

Научная статья

Original article

УДК 330.46:004.94

doi: https://doi.org/10.55186/2413046X_2026_11_5_72

edn: PTSJYO

**РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
СКЛАДСКОГО КОМПЛЕКСА
DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION AND SIMULATION MODEL
OF A WAREHOUSE COMPLEX**



Лебедева Людмила Николаевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной математики и информатики, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, г. Санкт-Петербург, e-mail: l.n.lebedeva@yandex.ru

Севодин Владислав Олегович, бизнес-аналитик, ООО «Индустрия Автоматизации», г. Москва, e-mail: vlad.sevodin@yandex.ru

Lebedeva Lyudmila Nikolaevna, PhD, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Informatics, Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, e-mail: l.n.lebedeva@yandex.ru

Sevodin Vladislav Olegivch, Business Analyst, LLC “Industria Avtomatizatsii”, Moscow, e-mail: vlad.sevodin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается подход к оптимизации конфигурации и операционных стратегий автоматизированной складской системы хранения на базе четырехсторонних шаттлов FWS/RS. Описаны показатели эффективности бизнес-процессов складской системы. Для решения оптимизационной задачи разработана имитационная модель и набор имитационных экспериментов, позволяющие выполнять анализ влияния

различных факторов и операционных стратегий на целевые показатели системы. Имитационная модель позволяет выбрать оптимальное сочетание стратегий размещения поступающих товаров на складе, релокации блокирующих грузов и назначения транспортных ресурсов. Имитационная модель разработана на основе дискретно-событийного и агентного подходов. Особое внимание уделено оценке производительности системы в условиях стохастического потока заявок различной интенсивности.

Abstract. The article considers the author's approach to optimizing the configuration and operational strategies of an automated warehouse storage system based on Four-Way Shuttles (FWS/RS). The efficiency indicators of the business processes of the warehouse system are described. To solve the optimization problem, a simulation model and a set of simulation experiments have been developed that allows analyzing the impact of various factors and operational strategies on the system's targets. The simulation model allows you to choose the optimal combination of strategies for placing incoming goods in a warehouse, relocating blocking cargo, and assigning transport resources. The simulation model is developed based on a combination of discrete event-based and agent-based approaches. Special attention is paid to evaluating the system's performance under conditions of a stochastic input flow of orders of varying intensity.

Ключевые слова: складская система, автоматизация, моделирование, оптимизация, имитационный эксперимент, шаттл, двумерная сетка, FWS/RS

Keywords: warehouse system, automation, modeling, optimization, simulation experiment, shuttle, 2D-grid, FWS/RS

В современных цепях поставок возрастает роль складской логистики. Развитие электронной коммерции, маркетплейсов, увеличение ассортимента продукции и ряд других факторов приводят к увеличению нагрузки на складские комплексы и распределительные центры. Повышение требований к уровню сервиса с одной стороны и оптимизация затрат с другой, а также

дефицит квалифицированного персонала стимулируют предприятия к автоматизации складской логистики.

Проекты автоматизации требуют значительных капитальных и операционных затрат. Поэтому до реализации проекта требуется обоснованная оценка последствий принимаемых управленческих решений: выбора количества оборудования, конфигурации складской зоны и стратегий работы системы.

Особую сложность представляет анализ систем на базе четырехсторонних шаттлов (Four-Way Shuttle Based Storage and Retrieval Systems, FWS/RS). Шаттлы могут перемещаться по двум направлениям внутри каждого уровня хранения и перемещаться между уровнями с помощью вертикальных подъемников.

Операционная эффективность FWS/RS определяется физической конфигурацией оборудования, а также совокупностью решений, принимаемых в процессе обработки заявок. К таким решениям относятся выбор ячейки хранения для входящей паллеты, назначение шаттла и лифта на транзакцию, выбор стороны доступа к целевой паллете в зоне хранения, релокация блокирующих грузов и организация бесконфликтного движения нескольких шаттлов на одном уровне. Эти решения взаимосвязаны, принимаются в условиях стохастического входящего потока заявок и могут оказывать нелинейное влияние на среднее время выполнения транзакции.

