

Разработка базового метода работы интеллектуальной автоматической системы управления автоматизированным складом

П. Р. Соловьев, Е. А. Рыжкова

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва

Аннотация: В работе представлена концепция интеллектуальной надстройки, призванной объединить автоматизированные вертикальные системы хранения, мобильных роботов и стандартные системы управления как складом, так и производственными процессами в единый комплекс. Предложенная математическая модель описывает ключевые аспекты размещения товаров, маршрутизации роботов и учёта пропускной способности оборудования. Алгоритмы оптимизации позволяют формировать и оперативно корректировать планы хранения и перемещения с учётом динамических изменений (всплески спроса, сбои, приоритетные заказы). Результаты моделирования подтверждают, что реализованная система способствует сокращению временных и ресурсных затрат, повышает пропускную способность и обеспечивает более высокую адаптивность логистических операций.

Ключевые слова: логистика, складская оптимизация, автоматизированные вертикальные системы хранения, мобильные роботы, коллаборативные роботы, система управления складом, система управления производственными процессами, математическая модель, алгоритмы оптимизации, интеллектуальная система.

В условиях быстрорастущих объёмов электронной коммерции и стремления к оперативной логистике значительно возрастает актуальность инновационных подходов к организации складских процессов. Автоматизированные вертикальные системы хранения, мобильные роботы и специализированное программное обеспечение (ПО) уже внедряются на ряде предприятий, но зачастую действуют обособленно, что мешает достичь максимальной эффективности и гибкости [1]. Предлагаемая в работе интеллектуальная надстройка в режиме реального времени формирует согласованные решения по размещению товаров, маршрутам роботов и взаимодействию с вертикальными системами хранения, используя данные из систем управления складом (СУС) и систем управления производственными процессами (СУПП). Базовая математическая модель описывает ключевые элементы инфраструктуры с учётом их пропускной способности, а разработанные алгоритмы оптимизации позволяют гибко перепланировать

операции при сбоях или всплесках спроса. Такой подход обеспечивает сокращение временных и ресурсных затрат, повышает пропускную способность и подтверждает высокую практическую значимость и перспективность данной темы [2].

Общая концепция интеллектуальной системы

Допустим, у нас есть склад с уже установленным необходимым оборудованием: автоматизированные вертикальные системы хранения, обеспечивающие высокую плотность размещения товаров и быструю их подачу, а также мобильные роботы двух типов — обычные транспортные платформы и роботы с интегрированным коллаборативным манипулятором. При этом в распоряжении склада имеются стандартные СУС и СУПП, которые предоставляют базовые функции учёта и управления производственными процессами, но не обеспечивают полноценной интеграции и интеллектуальной оптимизации [3]. В результате каждый компонент (вертикальные модули, мобильные роботы, СУС, СУПП) работает относительно автономно, а единого центра принятия решений, который бы в реальном времени формировал оптимальные планы размещения товаров, маршруты движения роботов и расписания операций с учётом всех ресурсов и ограничений, на данный момент не существует [4].

Существующая инфраструктура склада не обеспечивает слаженную и оперативную координацию всех процессов. Каждый элемент — будь то автоматизированный модуль хранения или транспортная платформа — функционирует в значительной степени изолированно, опираясь лишь на локальные алгоритмы управления [5]. Вследствие этого, возникает ряд затруднений: сложно обеспечить оптимальное распределение товаров по вертикальным ячейкам, затруднена синхронизация действий роботов при ограниченном количестве точек доступа к модулям, а при меняющихся условиях (поломки, всплески заказов) отсутствует эффективный механизм

пересмотра графиков и маршрутов. В итоге, склад вынужден либо держать избыточный запас производственных ресурсов, либо мириться с задержками в выполнении заказов [6]. Чтобы устранить данные недостатки и достичь более высокого уровня производительности, необходимо создать интеллектуальную систему, способную в режиме реального времени формировать глобальные решения по размещению товаров и планированию роботизированных операций. Такая система будет действовать как «надстройка» над имеющимися СУС и СУПП, используя их данные и возможности, но дополняя их многофакторной оптимизацией и динамической адаптацией к текущей обстановке [7].

