

Роботизированные технологии в складской логистике: анализ архитектуры и определение способов ее оптимизации

А.О.У. Ганиев¹, И.С. Полевщиков^{1,2,3}

¹*Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)*

²*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

³*Российский биотехнологический университет*

Аннотация: Представлены результаты анализа архитектуры роботизированных технологий, применяемых в складской логистике. Выявлены такие способы оптимизации архитектуры, как многофункциональность, модульность, роевой интеллект, внедрение нескольких режимов работы. На основании проведенного анализа создана концептуальная модель робота для инвентаризации складских помещений. Основными преимуществами модели являются: возможность использования робота в нерабочее время за счет наличия автономного режима работы; применение для инвентаризации и для совместной работы с другими роботами (координация движения наземных роботов); наличие алгоритма взаимозамены, обеспечивающего отказоустойчивость и частичное решение проблемы ограниченности времени работы робота от аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: роботизированные технологии, дроны, модульность, роевой интеллект, отказоустойчивость, складская логистика.

1 Введение

Складские помещения являются одним из ключевых звеньев в цепочке поставок товаров от производственных и торговых предприятий до потребителей. С целью сохранения своего конкурентного преимущества, увеличения объема продаж, своевременного выполнения заказов, снижения риска ошибок при подготовке заказов, а также повышения экономической эффективности, предприятия стремятся внедрять передовые технологии автоматизации складских помещений [1].

Однако внедрение роботизированных технологий, широко распространенных во многих сферах [2, 3], связано с рядом сложностей. Во-первых, повышение интенсивности логистических потоков обуславливает необходимость бесперебойного выполнения складских операций, то есть, в случае выхода оборудования из строя, убытки предприятия резко возрастают.

По этой причине целесообразным является не только проведение своевременного технического обслуживания складского роботизированного оборудования, но и поиск новых путей обеспечения его отказоустойчивости.

Во-вторых, в силу того, что существующие роботизированные технологии, как правило, являются узкоспециализированными, то для охвата всего цикла складских операций требуются значительные инвестиции. Одним из возможных решений является применение более универсальных по своей функциональности роботов.

В-третьих, время работы от аккумуляторных батарей таких роботизированных технологий, как складские беспилотные летательные аппараты, остается довольно ограниченным, что затрудняет непрерывное выполнение складских операций.

Настоящее исследование посвящено решению актуальных задач обеспечения отказоустойчивости, многофункциональности и эффективности складских роботизированных технологий путем рассмотрения возможных способов оптимизации их архитектуры.

2 Анализ средств автоматизации складских помещений и их архитектуры.

Выделяют два вида автоматизации: цифровую и физическую. Цифровая автоматизация подразумевает внедрение специализированного программного обеспечения, в то время как физическая – направлена на интеграцию и эксплуатацию роботизированных технологий [4].

На сегодняшний день существует целый ряд роботизированных технологий, применяемых в складских помещениях для выполнения широкого спектра складских операций.

Для транспортировки и перемещения товаров применяются автоматически управляемые транспортные средства (Automated Guided

Vehicles, AGV) и автономные мобильные роботы (Autonomous Mobile Robots, AMR).

К автоматически управляемым транспортным средствам относятся транспортеры штучных грузов (unit load vehicles), тягачи (towing vehicles), узкопроходные штабеллеры (VNA, Very Narrow Aisle AGV). Они выполняют транспортировку грузов по фиксированному маршруту и по этой причине при появлении на пути препятствия требуется его устранение для того, чтобы движение продолжилось. Кроме того, для обозначения самого маршрута требуется дополнительная инфраструктура в виде кабелей, RFID-меток лазерной навигаций или магнитных лент. К примеру, RFID система (Radio Frequency Identification – радиочастотная идентификация) состоит из двух частей: RFID-считывателя (interrogator, reader), установленного на автоматически управляемых транспортных средствах, и RFID-метки (tag, transponder) [5].

В отличие от автоматически управляемых транспортных средств, автономные мобильные роботы обладают большей гибкостью и строят маршрут с помощью лазерных локаторов (LiDAR) и датчиков, помогающих ориентироваться в окружающем пространстве путем одновременной локализации и построения карты (simultaneous localization and mapping, SLAM) [6]. Технология LiDAR (от англ. Light Detection and Ranging) для измерения расстояния основана на излучении сфокусированной световой волны и измерении времени, которое необходимо для ее отражения от расположенного вдали объекта/препятствия [7].

