

Научная статья

УДК 681.518

DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-4-54-70

Алгоритмы управления матричным складом на базе унифицированных транспортно-складских ячеек

Александр Владимирович Разумовский¹

Михаил Владимирович Сарамуд²

Яков Юрьевич Пикалов³

¹⁻³Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева
Красноярск, Россия

¹razumovskii.a.work@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2201-4211>

²msaramud@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0344-9842>

³yapibest@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Аннотация

В статье рассматриваются принципы организации работы складских систем на базе унифицированных транспортно-складских ячеек. Описаны общие аппаратные особенности функционирования транспортно-складских ячеек, заключающиеся в обеспечении возможности перемещения хранимого в них груза между собой. Представлен метод построения графа склада, учитывающий возможные направления передачи контейнеров с грузом между транспортно-складскими ячейками, добавленных в структуру склада, а также их общие аппаратные особенности. Описаны ключевые критерии, учитываемые при определении весовых коэффициентов ребер графа: базовая стоимость перемещения для каждой оси, износ ячеек, масса груза, хрупкость груза, расстояние до ближайших свободных ячеек, ремонтпригодность. Представлены алгоритмы, основной задачей которых является определение порядка перемещений контейнеров между ячейками склада с целью выполнения загрузки и разгрузки склада. Проведено имитационное моделирование работы склада размерами $5 \times 5 \times 5$ с использованием предложенных алгоритмов с учетом и без учета параметров износа ячеек. В результате моделирования была определена значимость данного критерия, позволяющая увеличить интервалы обслуживания склада и максимизировать время до первого сбоя. Проведено исследование возможности оптимизации структуры подобного рода складских систем с учетом различных требований, в ходе которого осуществлена оптимизация структуры для склада размерами $4 \times 3 \times 3$.

Ключевые слова

алгоритм Дейкстры, многопараметрическая оптимизация, теория графов, автоматизированные складские системы

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № FEFE-2020-0017).

Для цитирования

Разумовский А. В., Сарамуд М. В., Пикалов Я. Ю. Алгоритмы управления матричным складом на базе унифицированных транспортно-складских ячеек // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21, № 4. С. 54–70. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-4-54-70

© Разумовский А. В., Сарамуд М. В., Пикалов Я. Ю., 2023

The Algorithms for Managing a Matrix-Based Warehouse Utilizing Standardized Transport and Storage Cells

Alexandre V. Razumovsky¹, Mikhail V. Saramud²,
Yakov Y. Pikalov³

¹⁻³M. F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies
Krasnoyarsk, Russian Federation

¹razumovskii.a.work@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2201-4211>

²msaramud@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0344-9842>

³yapibest@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Abstract

The article explores the principles of organizing warehouse systems based on standardized transport and storage cells. It discusses the general hardware features of transport and storage cells that enable the movement of stored goods between them. The article presents a method for constructing a warehouse graph that takes into account possible directions for transferring containers with cargo between the transport and storage cells integrated into the warehouse structure, along with their common hardware characteristics. Key criteria used in determining the edge weights of the graph are described, including the basic cost of movement for each axis, cell wear and tear, cargo weight, fragility of the cargo, distance to the nearest available cells, and reparability. Algorithms are presented, the primary task of which is to determine the sequence of container movements between warehouse cells to facilitate loading and unloading operations. Simulation modeling of a warehouse with dimensions of $5 \times 5 \times 5$ was conducted using the proposed algorithms, both with and without considering cell wear and tear parameters. The results of the simulation highlighted the significance of this criterion, allowing for extended warehouse servicing intervals and maximizing the time until the first failure. The study also investigates the possibility of optimizing the structure of such warehouse systems to meet various requirements. As part of this investigation, the structure was optimized for a warehouse with dimensions of $4 \times 3 \times 3$.

Keywords

Dijkstra's algorithm, multiparameter optimization, graph theory, automated warehouse systems

Funding

The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. FEFE-2020-0017).

For citation

Razumovsky A. V., Saramud M. V., Pikalov Y. Y. The algorithms for managing a matrix-based warehouse utilizing standardized transport and storage cells. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 54–70. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-4-54-70

Введение

Вопросы эффективности и оптимизации автоматизированных складских структур являются одними из наиболее обсуждаемых при организации их работы. Существует множество различных подходов, используемых при организации автоматизированных складских систем¹, особенности которых были рассмотрены авторами в статьях [1; 2]. Также существуют системы, которые используют комбинации различных подходов [3]. Однако подобного рода подходы не позволяют использовать максимум свободного пространства доступной области, в которой располагается автоматизированный склад. Наиболее близким аналогом по эффективности использования пространства является система хранения на основе пазлов [4], в которой грузы перемещаются небольшим количеством автономных мобильных роботов. Данные роботы могут свободно перемещаться под грузами, поднимать определенный груз и переносить его на соседнее свободное пространство. Однако роботы перемещают всю стопку с грузами, что является не очень энергоэффективным решением. Для повышения эффективности использования доступного пространства предложен подход формирования склада из унифицированных ячеек.

¹ Higginbotham Gary. 8 Types of Automated Storage and Retrieval Systems (ASRS): A Deep Dive. URL: <https://us.blog.kardex-remstar.com/types-of-automated-storage-and-retrieval-systems>

В качестве объекта управления в данной статье предлагается рассмотреть складские системы, построенные на базе унифицированных транспортно-складских ячеек, каждая из которых является местом хранения и оснащена механизмом для перемещения груза в одном из шести направлений. Ниже представлена транспортно-складская ячейка (рис. 1).