При этом сложность взаимодействия элементов системы и стохастический характер складских процессов затрудняют получение обоснованных проектных решений с использованием только аналитических методов. Эффективным инструментом анализа и оптимизации в этом случае является имитационное моделирование., имитационная модель дает возможность исследовать влияние конкретных конфигурационных и операционных решений на целевые показатели до реализации проекта. [1]

В настоящей статье рассматривается разработка имитационно-оптимизационной модели автоматизированной складской системы хранения на базе четырехсторонних шаттлов FWS/RS. Цель исследования заключается в оценке влияния числа шаттлов и стратегий управления на эффективность работы системы, а также в формировании практических рекомендаций по выбору конфигурационных и операционных параметров.

Для обеспечения автономности FWS/RS систем требуется их интеграция с WMS- и ERP-системами, что позволяет получать данные о плановых приемках и отгрузках, актуальных остатках и физических адресах хранения грузов [2]. Это было учтено при разработке имитационной модели складского комплекса.

Перед тем, как перейти к описанию имитационной модели, кратко разберем моделируемые процессы. Операционный цикл FWS/RS включает в себя операции размещения и отбора. При размещении паллета передается с конвейера на лифт, перемещается на целевой уровень, принимается шаттлом и доставляется в назначенную ячейку хранения. При отборе шаттл перемещается к целевой паллете, при необходимости выполняет релокацию блокирующих грузов, после чего доставляет паллету к лифту для передачи на выходной конвейер. Таким образом, даже одна транзакция может включать несколько взаимосвязанных операций, а ее продолжительность зависит от текущего состояния системы.

Для оценки эффективности автоматизированных складских систем в литературе обычно используются три группы показателей: пропускная способность, среднее время цикла транзакции и коэффициент использования оборудования [1,3]. Пропускная способность характеризует количество входящих и исходящих транзакций, выполняемых системой в единицу времени. Среднее время цикла отражает интервал от момента поступления заявки до завершения операции. Коэффициент использования оборудования

показывает долю времени, в течение которого шаттлы и лифты заняты выполнением операций, а не находятся в простое.

Одним из наиболее важных факторов при оценке предельной эффективности FWS/RS является соотношение числа шаттлов и лифтов. В исследовании [1] сформулированы практические правила конфигурирования FWS/RS, связанные с соотношением длины продольных и поперечных проходов, глубиной хранения и числом ярусов. Однако эти рекомендации не подкреплены решением оптимизационной задачи в точной постановке.

Эффективное использование физической конфигурации склада требует оптимальных решений (стратегий и политик) на операционном уровне. В литературе выделяются стратегии назначения задач, стратегии хранения, стратегии релокации блокирующих грузов и стратегии диспетчеризации лифтов [3-5]. Стратегии назначения задач определяют, какой шаттл и какой лифт получают входящий запрос на размещение или отбор. Решение может приниматься на основе правила ближайшего шаттла или правила наименьшего времени выполнения операции [6].

Стратегии хранения определяют правило выбора ячейки для входящей паллеты. В FWS/RS такая стратегия влияет текущую операцию размещения и на последующие операции отбора, поскольку целевая паллета может оказаться заблокированной другими грузами. В литературе рассматриваются случайное размещение, размещение в ближайшую свободную ячейку, а также классовое размещение на основе ABC- или COI-классификации [3, 6].

Стратегии релокации блокирующих грузов аналогичны стратегиям размещения, поскольку задача релокации фактически сводится к повторному размещению груза в другой ячейке.

Для учета параллельной обработки заявок в шаттловых системах применяются модели типа Fork-Join. В работе [7] предложена модель FJQN, позволяющая сравнить последовательную и параллельную обработку. Результаты показывают, что параллельная обработка дает преимущество при

определенном соотношении геометрических параметров стеллажной системы, а эффект возрастает при увеличении числа шаттлов и интенсивности входящего потока.

Отдельное направление исследований связано с автоматизацией построения имитационных моделей. В работе [8] рассмотрен подход к моделированию FWS/RS в среде FlexSim.