Для выполнения операций хранения и извлечения товаров применяются автоматизированные складские системы (Automated Storage and Retrieval Systems, AS/RS). Основным подвижным компонентом данной системы является подъемно-транспортное устройство (лифт, кран-штабелер, карусель), которое под управлением компьютера размещает и извлекает

грузы из определенного места хранения [4].

Автоматизированные складские системы подразделяются на следующие группы:

1) Автоматические склады для мелкоштучного груза (Mini-Load AS/RS System): коробок, пластиковых контейнеров и ящиков, складских лотков, мелких деталей.

2) Автоматизированные склады для паллетного хранения (Unit-Load AS/RS System): подходят для складов производителей различной продукции, поскольку предназначены для хранения на поддонах большого количества грузов и товаров одного наименования при большом обороте.

3) Вертикальные склады-лифты и карусели обеспечивают компактность хранения товаров и изделий, доступность груза и быстрый его поиск на складе; внедряются в самые разнообразные отрасли. Основное отличие лифтового склада от карусельного склада заключается в том, что в лифтовой системе предусмотрено хранение продукции различной по своим габаритам, в то время как карусельный склад больше подходит для продукции одинаковой по размерам [8].

К автоматизированным складским системам относятся стеллажи с краном-штабелером (кассетным или паллетным), вертикальные лифтовые стеллажи (Vertical Lift Systems, VLS), горизонтальные или вертикальные карусели (Carousel-based AS/RS) [4].

Для обеспечения безопасной работы кранов-штабеллеров применяются датчики, установленные на крайних допустимых позициях замедления и останова тележки. При движении тележки датчики регистрируют перемещение закрепленных на ней металлических флажков, затем подают сигнал на ПЛК (программируемый логический контроллер), который в свою очередь реализует алгоритм включения / отключения приводного двигателя тележки (концевой выключатель) [9].

Для инвентаризации и проверки стеллажей в складских помещениях применяются дроны. Преимущество дронов заключается в том, что для навигации им не требуются маркеры или лазеры; для этого они используют оптические системы и системы компьютерного зрения. Данная технология может эффективно применяться не только в крытых складах, но и в складах открытого хранения [4].

Поскольку роботизированные технологии применяются для выполнения различных складских операций, их архитектура имеет свои отличительные черты. Подробнее рассмотрим следующие ключевые системы архитектуры роботизированных технологий: система навигации, система энергообеспечения, система привода, система управления, система безопасности. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Архитектура роботизированных технологий

	AGV	AMR	AS/RS	Дроны
Система навигации (инфраструктура в складском помещении)	Дополнительная инфраструктура требуется: кабели, метки RFID, маяки, лазерная навигация, магнитные ленты	Дополнительная инфраструктура не требуется	Дополнительная инфраструктура не требуется	Дополнительная инфраструктура не требуется
Система навигации (датчики робота)	Магнитные датчики или считыватели RFID-меток. Оптический (лазерный) локаатор LiDAR. Камеры	Оптический (лазерный) локаатор LiDAR	Индуктивные датчики	Оптический (лазерный) локаатор LiDAR Камеры
Система энергообеспечения (питания)	Аккумулятор	Аккумулятор	Питание от сети	Аккумулятор
Система привода (передвижения)	Двигатель, колеса	Двигатель, колеса	Двигатель	Моторы и пропеллеры
Система управления	ПЛК	ПЛК	ПЛК	ПЛК
Система безопасности	Оптический (лазерный) локаатор, кнопка аварийной остановки	Оптический (лазерный) локаатор, кнопка аварийной остановки	Металлические флажки на тележке крана, концевой выключатель	Чек-лист ошибок, «Возврат домой» во время разряда аккумулятора

На основе анализа ключевых систем рассмотренных роботизированных технологий были выделены следующие особенности их архитектуры:

1) Система привода мобильных роботов (автоматически управляемые транспортные средства (AGV), автономные мобильные роботы(AMR), дронов) позволяет осуществлять передвижение только одним способом (по земле или по воздуху).

2) Как правило, каждый робот является специализированным и выполняет только узкий круг операций. В случае необходимости в управляемых транспортных средствах (AGV) возможна замена исполнительного механизма для выполнения им захвата телег при перемещении или для переноса груза на неподвижную платформу (задействуется рольганг), однако их одновременное использование не предусматривается.

3) Использование искусственного интеллекта в роботизированных системах ограничено целями навигации (остановка / объезд препятствий) и не предусматривает алгоритма взаимопомощи или взаимозамены роботами друг друга в случае непредвиденного выхода из строя.

