

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТОДОВ ТРАССИРОВКИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА И АЛГОРИТМА A\* ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЯМ

На примере двух характерных расположений объектов промышленных предприятий и использования окрестностей фон Неймана и Мура для волнового алгоритма и алгоритма A\* проведен анализ влияния методов трассировки и размера дискретного рабочего поля на процент его охвата, на расположение трасс и на затраты времени вычислений. Установлено, в частности, что на траекторию расположения трасс влияет не только метод их синтеза, но, в некоторых случаях, и принятый размер сетки дискретного рабочего поля. Выявлена зависимость времени вычислений от размера сетки. Приведены диаграммы длин трасс, полученных при различных методах трассировки и размерах сетки.

Вычислительные эксперименты проводились на дискретном рабочем поле с размерами сетки 40, 20, 10, 5, 2 и 1 пиксель.

**Ключевые слова:** волновой алгоритм, алгоритм A\*, окрестность фон Неймана, окрестность Мура, расположение трасс, время трассирования.

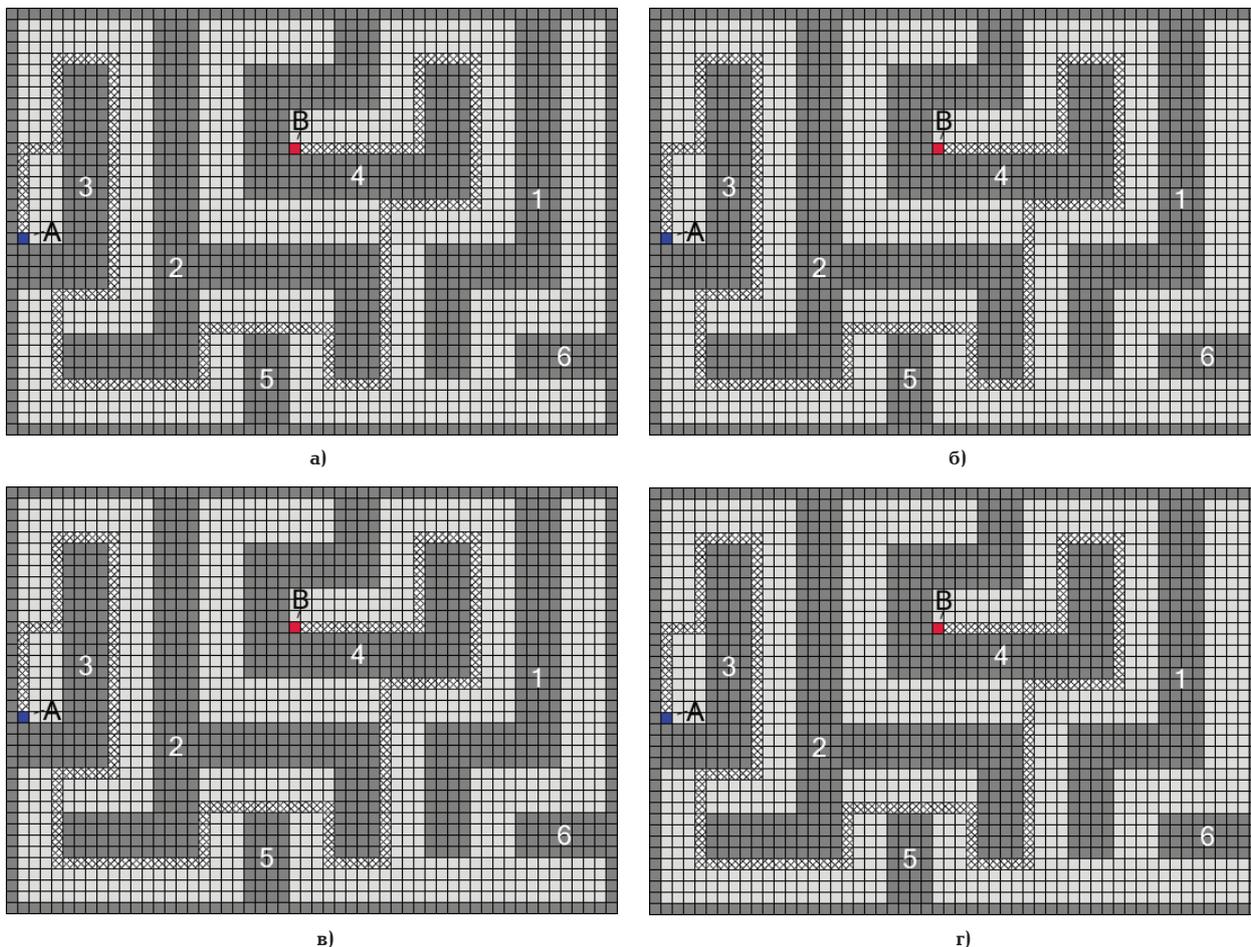
Волновой алгоритм, предложенный в начале второй половины XX века Ли и Муром [1, 2], широко используется для решения различных теоретических и прикладных задач, касающихся оптимальной прокладки трасс между объектами различного назначения. Достаточно большое распространение в науке и технике получили также алгоритмы под общим названием A\* (A звезда) [3–6] и так называемый лучевой алгоритм [7]. В частности, большое распространение они нашли при проектировании радиоэлектронных устройств [7, 8] и др.

