

Теплов Антон Владимирович,
ИТ аналитик, аспирант

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СКЛАДА

Россия, Самара, ООО «ССИ Шефер», anton.teplov163@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена обзору исследований в области складских операций и оптимизации логистических процессов. Рассматриваются различные аспекты проектирования складских систем, управления процессами и внедрения новых технологий. Особое внимание уделяется анализу существующих методологий для подбора заказов, хранения товаров и оценки производительности складов. В работе подчёркивается, что большинство исследований сосредоточено на отдельных функциях склада и отсутствуют попытки объединить взаимное влияние таких функций, как комплектация и хранение. В статье акцентируется внимание на необходимости комплексного подхода, включающего системное проектирование, оптимизацию процессов и использование передовых технологий, для достижения значительных улучшений в управлении складскими операциями и логистическими процессами в целом.

Ключевые слова: складские операции, склад, логистика, хранение товаров, комплектация заказов, автоматизированные системы хранения.

Anton V. Teplov,
IT analyst, Postgraduate Student

A SYSTEM APPROACH TO IMPROVING WAREHOUSE EFFICIENCY

LLC “SSI Schaefer”, Samara, Russia, anton.teplov163@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the review of research in the field of warehouse operations and optimization of logistics processes. Various aspects of warehouse system design, process management and implementation of new technologies are considered. Special attention is paid to the analysis of existing methodologies for order picking, goods storage and warehouse performance evaluation. The paper emphasizes that most studies focus on individual warehouse functions and there are no attempts to combine the mutual influence of functions such as picking and storage. The paper focuses on the need for an integrated approach, including system design, process optimization and the use of advanced technologies, to achieve significant improvements in the management of warehouse operations and logistics processes in general.

Keywords: warehousing operations, warehouse, logistics, goods storage, order picking, automated storage systems.

Введение

Производственную логистику можно определить как процесс эффективного и рационального управления потоками товаров и услуг между производителями и потребителями. Операции внутри склада включают в себя приём заказов, получение материалов, маркировку, отгрузку (перемещение товаров по складу), пополнение запасов, контроль запасов, сборку, комплектацию заказов, сортировку и упаковку, укладку, отгрузку, обработку возвратов и т. д. Как мы видим, работа большого количества процессов может подвергнуться анализу и оптимизации. Из всех складских операций комплектация заказов считается наиболее затратной.

Комплектация заказов – это складская функция по извлечению единиц хранения из мест их складирования, чтобы удовлетворить запросы клиентов [1]. Необходимость комплектации обусловлена тем, что изначально товар поступает большими партиями, где подвергается процессу приёмки, деконсолидации, либо хранится сгруппированным. Заказы необходимо собирать с минимальными временными издержками, т. к. требования клиентов постоянно растут и нужно быть конкурентным. Ошибки при комплектации приводят к задержкам заказов, сбоям поставок и сильному увеличению затрат. Стоимость затрат на комплектацию обусловлена большим количеством труда операторов-людей, которые на данный момент пока только частично подвергаются попыткам автоматизировать некоторую часть их работы.

Современные тенденции в производстве и дистрибуции значительно усложнили и повысили важность проектирования и управления процессом комплектации заказов. Компании добавляют сопутствующие услуги с добавленной стоимостью в процесс формирования заказов, что усложняет управление. Также склады участвуют в процессе возврата товаров для обратного перераспределения производителям и поставщикам [2].

Организация операций по комплектации заказов напрямую влияет на эффективность работы распределительного центра и всей цепочки поставок. Вероятные ошибки в точности и полноте заказов, а также потери времени, открывают возможности для улучшений. Несмотря на инновационные решения в индустрии и значительный прогресс в научных исследованиях, существует разрыв между практикой и академическими исследованиями. Не все новые методы комплектации изучены и оптимальные комбинации различных аспектов комплектации заказов исследованы недостаточно.

Схема движения товаров на складе

Рассмотрим подробнее типовые функциональные зоны и движение материалов на складах (см. рис. 1). К основным видам складской деятельности относятся: приёмка товара, хранение, комплектация/сборка заказов, буферизация/сортировка, отгрузка/доставка и кросс-докинг.