3 Способы оптимизации архитектуры роботизированных технологий

С учетом особенностей роботизированных технологий можно выделить ряд способов оптимизации их архитектуры. В каждом случае оптимизация затрагивает одну или несколько ключевых систем в зависимости от вида рассматриваемых роботов (таблица 2).

Рассмотрим подробнее каждый из предложенных методов оптимизации архитектуры роботизированных технологий.

Применение принципа *многофункциональности* поможет сделать роботов более универсальными. Так в AGV / AMR роботах,

спроектированных по данному принципу, будут предусмотрены функции как буксировки, так и перевозки, что в свою очередь позволит сократить финансовые издержки на покупку роботов для автоматизации каждой из данных операций по отдельности.

Таблица 2

Способы оптимизации архитектуры роботизированных технологий

Способ оптимизации	Вид роботов	Оптимизируемая система	Результат оптимизации
1	2	3	4
Много-функциональность	AGV / AMR	Исполнительный механизм	Повышение универсальности робота, экономия времени за счет одновременного выполнения нескольких операций (буксировка и перевозка)
Модульный принцип построения	AGV / AMR	Все системы	Обеспечение гибкости за счет реконфигурируемости роботизированной системы
Роевой интеллект	совместная работа AS/RS с AGV / AMR	Терминал управления для работы нескольких роботов одновременно	Слаженная совместная работа роботов
	совместная работа дронов с AGV / AMR	Терминал управления для работы нескольких роботов одновременно, система навигации	Построение оптимальных маршрутов в зависимости от загруженности проходов

Модульность. Модульные роботы – это роботы, состоящие из более мелких элементов – модулей, связанных между собой с помощью стыковочного устройства. Модули представляют собой относительно простые и самостоятельные «кирпичики», на каждый из которых установлены датчики, система питания и управления и др. [10].

В зависимости от типа модулей реконфигурируемые робототехнические системы подразделяются на два типа: гомогенные, состоящие из одинаковых модулей, и гетерогенные, включающие функционально различные модули [11].

Впервые идея модульного построения роботов была сформулирована, обоснована и реализована в ЦНИИ РТК в 1980/82 годах. Здесь была создана первая система модулей для построения механической части роботов, их устройств управления и программного обеспечения.

Преимущества модульного подхода к построению роботов связаны со следующими факторами:

- сокращение сроков проектирования, производства и внедрения роботов, поскольку они собираются из серийных компонентов;
- повышение технического уровня роботов, их надежности и снижение стоимости (поскольку появляется возможность компоновать роботы из минимально необходимого числа простейших модулей в зависимости от конкретного варианта применения, уменьшается избыточность в конструкции и параметрах роботов);
- снижение расходов на обслуживание роботов;
- поскольку производство роботов заключается в их сборке из стандартных частей, то это может быть организовано практически на любом машиностроительном производстве [12].

В складской робототехнике данный принцип нашел свое применение при разработке прототипа реконфигурируемых модульных умных тележек (Self-Reconfigurable Modular Intelligent Vehicles). При необходимости перевозки крупногабаритного груза задействуется специальный алгоритм. Он группирует модульные тележки таким образом, что они образуют платформу, которая по своим размерам и грузоподъемности соответствует габаритам перевозимого груза [13].

Таким образом, использование модульных роботов предоставляет такие преимущества, как гибкость, реконфигурируемость (адаптация структуры в зависимости от выполняемых задач) и снижение стоимости производства за счет необходимости производить только нескольких видов модулей [14].

Роевой интеллект как способ оптимизации архитектуры обеспечит более слаженную совместную работу роботов (например, при необходимости последовательной погрузки-разгрузки на вертикальном лифтовом стеллаже и транспортировки на автономном мобильном роботе). Одним из ключевых составляющих систем роевого интеллекта является именно взаимодействие роботов между собой и окружающей средой [15].

Кроме того, роевой интеллект позволит не только избегать столкновений с неподвижными (стационарными) конструкциями (полками, столами) и движущимися препятствиями (операторы, вилочные погрузчики), но также определять местоположение других роботов и строить оптимальный маршрут движения.

На основании рассмотренных способов оптимизации архитектуры роботизированных систем разработана концептуальная модель робота-дрона (рис. 1).