В последнее время были предложены методы использования модификаций упомянутых алгоритмов для поиска оптимальных план-трасс каналов связи автоматизированных систем управления [9], трубных проводок между технологическим внутрицеховым оборудованием химико-технологических систем [10, 11] и охранных зон проектируемых ЛЭП [12].

Известны реализации названных алгоритмов в различных автоматизированных системах проектирования, таких как PCAD, OrCAD, TopoR [13, 14], Cadence Virtuoso [15], Графика – TP [16, 17] и другие.

В упомянутых и многих других публикациях используемые разновидности алгоритмов применяются для проектирования трасс при тех или иных конкретных предъявляемых к ним (трассам) требованиях. Одним из важных критериев оценки того или иного алгоритма трассировки является время, затрачиваемое на поиск оптимальной по длине трассы. Как правило, при достаточно сложных схемах поиск таких трасс требует достаточно больших временных затрат. Предлагаемые модификации волнового алгоритма направлены, кроме прочего, на сокращение площади, анализируемой в процессе поиска такой трассы, полагая, что сокращение площади охвата должно привести к уменьшению времени поиска. Таким подходом вызвано появление алгоритма A\* [3–6] и лучевого алгоритма [7]. Одним из способов решения проблемы сокращения времени трассировки является распараллеливание вычислений с использованием многопроцессорной техники [10].

В данной статье на примере двух характерных расположений препятствий проведены исследования основных качественных характеристик методов синтеза кратчайших трасс, основанных



**Рис. 1. Лабиринтообразное расположение объектов — методы трассировки:**  
 а) и б) — волновой алгоритм с использованием окрестностей соответственно фон Неймана и Мура;  
 в) и г) — алгоритм A\* с использованием окрестностей соответственно фон Неймана и Мура

на волновом алгоритме и его разновидности алгоритма A\* с использованием окрестностей фон Неймана и Мура.

В первом примере в качестве тестового принято расположение зданий и сооружений предприятия (препятствий) лабиринтообразного достаточно замкнутого типа (рис. 1), а во втором — более обособленное их расположение (рис. 2). Вычислительные эксперименты велись применительно к прокладке одной трассы в направлении от точки A одного объекта к точке B другого (рис. 1, 2).

Для исследования в качестве базовых приняты следующие четыре метода:

- волновой алгоритм с использованием окрестностей фон Неймана;
- волновой алгоритм с использованием окрестностей Мура;
- алгоритм A\* с использованием окрестностей фон Неймана;
- алгоритм A\* с использованием окрестностей Мура.

При проектировании трасс внешних кабельных и трубных проводок промышленных предприятий с применением методов, основанных на волновых алгоритмах, возможно использование сеток дискретного рабочего поля с различными размерами ее клеток (при вычислительных экспериментах размеры клеток дискретного рабочего поля удобно задавать в пикселях). Малые размеры клеток можно рекомендовать при проводке кабелей и труб небольших диаметров или при определении осевых

линий трасс, большие — при решении вопроса о расположении сооружений эстакадного и траншейного типа.