Ряд исследований фокусируется на задачах релокации и маршрутизации. В работе [9] имитационная среда используется для тестирования алгоритмов перемещения, блокирующих паллет. Предложенный эвристический алгоритм релокации превосходит стандартный поиск A^* и методы Q-learning, однако исследование сосредоточено преимущественно на задаче релокации, а не на комплексной работе складской системы.

Приведенный обзор показывает, что существующие аналитические и имитационные подходы позволяют решать лишь отдельные задачи моделирования и оптимизации автоматизированных складских систем: расчет пропускной способности, анализ параллельной обработки, построение маршрутов, релокацию блокирующих грузов и автоматизацию сборки моделей. Однако в рассмотренных работах недостаточно полно учитывается совместное влияние стратегий хранения, релокации, назначения шаттлов и диспетчеризации лифтов на работу системы FWS/RS. Это обуславливает необходимость разработки имитационной модели, позволяющей исследовать перечисленные стратегии в единой стохастической постановке.

Для устранения указанного ограничения в рамках исследования была разработана параметризованная имитационная модель FWS/RS зоны складской системы. В качестве среды моделирования выбрана среда AnyLogic, позволяющая совмещать дискретно-событийный и агентный подходы. Дискретно-событийная логика использовалась для описания потоков заявок, очередей, занятости лифтов и временных задержек при выполнении операций. Агентный подход применялся для моделирования

поведения отдельных элементов системы: шаттлов, уровней хранения, заявок и материальных объектов.

Предлагаемая архитектура модели включает несколько основных сущностей. Агент MaterialItem используется для хранения информации о грузовой единице, ее характеристиках, ABC-группе, серии и связанной заявке.

Агент StorageLevel (Рисунок 1) описывает уровень FWS/RS, хранит данные о текущих остатках, статусах ячеек, выбранных стратегиях хранения и релокации, а также управляет назначением шаттлов.

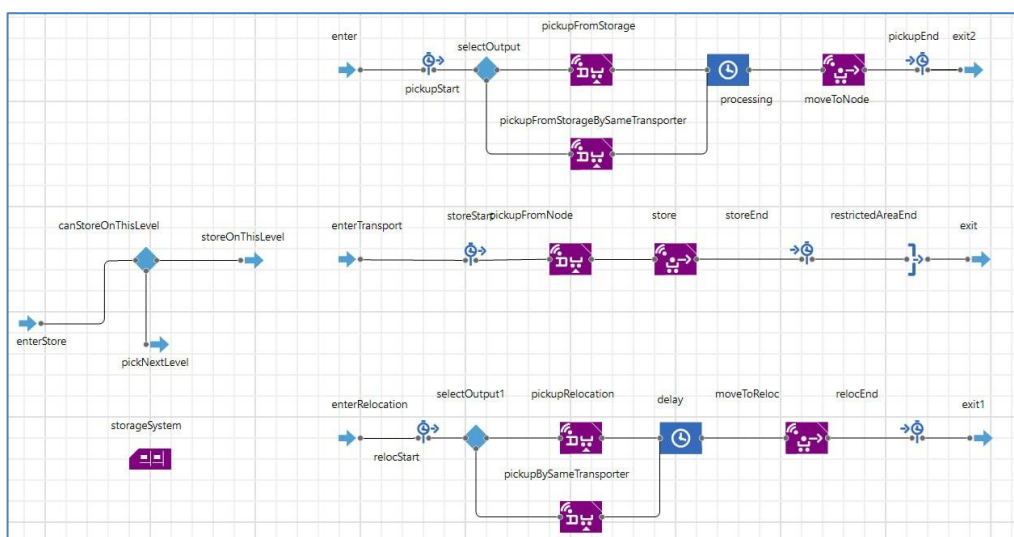


Рисунок 1. Логика агента StorageLevel (Anylogic UI)

Агент Shuttle хранит данные о состоянии шаттла, его занятости и простоях. Агент Task описывает заявку на размещение или отбор.

Блок TaskFlowChart (Рисунок 2) обеспечивает движение заявок в системе, сбор статистики по времени обработки и контроль очередей.