Практическое применение складских дронов в настоящее время в основном связано с управлением запасами или инвентаризацией (проверкой количества товаров, хранящихся на складах на отчетный период), а также проверкой стеллажей для сбора информации о местах, на которых располагаются товары, о наличии свободного пространства на полках стеллажей [16]. Благодаря дронам повышается точность инвентаризации, сокращается время (в 10 раз и более) и снижаются затраты (на 30-40%) на ее проведение, а также минимизируются опасные задачи для персонала склада [17].

Преимущество дрона, разработанного на основе предложенной концептуальной модели, заключается в том, что кроме инвентаризации он также применим для сбора информации, необходимой для эффективной организации движения наземных роботов. Благодаря роевому интеллекту при совместной работе с AGV / AMR роботами дрон анализирует уровень

загруженности проходов между стеллажами и помогает определить более свободный маршрут.

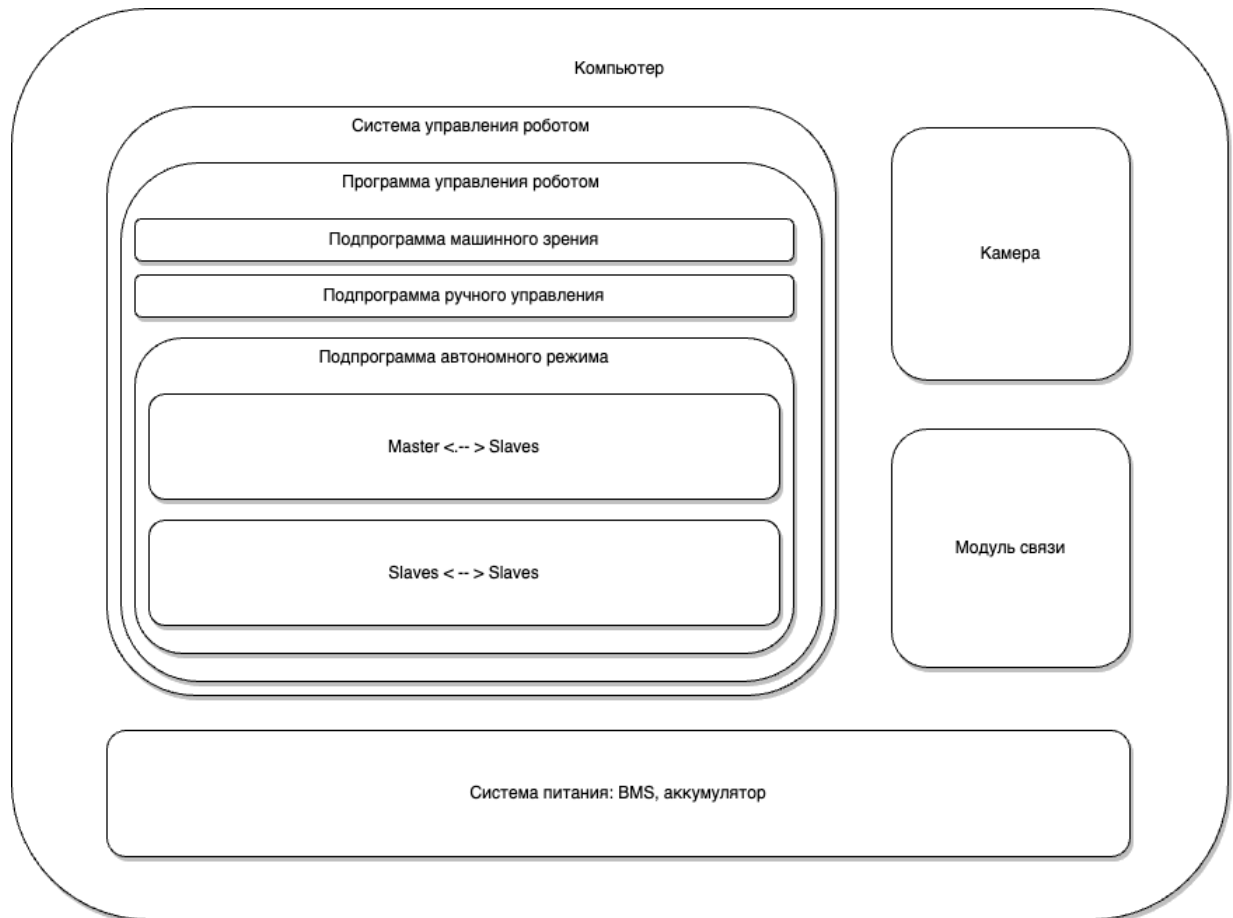


Рис. 1. – Концептуальная модель архитектуры робота-дрона

При совместной работе с другими дронами роевой интеллект обеспечит их отказоустойчивость и частично решит проблему ограниченности времени их работы в воздухе. Реализация алгоритма взаимозамены позволит дрону с высоким зарядом аккумулятора продолжить выполнение задачи поставленной, перед дроном, у которого уровень заряда аккумулятора достиг критически низкой отметки.