В данной работе исследования траектории трасс проводились при размерах клеток, равных 40, 20, 10, 5, 2 и одному пикселю. На рис. 1 и 2 приведены, как наиболее наглядные, результаты трассировок при размере клеток (ячеек) дискретного рабочего поля, равном 10 пикселям (клетки, соответствующие траектории, на рисунках выделены штриховкой).

В зависимости от взаиморасположения объектов размеры клеток сетки дискретного поля в некоторых случаях достаточно заметно влияют на траекторию трассы, а в некоторых — такого влияния не оказывают. Так, при лабиринтообразном расположении объектов траектории трассы, полученные волновым методом с использованием окрестностей фон Неймана, при различных размерах клеток сетки в принципе совпадают. Величина клеток, естественно, влияет на поперечный размер трасс. Именно этим объясняется некоторая разница в расположении трасс: при размере клеток в 40 пикселей траектория между точками A и B занимает в нашем примере всю площадь между объектами, а при меньших размерах — она проходит в основном вдоль объектов (рис. 1а). Такое же поведение трасс наблюдается для лабиринтообразного расположения и для остальных трех методов трассировки.

При сравнении волнового алгоритма и алгоритма A\* в случае использования окрестностей фон Неймана можно отметить достаточную близость

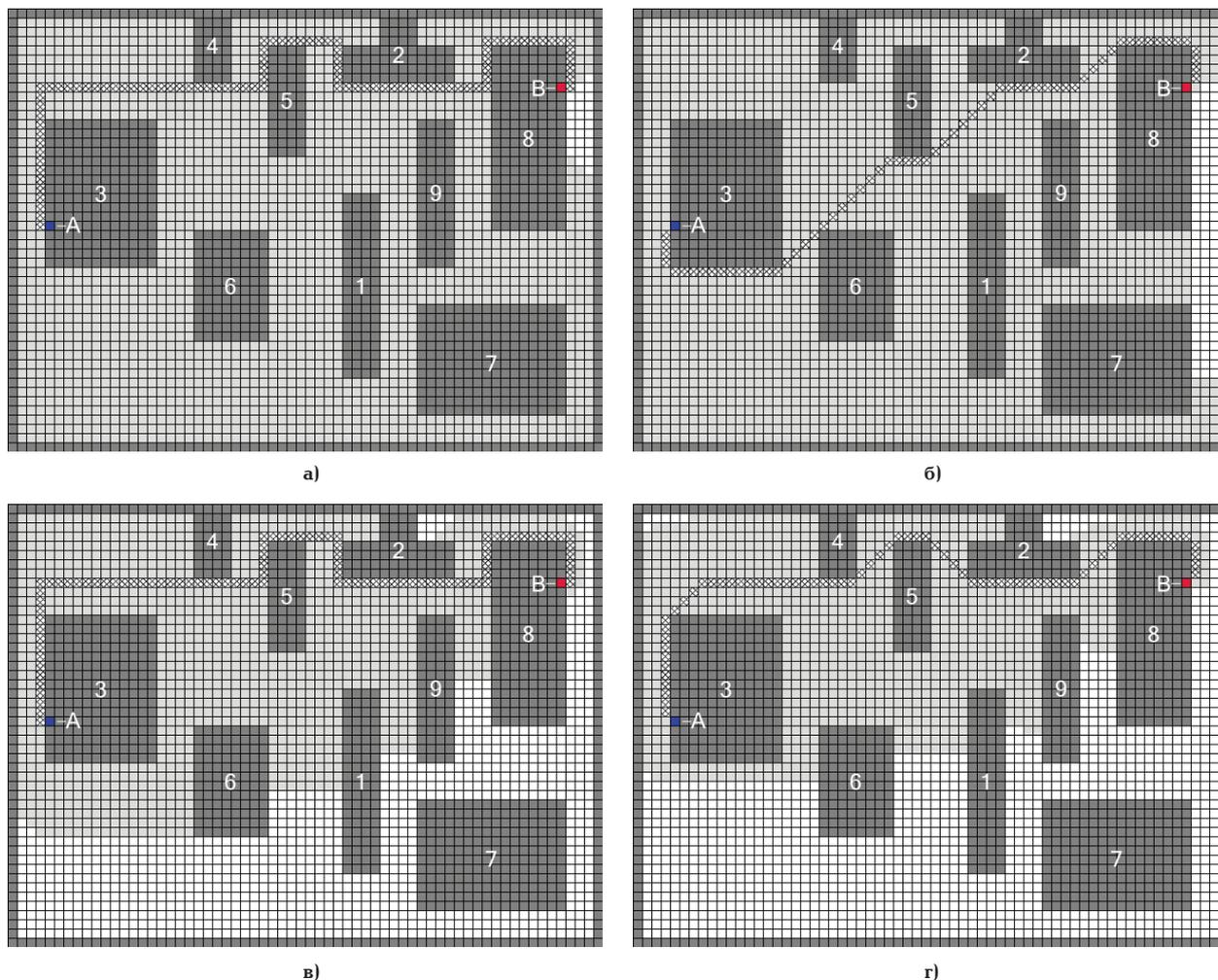


Рис. 2. Обособленное расположение объектов — методы трассировки:  
 а) и б) — волновой алгоритм с использованием окрестностей соответственно фон Неймана и Мура;  
 в) и г) — алгоритм A\* с использованием окрестностей соответственно фон Неймана и Мура

получаемых траекторий (рис. 1а и в). Небольшое отличие наблюдается при подходе трассы к объекту 2 от объектов 3 и 5, что объясняется свойствами алгоритма A\*.