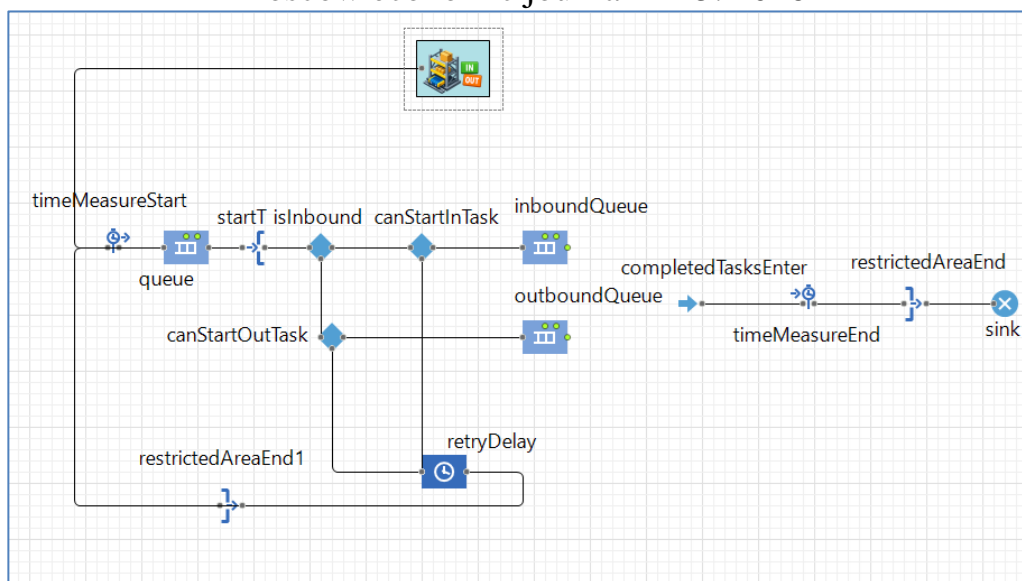


Рисунок 2. Логика агента TaskFlowchart (Anylogic UI)

Предлагаемый подход к разработке имитационных моделей предусматривает автоматизацию процесса формирования складской зоны на основе заданных параметров. Для этого используется внешний Python-сценарий, который формирует структуру уровней, зон хранения и узлов доступа. Такая архитектура позволяет адаптировать модель к различным конфигурациям FWS/RS и снижает трудоемкость построения новых имитационных сценариев.

В модели реализована параметризация стратегий управления. В качестве стратегий размещения рассматриваются случайное размещение, размещение в ближайшую свободную ячейку, а также размещение с учетом ограничений по совместимости или ABC-группе товара. Стратегии релокации блокирующих паллет строятся по такой же логике, поскольку задача релокации фактически сводится к повторному размещению груза в системе. Для назначения шаттлов используются правила выбора ближайшего шаттла или шаттла, обеспечивающего кратчайшее время выполнения операции.

При поступлении заявки на отбор модель определяет наличие требуемой паллеты на уровнях хранения, проверяет доступность соответствующих слотов и резервирует целевую ячейку, чтобы исключить ее блокировку

другими операциями. Если целевая паллета недоступна из-за блокирующих грузов, выполняется последовательность релокаций. После освобождения доступа шаттл извлекает паллету и передает ее к лифту. При поступлении заявки на размещение система выбирает доступную ячейку в соответствии с заданной стратегией хранения и резервирует ее до завершения операции.

На основе предложенного подхода и реализации описанного выше набора инструментов построена имитационно-оптимизационная модель зоны FWS/RS для реальной складской системы. В качестве исходных параметров использовались характеристики реальной автоматизированной складской зоны предприятия. В модели учитывались число уровней, количество ячеек на уровне, число продольных и поперечных проходов, количество входных и выходных лифтов, а также интенсивность входящего потока заявок.

При построении модели был принят ряд допущений. Предполагалось, что заявки на отгрузку формируются только на те грузы, которые физически присутствуют в системе. Модель энергопотребления, а также отказы лифтов и шаттлов в модели не учитываются. Интенсивность поступления заявок в течение одного модельного прогона считается постоянной.

На рисунке 3 отображено окно одного из экспериментов разработанной имитационной модели.



