

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НА СКЛАДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Дарья Скворцова,
к.т.н., ассистент кафедры
промышленной логистики,
Московский государственный
технический университет
им. Н.Э. Баумана

Анастасия Федина,
студентка 3-го курса бакалавриата
кафедры промышленной логистики,
Московский государственный
технический университет
им. Н.Э. Баумана

Валерия Кульбацкая,
студентка 3-го курса бакалавриата
кафедры промышленной логистики,
Московский государственный
технический университет
им. Н.Э. Баумана

Дмитрий Ермаков,
студент 5-го курса специалитета
кафедры систем автоматического
управления, Московский
государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана

Аннотация. В работе рассматриваются современные тренды развития логистических систем с учетом технологий Индустрии 4.0. Одним из них является применение беспилотных аппаратов на складах для инвентаризации и доставки. В статье предлагается модель складского помещения с применением беспилотного аппарата – робота-тележки. Описан поиск оптимального маршрута с использованием генетических алгоритмов. Его применение позволяет быстро и точно рассчитать необходимый путь. Для решения написан программный код на языке Python с использованием библиотек Matplotlib и Ortools. Разработанная модель может быть использована на различных предприятиях.

Ключевые слова. Беспилотные аппараты, генетический алгоритм, технологии Индустрии 4.0, логистические системы.

Annotation. The paper examines the current trends in the development of logistics systems, taking into account the technologies of Industry 4.0. One of the current trends is the use of drones in warehouses for inventory and delivery. In the article proposes a model of a warehouse with the use of an unmanned vehicle – a robot cart. This article describes the search for the optimal route of an drones using genetic algorithms. Its application allows you to quickly and accurately calculate the required path. For the solution, the program code is written in Python using the Matplotlib library and Ortools. The result of the program is the minimum route of the robot. The developed model can be used in various enterprises.

Key words. Drones, genetic algorithm, Industry 4.0, logistics systems.

Индустрия 4.0 диктует свои правила ведения бизнеса: компаниям необходимо использовать новые информационные технологии, чтобы оставаться конкурентоспособными. Создание цифровых экосистем возможно только с применением технологий Интернета вещей (Internet of Things, далее – IoT) [1]. Концепция IoT основана на взаимодействии физического мира и виртуального и может включать не только объекты, но и процессы, ин-

формацию, людей. Эти данные могут быть использованы для планирования маршрутов, их оптимизации, управления расходом топлива и прогнозирования будущих потребностей в запасах.

Для повышения эффективности обмена данными используется технология блокчейн, которая позволяет повысить скорость и надежность транзакций [2]. Оцифровка активов, использование смарт-контрактов и криптовалюты поддерживает торго-

вую среду, свободную от посредников, с полной прозрачностью и доверием стейкхолдеров [3]. Использование IoT совместно с блокчейном создают основу цифровых цепочек поставок (Digital Supply Chains, далее – DSC) [4], а также позволяют снижать издержки за счет более точной обработки больших объемов данных из большого числа источников [5].

Идею цифровых складов поддерживает технология 3D-печати, которая

Таблица 1.

Оптимальные маршруты и их длина для робота-тележки

Источник: разработано авторами

№ маршрута	Оптимальный путь (по отделам)	Оптимальный путь (по точкам)	Длина пути, м
1	0-5-2-4-1-3-0	0-11-7-8-5-8-9-6-19-18-20-3-2-1-10-0	56
2	0-1-3-2-0	0-11-7-8-9-6-19-5-16-4-7-11-0-13-12-14-1-10-0	60
3	0-1-2-3-4-0	0-13-12-14-15-17-18-20-3-2-1-14-12-13-4-7-11-0	52
4	0-7-4-3-6-8-2-5-1-0	0-13-4-7-8-5-19-6-9-6-19-18-20-3-2-1-10-0	56

позволяет увеличить скорость производства при одновременном уменьшении издержек [6].