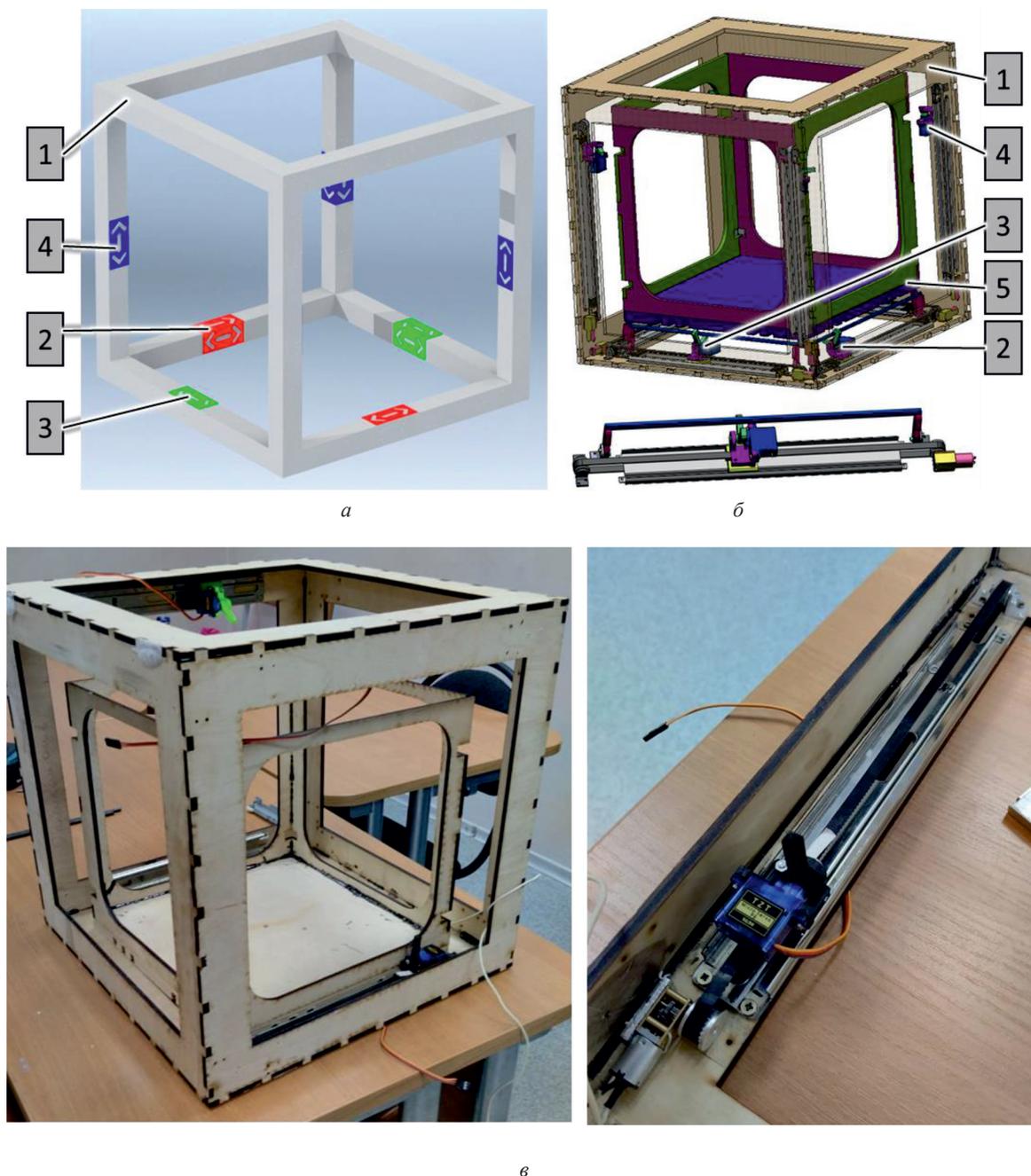


Рис. 1. Схема унифицированной транспортно-складской ячейки (а), 3D-модель конструкции (б) и экспериментальный макет (в)
 Fig. 1. Schematic representation of the standardized transport and storage cell (a), 3D model of the structure (b), and experimental prototype (c)

Ячейка состоит из неподвижного каркаса 1, в котором имеются устройства фиксации груза (на схеме не показаны), привода перемещения грузов 2, 3 и 4: вдоль осей X (2 шт.), Y (2 шт.),

Z (4 шт.), а также контейнер 5 с перемещаемым грузом. Приводы вдоль каждой из координатных осей работают синхронно и могут перемещать груз в одну из шести соседних ячеек (рис. 2).

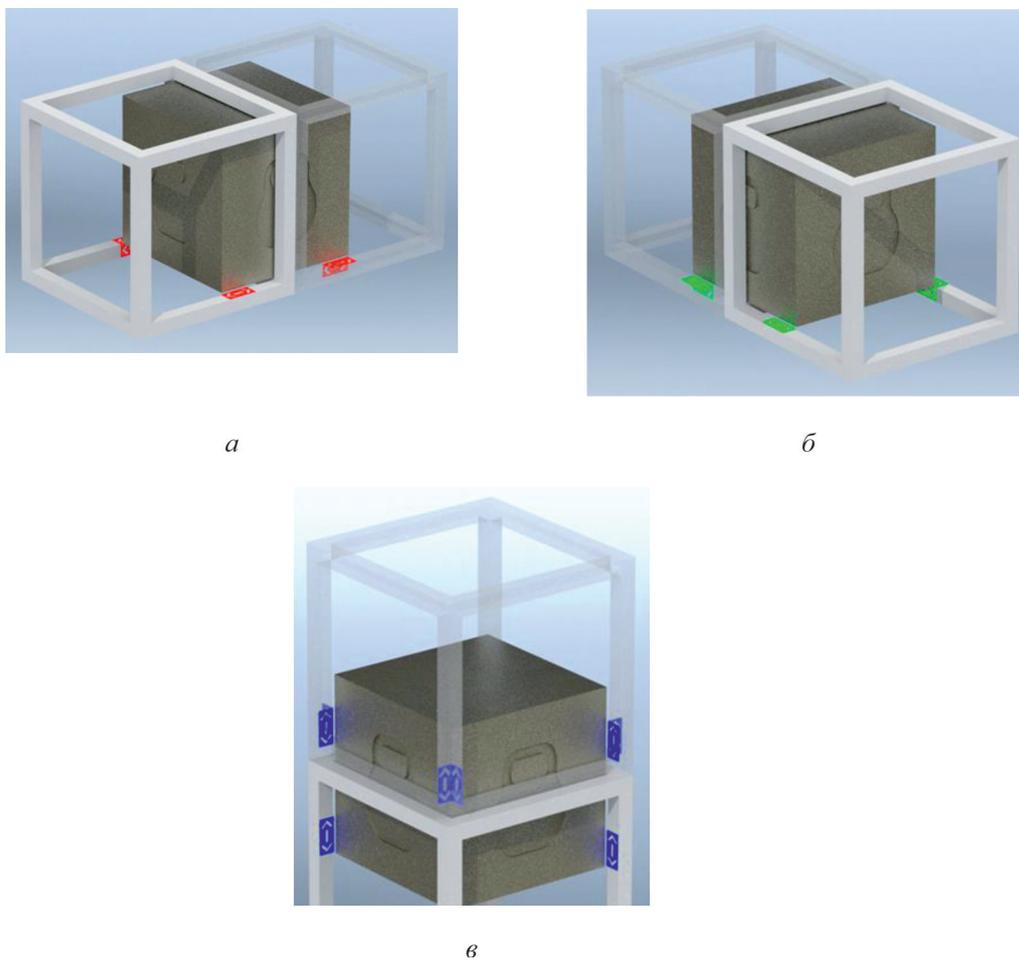


Рис. 2. Варианты перемещения грузов вдоль координатных осей:
перемещение вдоль OX (а), OY (б) и OZ (в)
Fig. 2. Options for cargo movement along coordinate axes:
movement along OX (a), OY (b), and OZ (v)

Пример обработки запроса в складской системе, построенной на базе таких ячеек, представлен на рис. 3. После того как в систему управления складом поступил запрос на выдачу груза (обозначенного на схеме красным цветом), груз последовательно перемещается из одной ячейки в другую, как показано белыми стрелками. На пути следования груза имеется синий контейнер, который преграждает путь к зоне выдачи, поэтому данный контейнер смещается в ближайшую свободную ячейку, после чего красный контейнер передается в зону выдачи. Общая идея алгоритмов, которые рассматриваются в данной работе, очень схожа с идеей, описанной в работах [5; 6], за тем отличием, что предлагаемые алгоритмы разрабатывались конкретно под предлагаемую структуру склада с возможностью работы во всех плоскостях.