Рисунок 3. Окно эксперимента «Сравнение прогонов»

Для оценки эффективности системы были проведены эксперименты варьирования параметров, сравнения прогонов и оптимизационные эксперименты. Эксперименты выполнялись на горизонте 24 часов модельного времени. Интервалы между последовательными поступлениями заявок на отбор и размещение задавались экспоненциальным распределением. Для повышения надежности результатов использовалось переменное число репликаций, обеспечивающее доверительный интервал 95%.

Эксперимент варьирования параметров был направлен на оценку влияния интенсивности входящего потока заявок на среднее время цикла, суммарное время выполнения операций размещения, отбора и релокации блокирующих грузов. Параметр интенсивности изменялся в заданном диапазоне с фиксированным шагом. Такой подход позволил оценить изменение показателей эффективности системы при различных уровнях нагрузки и определить условия, при которых рост входящего потока начинает приводить к существенному увеличению времени обработки транзакций.

Оптимизационный эксперимент был направлен на определение рационального числа шаттлов для выбранной конфигурации FWS/RS. В качестве целевой функции использовалось среднее время выполнения заявки, а управляющей переменной выступало количество шаттлов, изменяемое в заданном диапазоне с фиксированным шагом. Дополнительно учитывались ограничения, связанные с коэффициентом занятости шаттлов, числом выполненных заявок за период моделирования и максимально допустимым средним временем обработки транзакции.

В оптимизационном эксперименте рассматривался режим максимальной интенсивности поступления заявок, равной 110 заявкам в час. В качестве дополнительных условий допустимости решения были заданы минимальный коэффициент занятости шаттлов, равный 0,7, выполнение не менее 2640 заявок за 24 часа модельного времени, а также ограничение на среднее время

выполнения заявки, не превышающее 3 минут модельного времени. Эти условия позволяют учитывать производительность системы и экономическую целесообразность увеличения числа единиц оборудования.

Цель эксперимента заключалась не в получении универсального глобального оптимума для всех возможных конфигураций FWS/RS, а в поиске рационального решения для заданной топологии и заданного режима нагрузки. В результате было получено, что для заданной конфигурации оптимально использование 7 шаттлов при условии максимальной нагрузки.

Результаты моделирования показали, что эффективность FWS/RS определяется количеством используемого оборудования и согласованностью локальных управленческих решений.

Сравнение стратегий хранения и релокации показало, что выбор ячейки размещения влияет на время текущей операции и на сложность будущих операций отбора. Стратегии, ориентированные только на минимизацию времени размещения, могут приводить к увеличению числа блокирующих паллет и росту времени релокации при последующем отборе. Поэтому при выборе политики хранения необходимо учитывать ближайшую свободную ячейку и ожидаемую частоту обращения к грузам, а также совместимость номенклатуры и вероятность будущих блокировок.

Для операций отбора наибольшую значимость имеет стратегия релокации блокирующих грузов. Нерациональное перемещение таких грузов может создавать дополнительные блокировки и увеличивать среднее время выполнения последующих транзакций. На основании эксперимента варьирования параметров были выделены характерные режимы работы системы. Наименьшее среднее время релокации обеспечивали политики, учитывающие совместимость номенклатуры и зоны хранения. «Жадное» размещение в ближайшую ячейку без учета характеристик грузов приводило к росту последующих перемещений. Таким образом, стратегия, эффективная для отдельной операции, не рациональна для системы в целом: сокращение

времени размещения может сопровождаться увеличением затрат на последующий отбор и релокацию. Поэтому для FWS/RS предпочтительны политики, учитывающие классы и совместимость грузов при назначении зон хранения; именно они обеспечивают более поздний переход системы к перегрузке при росте интенсивности входящего потока.

Таким образом, предложенный подход и разработанные инструменты могут использоваться для предварительной оценки проектных решений, а также как средство сравнительного анализа различных стратегий управления при фиксированной конфигурации складской зоны для уже реализованных проектов. Это позволяет снизить риск избыточных капитальных затрат и повысить обоснованность решений, принимаемых при проектировании FWS/RS.

