.).
6. Macek K., Petrovic I., Ivanjok E. An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots. In Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology. 2003. pp. 969–973.
7. Stentz A et al. The Focussed D\* Algorithm for Real-Time Replanning. In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1995. vol. 95. pp. 1652–1659.
8. Platonov A.K., Karpov I.I., Kirilchenko A.A. *Metod potencialov v zadache prokladki trassy* [Method of potential in a problem of the route laying]. M.: Preprint Instituta prikladnoj matematiki AN SSSR. 1974. 27 p. (In Russ.).
9. Pshikhopov V. H., Medvedev M.Yu. *Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennyh i neopredelennyh sredah* [Mobile objects control in certain and uncertain environments]. M.: Nauka. 2011. 350 p. (In Russ.).
10. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A. Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories. *The IPSI BgD Transactions on Inter-net Research*. vol. 8. no. 2. 2002. pp. 40–45. (In Russ.).

11. Popel E.V. [Information processing about the field of distances in a problem of the people movement modeling]. *Perspektivy razvitiya informacionnyh tehnologij – Prospects of development of information technologies*. 2012. vol. 10. pp. 20–25. (In Russ.).
12. Scherbakov V.S., Korytov M.S. [Use of algorithms of search of a way of movement of freight by the truck crane on columns]. *Vestnik VGTU – The VGTU Vestnik*. 2009. vol. 5. pp. 37–41. (In Russ.).
13. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*. 1959. vol. 1. no. 1. pp. 269–271.
14. Bellman R. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1958. vol. 16. no. 1. pp. 87–90.
15. Hart P.E., Nilsson N. J. Raphael B. A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. vol. 2. pp. 100–107.
16. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. Correction to «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths». *SIGART Newsletter*. 1972. vol. 37. C. 28–29.
17. Hagberg A., Schult D., Swart P. NetworkX Reference Release 1.11 Available at: [www.media.readthedocs.org/pdf/networkx/stable/networkx.pdf](http://www.media.readthedocs.org/pdf/networkx/stable/networkx.pdf). (accessed 31.01.16).
18. Kiper A.V., Stankievich T.S. [Sistem for the choice of the shortest safe route of rescue of people from the burning building in the seaport territory]. *Vestnik AGTU. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – The AGTU Vestnik. Management, computer facilities and informatics*. 2013. vol. 2. pp. 144–152. (In Russ.).
19. Sundetov R. N., Eslamgaliyev T.N. [Search algorithm choice justification of an optimum way with calculation of indicators of the traffic light in a city network]. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire – Natural and mathematical sciences in the modern world*. 2015. vol. 5(29). pp. 133–137. (In Russ.).
20. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savelyeva M. N [Optimization of streams in transport systems]. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki – Izvestya of SFedU. Technical science*. 2014. vol. 5(154). pp. 161–167. (In Russ.).
21. Dubovik N. N., Lavrov A.V., Nogin O. A., Tumanov V. M. [The analysis of methods of spatial navigation and trace of routes with linear restrictions]. *MNIZh – International Research Journal*. 2015. vol. 11–2 (42). pp. 35–42. (In Russ.).

**Лазарев Владимир Сергеевич** — магистр, Южный Федеральный Университет, аспирант. Область научных интересов: Групповое управление подвижными объектами. Число научных публикаций — 23. [vlazarev@sfedu.ru](mailto:vlazarev@sfedu.ru); 347928, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, улица Шевченко, 2; р.т.: (8634) 37-16-94.

**Lazarev Vladimir Sergeyevich** — Magistry, SFedu, Southern Federal University. Research interests: Vehicles robot group control. The number of publications — 23. [vlazarev@sfedu.ru](mailto:vlazarev@sfedu.ru); 347928, Rostov Region, Taganrog, GSP-17A, Shevchenko Street, 2; office phone: (8634) 37-16-94.

**Агаджанов Давид Эдуардович** — магистрант, Южный Федеральный Университет. Область научных интересов: Робототехника и процессы управления. [tz2403@gmail.com](mailto:tz2403@gmail.com); 347928, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, улица Шевченко, 2; р.т.: (8634) 37-16-94.

**Agadjanov David Eduardovich** — master student, SFedu, Southern Federal University. Research interests: Robotics and control. [tz2403@gmail.com](mailto:tz2403@gmail.com); 347928, Rostov Region, Taganrog, GSP-17A, Shevchenko Street, 2; office phone: (8634) 37-16-94.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00703 мол\_а.

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR according to the research project No.16-38-00703 мол\_а.

## РЕФЕРАТ

### *Лазарев В.С., Агаджанов Д.Э.* **Использование графоаналитических методов для формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде.**

Рассматривается задача формирования траекторий движения группы подвижных объектов, функционирующих в двумерной среде с неподвижными препятствиями. Для решения этой задачи можно использовать графоаналитические методы. При использовании данных методов область, в которой движутся подвижные объекты, представляется в виде графа. Каждое препятствие на пути объекта создается удалением обозначенных вершин и ребер этого графа. В качестве основы методов для формирования траектории движения подвижных объектов группы используются алгоритмы Дейкстры, Беллмана-Форда и  $A^*$ , взятые на основе анализа литературных источников как наиболее часто используемые. Поставлен эксперимент, включающий компьютерное моделирование методов формирования траектории для группы из однородных подвижных объектов и некоторого количества препятствий различной формы. Моделирование было проведено средствами среды разработки Python Shell, в частности, при использовании библиотеки networkx. Данная библиотека включает в себя функции по работе с графами, в том числе и для нахождения пути по алгоритмам Дейкстры, Беллмана-Форда и  $A^*$ . Результатами моделирования являются данные о времени движения группы подвижных объектов по траекториям, разработанным при помощи алгоритмов. Эксперимент включал 100 итераций моделирования для построения диаграмм средних значений затрачиваемого времени по каждому из алгоритмов. На основании данных результатов моделирования произведено сравнение методов, в качестве критерия использовалось время движения группы подвижных объектов. Данное сравнение позволило сделать вывод об эффективности различных методов решения задачи, заключающейся в построении траектории движения для группы подвижных объектов, и помогло выявить наиболее оптимальный из методов.

## SUMMARY

### *Lazarev V.S., Agadjanov D.E.* **Using Graphic-Analytical Methods for Robots Group Movement Trajectories Formation in the Two-Dimensional Environment.**

The problem of movement trajectories formation of a vehicle robots group, functioning in the two-dimensional environment with motionless obstacles, is considered. For the solution of this task, it is possible to use graphic-analytical methods. When using these methods, the area, in which vehicle robots move, is presented in the form of a graph. Each obstacle in a way of the object is created by the removal of nodes and edges of this graph. Dijkstra's algorithms, Bellman-Ford and A\*, taken according to the analysis of references as the most often used, are used as a basis for methods of forming robots group movement trajectories. The experiment was conducted, including computer modeling of trajectory formation methods for a uniform robots group and obstacles of various forms. Modeling has been carried out by means of the Python Shell development environment, in particular, using networkx library. This library includes functions for work with columns, including for finding a way according to Dijkstra's, Bellman-Ford and A\* algorithms. Results of modeling are data on time of vehicle robots group movement on trajectories developed by means of the algorithms. The experiment included 100 iterations of modeling for creation of charts of the average values of time spent by each of the algorithms. Based on these modeling results, a comparison of methods was made; the average time of vehicle robots group movement was used as a criterion. This comparison has allowed drawing a conclusion about the efficiency of various methods. In addition, this comparison has allowed revealing the most optimum of the methods.