Автоматизированные склады, находящиеся в различных сферах хозяйственной деятельности, могут существенно отличаться по ряду показателей (вместимость склада, размер складского помещения и хранящихся объектов, скорости выдачи / загрузки и т. д.). Так, на автома-

тизированном складе интернет-магазина мелкой цифровой техники необходимо обеспечить большую ротацию широкой номенклатуры товаров, при этом требования к скорости загрузки / выдачи товаров не слишком жесткие, в то время как на облачном хранилище вещей частота обновления объектов будет низкая, но требуется обеспечить высокую скорость загрузки-выгрузки крупногабаритных ячеек хранения. Таким образом, для этих двух случаев алгоритмы построения оптимальной структуры, а также путей загрузки и разгрузки будут различаться.

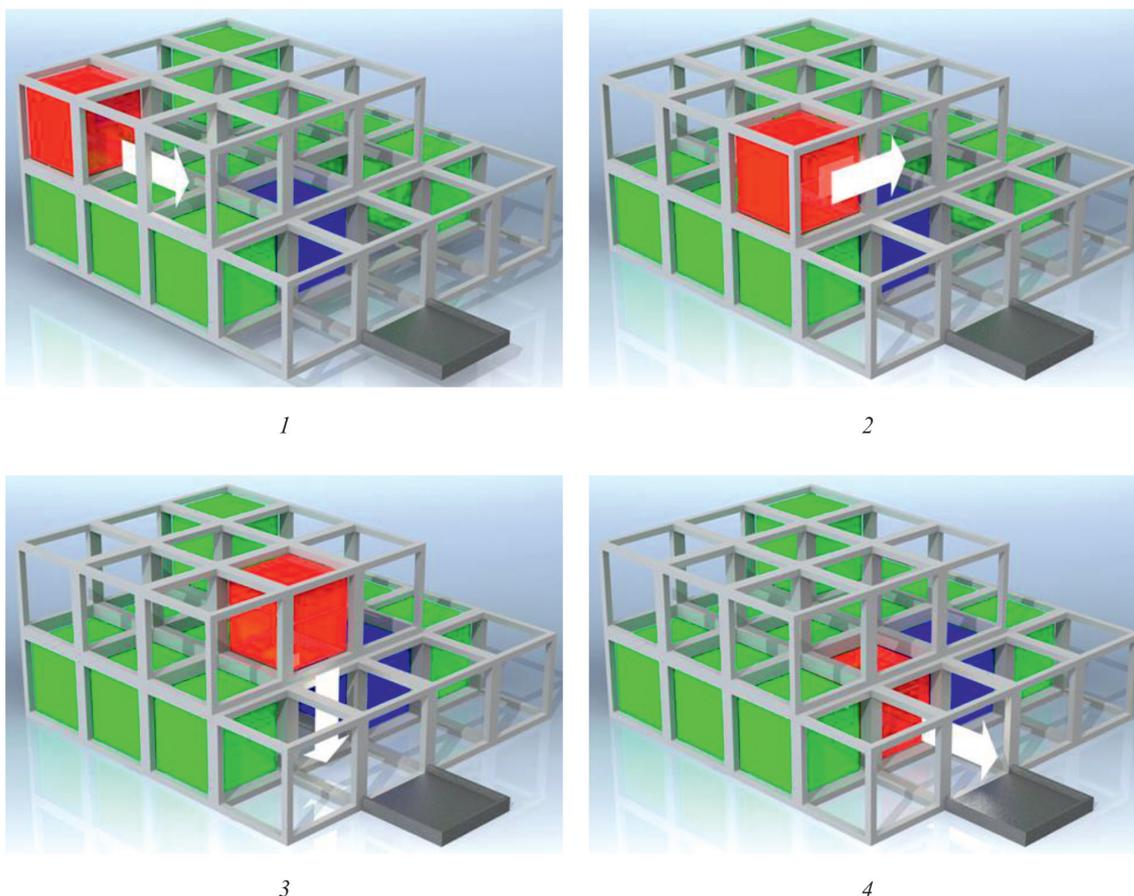


Рис. 3. Последовательность движений при перемещении груза в зону выдачи (1–4)
 Fig. 3. Sequence of movements during the cargo relocation to the issuing zone (1–4)

Для оптимизации данных алгоритмов можно выделить следующие параметры автоматизированного склада, которые можно подразделить на группы.

1. Параметры, связанные со складским помещением и характеристиками складских ячеек (его размерами, конфигурацией и т.д.):

1.1. Конфигурация склада (форма расположения ячеек). Любой склад считается параллелепипедом с фиксированным количеством ячеек по каждой из 3 декартовых координат. При этом каждая ячейка имеет свой трехмерный адрес. Для сложных конфигураций часть ячеек не может принимать и перемещать контейнер с грузом (например, в тех местах, где расположены несущие конструкции складского помещения или где организованы проходы).

1.2. Структура склада. Каждая из ячеек склада может иметь ограничения на перемещения вдоль некоторых координатных осей. Количество и расположение этих ячеек может быть оптимизировано и задано принудительно. Существуют следующие типы ячеек:

1.2.1. Отсутствующие ячейки – не могут перемещать или принимать груз. Они служат для обозначения в складском массиве, либо вышедших из строя ячеек, либо тех мест, где ячеек быть не должно ввиду конфигурации складского помещения.

1.2.2. Ячейки двунаправленного перемещения (X и Y , либо X и Z , либо Y и Z).

1.2.3. Ячейки трехнаправленного перемещения, которые могут осуществлять перемещение сразу по 3 координатам.

1.3. Энергозатраты перемещения груза в различных направлениях. Для перемещения груза в горизонтальном направлении ячейка задействует 2 привода, а для вертикального перемещения используются 4 привода. При этом подъем груза вверх сопряжен с большими затратами энергии в сравнении с опусканием того же груза вниз.

1.4. Расположение зоны выдачи и загрузки объектов:

1.4.1. Могут совпадать и не совпадать.

1.4.2. Выполнены в виде единичных ячеек, произвольно расположенных на гранях, либо в виде целых рядов или плоскостей.

1.4.3. Фиксированные либо изменяющие свое расположение.

1.5. Износ ячеек. Может быть подсчитан как количество перемещений вдоль каждой из осей.

1.6. Ремонтопригодность ячеек склада. Можно охарактеризовать доступностью для человека, т. е. ячейки, расположенные ближе к проходам на высоте человеческого роста, будут иметь наибольшую ремонтопригодность, а ячейки, находящиеся в глубине склада либо у стены, – наименьшую.

2. Параметры, связанные с характеристиками груза:

2.1. Масса перемещаемого груза. Чем тяжелее груз, тем меньше вероятность его перемещения.

2.2. Хрупкость груза – такие объекты, которые не желательно перемещать без необходимости.

2.3. Уникальность груза:

2.3.1. Каждый объект уникален и другого такого же на складе не будет. Например, характерно для облачного склада хранения вещей.

2.3.2. На складе присутствует (или может присутствовать) группа объектов, которые обладают практически схожими характеристиками, но могут отличаться, например, датой выпуска или версией. Это может учитываться при организации очереди выдаваемых со склада грузов.