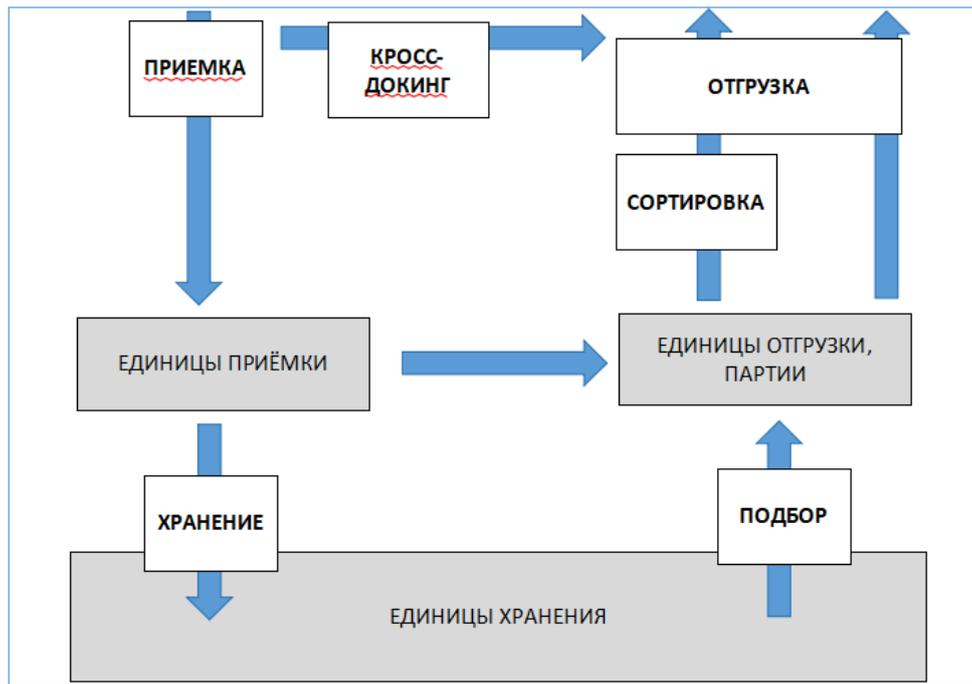


Рис. 1. Типичные функции и потоки на складе

Приёмка включает разгрузку товаров с транспортных средств, обновление учёта запасов, проверку на соответствие количеству и качеству. Это важный этап для предотвращения ошибок и проблем на последующих стадиях. Перемещение поступающих товаров в места хранения, возможно переупаковка и физические перемещения между различными функциональными зонами склада. *Комплектация заказов* – это основная деятельность на большинстве складов, включающая процесс получения нужного количества определённых товаров для набора заказов клиентов. Важность этой операции обусловлена её затратностью и влиянием на общую эффективность склада. Если заказы собираются партиями, требуется их *сортировка* по индивидуальным заказам клиентов. После комплектации заказы часто необходимо упаковать и разместить на правильной грузовой единице (например, поддоне). Это обеспечивает сохранность и удобство транспортировки товаров. *Кросс-докинг* выполняется, когда поступившие товары непосредственно перемещаются на погрузочные доки для отправки, минуя этапы хранения и комплектации. Это позволяет сократить время пребывания товаров на складе и ускорить процесс доставки.

Комплектация заказов включает несколько ключевых этапов: группировка и планирование заказов клиентов, назначение товаров из мест хранения к заказам, выпуск заказов на выполнение, подбор товаров из мест хранения и распределение выбранных товаров. Каждый из этих этапов играет важную роль в обеспечении точности и своевременности выполнения заказов. На складах существует множество различных типов систем комплектации заказов и часто несколько систем используются одновременно. Заказы клиентов состоят из одной или нескольких строк, каждая из

которых представляет собой уникальную товарную единицу (SKU – Stock Keeping Units) в определённом количестве.

Существует большое количество типов складов. Типы зависят от множества факторов, таких как назначение, уровень автоматизации, виды хранимых товаров и операционные процессы. По назначению склады можно разделить на производственные, дистрибьюторские, розничные и склады конечных пользователей. По уровню автоматизации склады можно разделить на традиционные, автоматизированные и полуавтоматизированные. Существуют различные методы и уровни автоматизации для многих из существующих типов складов. Не все из них подвергались попыткам применения автоматизации процессов и вариантов разработки методов и алгоритмов оптимизации. В этой статье мы посмотрим какие типовые решения по оптимизации логистических процессов применяют на практике аналитики и проектировщики, а также полноту покрытия научными исследованиями по данным областям. Далее выделим типовые склады, для которых научное сообщество ещё не предложило алгоритмов и методик оптимизации и определим направление для дальнейшего исследования.

Обзор существующих решений

Проектирование складов играет ключевую роль в эффективной организации логистики и цепочек поставок предприятия. Современные решения направлены на оптимизацию пространства, улучшение рабочих процессов и повышение общей производительности. Однако выбор конкретного решения по проектированию склада всегда делается на основе уникальной конфигурации склада, специфических характеристик товаров и конкретных предоставляемых услуг. Можно констатировать, что несмотря на все достижения, в данной области отсутствует систематизация по применению конкретных решений в зависимости от исходных условий. Каждый склад требует индивидуального подхода, учитывающего его уникальные особенности и каждый раз аналитик при проектировании склада сталкивается с проблемой выбора. Решения по проектированию складов – это комплексный процесс, требующий учёта множества факторов и применения передовых технологий.

