

СТАТЬИ

УДК 519.876.5

DOI 10.17513/snt.40416

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДСКИМ ПОМЕЩЕНИЕМ****Байков Д.В., Егоров Д.С., Иншаков А.П.***ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва»,
Саранск, e-mail: danil.egorov21@yandex.ru*

Цель исследования – повышение надежности работы автоматизированной системы управления складским помещением за счет увеличения среднего времени наработки на отказ и оптимизация ее эффективности путем сокращения времени выполнения цикла обработки изделий и равномерного распределения степени заполнения складских секций с помощью технологий имитационного моделирования. Предложен общий вид имитационной модели складского комплекса, включающий конвейер подачи, модуль динамической сортировки, роботизированные станции обработки, сборки и упаковки, трёхсекционный склад ёмкостью 162 места. Управление реализовано на программируемом логическом контроллере семейства Siemens S7-1500 в среде TIA Portal. Предложенная автоматизированная система управления складским помещением позволяет проанализировать влияние случайного распределения изделий по цветовым потокам на время выполнения цикла программы, а также степень заполнения каждой складской секции, фиксируя моменты возникновения производственных заторов и вынужденных остановок. Такой подход предоставляет инженерам инструмент предварительной оптимизации алгоритмов управления до внедрения в реальные технологические процессы. Также представлены результаты проведенных испытаний пяти различных по количеству партий изделий, продемонстрировавшие рост задержек и вынужденных остановок по мере приближения к лимиту хранения и неравномерного заполнения секций. Проведенный анализ показал накопление статистической ошибки во времени выполнения цикла программы, вызванной взаимодействием конвейеров и роботов. Полученные результаты подтверждают эффективность использования имитационного моделирования для предварительной оптимизации складских операций, демонстрируя снижение времени обработки, уменьшение простоев оборудования и повышение общей надежности системы по сравнению с традиционным процессом разработки систем автоматизации технологических процессов. Применение имитационного моделирования позволяет не только минимизировать риски при запуске реального производства, но и разработать индивидуальные рекомендации по модернизации складской инфраструктуры с учетом выявленных узких мест.

Ключевые слова: автоматизация, управление, имитационное моделирование, программируемый логический контроллер, алгоритм

**SIMULATION OF AN AUTOMATED
WAREHOUSE MANAGEMENT SYSTEM****Baykov D.V., Egorov D.S., Inshakov A.P.***National Research Mordovia State University, Saransk, e-mail: bdv2304@mail.ru*

The objective of the study is to improve the reliability of the automated warehouse management system by increasing the mean time between failures and optimizing its efficiency by reducing the product processing cycle time and uniformly distributing the degree of filling of the warehouse sections using simulation modeling technologies. A general view of the simulation model of the warehouse complex is proposed, including a feed conveyor, a dynamic sorting module, robotic processing, assembly and packaging stations, a three-section warehouse with a capacity of 162 places. The control is implemented on a programmable logic controller of the Siemens S7-1500 family in the TIA Portal environment. The proposed automated warehouse management system makes it possible to analyze the influence of random distribution of products among color streams on the program cycle execution time, as well as the degree of filling of each warehouse section, recording the moments of production congestion and forced stops. This approach provides engineers with a tool for preliminary optimization of control algorithms before implementation in real technological processes. The results of tests of five different batches of products are also presented, demonstrating an increase in delays and forced stops as they approach the storage limit and the sections are unevenly filled. The analysis showed the accumulation of a statistical error in the execution time of the program cycle caused by the interaction of conveyors and robots. The results obtained confirm the effectiveness of using simulation modeling for preliminary optimization of warehouse operations, demonstrating a decrease in processing time, a decrease in equipment downtime and an increase in the overall reliability of the system compared to the traditional process automation system development process. The use of simulation modeling allows not only to minimize risks when launching real production, but also to develop individual recommendations for upgrading the warehouse infrastructure, taking into account the identified bottlenecks.

Keywords: automation, control, simulation modeling, programmable logic controller, algorithm

Введение

В настоящее время логистика и управление складскими операциями становится ключевыми факторами конкурентоспособ-

ности предприятий [1, 2]. Рост объемов товарооборота, необходимость повышения операционной эффективности (снижение времени обработки заказа и увеличение ко-

эффективности использования оборудования) и сокращение эксплуатационных издержек (уменьшение электропотребления и снижение затрат на персонал) требуют внедрения передовых технологий автоматизации, обеспечивающих высокую точность управления, надежность работы и масштабируемость процессов [3, 4]. В данном контексте имитационное моделирование автоматизированных систем управления складскими помещениями приобретает особую актуальность, позволяя тестировать и оптимизировать процессы без риска для реальных объектов [5, 6, 7].