Еще одним преимуществом предлагаемой модели дрона является возможность его работы как в автономном, так и в ручном режимах, что позволяет использовать его в том числе в нерабочее время и как следствие сделать работу персонала склада более безопасной.

4. Заключение

В сфере складской логистики применяется большое количество роботизированных технологий для автоматизации различных складских операций, что позволяет снизить издержки на их выполнение, повысить удовлетворенность сотрудников за счет повышения безопасности и клиентов – за счет минимизации риска ошибок при комплектации заказов.

Архитектура роботизированных технологий включает ряд ключевых систем, среди которых системы навигации, энергообеспечения, привода, управления и безопасности. Архитектура роботизированных систем характеризуется следующими особенностями:

- система привода, позволяющая передвигаться только по земле или по воздуху;
- исполнительный механизм, обеспечивающий выполнение, как правило, только одного вида складских операций;
- использование искусственного интеллекта исключительно для целей навигации.

С учетом рассмотренных особенностей, архитектура различных роботизированных технологий может быть оптимизирована за счет внедрения многофункционального исполнительного механизма, модульного принципа построения и роевого интеллекта. Благодаря предложенным способам оптимизации архитектура роботизированных технологий будет обладать такими преимуществами как универсальность, отказоустойчивость и возможность слаженной совместной работы нескольких роботов.

В концептуальной модели дрона, разработанной с применением выявленных способов оптимизации архитектуры, можно выделить такие преимущества как наличие нескольких режимов работы, роевой интеллект и многофункциональность. Применение дрона в автономном режиме даст возможность осуществления необходимых операций не только в рабочее, но

и в нерабочее время. Кроме того, роевой интеллект позволит не только частично решить проблему ограниченности времени работы дронов в воздухе (за счет алгоритма взаимозамены при низком уровне заряда аккумулятора), но также обеспечить их многофункциональность и совместную работу с другими роботами (координация движения AGV / AMR роботов по оптимальным маршрутам).

Литература

1. Garg V., Agrawal R. Transforming management using artificial intelligence techniques. First edition. CRC Press, 2020. pp. 63-72.

2. Чачхиани Т.И., Серова М.Г. Мобильный робот в нестационарной среде // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546.

3. Файзрахманов Р.А., Полевщиков И.С. Автоматизированное управление формированием профессиональных навыков оператора роботизированной системы с использованием нечеткой логики // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3283.

4. Староверова О. В., Андреева А. А. Некоторые особенности применения роботизированных технологий в складской логистике // Журнал исследований по управлению. 2022. № 3. С. 39-49.

5. Бельский В.С., Грибоедова Е. С., Царегородцев К.Д., Чичаева А.А. Безопасность RFID-систем // International Journal of Open Information Technologies. 2021. №9. pp. 1-20.

6. Zhang J., Yang X., Wang W., Guan J., Ding L., Lee V.C.S. Automated guided vehicles and autonomous mobile robots for recognition and tracking in civil engineering // Automation in Construction, 2023, Vol. 146. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522005696](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522005696).

7. Taylor T.S. Introduction to Laser Science and Engineering. CRC Press, 2019. pp. 239-242.
 8. Автоматизированные склады: общие вопросы. URL: kiit.ru/voprosy/avtomatizirovannye-sklady/ (Дата обращения: 23.11.2024).
 9. Автоматика для кранов-штабеллеров. URL: teko-com.ru/po-otrasljam/gruzopodemnoe-i-oborudovanie-dlya-peremecsheniya-gruzov-i-passazhirov/avtomatizatsija-podemno-transportnogo-oborudovanija/avtomatika-dlja-kranov-shtabelerov/ (Дата обращения: 19.11.2024).
 10. Moubarak P., et al., Modular and Reconfigurable Mobile Robotics // Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 60, Iss. 12. pp. 1648-1663.
 11. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем // Информатика, телекоммуникации и управление. 2013. №1 (164). С. 98-103.
 12. Юревич Е.И. Основы робототехники. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2018. С. 304.
 13. Zhou, Jing & Wang, Jiacheng & He, Jiazhong & Gao, Jian & Yang, Aixi & Hu, Sideng & Li, Qiang. (2022). Design, Fabrication, and Control Algorithm of Self-Reconfigurable Modular Intelligent Vehicles. Applied Sciences. 12. 6886. 10.3390/app12146886.
 14. Brunete A, Ranganath A., Segovia S., Pérez de Frutos J., Hernando M., Gamba E. Current trends in reconfigurable modular robots design // International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, Vol. 14. URL: researchgate.net/publication/317545311_Current_trends_in_reconfigurable_modular_robots_design.
 15. Yang X. Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence. Algorithms, Theory and Applications. First edition.– Academic Press, 2020. pp. 273-302.
-