2.3.3. На складе подразумевается наличие абсолютно одинаковых экземпляров груза. Соответственно, последовательность их выдачи значения не имеет.

2.4. Количество объектов, хранящихся в одном контейнере:

2.4.1. Один объект. Когда контейнер с грузом поступает на выдачу со склада, то на склад он больше не возвращается.

2.4.2. Несколько объектов. В этом случае после выдачи одного или нескольких объектов из контейнера он возвращается на склад до следующего запроса.

3. Параметры, связанные с режимом работы склада.

3.1. Количество загруженных ячеек.

3.2. Приоритетность задач загрузки-выгрузки объектов склада:

3.2.1. Время выгрузки объектов со склада может быть критически важным показателем, для обеспечения максимально быстрого реагирования на запрос пользователя (например, в off-line магазине или на складе вещей), в то время как время загрузки на склад – менее критичное значения так как можно организовать некоторую буферную зону для быстрого приема объектов хранения.

3.2.2. Время загрузки и выгрузки имеют одинаковую значимость. Данная ситуация характерна для автоматизированных складов, не взаимодействующих непосредственно с пользователем, а выполняющим свои функции внутри общей автоматизированной среды.

3.2.3. Время загрузки объектов на склад имеет больший приоритет по сравнению с выдачей. Соответствует случаю работы склада, например, в транспортной компании или off-line магазине в моменты прихода партии товара.

3.3. Частота обращений к складу. То есть количество загрузок и выгрузок в день:

3.3.1. Высокая частота – более 2000 объектов в день. Например, склад магазина.

3.3.2. Средняя частота – 200–2000 объектов в день. Например, склад автоматизированного производства.

3.3.3. Низкая частота – менее 200 объектов в день. Например, склад облачного хранилища вещей.

3.4. Приоритетность ротации объектов. Подразумевает наличие на складе закономерности между последовательностями поступающих и выдаваемых объектов:

3.4.1. First-In-First-Out (FIFO). Объекты, которые поступили первыми на склад, первыми поступают на выдачу. Например, в магазине продуктов, имеющих срок годности и при наличии одинаковых единиц товаров, выдавать следует те, которые поступили первыми.

3.4.2. Last-In-First-Out (LIFO). Объекты, которые поступили последними, первыми подлежат выдаче. Может применяться, например, для склада комплектующих в автоматизированном производстве.

3.4.3. Приоритетность отсутствует. Данная ситуация характерна для складов, в которых характерно произвольное поступление и выдача грузов (например, облачный склад хранения вещей).

3.5. Допустимое количество одновременных перемещений:

3.5.1. Без ограничения. Склад может осуществлять одновременные перемещения сразу нескольких ячеек, но требует более высоких затрат энергии для одновременного перемещения нескольких контейнеров.

3.5.2. Ограниченно. Количество максимальных синхронных перемещений ограничено (например, с точки зрения предельных потребляемых токов приводами перемещений).

3.5.3. Отсутствует. То есть все перемещения осуществляются последовательно (по одной ячейке).

Метод построения графа склада

Каждая ячейка склада характеризуется следующим рядом значений: координаты позиции ячейки в структуре склада, идентификатор ячейки и аппаратно допустимые направления передачи контейнеров груза данной ячейкой. Дополнительно в ходе работы склада также собирается информация о количестве совершенных передач контейнеров данной ячейкой в каждом направлении. Каждая ячейка также содержит информацию о своем содержимом – контейнере. Каждый контейнер в свою очередь имеет общую информацию для идентификации груза, а также такие характеристики, как хрупкость груза и его массу.

Для решения задачи перемещения контейнеров с грузами между ячейками структура склада представляется в виде направленного графа [7]. В данном графе вершины представляют собой ячейки склада с соответствующим идентификатором, а ребра – возможность передачи контейнера между соседними ячейками. Помимо этого, каждое ребро графа имеет весовой коэффициент, отражающий стоимость передачи контейнера с грузом в назначенном направлении.

Обновление связей между вершинами осуществляется при добавлении новой ячейки в объект склада. Относительно добавляемой на склад ячейки осуществляется проверка наличия ячейки в направлениях, в которых добавляемая ячейка способна осуществлять передачу груза. Передача между ячейками возможна в случае, если добавляемая ячейка (A) и проверяемая ячейка (B) могут передавать груз в направлениях от A в B и от B в A .

Принцип вычисления весовых коэффициентов, назначаемым ребрам графа, удобней всего рассмотреть между двумя соседними ячейками A и B , соединенными ребром. При этом предполагается перемещение груза из ячейки A в B . Тогда для данного ребра весовой коэффициент вычисляется по следующей общей формуле:

$$W_{AB} = \sum_{i=1}^N w_i * C_i,$$

где W_{AB} – общая стоимость перемещения по данному ребру, w_i – значимость i -го фактора; C_i – числовое значение, отражающее i -й фактор; N – общее количество факторов.

В предложенной модели учитываются следующие факторы, влияющие на общую стоимость перемещения по каждому ребру графа:

1. Базовая стоимость перемещения C_1 . Задается в параметрах склада. В зависимости от направления передачи контейнера устанавливаются разные базовые стоимости его перемещения:

1.1 В горизонтальном направлении: $C_1 = 1$.

1.2. В вертикальном направлении вверх: $C_1 = 2$ (так как задействовано в 2 раза больше приводом по сравнению с горизонтальным перемещением).

1.3. В вертикальном направлении вниз: $C_1 = 1,5$ (меньше на 0,5, так как при движении вниз меньше нагрузка).

2. Износ ячеек C_2 :

$$C_2 = \frac{\max(\text{move}_A, \text{move}_B)}{\text{move}_{lim}},$$

где move_A и move_B – количество перемещений контейнеров в ячейке A и B (соответственно) вдоль направления $A-B$ за все время; move_{lim} – максимальное допустимое количество перемещений грузов для ячеек в направлении $A-B$.

3. Масса груза в контейнере ячейки C_3 . Параметр может иметь значение в диапазоне $(0; 1]$, где верхнее значение – максимально возможная масса груза.

4. Относительная хрупкость груза в контейнере ячейки C_4 . Параметр может иметь значение в диапазоне $[0; 1]$.

5. Среднее расстояние до ближайших свободных ячеек C_5 . При вычислении его значения определяется среднее среди минимальных расстояний до N_E ближайших пустых ячеек:

$$C_5 = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} \min_steps_j,$$

где \min_steps – список минимальных расстояний до ближайших N_E свободных ячеек относительно ячейки B .

6. Ремонтпригодность C_6 . Характеризуется доступностью для замены обслуживающим персоналом. Так, наиболее ремонтпригодными считаются ячейки, расположенные на внешних вертикальных стенках складского массива.

На рис. 4 представлена визуализация графа склада размерами $5 \times 4 \times 3$.