Трассы, получаемые на основе окрестностей Мура (рис. 1б и г), для лабиринтообразного расположения также в основном схожи с полученными на основе окрестностей фон Неймана с учетом, конечно, того, что траектории в окрестностях Мура имеют возможность проходить под углом 45 угловых градусов. Сопоставление рис. 1а и 1в с рис. 1в и 1г показывает, что алгоритм A\* обеспечивает прокладку трасс по кратчайшему пути. Следует отметить (рис. 1а, б), что волновой алгоритм и с использованием окрестностей Мура, и с использованием окрестностей фон Неймана обеспечивает движение к объекту 3 с одной и той же клетки.

Сравнение трасс, синтезированных с применением окрестностей Мура на основе волнового алгоритма и алгоритма A\* (рис. 1б, г) показывает их практически полное совпадение. Незначительное различие наблюдается на участке траектории от исходной точки А до объекта 3.

Следует заметить, что возникающие различия в траекториях в рассматриваемом случае не влияют на ее протяженность (с учетом, конечно, свойств окрестностей фон Неймана и Мура).

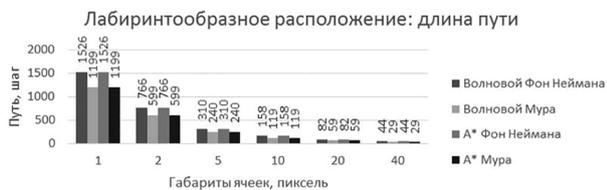
При синтезе трасс для второго случая более обособленного расположения объектов (рис. 2) на рас-

положение трасс повлияло как различие в методах трассировки, так и размеры клеток дискретного рабочего поля. Основные различия наблюдались при обходе объектов 3 и 5 (рис. 2).

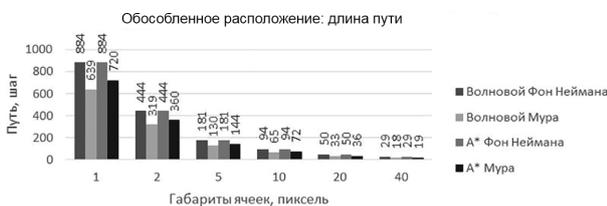
В случае использования окрестностей фон Неймана и волновой алгоритм, и алгоритм A\* обеспечивают смену траектории трассы при одинаковых размерах клеток сетки: при размерах клеток в 40 пикселей траектория проходит над объектом 3 и под объектом 5, при размерах клеток в 20, 10 и 5 пикселей — над объектом 3 и над объектом 5 (рис. 2а, в), а при размерах клеток в 2 и 1 пиксель — под объектами 3 и 5.