Список источников

1. Mao J., Cheng J., Li X. Modelling Analysis of a Four-Way Shuttle-Based Storage and Retrieval System on the Basis of Operation Strategy. *Appl. Sci.* 2023. 13(5), 3306.
2. Polten L., Emde S. Multi-shuttle crane scheduling in automated storage and retrieval systems // *European Journal of Operational Research.* 2022. Vol. 302, № 3. P. 892-908.
3. López-Plata, I. Minimizing the operating cost of block retrieval operations in stacking facility / I. López-Plata et al. // *Computers & Industrial Engineering.* – 2019. – Vol. 136. – P. 436–452.
4. Gonzalez, K. Slotting Optimization Model for a Warehouse with Divisible Storage Locations / K. Gonzalez, R. Mena, F. Kristjanpoller // *Applied Sciences.* – 2021. – Vol. 11, No. 3. – Art. 936.
5. Houshyar A. Using simulation to compare different automated storage/retrieval system designs / A. Houshyar, I. Chung // *Computers & Industrial Engineering.* – 1991. – Vol. 21, No. 1–4. – P. 629–633.

6. Li M. Dual-Component Reward Mechanism Based on Proximal Policy Optimization: Resolving Head-On Conflicts in Multi-Four-Way Shuttle Systems for Warehousing / M. Li, Y. Xiang, X. Jin et al. // *Electronics*. – 2026. – Vol. 15. – Art. 11367.
7. Deng L. Modeling and performance analysis of shuttle-based compact storage systems under parallel processing policy / L. Deng, L. Chen, J. Zhao, R. Wang // *PLoS ONE*. – 2021. – Vol. 16, No. 11. – Art. e0259773.
8. Cheng W. Techniques of Automatic Modeling for Four-Way-Shuttle Based Storage and Retrieval System Based on Flexsim / W. Cheng, Z. Wang, Y. Wang // *MATEC Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 325
9. Ying L. Improved A* algorithm design for container relocation problem in four-way shuttle-based storage and retrieval systems / L. Ying, W. Xun, F. Hongqiang, Z. Jingtian // *Digital Engineering*. – 2026. – Vol. 9.- 100086.

References

1. Mao J., Cheng J., Li X. Modelling Analysis of a Four-Way Shuttle-Based Storage and Retrieval System on the Basis of Operation Strategy. *Appl. Sci.* 2023. 13(5), 3306.
2. Polten L., Emde S. Multi-shuttle crane scheduling in automated storage and retrieval systems // *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 302, № 3. P. 892-908.
3. López-Plata, I. Minimizing the operating cost of block retrieval operations in stacking facility / I. López-Plata et al. // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – Vol. 136. – P. 436–452.
4. Gonzalez, K. Slotting Optimization Model for a Warehouse with Divisible Storage Locations / K. Gonzalez, R. Mena, F. Kristjanpoller // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, No. 3. – Art. 936.
5. Houshyar A. Using simulation to compare different automated storage/retrieval system designs / A. Houshyar, I. Chung // *Computers & Industrial Engineering*. – 1991. – Vol. 21, No. 1–4. – P. 629–633.

6. Li M. Dual-Component Reward Mechanism Based on Proximal Policy Optimization: Resolving Head-On Conflicts in Multi-Four-Way Shuttle Systems for Warehousing / M. Li, Y. Xiang, X. Jin et al. // *Electronics*. – 2026. – Vol. 15. – Art. 11367.
7. Deng L. Modeling and performance analysis of shuttle-based compact storage systems under parallel processing policy / L. Deng, L. Chen, J. Zhao, R. Wang // *PLoS ONE*. – 2021. – Vol. 16, No. 11. – Art. e0259773.
8. Cheng W. Techniques of Automatic Modeling for Four-Way-Shuttle Based Storage and Retrieval System Based on Flexsim / W. Cheng, Z. Wang, Y. Wang // *MATEC Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 325
9. Ying L. Improved A* algorithm design for container relocation problem in four-way shuttle-based storage and retrieval systems / L. Ying, W. Xun, F. Hongqiang, Z. Jingtian // *Digital Engineering*. – 2026. – Vol. 9.- 100086.

© Лебедева Л.Н., Севодин В.О., 2026. *Московский экономический журнал*,

2026, № 5.