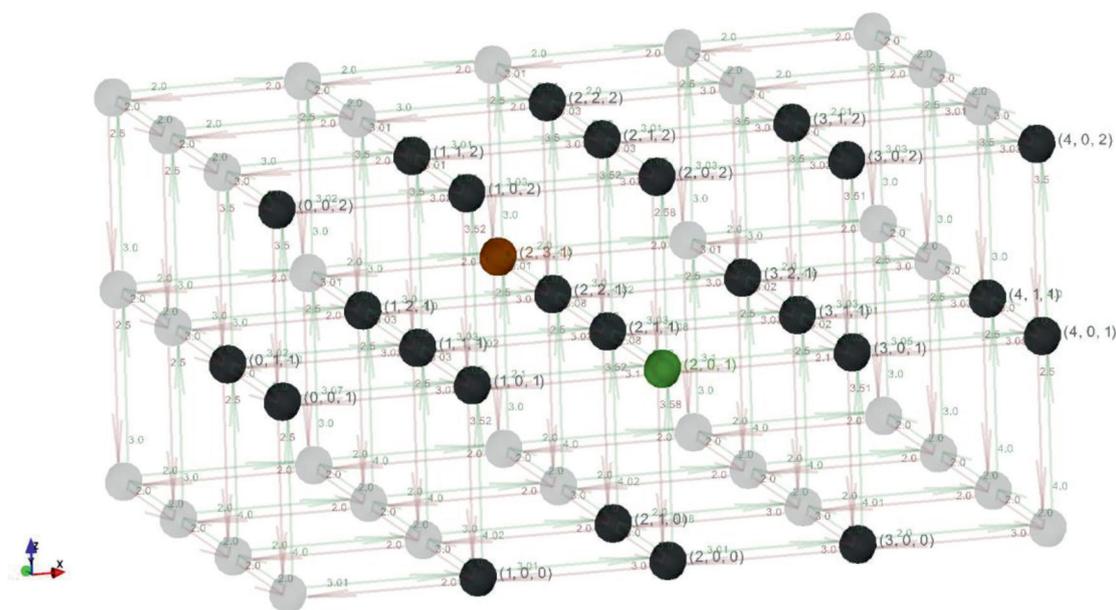


Рис. 4. Визуализация 3D-графа складского массива
 Fig. 4. Visualization of the 3D graph of the warehouse array

На представленном изображении вершины склада имеют разную цветовую идентификацию в зависимости от состояния и/или назначения:

1. Зеленые вершины соответствуют ячейкам, назначенным в качестве пунктов загрузки контейнеров в склад.
2. Красные вершины соответствуют ячейкам, назначенным в качестве пунктов выгрузки контейнеров со склада.
3. Темно-серые вершины соответствуют ячейкам, в которых имеется контейнер с грузом.
4. Полупрозрачные вершины соответствуют свободным ячейкам склада.

Алгоритм загрузки склада

При описании алгоритма работы склада использовалась следующая терминология. Путь – упорядоченный список действий (шагов), которые представляют собой тройки значений: координаты ячейки, соответствующие начальной позиции контейнера; координаты целевой ячейки; стоимость (вес) перемещения. Для расчетов путей перемещения контейнеров в процессах загрузки и разгрузки реализовано два алгоритма соответственно. В основе данных алгоритмов лежит алгоритм Дейкстры [8], основанный на фибоначиевой куче [9], используемый для определения оптимального пути в графах². Оптимальность определяется на основе рассчитанных весовых коэффициентов ребер графа. Оптимальная целевая ячейка – ячейка, в которой общая стоимость перемещения контейнера, следуя найденному пути, минимальна.

Алгоритм загрузки склада реализован следующим образом:

1. Из процесса поиска пути исключаются вершины графа, соответствующие ячейкам, назначенным для загрузки контейнеров на склад, кроме ячейки, из которой в данный момент осуществляется загрузка.

² SciPy documentation. `scipy.sparse.csgraph.dijkstra` – SciPy v1.11.2 Manual. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.sparse.csgraph.dijkstra.html>

2. Осуществляется поиск пути для контейнера из ячейки загрузки в оптимальную ячейку склада на основе алгоритма Дейкстры.

3. Осуществляется проверка перемещения груза, последовательно следуя шагам найденного пути до тех пор, пока не будет встречен шаг, на котором целевая ячейка перемещения контейнера будет загружена.

4. Порядок последовательности данного и оставшихся шагов пути меняется в обратную сторону.

Следуя путям перемещения, получаемым данным алгоритмом, помещаемые на склад контейнеры распределяются в первую очередь по наиболее оптимальным ячейкам, после чего последовательно продвигаются глубже в склад. На рис. 5 представлен пример изменения при загрузке контейнера на склад.

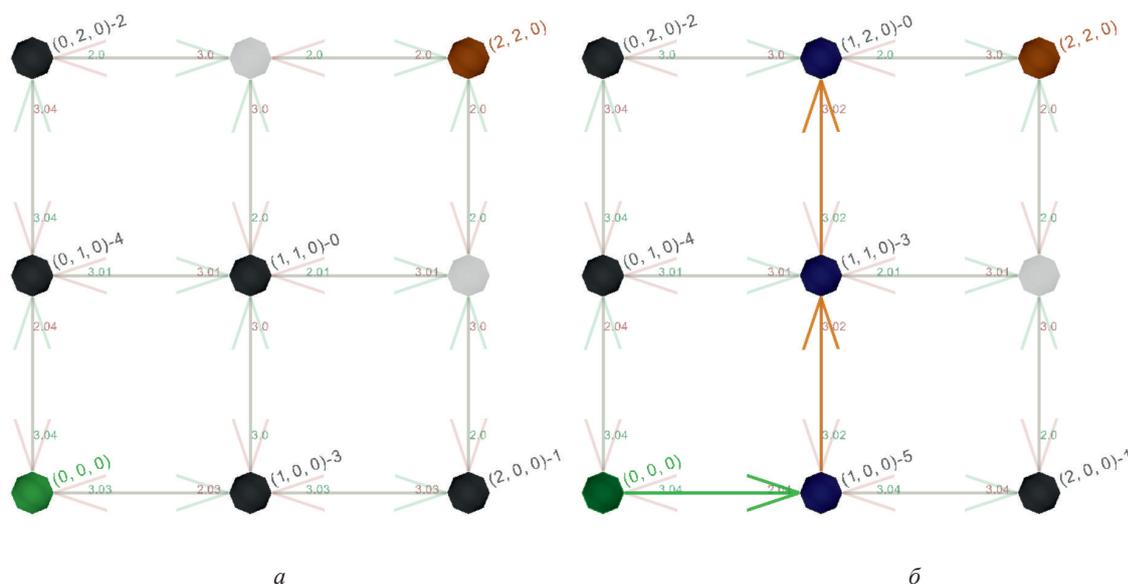


Рис. 5. Пример помещения контейнера на склад:
 а – исходное состояние склада; б – конечное состояние склада
 Fig. 5. Example of container placement in the warehouse:
 а – initial state of the warehouse; б – final state of the warehouse

Темно-синим цветом обозначены ячейки, задействованные в процессе перемещения контейнеров и являются занятыми на момент окончания перемещений. Зеленые стрелочки визуализируют основной маршрут перемещения запрашиваемого контейнера, а оранжевые – маршруты освобождения занятых ячеек. Числовые значения, отображаемые справа от координат ячейки, отображают идентификатор контейнера груза.