При применении окрестностей Мура в случае волнового алгоритма трасса располагается под объектами 3 и 5 (рис. 2б), а в случае алгоритма A\* — над этими объектами (рис. 2г).

Важной количественной характеристикой методов трассировки является обеспечиваемая ими длина трасс. Понятно, что сопоставление длин траекторий трасс будет корректно только для дискретных рабочих полей с одинаковым размером клеток. Из рис. 3а видно, что, несмотря на ранее отмеченную некоторую разницу в конфигурации траекторий при лабиринтообразно расположенных объектах, длина траекторий трасс для всех размеров ячеек оказывается с точностью до пикселя одинаковой для окрестностей фон Неймана, полученных как на основе волнового алгоритма, так

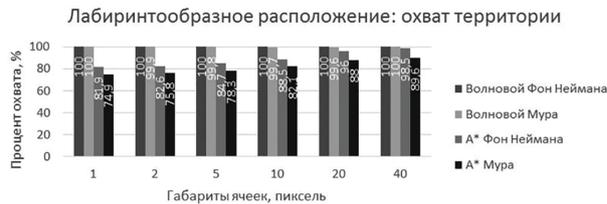


а)

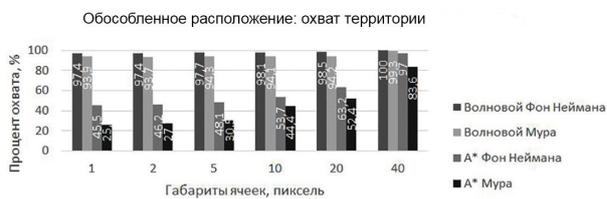


б)

Рис. 3. Диаграммы длин трасс

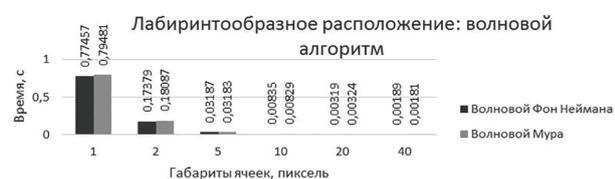


а)

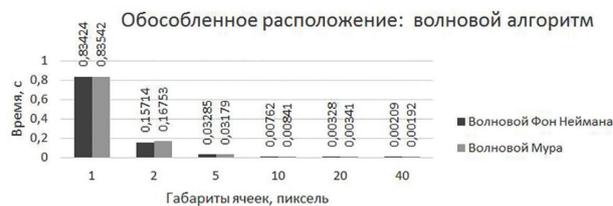


б)

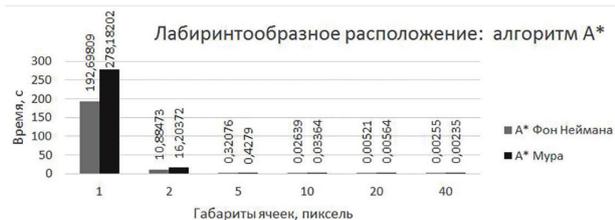
Рис. 4. Диаграммы охвата площади территории



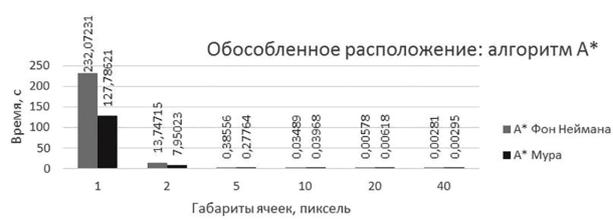
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Диаграммы длительности вычислительного процесса

и на основе алгоритма A\*. Это утверждение справедливо также для окрестностей Мура и для окрестностей фон Неймана при синтезе траекторий с обособленным расположением объектов (рис. 3б). Для этого расположения объектов алгоритм A\* при использовании окрестностей Мура синтезирует траекторию несколько более длинную (на 5–11%), чем волновой при всех размерах ячеек сетки (рис. 3б).