Совместно с IoT компании могут использовать технологию RFID (Radio Frequency Identification), основанную на присвоении объектам определенных RFID-кодов, которая позволяет дистанционно обнаруживать, распознавать и оперативно сопровождать объекты в пространстве [7].

Следующий инструмент оптимизации управления цепями поставок – это технологии искусственного интеллекта (ИИ). В логистике они применяются для анализа данных, обмена информацией, поддержки в управлении цепями поставок, прогнозирования спроса, оптимизации издержек.

Свое применение в логистике нашли и беспилотные технологии. К 2025–2027 гг. прогнозируется высокая динамика роста наземной беспилотной техники [8]. В логистике дроны используются для доставки малогабаритных товаров, в качестве такси, складских роботов и роботизированных тележек [9].

Беспилотники также используются крупными логистическими центрами для оптимизации процесса инвентаризации и позволяют своевременно выявлять и подтверждать наличие свободных складских площадей, что позволяет обеспечить дальнейшую бесперебойную работу с пополнением, размещением, приемкой запасов [10].

Модель оптимизированного склада, предложенная в настоящей статье, включает в себя систему из отделов, сотрудников, работающих в каждом из них, и роботов-тележек, собирающих заказы. Выбранная модель беспилотного аппарата от компании Kiva Systems [11] перемещает стеллажи

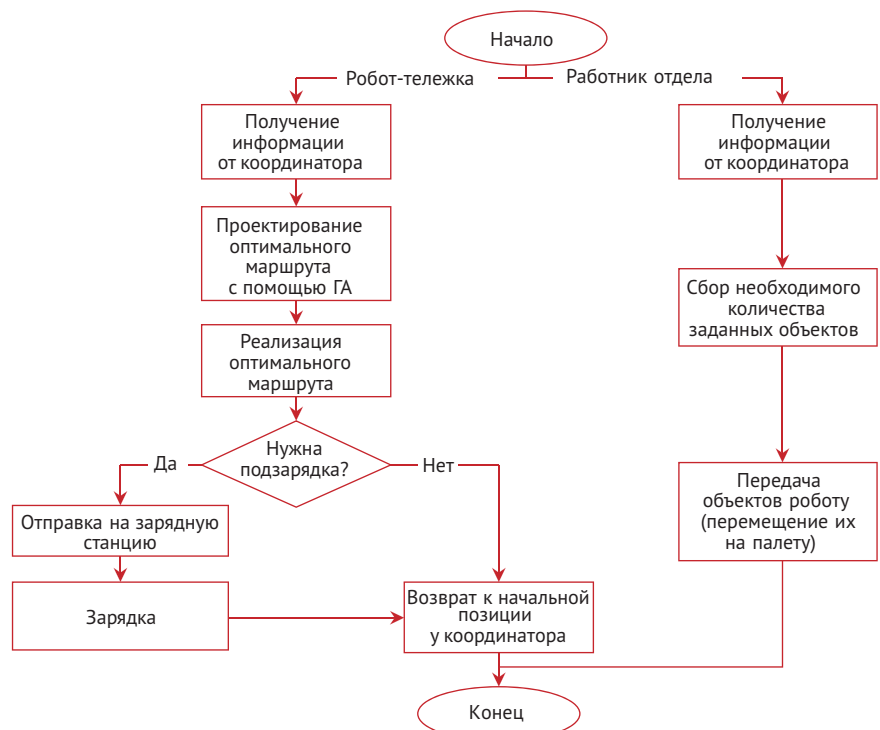


Рисунок 1. Алгоритм сборки заказа

Источник: разработано авторами



Рисунок 2. Схематичное описание генетического алгоритма

Источник: разработано авторами

палеты грузов объемом до 317 кг со скоростью до 8 км/ч. Сотрудники склада перемещаются только в рамках закрепленного за ними отдела. Беспилотный аппарат, в свою очередь, проезжая нужные отделы, собирает товары в единый заказ. Алгоритм

сборки одного заказа представлен на рис. 1.