Переход к использованию имитационных моделей позволяет переносить сложные логистические сценарии в виртуальную среду, где ошибки и проблемные места выявляются без риска для оборудования и производственного графика [8, 9, 10]. При этом именно участок сборки-упаковки с последующим размещением продукции остаётся наиболее уязвимым к нерегулярному входному потоку и неравномерному заполнению зон хранения [11, 12].

Несмотря на обилие коммерческих решений и разработок, большинство исследований по автоматизации складских операций сосредоточено либо на совершенствовании алгоритмов сортировки, либо на оптимизации конфигурации зон хранения и маршрутов отбора, оставляя без должного внимания комплексную верификацию цикла «подача → сборка → упаковка → складирование» [13, 14, 15]. Отсутствие такой информации нередко приводит к ситуации, когда производственная линия запускается с избыточными паузами, что вызывает потребность в доработке алгоритмов на местах пусконаладочных работ.

Целью настоящего исследования является повышение надежности работы автоматизированной системы управления складским помещением за счет увеличения среднего времени наработки на отказ и оптимизация ее эффективности путем сокращения времени выполнения цикла обработки изделий и равномерного распределения степени заполнения складских секций с помощью технологий имитационного моделирования.

Материалы и методы исследования

Для создания имитационной модели складского комплекса использовалась трехмерная среда моделирования Factory I/O версии 2.5.8. Управление разработанной моделью осуществлялось через виртуальный программируемый логический контроллер SIEMENS CPU 1511-1 PN с программным обеспечением Simatic S7 PLCSIM. Взаимо-

действие между виртуальным оборудованием и ПЛК обеспечивалось встроенным модулем связи Factory I/O PLC Driver, что исключило необходимость применения внешнего OPC UA-сервера.

Разработанная имитационная модель включала конвейер подачи деталей, модуль динамической сортировки, роботизированные станции обработки, сборки и упаковки, а также трёхсекционный склад общей ёмкостью 162 паллетоместа (по 54 места в каждой секции). Генерация входного потока деталей осуществлялась со следующим распределением: зеленые детали – 50%, синие – 33%, серые – 17%. Управление системой было реализовано на языке релейной логики (LAD) в среде TIA Portal V18 и включало четыре основных этапа: детекцию цвета деталей, маршрутизацию по соответствующим линиям обработки, упаковку и складирование. При достижении лимита заполнения секции система автоматически останавливала подачу изделий до освобождения мест, предотвращая перегрузку. Были проведены тесты с постепенным увеличением загрузки склада: от 32 до 162 изделий. Для каждой партии фиксировались: расчётное и фактическое время выполнения цикла, количество вынужденных остановок, степень заполнения каждой секции склада. Вынужденная остановка фиксировалась при превышении времени простоя конвейера более 15 с. Перед каждым тестом склад очищался для исключения влияния предыдущих испытаний. Каждый тест повторялся 5 раз, использовались усредненные значения.

Результаты испытаний анализировались с целью выявления закономерностей, таких как зависимость времени выполнения цикла программы от загрузки системы и влияние неравномерного распределения изделий на производительность. Особое внимание уделялось аварийным режимам работы системы.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлен общий вид разработанной имитационной модели складского комплекса, охватывающая полный цикл логического процесса: от генерации продукции до её размещения на складе. Структурно модель состоит из: устройства совершающего имитацию входного потока обрабатываемых деталей разных цветов (1); линии распределения с датчиками цвета (2); трёх параллельных модулей обработки, сборки и упаковки деталей (3); трёх вертикальных лифтов-накопителей (4), размещающих готовую продукцию в соответствующие секции склада по 54 паллетоместа.