Базовая математическая модель системы

Далее представлена базовая математическая модель, которая призвана описать процессы хранения и перемещения товаров на складе, оснащённом вертикальными модулями и мобильными роботами. Данная модель включает в себя основные множества и параметры, связанные с характеристиками товаров, вместимостью вертикальных систем, а также техническими ограничениями и особенностями работы роботов. Кроме того, формулируются ключевые переменные решения, отражающие выбор мест хранения и планирование маршрутной деятельности роботов, и указываются основные ограничения, позволяющие учесть пропускную способность оборудования и временные лимиты.

1. Наборы объектов и их числовые параметры, описывающие складскую систему.

- Товары.

$$I = \{1, 2, \dots, I_n\} \quad (1)$$

I – это множество товаров, присутствующих на складе.

Для каждого товара i задано количество (или объём) q_i .

При необходимости вводятся дополнительные атрибуты: габариты, вес, частота спроса, приоритет и т. д.

- Вертикальные системы хранения (модули).

$$V = \{1, 2, \dots, V_n\} \quad (2)$$

V — множество всех вертикальных модулей хранения, установленных на складе. В таблице 1 представлено наглядное объяснение параметров.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Единица	Смысл и практическое значение
Вместимость модуля	C_v	ячейки / м ³	Максимальный объём (или число лотков), который может быть размещён в вертикальном модуле V .
Время механического доступа	t_v^{acc}	сек	Среднее время подъёма/опускания лифта модуля и подачи требуемого лотка оператору или роботу.
Одновременная обслуживаемость	$Cap(v)$	роботов	Количество мобильных роботов, которые могут одновременно работать с модулем V (определяется числом точек доступа/окон выдачи).

Каждый модуль V имеет вместимость C_v (в условных единицах объёма или количества ячеек), а также характеристику времени доступа t_v^{acc} , отражающую механическое время, необходимое модулю на выдачу или приём полки/лотка.

Кроме того, может быть учтён параметр $Cap(V)$, описывающий, сколько роботов одновременно могут обслуживать данный модуль (например, если у модуля несколько точек доступа).

- Мобильные роботы.

$$R = \{1, 2, \dots, R_n\} \quad (3)$$

R — множество всех мобильных роботов, задействованных на складе.

Часть из них ($R_{cobot} \subseteq R$) оснащена коллаборативными манипуляторами, способными самостоятельно выполнять операции забора/укладки товаров из вертикальных модулей. Остальные ($R_{basic} \subseteq R$) могут лишь перевозить грузы,

но не производить манипуляции. В таблице 2 представлено наглядное объяснение параметров.

Таблица 2

Параметр / множество	Обозначение	Единица измерения	Смысл и практическое назначение
Роботы-перевозчики	$R_{basic} \subseteq R$	роботов	Платформы без манипулятора; могут только транспортировать грузы между зонами.
Роботы-коботы	$R_{cobot} \subseteq R$	роботов	Платформы, оснащённые коллаборативным манипулятором; способны забирать и укладывать товар прямо из вертикальных модулей.

- Зоны склада.

$$W = \{1, 2, \dots, W_n\} \quad (4)$$

W — множество всех функциональных зон склада (приёмка, отгрузка, буферные участки, зоны консолидации и т.п.), между которыми перемещаются роботы.

Сюда входят области приёмки, отгрузки, промежуточные буферные зоны. Дополнительно определяются расстояния или времена перемещения между ними, зависящие от выбранного робота и конфигурации склада: $\tau_{r,w1,w2}$. В таблице 3 представлено наглядное объяснение параметров.

Таблица 3

Параметр	Обозначение	Единица	Смысл и назначение
Время перемещения робота между зонами	$\tau_{r,w1,w2}$	сек	Среднее время, которое робот r тратит на путь из зоны $w1$ в зону $w2$; учитывает длину маршрута, скорость платформы и локальные ограничения

- Заказы (операции).

$$O = \{1, 2, \dots, O_n\} \quad (5)$$

O — множество всех заказов (операций отбора/пополнения), которые склад должен выполнить в рассматриваемом плановом горизонте.

Каждый заказ O может включать перечень товаров, которые необходимо отобрать (или пополнить в случае инверсной задачи).

Задаётся приоритет или дедлайн $T_{\text{deadline},o}$. Если требуется учесть строгие временные окна, они задаются как интервалы $[e_o, l_o]$, где e_o — ранний старт (Earliest Start), а l_o — поздний финиш (Latest Finish). В таблице 4 представлено наглядное объяснение параметров.