При сопоставлении волнового алгоритма и алгоритма A\* одним из критериев является площадь охвата территории дискретного рабочего поля в процессе поиска кратчайшего пути. Собственно, алгоритм A\* был предложен как метод, позволяющий существенно сократить анализируемую в ходе поиска площадь поля и тем самым уменьшить время вычислений.

В рассматриваемых в данной статье примерах показано, что волновой алгоритм практически при всех размерах ячеек и принятых для исследования методов, как в случае лабиринтообразного (рис. 4а), так и в случае обособленного (рис. 4б) расположения объектов предприятия в ходе поиска трассы наименьшей длины охватывает практически 100 процентов территории дискретного поля.

Более сложная зависимость наблюдается при использовании алгоритма A\*. Прежде всего следует

отметить, что во всех рассмотренных случаях площадь охвата территории по сравнению с волновым алгоритмом меньше. Наблюдается закономерность увеличения разницы между ними с уменьшением размера ячеек сетки: если при размерах ячеек в 40 пикселей это разница сравнительно невелика и охват площади незначительно отличается от 100 процентов, то при размерах ячеек в один пиксель процент охвата уменьшается практически до 26 и 46 процентов (сравнение степени охвата площади для дискретного поля с ячейками в 10 пикселей можно сделать по рис. 1 и 2).

Вторым важным критерием оценки метода трассировки является время вычислительного процесса, необходимое для поиска кратчайшего пути между соединяемыми точками.

Проведенные численные эксперименты показали (рис. 5), что время трассировки во всех рассмотренных случаях увеличивается с уменьшением размера ячеек поля, что вполне объяснимо и связано с уменьшением шага вычислений. При использовании волнового алгоритма отмечается примерное равенство времени вычислений для ячеек всех размеров как на основе окрестностей фон Неймана, так и на основе окрестностей Мура (рис. 5а, б). Применение алгоритма A\* показало заметную разницу

во времени в зависимости от вида окрестностей (рис. 5в, г), колеблющуюся в пределах примерно от 1,05 до 1,8 раза. При этом разница в затратах времени увеличивается с уменьшением размера ячеек. Синтез трасс в лабиринтообразном расположении объектов потребовал большее время при применении окрестностей Мура (рис. 5в), а синтез трасс для другого расположения объектов — при применении окрестностей фон Неймана (рис. 5г).

Как уже отмечалось, одной из целей разработки алгоритма  $A^*$  являлось уменьшение вычислительного времени за счет сокращения площади дискретного рабочего поля, подвергающейся анализу в ходе поиска кратчайшей трассы, путем включения в анализ только точек, ближайших к финишной. Однако необходимо иметь в виду, что при этом достаточно простой волновой алгоритм требуется оснастить дополнительным алгоритмом для отбора таких точек. Реализация логических операций дополнительного алгоритма требует заметных затрат машинного времени. Именно этим, по нашему мнению, объясняется тот факт, что в вычислительных экспериментах данной работы использование алгоритма  $A^*$  потребовало больших затрат времени на поиск кратчайшей трассы, чем классический волновой (рис. 5).

В заключение отметим, что при использовании рассматриваемых алгоритмов трассировки (волнового и  $A^*$ ) следует иметь в виду, что их использование в при различных условиях синтеза (в частности, по размеру ячеек дискретного поля, по расположению объектов на территории предприятия) может дать отличные друг от друга трассы как по длине, так и по траектории. В связи с этим при проектировании трасс, с нашей точки зрения, целесообразно выполнить несколько численных экспериментов различными методами и при различных размерах ячеек дискретного поля и выбрать наиболее подходящий вариант, учитывая, что время одного численного эксперимента, как правило, невелико.