Оптимизация маршрута робота-тележки сводится к решению задачи коммивояжера. Эта задача комбинаторной оптимизации относится к классу NP-полных задач. Известно,

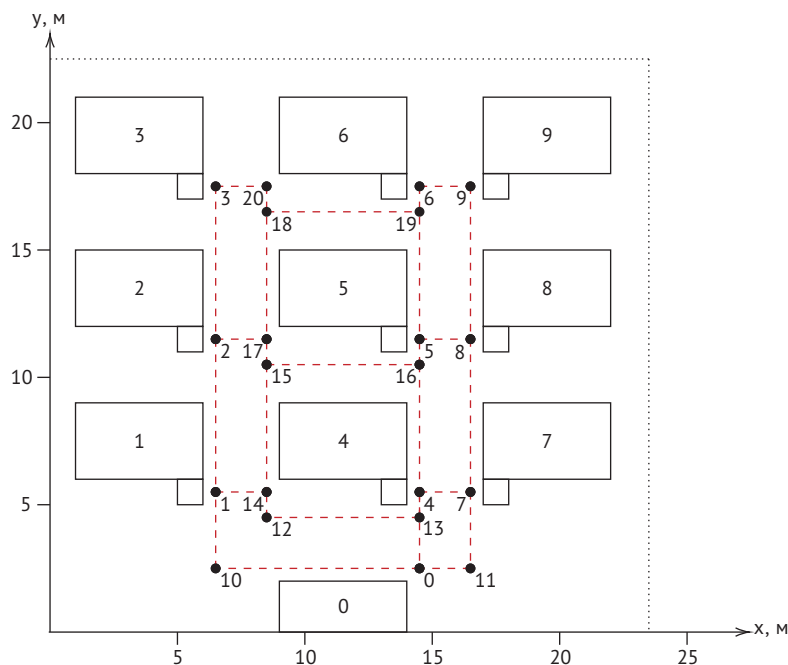
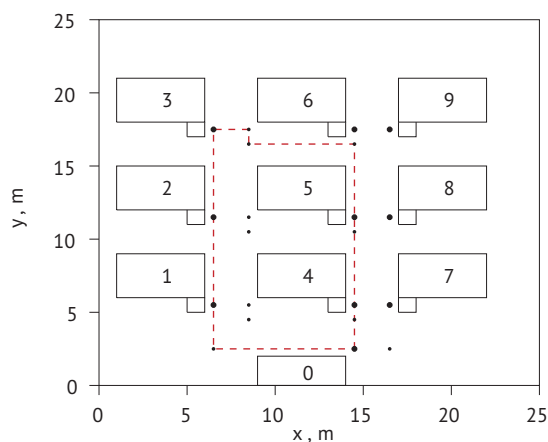


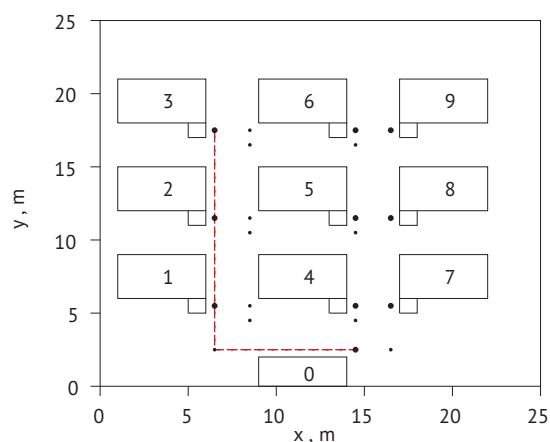
Рисунок 3. Схема логистического склада
Источник: разработано авторами

что при достаточно большом количестве точек она не может быть решена методом перебора. В рассматриваемом случае решается ассиметричная задача коммивояжера, для которой существует $(n-1)!$ возможных маршрутов, то есть для 10 точек возможно $9!$ вариантов маршрута. На практике для оптимизации маршрута беспилотных летательных аппаратов могут использоваться также метод ветвей и границ, жадные алгоритмы, метод имитации отжига, другие виды эволюционных алгоритмов, например муравьиный [12, 13].