Таблица 4

Параметр	Обозначение	Единица	Смысл и назначение
Жёсткий дедлайн	$T_{\text{deadline},o}$	сек / дата-время	Крайний момент завершения всех операций по заказу O
Ранний старт окна	e_o	сек / дата-время	Самый ранний момент, когда допускается начать обработку заказа O
Поздний финиш окна	l_o	сек / дата-время	Последний допустимый момент окончания заказа (если задано окно $[e_o, l_o]$)

2. Переменные решения.

- Размещение товаров: двоичная переменная x , показывающая, хранится ли товар i в вертикальном модуле v .

$$x_{i,v} \in 0,1 \quad (6)$$

Если один и тот же товар допустимо размещать в нескольких модулях (например, при большом количестве), условие

$$\sum x_{i,v} \leq 1 \quad (7)$$

может быть заменено на

$$\sum x_{i,v} = k_i, \quad (8)$$

Где k_i — разрешённое число модулей для товара i .

- Маршрутизация роботов: показывает, перевозит ли робот r товар i из зоны $w1$ в $w2$.

$$y_{r,i,w1,w2} \in 0,1 \quad (9)$$

При использовании более подробных моделей вводят дополнительные переменные для последовательных шагов пути робота, учитывая порядок следования зон.

- Планирование времени (если задача требует детального расписания). В таблице 5 представлено наглядное объяснение параметров.

Моменты начала и окончания k -й операции у робота r .

$$t_r^{start}(k), t_r^{finish}(k) \quad (10)$$

«Занимает ли робот r модуль v в момент времени t », если нужно дискретизировать время.

$$\delta_{r,v}(t) \in 0,1 \quad (11)$$

Таблица 5

Параметр	Обозначение	Единица	Смысл и назначение
Момент начала k -й операции робота r	$t_r^{start}(k)$	сек / дата-время	Временная отметка, когда робот r приступает к k -й задаче (поездка, захват, выгрузка и т.д.)
Момент окончания k -й операции робота r	$t_r^{finish}(k)$	сек / дата-время	Время, когда робот r завершает k -ю задачу и становится доступным для следующей
Индикатор занятости модуля v роботом r в момент t	$\delta_{r,v}(t)$	булевая	Показывает, обслуживает ли робот r вертикальный модуль v в конкретный момент времени t ; 1 — занят, 0 — свободен

- Манипуляции с товаром (только для роботов с коллаборативными манипуляторами). «Выполняет ли робот r операцию забора/выкладки товара i в модуле v ». В таблице 6 представлено наглядное объяснение параметров.

$$\theta_{r,i,v} \in 0,1 \quad (12)$$

Соответствующее время манипуляции можно задать как

$$T_{r,i,v}^{manip} \quad (13)$$

Таблица 6

Параметр	Обозначение	Единица	Смысл и назначение
Флаг выполнения операции «подбор/укладка» товара i роботом r в модуле v	$\theta_{r,i,v} \in 0,1$	булевая	1 — робот r выполняет захват или укладку товара i в вертикальном модуле v ; 0 — операция не назначена
Время манипуляции товара i роботом r в модуле v	$T_{r,i,v}^{manip}$	сек	Продолжительность цикла «подъехать + захват/выкладка» для пары (робот, товар, модуль)

3. Ограничения

- Ограничения вместимости вертикальных модулей:

$$\sum_i (q_i \cdot x_{i,v}) \leq C_v, \forall v \in V \quad (14)$$

Это гарантирует, что общий объём/вес товара, привязанного к модулю V , не превысит его доступную вместимость. В таблице 7 представлено наглядное объяснение параметров.

Таблица 7

Параметр	Обозначение в формуле	Единица	Смысл и назначение
Множество вертикальных модулей	V	модули	Перечень всех вертикальных систем хранения на складе
Вместимость модуля	C_v	ячейки / м ³	Максимальный объём (или число лотков), который может быть размещён в модуле v
Объём (или вес) товара	q_i	шт / м ³ / кг	Размерная характеристика единицы товара i (сколько места он занимает)
Двоичная переменная хранения	$x_{i,v}$	булевая	1 — товар i хранится в модуле v ; 0 — товар i не хранится в модуле v

- Ограничения уникальности (или кратности) размещения:

$$\sum_{v \in V} x_{i,v} \leq 1, \forall i \in I \quad (15)$$

Выбирается исходя из физической и организационной стратегии хранения (один товар — один модуль или несколько).