Алгоритм разгрузки склада

Алгоритм разгрузки склада реализован по более сложному механизму, который можно описать следующей последовательностью основных действий:

1. Из процесса поиска пути исключаются вершины графа, соответствующие ячейкам, назначенным для загрузки контейнеров на склад.

2. Осуществляется поиск пути для контейнера из ячейки с требуемым контейнером в ячейку разгрузки склада на основе алгоритма Дейкстры.

3. Осуществляется проверка перемещения груза, последовательно следуя шагам найденного пути до тех пор, пока не будет встречен шаг, на котором целевая ячейка перемещения контейнера будет загружена.

4. Осуществляется поиск пути для разгрузки целевой ячейки на рассматриваемом шаге в оптимальную свободную ячейку на основе алгоритма Дейкстры.

5. Порядок последовательности шагов пути разгрузки ячейки меняется в обратную сторону.

6. Полученная последовательность шагов помещается перед шагом основного пути, на котором потребовалась разгрузка целевой ячейки.

7. Повторение шагов 3–7 для оставшихся шагов основного пути.

Получаемая в ходе данного алгоритма последовательность шагов позволяет перемещать контейнер из запрашиваемой ячейки, освобождая занятые на пути ячейки. На следующем изображении (рис. 6) представлена визуализация примера найденного маршрута разгрузки ячейки в позиции $(0, 1, 0)$ в ячейку $(2, 2, 0)$ в полностью загруженном складе (кроме ячеек загрузки и выгрузки).

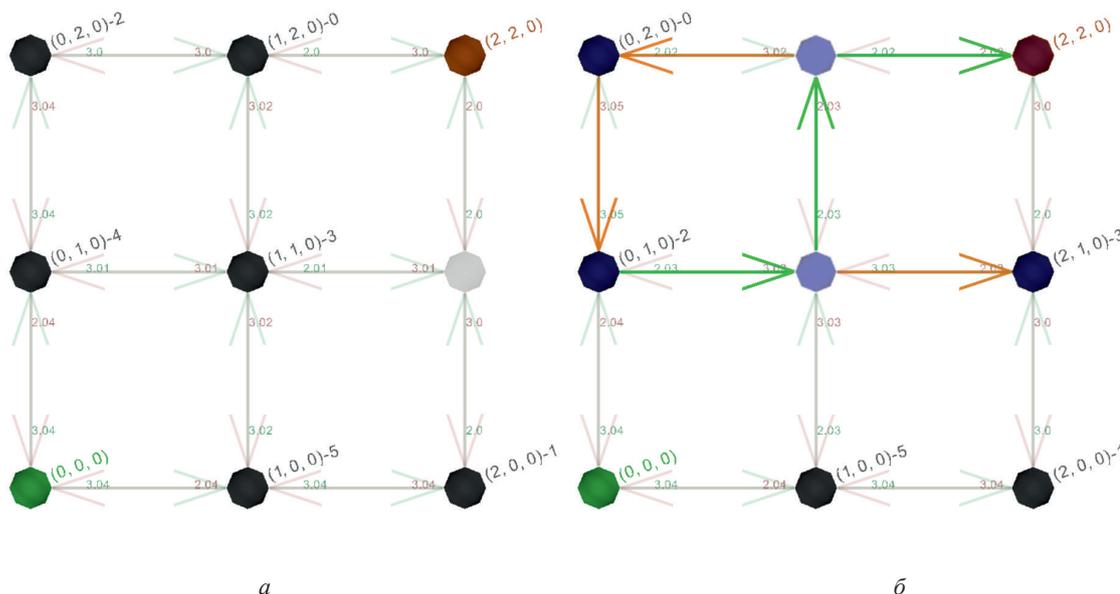


Рис. 6. Пример визуализации пути разгрузки:
 a – исходное состояние склада; b – конечное состояние склада

Fig. 6. Example of unloading path visualization:
 a – initial state of the warehouse; b – final state of the warehouse

Голубым цветом обозначены ячейки, задействованные в процессе перемещения контейнеров и являются свободными на момент окончания перемещений.

Данное изображение визуализирует порядок действий, представленный в табл. 1.

Важно отметить, что для корректного функционирования представленных алгоритмов необходимо наличие как минимум одной свободной ячейки без учета входных и выходных ячеек.

Таблица 1

Пример порядка действий разгрузки склада

Table 1

Example of Unloading Warehouse Procedure Steps

№ шага	Цель перемещения	Позиция начальной ячейки	Позиция целевой ячейки	Стоимость перемещения
1	Освобождение пути	(1, 1, 0)	(2, 1, 0)	3,509999
2	Перемещение целевого контейнера	(0, 1, 0)	(1, 1, 0)	3,343333
3	Освобождение пути	(0, 2, 0)	(0, 1, 0)	3,289999
4	Освобождение пути	(1, 2, 0)	(0, 2, 0)	3,500000
5	Перемещение целевого контейнера	(1, 1, 0)	(1, 2, 0)	3,186666
6	Перемещение целевого контейнера	(1, 2, 0)	(2, 2, 0)	3,333333

Влияние учета показателей износа ячеек на работу алгоритмов склада

Изучалось влияние учитываемых факторов при вычислении весовых коэффициентов графа склада на специфику функционирования склада. В частности, исследовалось влияние коэффициента износа ячеек на общий график обслуживания склада.

Опытная конфигурация склада представляет собой массив ячеек $5 \times 5 \times 5$, сгруппированных в форме параллелепипеда. Сами ячейки способны передавать груз во всех направлениях. Максимальное количество перемещений для каждой ячейки выставлено в 1000 действий для каждой оси. Входная ячейка склада расположена в позиции (2, 0, 2), выходная ячейка склада – в позиции (2, 4, 2).

Параметры значимости критериев (w) были установлены к следующим значениям:

1. Базовая стоимость перемещения: 1,0.
2. Масса груза в контейнере: 1,0.
3. Хрупкость груза в контейнере: 1,0.
4. Среднее расстояние до ближайших свободных ячеек: 0,5.
5. Ремонтопригодность: 1,0.

Значимость критерия износа для двух этапов тестирования равнялась 0,0 и 300,0 соответственно.

Тестирование произведено на предварительно заполненном складе на 50 %. После заполнения склада произведено 1000 итераций разгрузки случайного груза и загрузки нового. На рис. 7 представлена визуализация результатов тестирования, демонстрирующая влияние учета параметра износа ячеек на общий износ склада в ходе эксплуатации.

Цветовая индикация и числовое значение справа от координат ячеек отображают максимальный износ ячейки по всем осям.

Исходя из представленных результатов, учет износа ячеек позволяет более равномерно задействовать механизмы ячеек склада, что в свою очередь потенциально позволяет продлить интервал между обслуживаниями склада и максимизировать время до первого сбоя ячеек. Данная особенность заметно проявляется при повышенной загруженности склада.