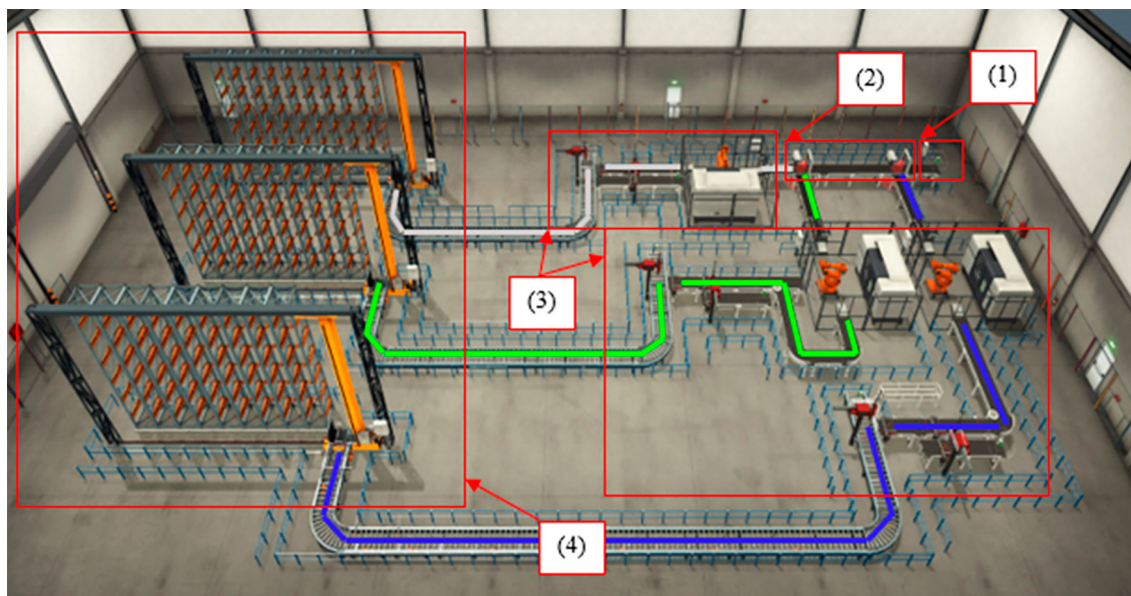


Рис. 1. Общий вид имитационной модели складского комплекса в среде Factory I/O
Источник: составлен авторами

На рис. 2 представлена блок-схема программы складирования синего изделия, а на рис. 3 блок-схема алгоритма работы синей линии имитационной модели складского комплекса. Функционирование зеленой и серой линии осуществляется схожим образом.

Каждые 15 с в системе появляется деталь одного из трёх цветов – зелёного, синего или серого. Вероятность распределения смещена в сторону зелёных объектов, что отражает реалистичное неравномерное поступление. Датчик технического зрения фиксирует цвет детали, после чего изделие перенаправляется на соответствующую сборочную линию. Каждая линия включает следующую цепочку операций: захват детали манипулятором; виртуальная обработка и сборка (сжатие, позиционирование); упаковка на паллету; передача сигнала о готовности к складированию; перемещение паллеты к складу; вызов соответствующего лифта; размещение на складе в одной из 54 ячеек секции. При достижении лимита заполнения секции система автоматического управления подаёт команду остановки и блокирует дальнейшую подачу продукции до освобождения мест, что предотвращает заторы и перегрузку участков.

Оценка работоспособности предложенного алгоритма производилась при постепенном увеличении загрузки трехсекционного складского помещения: от минимального (32 детали) до полного заполнения (162 детали). При этом для каждой партии фиксировались: расчётное время цикла: 1 мин 15 с – для зелёных деталей;

1 мин 25 с – для синих деталей; 1 мин 5 с – для серых деталей; фактическое время; число вынужденных остановок и степень заполнения каждой складской секции. Различия времени обработки детали обусловлено сложностью технологических операций, применяемых для деталей разных цветов. Перед каждым запуском склад очищался до нуля.

Усредненные результаты проведенных испытаний разработанной имитационной модели складского комплекса сведены в таблицу.

Как видно из таблицы при умеренной загрузке складского помещения (32 детали) все изделия, поступающие на склад, были корректно идентифицированы и распределены по ячейкам, сбой в работе отсутствовали, а фактическое время выполнения цикла программы практически совпало с расчетным. При увеличении загрузки склада в два раза начали проявляться кратковременные задержки в работе манипулятора, что вызвало необходимость в принудительной остановке линии и устранении затора. При заполнении складского помещения до 59% были зафиксированы две остановки в работе зеленой линии, вызванные неравномерным накоплением изделий. При этом расхождение фактического времени выполнения цикла программы с расчетным составило 15%. Последующие испытания показали необходимость доработки алгоритмов ввиду увеличения времени простоя конвейеров из-за неравномерности распределения деталей по производственным линиям.