#### Библиографический список

1. Lee C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications // IRE Transactions on Electronic Computers. 1961. Vol. EC-10, Issue 2. P. 364–365.
2. Moore E. F. The Shortest Path through a Maze // Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching. Harvard University Press. 1959. Vol. 2. P. 285–292.
3. Нильсон Н. Искусственный интеллект: методы поиска решений = Problem-solving Methods in Artificial Intelligence / пер. с англ. В. Л. Стефанюка; ред. С. В. Фомина. М.: Мир, 1973. С. 70–80.
4. Dechter R., Pearl J. Generalized best-first search strategies and the optimality of  $A^*$  // Journal of the ACM. 1985. Vol. 32, Issue 3. P. 505–536. DOI: 10.1145/3828.3830.
5. 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 SSC4. 1968. Vol. 4 (2). P. 100–107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
6. 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. P. 28–29.
7. Абрайтис Л. Б. Автоматизация проектирования топологии цифровых интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.
8. Сизова Л. Н. Волновой алгоритм трассировки и пример его реализации // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного

цикла промышленного продукта: сб. стат. междунар. конф. М., 2015. С. 246–248.

9. Абаев Р. К. Об оптимизации план-трасс каналов связи автоматизированных систем управления // Технологии технологической безопасности. 2012. № 4 (44). С. 1–9. URL: <http://academygps.ucoz.ru/ttb/2012-4/2012-4.html> (дата обращения: 12.04.2018).
10. Егоров С. Я., Фурсов И. С., Бойков С. Ю. [и др.]. Разработка алгоритмов трассировки технологических соединений с использованием многопроцессорной техники // Вестник ТГТУ. 2012. Т. 18, № 3. С. 583–587.
11. Черягина Д. И. Обоснование строительства и изыскания трассы трубопровода // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2017. № 18-1. С. 37–39.
12. Трофимов А. А. Метод полевого трассирования охраняемых зон проектируемых ЛЭП относительно магнитных меридианов местного геомагнитного поля // Геодезия и картография. 2015. № 6. С. 9–13.
13. Полубасов О. Трассировка в САПР ТороR – взгляд изнутри // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 6. С. 104–111.
14. Воробьева О. ТороR 6.0: шесть шагов навстречу // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 4 (135). С. 192–199.
15. Шейн В. Ю., Косых А. В., Вольф Р. А. Проектирование топологии цифровых систем методом автоматической трассировки // Наука и молодежь в XXI веке: сб. ст. III Всерос. студ. науч.-техн. конф. Омск, 2017. С. 195–200.
16. Сизова Л. Н. Программный комплекс «Графика – ТР» // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 1. С. 32–36.
17. Разумовский А. И., Сизова Л. Н. Проектирование и трассировка печатных плат с использованием программного комплекса «Графика – ТР» // Информационные технологии. 2010. № 2. С. 56–59.

**ХОМЧЕНКО Василий Герасимович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Автоматизация и робототехника» Омского государственного технического университета.  
SPIN-код: 8385-2139

AuthorID (РИНЦ): 175651  
AuthorID (SCOPUS): 6603880234  
ResearcherID: P-8539-2015

**ЗУГА Игорь Михайлович**, кандидат технических наук, генеральный директор ПАО «ОНХП», г. Омск.  
SPIN-код: 1556-0157  
AuthorID (РИНЦ): 992991  
AuthorID (SCOPUS): 56503925500

**КУЖЕЛЬ Алексей Николаевич**, главный специалист по разработке программного обеспечения ПАО «ОНХП», г. Омск.

**СТРОЕВ Артем Олегович**, инженер отдела информационных технологий ПАО «ОНХП», г. Омск.  
Адрес для переписки: [library@onhp.ru](mailto:library@onhp.ru)

#### Для цитирования

Хомченко В. Г., Зуга И. М., Кужель А. Н., Строев А. О. Исследование качественных показателей методов трассировки на основе волнового алгоритма  $A^*$  применительно к промышленным предприятиям // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 220–224. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-220-224.

Статья поступила в редакцию 30.10.2018 г.

© В. Г. Хомченко, И. М. Зуга, А. Н. Кужель, А. О. Строев