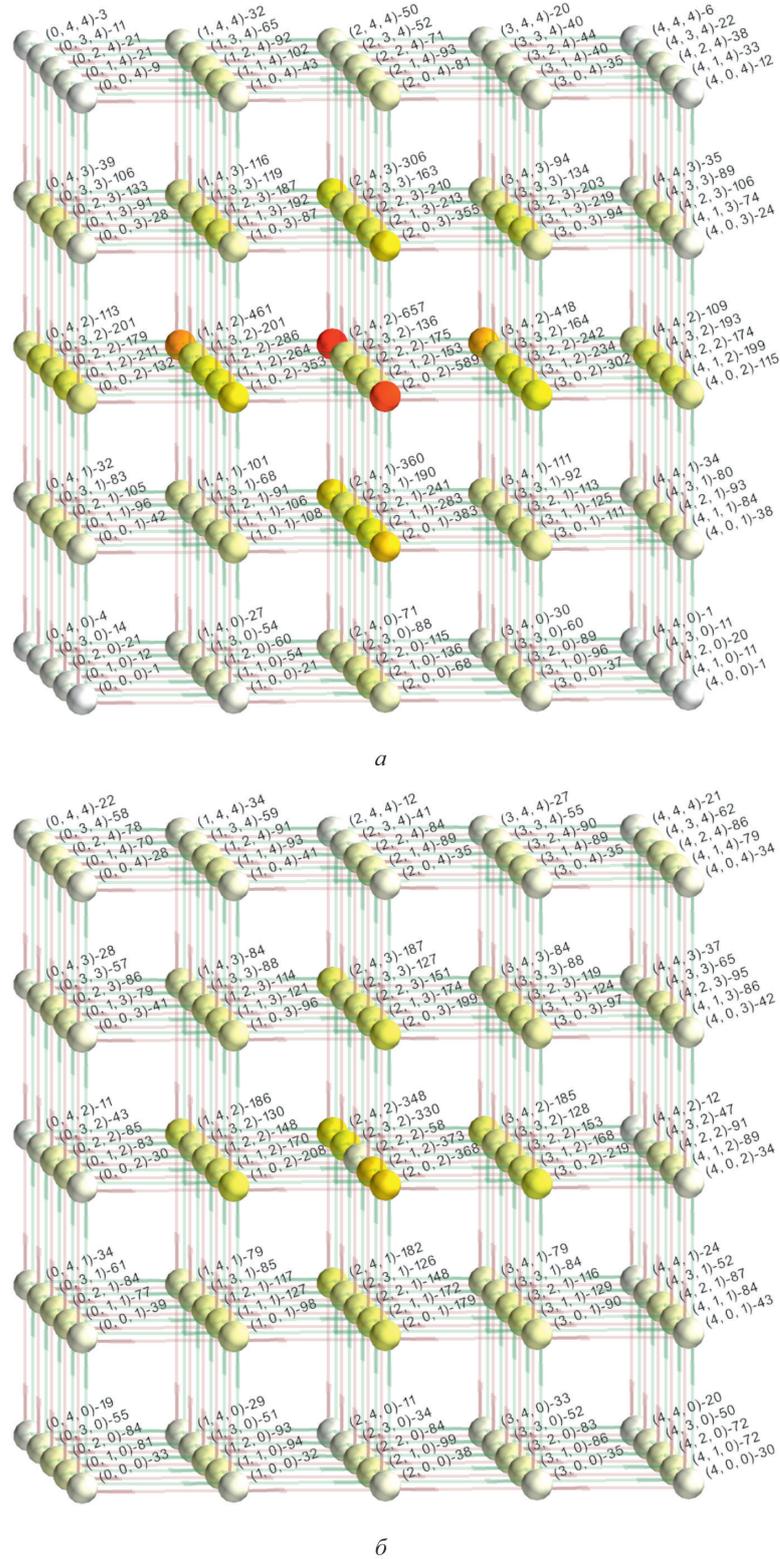


Рис. 7. Визуализация износа ячеек склада:

a – без учета параметра износа; b – с учетом параметра износа

Fig. 7. Visualization of warehouse cell durability: a – without considering durability parameter;

b – with consideration of durability parameter

Возможность оптимизации структуры массивов складских ячеек

Дополнительно исследована возможность удешевления структуры склада путем замены ячеек, способных перемещать груз по всем осям, на ячейки, способные перемещать груз по одной или двум осям. Предполагается, что склад состоит из массивов ячеек размерами $4 \times 3 \times 3$, в которых ячейки имеют аналогичные конфигурации. Именно оптимизация данных массивов является основной задачей данного исследования.

Основное требование к данным массивам заключается в возможности передачи груза между границами этих массивов. Стоимость структуры вычисляется как сумма стоимостей всех входящих в нее ячеек. Стоимость ячейки же зависит от стоимости осей, в которых она способна передавать контейнер. Так, для осей OX и OY стоимости назначены в 0,2 усл. ед., а для оси OZ – 0,6 усл. ед.

Помимо описанного показателя стоимости, также учитывается эффективность передачи контейнеров между ячейками массива. Данный показатель вычисляется по следующей формуле:

$$F_{eff} = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} \frac{D(C_i, C_j)}{|C_i[X] - C_j[X]| + |C_i[Y] - C_j[Y]| + |C_i[Z] - C_j[Z]|},$$

где C_k – позиция k -й ячейки; $D(C_i, C_j)$ – количество шагов для перемещения контейнера из ячейки C_i в ячейку C_j (согласно графу склада); $C_k[X]$, $C_k[Y]$, $C_k[Z]$ – координаты x , y , z позиции ячейки C_k ; N_c – количество ячеек в массиве.

Итоговую целевую функцию, используемую при оптимизации структуры массива склада, можно представить в следующем виде:

$$F(F_{eff}, F_{cost}, \alpha) = \alpha \cdot F_{eff} + (1 - \alpha) \cdot F_{cost} \rightarrow \min$$

где F_{eff} – показатель эффективности перемещения груза в массиве ячеек; F_{cost} – суммарная стоимость ячеек массива; α – коэффициент значимости показателя эффективности $\alpha \in [0; 1]$.

Процесс оптимизации осуществлялся с применением генетического алгоритма [10], где в качестве генотипа использовался массив из 36 целочисленных значений в диапазоне от 0 до 6 (генов), указывающих на конфигурацию каждой ячейки массива. Значения генов и допустимые конфигурации ячеек представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения генов и допустимые конфигурации ячеек

Table 2

Gene Values and Permissible Cell Configurations

Значение гена	Конфигурация ячейки (направления передачи контейнера)	Стоимость конфигурации
0	OX, OY, OZ	1,0
1	OX	0,2
2	OY	0,2
3	OZ	0,2
4	OX, OY	0,4
5	OX, OZ	0,8
6	OY, OZ	0,8

В качестве параметра α выбрано значение 0,5. Размер популяции был установлен в 20 особей.

В результате проведенных вычислений на протяжении 150 поколений был выявлен ряд конфигураций, являющихся наиболее оптимальными в вопросе удешевления, удовлетворяющими всем требованиям корректного функционирования. На рис. 8 представлен пример корректированного графа массива ячеек оптимальных конфигураций. Стоимость представленной структуры составила 18 усл. ед.