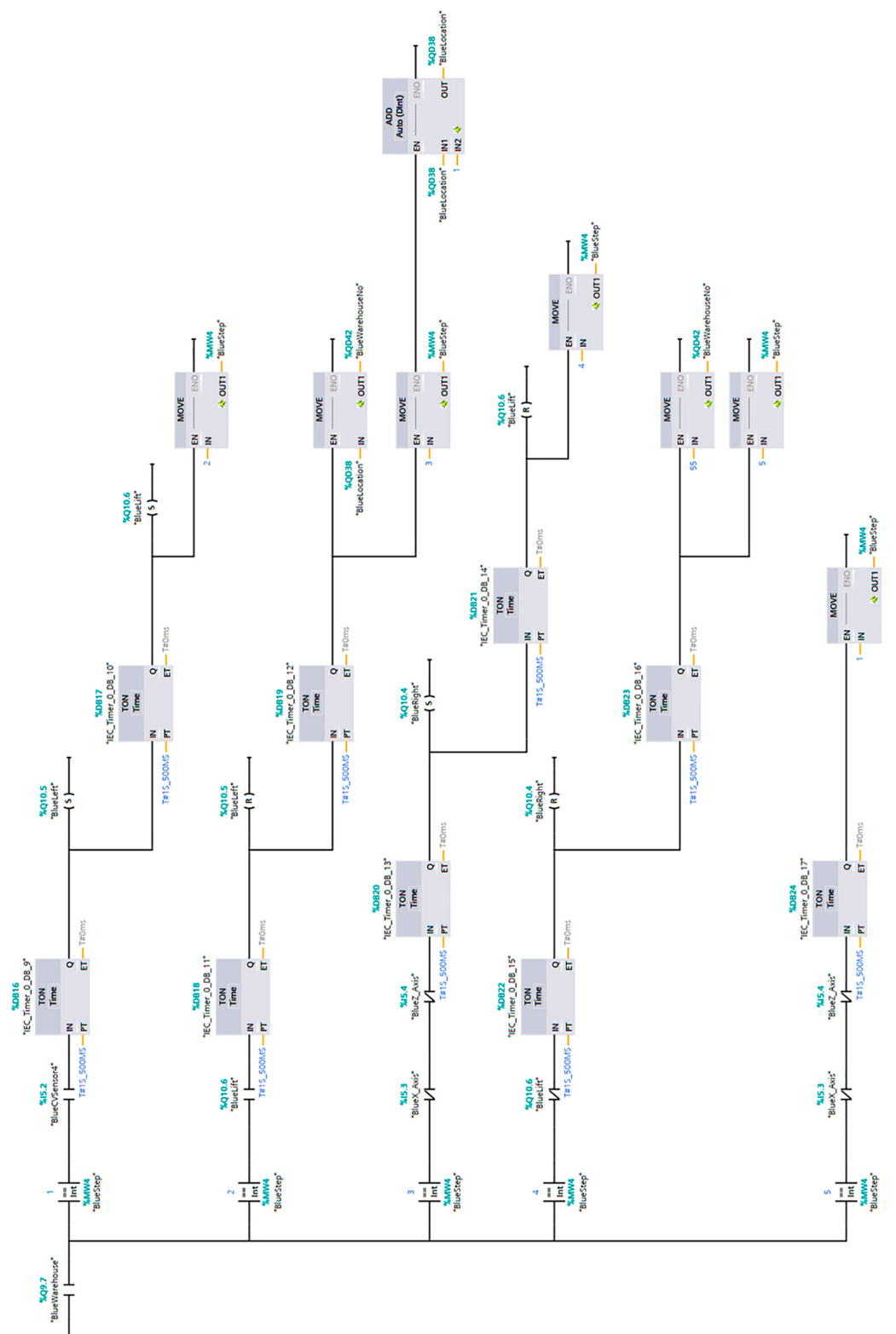
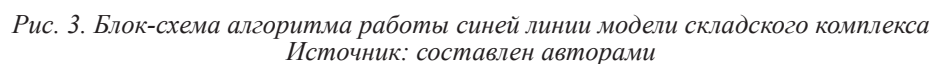


Рис. 2. Блок-схема программы складирования синего изделия на языке LAD



Результаты испытаний имитационной модели системы управления складом

Тест №	Кол-во деталей, ед.	Зелёные/Синие/Серые, шт.	Расчётное время, мин.	Фактическое время, мин.	Кол-во остановок, ед.	Заполнение склада, %
1	32	16/11/5	41,0	43,1	0	20
2	64	32/21/11	82,0	87,1	1	40
3	96	48/32/16	123,1	132,2	2	59
4	128	64/43/21	163,7	176,9	3	79
5	162	81/54/27	207,0	223,4	4	100

Примечание: составлена авторами.

Результаты испытаний показали, что неравномерное распределение изделий по цветовым потокам приводит к локальным перегрузкам секций склада, увеличению времени выполнения цикла и вынужденным остановкам, что подчеркивает необходимость внедрения динамической маршрутизации. Установлено, что статическая маршрутизация неэффективна при высокой загрузке склада (более 96 деталей). Для повышения производительности требуется внедрение адаптивных алгоритмов, учитывающих текущее заполнение секций и распределение входного потока, что по данным моделирования позволит снизить время простоя до 22% при нагрузке более 100 изделий.