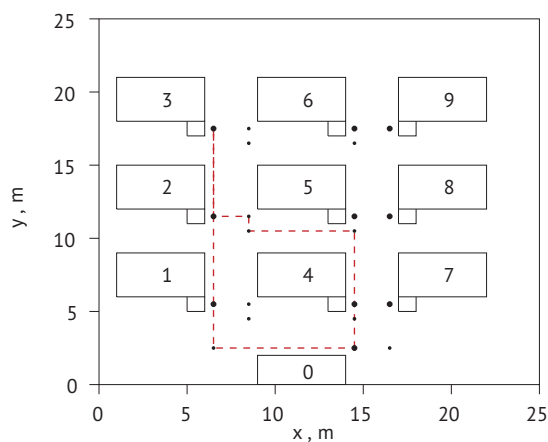
Для нахождения оптимального пути беспилотного робота-тележки на складе был выбран генетический алгоритм, который является одним из методов эволюционных алгоритмов. Генетический алгоритм использует несколько точек поискового пространства одновременно, что позволяет исключить попадание в локальный экстремум унимодальной целевой



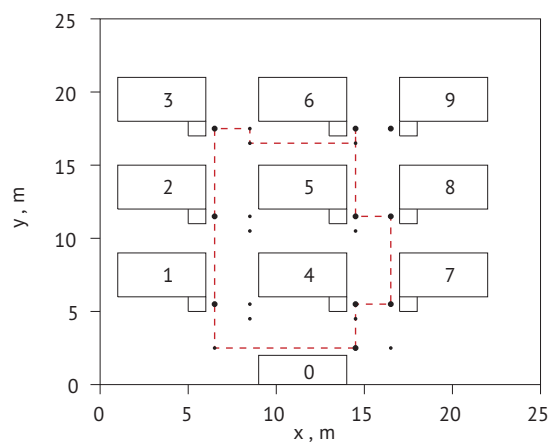
А



Б



В



Г

Рисунок 4. Визуализация рассчитанного маршрута с использованием программы на Python: а – маршрута № 1; б – маршрута № 2; в – маршрута № 3; г – маршрута № 4
Источник: разработано авторами

функции. Также генетический алгоритм в процессе вычислений использует только данные об области допустимых значений и целевой функции в произвольной точке, что повышает скорость работы. Таким образом, он находит решение, которое приводит к удовлетворению условий задачи нахождения оптимального пути для беспилотного робота за максимально короткое время [14].

Порядок действия генетического алгоритма представлен на рис. 2.

Для данной задачи целевой функцией будет являться $f(x)=S \rightarrow \min$, где S – длина пути. А аргументами $f(x)=F(S_1, S_2, \dots, S_k)$, где S_i – отдел, который присутствует в маршруте робота-тележки, k – количество всех генерируемых маршрутов. Также необходимо построить матрицу расстояний A между n количеством отделов:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & d_{01} & \dots & d_{0n} \\ d_{10} & 0 & \dots & d_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n0} & d_{n1} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Учитывая расстояние от последнего отдела до начального (конечного) положения робота-тележки (S_0), получаем:

$$f(x)=A\{S_0, S_1\}+A\{S_1, S_2\}+\dots+A\{S_{(k-1)}, S_k\}+A\{S_k, S_0\}.$$

Для решения поставленной задачи разработана программа на языке Python, для визуализации использовалась библиотека Matplotlib, а для применения генетического алгоритма при написании программы – подключена библиотека Ortools.

В качестве входных данных программа записывает набор пронумерованных отделов, которые должен проехать робот-тележка. Далее производится поиск оптимального пути, и на выходе пользователь получает порядок прохождения отделов.