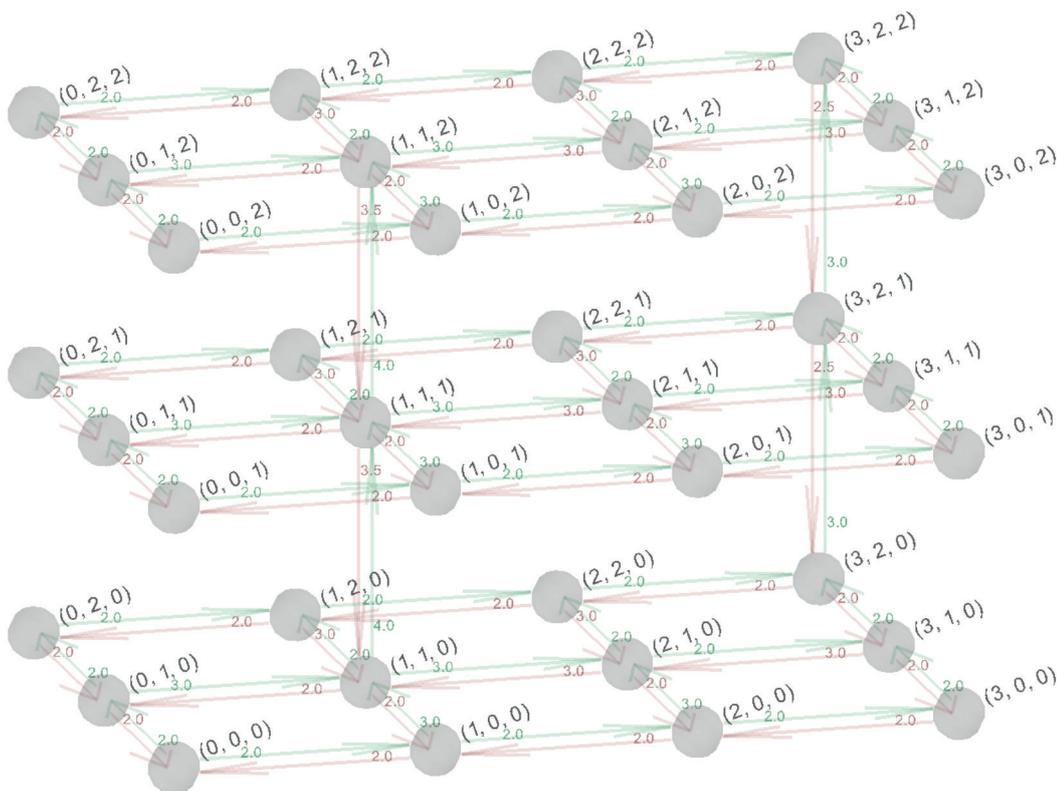


Рис. 8. Пример графа оптимальной структуры массива ячеек склада
Fig. 8. Example of the optimal structure graph for the array of warehouse cells

Заключение

Предложенный метод построения графа склада позволяет сформировать структуру склада и предоставляет возможность гибкой настройки стоимости перемещений, учитывая следующий ряд критериев: базовая стоимость перемещения, износ ячеек, вес груза контейнера, хрупкость груза контейнера, среднее расстояние до ближайших свободных ячеек и ремонтнопригодность.

Алгоритм загрузки склада позволяет определить путь перемещения контейнеров для оптимального расположения нового контейнера на складе. Представленный алгоритм разгрузки, помимо определения оптимального пути перемещения контейнера к выходу склада, дополнительно осуществляет определение путей разгрузки занятых ячеек, расположенных на основном пути. Предложенные алгоритмы способны выдавать удовлетворительные результаты относительно перемещения контейнеров по складу для выполнения тех или иных действий.

В перспективе имеется возможность дальнейшего анализа производительности и оптимизации предложенных алгоритмов. В результате имитационного моделирования работы склада размерами $5 \times 5 \times 5$ с использованием предложенных алгоритмов (с учетом и без учета параметров износа ячеек) была определена значимость данного критерия в вопросах увеличения интервалов обслуживания склада и максимизации времени до первого сбоя. Разработана целевая функция, позволяющая выполнять оптимизацию структуры подобного рода складских систем с учетом различных требований к скорости или стоимости складского массива и коэффициента значимости

Список литературы / References

1. **Koster R. B. M. de.** Automated and Robotic Warehouses: Developments and Research Opportunities // *Logistics and Transport*. 2018. Vol. 38. № 2. P. 33. DOI: 10.26411/83-1734-2015-2-38-4-18
2. **Furmans K., Schonung F., Gue K.** Plug-And-Work Material Handling Systems // *Progress in Material Handling Research*. 2010. P. 132-142. URL: https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1038&context=pmhr_2010
3. **Xiaoyi Z., Changpeng S., Peng L., Yigong Z., Benjin L., Wenkai M.** Optimizing Replenishment Base on Order Structure in Combined Automatic Warehouse System // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 66729-66741. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3291086
4. **Raviv T., Bukchin Y., de Koster R.** Optimal Retrieval in Puzzle-Based Storage Systems Using Automated Mobile Robots // *Transportation Science*. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). 2023. Vol. 57, № 2. P. 424–443.
5. **Gue K. R., Kim B. S.** Puzzle-based storage systems // *Naval Research Logistics*. 2007. Vol. 54, no. 5. P. 556–567. DOI: 10.1002/nav.20230
6. **Gue K. R., Furmans K., Seibold Z., Uludağ O.** GridStore: A Puzzle-Based Storage System With Decentralized Control // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2014. Vol. 11, no. 2. P. 429-438. DOI: 10.1109/TASE.2013.2278252
7. **Ore O.** Theory of Graphs. Colloquium Publications, Dec. 1962. DOI: 10.1090/coll/038
8. **Bondy J. A., Murty U. S. R.** Graph Theory with Applications. 1976. DOI: 10.1007/978-1-349-03521-2
9. **Fredman M. L., Tarjan R. E.** Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms // *Journal of the ACM*. 1987. Vol. 34, no. 3. P. 596–615. DOI: 10.1145/28869.28874
10. **Mitchell M.** An Introduction to Genetic Algorithms. 1998. DOI: 10.7551/mitpress/3927.001.0001

Информация об авторах

Александр Владимирович Разумовский, инженер

WoS Researcher ID: JFA-2364-2023

ID РИНЦ: 1177886

Михаил Владимирович Сарамуд, кандидат технических наук

WoS Researcher ID: H-1483-2018

Scopus Author ID: 57193316

ID РИНЦ : 744907

Яков Юрьевич Пикалов, кандидат технических наук

WoS Researcher ID: AAD-5349-2022

Scopus Author ID: 57221839886

ID РИНЦ : 606492

Information about the Authors**Alexander V. Razumovsky**, Engineer

WoS Researcher ID: JFA-2364-2023

ID RSCI: 1177886

Mikhail V. Saramud, Ph.D. in Technical Sciences

WoS Researcher ID: H-1483-2018

Scopus Author ID: 57193316

ID RSCI: 744907

Yakov Yu. Pikalov, Ph.D. in Technical Sciences

WoS Researcher ID: AAD-5349-2022

Scopus Author ID: 57221839886

ID РИНЦ: 606492

*Статья поступила в редакцию 24.10.2023;
одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 14.12.2023*

*The article was submitted 24.10.2023;
approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 14.12.2023*