- Ограничения на маршрут и выполнение заказов:

Если рассматривается полный цикл отбора со склада: «товар i находится в модуле $v \rightarrow$ загрузка роботом $r \rightarrow$ доставка в зону отгрузки w »:

$$y_{r,i,v,w} = 1 \Rightarrow x_{i,v} = 1 \quad (16)$$

То есть, если робот r перевозит товар i из модуля v в зону w , то товар i действительно должен там храниться. В таблице 8 представлено наглядное объяснение параметров.

Таблица 8

Параметр	Обозначение	Единица	Смысл и назначение
Флаг транспортировки товара i роботом r из модуля v в зону w	$y_{r,i,v,w}$	булевая	1 — робот r перевозит товар i из вертикального модуля v в зону w ; 0 — такой перевозки нет

Консервация потока: для каждого товара, требующего перемещения, суммарное количество задействованных отрезков пути должно быть равно 1 (или равно нужному количеству единиц, если товаров несколько):

$$\sum_{r \in R} \sum_{(w1,w2) \in W} y_{r,i,w1,w2} = 1, \forall i \in I_{to\ move} \quad (17)$$

- Временные ограничения:

Ограничение одновременных операций робота:

$$t_r^{finish}(k) \leq t_r^{start}(k+1), \forall k, r \in R \quad (18)$$

Запрещает роботу выполнять более одной задачи в одно и то же время.

Временные окна (если требуется соблюдение дедлайнов для заказов):

$$t_r^{finish}(o) \leq T_{deadline,o}, \forall o \in O \quad (19)$$

где

$$t_r^{finish}(o) \quad (20)$$

— момент окончания операции, удовлетворяющей заказ o .

- Ограничения пропускной способности модуля:

$$\sum_{r \in R} \delta_{r,v}(t) \leq \text{Cap}(v), \forall v \in V, \forall t \in T \quad (21)$$

Если $\text{Cap}(v)=1$, модуль может обслуживать только одного робота в единицу дискретного времени t ; для большей пропускной способности ставят $\text{Cap}(v)>1$.

4. Целевая функция (F)

Сформируем мультикритериальную функцию F . В таблице 9 представлено наглядное объяснение параметров.

$$F = \min \left(\alpha_1 \cdot T_{\text{makespan}} + \alpha_2 \cdot \sum_r \sum_{w1, w2} (y_{r,i,w1,w2} \cdot \tau_{r,w1,w2}) + \alpha_3 \cdot \Psi(x_{i,v}) \right) \quad (22)$$

Таблица 9

Элемент целевой функции	Обозначение	Смысл и назначение
Общее время выполнения плана	T_{makespan}	Время завершения последней операции (или суммарная длительность всех заказов); минимизация ускоряет обработку заказов.
Суммарные логистические затраты на перемещение	$\sum_r \sum_{w1, w2} (y_{r,i,w1,w2} \cdot \tau_{r,w1,w2})$	Учёт времени/стоимости пробегов роботов; может включать энерго-, амортизационные и другие эксплуатационные расходы.
Штраф за неэффективное размещение	$\Psi(\{x_{i,v}\})$	Отражает качество распределения товаров по модулям: чем больше востребованных позиций находится в «быстрых» модулях, тем ниже штраф.
Весовые коэффициенты	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Задают приоритеты критериев: α_1 — важность сокращения времени, α_2 — снижения затрат на перемещение, α_3 — минимизации потерь от нерационального хранения.

5. Применение и дальнейшие доработки

В описанной модели уже учтена основная логика: где хранить (переменные $x_{i,v}$) и как перемещать (переменные $y_{r,i,w1,w2}$, время сервисных операций).

Для реального склада могут быть добавлены дополнительные детали:

- Учёт габаритов (не только объём, но и ограничения по высоте, весу, форм-фактору) [9].
- Учёт зарядки мобильных роботов (ограничение по количеству и времени зарядных станций).
- Системы резервирования: если модуль временно недоступен, должны быть введены соответствующие ограничения.

Также возможно использование метаэвристических алгоритмов (например, генетический алгоритм, поиск с запретами, муравьиные колонии), чтобы находить приближённые решения для больших размеров задачи, где точные методы становятся вычислительно сложными [10].

Таким образом, данная базовая математическая модель закладывает основу для разработки системы оптимизации, которая будет в реальном времени (или с регулярным обновлением) решать задачу глобального планирования размещения товаров и роботизированных перемещений, учитывая существующие ресурсы склада (вертикальные модули, роботы, зоны) и ограничивающие факторы (вместимость, время обслуживания, дедлайны заказов).