Далее рассмотрим пример оптимизации маршрута робота-тележки Kiva на складе. Схема склада представлена на рис. 3, где отделы – это пронумерованные прямоугольники; пункты выдачи объектов – квадраты, прилегающие к отделам; точки 0–9 – основные остановки робота; точки 10–19 – вспомогательные точки; пунктирные линии – разметка на полу складского помещения, по которой движется ро-

бот-тележка. Используя программу на Python, получаем следующие результаты (табл. 1).

В табл. 1 представлены оптимальные пути для заданных маршрутов, то есть благодаря программе можно получить конкретную последовательность из точек (отделов), к которым робот-тележка должен приехать. Также рассчитывается минимальная длина каждого пути.

Визуализация маршрутов № 1–4 представлена на рис. 4 (а–г) соответственно.

Таким образом, показано, что разработанная на Python программа с использованием библиотеки Matplotlib и Ortools и применение генетического алгоритма позволяет быстро рассчитывать и визуализировать маршрут робота-тележки, подбирая кратчайший путь в зависимости от входных данных. В статье также показано, как при изменении входных данных (набор точек остановки робота) меняются длины маршрутов и сами маршруты. Применение на складе беспилотных устройств для доставки и комплектования заказов, использование эволюционных алгоритмов, в частности генетических, для оперативного построения оптимального маршрута является перспективным направлением развития логистических систем и важным фактором, сокращающим издержки предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Witkowski K. Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative solutions in logistics and supply chains management // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 182. – P. 763–769.
2. Малягин Т.А., Завьялов Д.В. Применение технологий блокчейн в логистике: перспективы и особенности внедрения // *Человеческий капитал и профессиональное образование*. – 2018. – Т. 1. – № 25. – С. 88–91.
3. Pournader M., Shi Y., Seuring S., Lenny Koh S. C. Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature // *Internet journal of production research*. – 2020. – Vol. 58 (7). Electronic resource: URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2019.1650976>
4. Garay-Rondero C.L., Martinez-Flores J.L., Smith N.R., Caballero Morales S.O., Aldrette-Malacara A. Digital supply chain model in Industry 4.0 // *Journal of Manufacturing Technology Management*. – 2019. – Vol. 31. – No. 5. – P. 887–933.
5. Korpela K., Hallikas J., Dahlberg T. Digital supply chain transformation toward blockchain integration // *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*. – 2017. – P. 4182–4191.
6. Королева А.А. Экономические эффекты цифровой логистики // *Журнал Белорусского государственного университета экономики*. – 2019. – № 11. – С. 68–76.
7. Назарова К.В. Перспективы использования RFID-технологий в логистике // *Форсайт логистики: будущее логистики глазами молодых ученых: труды материалов международной форсайт-сессии*. – 2018. – С. 90–94.
8. Cohn P., Green A., Langstaff M., Roller M. Commercial drones are here: The future of unmanned aerial systems. McKinsey & Company, 2017. Electronic resource: URL: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/commercial-drones-are-here-the-future-of-unmanned-aerial-systems>
9. Морозова Ю.А. Беспилотные технологии в логистике: опыт применения, проблемы и перспективы // *Корпоративная логистика*. – 2019. – № 4 (93). – С. 33–38.
10. Marchuk V.Ye., Harmash O.M., Ovdienko O.V. World trends in warehousing logistics // *Intellectualization of logistics and supply chain management*. – 2020. – Vol. 2. – P. 32–50.
11. Kiva robots. Electronic resource: URL: <http://robotrends.ru/robotopedia/kiva>
12. Дмитриев В.И., Грушевой С.А. Оптимизация маршрута перемещения беспилотных летательных аппаратов с ретрансляторами радиосвязи // *Вестник рязанского государственного радиотехнического университета*. – 2018. – № 63. – С. 64–68
13. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли*. – 2021. – Т. 13. – №1. – С. 6–17.
14. Чмырь Д.А. Оптимизация технологических процессов генетическими алгоритмами. – М.: Изд-во AP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 52 с.