16. Баркова Н.Ю., Деулина Е.Д., Малышева М.А., Кирсанова Д.П., Бородина О.А. Беспилотные летательные аппараты: потенциал использования в системах складирования компаний // Вестник ГУУ. 2022. №5. С. 44-52.

17. Wawrla L., Maghazei O., Netland T. Applications of drones in warehouse operations: Whitepaper. ETH Zurich, D-MTEC, Chair of Production and Operations Management; 2019. URL: ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/pomdam/documents/Drones%20in%20warehouse%20operations_PO%20whitepaper%202019_Final.pdf (Дата обращения: 23.11.2024).

References

1. Garg V., Agrawal R. Transforming management using artificial intelligence techniques. First edition. CRC Press, 2020. pp. 63-72.

2. Chachkhiani T.I., Serova M.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546.

3. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3283.

4. Staroverova O. V., Andreeva A. A. Zhurnal issledovaniy po upravleniyu. 2022. № 3. pp. 39-49.

5. Bel'skiy V.S., Griboedova E. S., Tsaregorodtsev K.D., Chichaeva A.A. International Journal of Open Information Technologies. 2021. № 9. pp. 1-20.

6. Zhang J., Yang X., Wang W., Guan J., Ding L., Lee V.C.S. Automation in Construction, 2023, Vol. 146. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522005696.

7. Taylor T.S. Introduction to Laser Science and Engineering. CRC Press, 2019. pp. 239-242.

8. Avtomatizirovannye sklady: obshchie voprosy [Automated warehouses: general issues]. URL: kiit.ru/voprosy/avtomatizirovannye-sklady/ (Date accessed

23/11/2024).

9. Avtomatika dlya kranov-shtabellerov [Automation for stacker cranes]. URL: teko-com.ru/po-otrasljam/gruzopodemnoe-i-oborudovanie-dlya-peremecsheniya-gruzov-i-passazhirov/avtomatizatsija-podemno-transportnogo-oborudovanija/avtomatika-dlja-kranov-shtabellerov/ (Date accessed 19/11/2024).

10. P. Moubarak, et al. Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 60, Iss. 12. pp. 1648-1663.

11. Lopota A.V., Yurevich E.I. Informatika, telekommunikatsii i upravlenie. 2013. №1 (164). pp. 98-103.

12. Yurevich E.I. Osnovy robototekhniki [Basics of Robotics]. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg, 2017. pp. 215-220.

13. Zhou, Jing & Wang, Jiacheng & He, Jiazhong & Gao, Jian & Yang, Aixi & Hu, Sideng & Li, Qiang. (2022). Design, Fabrication, and Control Algorithm of Self-Reconfigurable Modular Intelligent Vehicles. Applied Sciences. 12. 6886. 10.3390/app12146886.

14. Brunete A, Ranganath A., Segovia S., Pérez de Frutos J., Hernando M., Gambao E. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, Vol. 14. URL: researchgate.net/publication/317545311_Current_trends_in_reconfigurable_modular_robots_design.

15. Yang X. Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence. Algorithms, Theory and Applications. First edition. Academic Press, 2020. pp. 273-302.

16. Barkova N.Yu., Deulina E.D., Malysheva M.A., Kirsanova D.P., Borodina O.A. Vestnik GUU. 2022. №5. pp. 44-52.

17. Wawrla L., Maghazei O., Netland T. Applications of drones in warehouse operations: Whitepaper. ETH Zurich, D-MTEC, Chair of Production and Operations Management; 2019. URL: ethz.ch/content/dam/ethz/special-



interest/mtec/pomdam/documents/Drones%20in%20warehouse%20opeations_PO
M%20whitepaper%202019_Final.pdf (Date accessed 23/11/2024).

Дата поступления: 10.11.2024

Дата публикации: 14.12.2024