Литература

1. Соловьев П.Р., Савина Л.Ю., Захаркина С.В., Масанов С.В., Рыжкова Е.А. Разработка системы управления квадрокоптером в SimMechanics // Инженерный вестник Дона. 2023. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906.
 2. Соловьев П.Р., Рыжкова Е.А. Разработка упрощенного метода калибровки коллаборативного робота на мобильной тележке // Инженерный вестник Дона. 2024. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9682.
 3. Kuhl Michael E., Bhisti Rukshar, Bhattathiri Sriparvathi Shaji, Li Maojia P. Warehouse Digital Twin: Simulation Modeling and Analysis Techniques. 2022 Winter Simulation Conference (WSC). 2022. URL: ieeexplore.ieee.org/document/10015265
 4. Li Xin, He Bin, Zhipeng Wang, Yanmin Zhou, Li Gang. Digital Twin-Driven Task Replanning Method for Robot-Environment Physical Interaction. 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Baishan. IEEE. 2022. С. 407-412
 5. Wu Zhenyong, Wang Yuan, Wu Hanzhao, Zhang Wei, Zhou Rong. Digital Twin-Driven Design and Optimization Method for Smart Warehouse. Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. 2022. URL: informs-sim.org/wsc22papers/298.pdf
 6. Deogratias Kibira, Shao Guodong, Ventekesh Rishabh. Building a Digital Twin of an Automated Robot Workcell. Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM). 2023. URL: tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=936285
 7. Kuts Vladimir, Marvel Jeremy A., Aksu Murat, Pizzagalli Simone L., Sarkans Martinš, Bondarenko Yevhen, Tauno Otto. Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool. MDPI Robotics. 2022. URL: doi.org/10.3390/robotics11050113
-

8. Батранюк И.А., Шемет Д.В. Взаимодействие коллаборативных роботов при совместной работе с людьми и другими роботами. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. С. 492-495.

9. Belokopytov, M. D. Collaborative Robots. Proceedings of Young Scientists and Specialists of Samara University. 2022. № 2(21). С. 160-164.

10. Карпов, В. Э. Сигнальная коммуникация для управления поведением коллаборативного робота. Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 5. С. 260-268.

References

1. Solov`ev P.R., Savina L.Yu., Zaxarkina S.V., Masanov S.V., Ry`zhkova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906.

2. Solov`ev P.R., Ry`zhkova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9682.

3. Kuhl Michael E., Bhisti Rukshar, Bhattathiri Sriparvathi Shaji, Li Maojia P. Warehouse Digital Twin: Simulation Modeling and Analysis Techniques. 2022 Winter Simulation Conference (WSC). 2022. URL: ieeexplore.ieee.org/document/10015265.

4. Li Xin, He Bin, Zhipeng Wang, Yanmin Zhou, Li Gang. Digital Twin-Driven Task Replanning Method for Robot-Environment Physical Interaction. 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Baishan. IEEE. 2022. pp. 407-412

5. Wu Zhenyong, Wang Yuan, Wu Hanzhao, Zhang Wei, Zhou Rong. Digital Twin-Driven Design and Optimization Method for Smart Warehouse. Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. 2022. URL: informs-sim.org/wsc22papers/298.pdf.

6. Deogratias Kibira, Shao Guodong, Ventekesh Rishabh. Building a Digital Twin of an Automated Robot Workcell. Annual Modeling and Simulation



Conference (ANNSIM). 2023. URL:
tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=936285.

7. Kuts Vladimir, Marvel Jeremy A., Aksu Murat, Pizzagalli Simone L., Sarkans Martinš, Bondarenko Yevhen, Tauno Otto. Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool. MDPI Robotics. 2022. URL: doi.org/10.3390/robotics11050113.

8. Batranyuk I.A., Shemet D.V. Aktual'ny'e problemy' aviacii i kosmonavтики. 2021. P. 492-495.

9. Belokopytov, M.D. Collaborative Robots. Proceedings of Young Scientists and Specialists of Samara University. 2022. No. 2(21). pp. 160-164.

10. Karpov, V. E'. Mexatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2023. T. 24, № 5. pp. 260-268.

Дата поступления: 17.03.2025

Дата публикации: 27.04.2025