Заключение

Разработанная имитационная модель складского комплекса доказала свою эффективность в предварительной оптимизации алгоритмов управления до их внедрения в реальные технологические процессы. Модель позволила выявить системные проблемы, такие как задержки и перегрузки, и минимизировать риски, связанные с физической отладкой и доработкой оборудования, что ускоряет ввод системы в эксплуатацию и повышает её надежность. Это делает подход экономически оправданным для проектирования автоматизированных складов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию IoT-датчиков и методов машинного обучения с автоматизированной системой управления складским помещением, что позволит создать гибкие и адаптивные системы управления для более точного прогнозирования поведения системы в реальных условиях.

Таким образом, исследование демонстрирует, что имитационное моделирование является мощным инструментом для инженеров и проектировщиков, позволяющим не только тестировать, но и совершенствовать логические процессы до их физической реализации.

Список литературы

1. Сущинская В.А. Логистика, как фактор повышения конкурентоспособности предприятия // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 5-3 (75). С. 109-111. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=bztdic> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.24412/2411-0450-2021-5-3-109-111.
2. Кизимиров М.В., Черняев Е.В. Управление складом в транспортно-логистических центрах на основе стратегий ресурсосбережения // Вестник Челябинского государственного университета. 2024. № 11 (493). С. 116-124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76058702> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.47475/1994-2796-2024-493-11-116-124.
3. Староверова О.В., Андреева А.А. Некоторые особенности применения роботизированных технологий в складской логистике // Журнал исследований по управлению. 2022. Т. 8. № 3. С. 39-49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49285532> (дата обращения: 19.05.2025).
4. Неупокоева Е.О. Гибридная технология синтеза транспортно-логистических систем на основе машинного обучения и имитационного моделирования // Экономика. Информатика. 2024. Т. 51. № 3. С. 670-681. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75096707> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.52575/2687-0932-2024-51-3-670-681.
5. Гулягина О.С. Современные логистические технологии в складской деятельности // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. 2013. № 6. С. 78-81. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23523797> (дата обращения: 22.05.2025).
6. Бабина О.И. Имитационная модель склада промышленного предприятия по производству бетона // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 41-50. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23609924> (дата обращения: 22.05.2025).
7. Derhami S., Smith J.S., Gue K.R. A simulation-based optimization approach to design optimal layouts for block-stacking warehouses // International Journal of Production Economics. 2020. Vol. 223. P. 107525. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527319303524> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107525.
8. Kukartseva O.I. Simulation modeling of production processes at the enterprise // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2022. № 21. P. 277-278. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49737899> (дата обращения: 22.05.2025).
9. Сурков А.А. Сравнительный анализ математических моделей управления цепями поставки в различных отраслях // Modern Economy Success. 2023. № 6. С. 196-211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54736831> (дата обращения: 22.05.2025).
10. Байков Д.В., Суслин А.Ю., Резепов С.Н., Храмова И.Д. Моделирование системы тягового привода электромотоцикла // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 22-25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53835654> (дата обращения: 22.05.2025).

11. Брыкин В.А. Отдельные инструменты совершенствования автоматизированной системы управления складом // Качество. Инновации. Образование. 2020. № 5 (169). С. 51-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44394402> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.31145/1999-513x-2020-5-51-59.
12. Володарец Н.В., Масленникова А.Г. К вопросу имитационного моделирования транспортных систем // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. 2017. № 4. С. 21-28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34866003> (дата обращения: 22.05.2025).
13. Cestero P.J., Quartulli M., Metelli A.M., Restelli M. Storehouse: a Reinforcement Learning Environment for Optimizing Warehouse Management. July 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/361900783_Storehouse_a_Reinforcement_Learning_Environment_for_Optimizing_Warehouse_Management (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.48550/arXiv.2207.03851.
14. Zhou Y., Dong Y., Xia H., Gu J. Routing Optimization of Intelligent Vehicle in Automated Warehouse // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2014. 1-14. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/789754> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1155/2014/789754.
15. Maheshwari P., Kamble S., Kumar S., Belhadi A., Gupta S. Digital twin-based warehouse management system: A theoretical toolbox for future research and applications // The International Journal of Logistics Management. 2023. Vol. 35. Is. 2. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijlm-01-2023-0030/full/html> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1108/IJLM-01-2023-0030.