Управление сборкой заказов становится всё более сложным из-за внедрения новых программ, сокращением цикла заказа, быстрой реакцией, а также внедрением новых маркетинговых стратегий. Эти условия требуют более частых и точных поставок меньших заказов и включения в систему сборки большего количества единиц товара. Повышенные требования к пропускной способности, хранению и точности сборки заказов сделали её управление более сложным.

На многих складах применяются системы, где сотрудники перемещаются по складу и вручную подбирают товары, так называемые системы «сборщик-к-деталям» (picker-to-parts) [3]. В таких системах различаются

два уровня: низкоуровневые системы, где товары подбираются с полок или стеллажей, и высокоуровневые системы, где сотрудники используют подъёмные устройства для доступа к товарам на высоких стеллажах. Высокоуровневые системы могут быть разделены на низкоуровневые с помощью этажных мезонинных конструкций, а потоки транспортных единиц (ТЕ) с разных этажей объединяются посредством автоматизированных конвейерных линий. В низкоуровневых системах сотрудники сами перемещаются по уровню, выбирая необходимые товары, а в высокоуровневых системах они поднимаются на подъёмниках для доступа к высоко расположенным товарам. В системах «детали-к-сборщику» (parts-to-picker) как правило, контейнеры с деталями или паллета из мест хранения доставляются к месту сборки заказа. После сборки заказа, контейнер или паллета возвращаются обратно в систему хранения.

При ручной сборке большая часть времени жизни заказа занимает перемещение для поиска товара (см. рис. 2) [4, с. 434]. Благодаря бурному развитию автоматизированных конвейерных систем появилась возможность частично оптимизировать основную долю времени работы сборщика. Все это необходимо проводить в комплексе с основными принципами, которые применимы к функции сборки заказов в любом складском комплексе, независимо от его размера, объёма, инвентаря, требований клиентов или типа системы управления. Закон «Парето» говорит, малое количество SKU составляют большую часть заказов и обеспечивают большую долю оборота на складе. Группировка популярных товаров может существенно сократить время перемещения в процессе сборки заказов. Невозможно иметь эффективную систему сборки заказов без эффективной системы местонахождения товаров. Важно оптимизировать человеческое участие в процессе сборки заказов, такие как перемещение к местам сборки, извлечение товаров из мест хранения, сортировка товаров и упаковка.

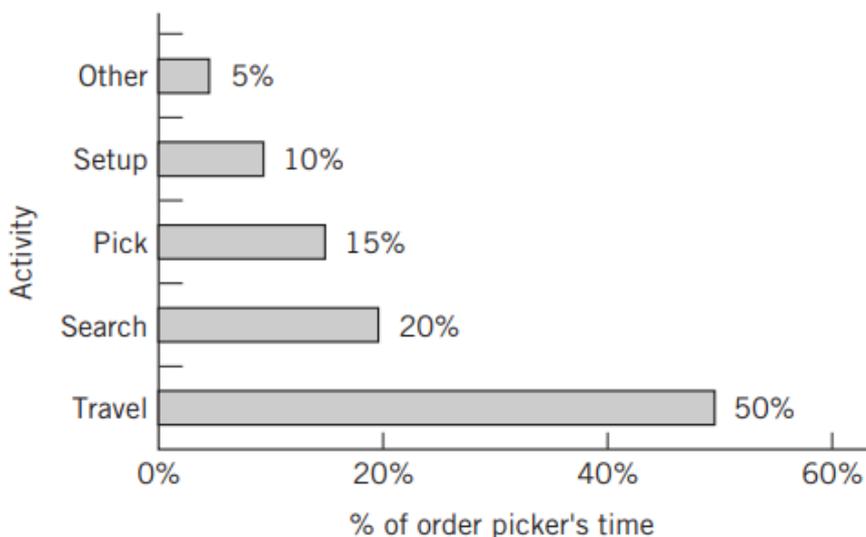


Рис. 2. Типичное распределение времени комплектовщика заказов

В статье Kim и др. [5] обозначена проблема последовательности сборки заказов в автоматизированном складе, где части маршрута сборщика заказов фиксированы, длина макета значительно больше ширины, и сборщик может держать только один предмет одновременно. Основная задача заключается в нахождении оптимальной последовательности с учётом заданных вертикальных путей, что представляет собой особый тип задачи «коммивояжёра». Для её решения применяется простая эвристика на основе координаты X и эффективный алгоритм на основе кластеризации для решения этой проблемы. Экспериментальные результаты показывают их эффективность. Из-за особой структуры макета эвристика на основе координаты X генерирует хорошие решения для тестовых случаев. Предложенный алгоритм последовательности сборки заказов на основе кластеризации генерирует оптимальные решения для всех тестовых случаев.

В качестве систем подбора часто на складах используются автоматизированные системы хранения и поиска (AS/RS – automated storage and retrieval system). AS/RS системы представляют собой комплексные системы, включающие стеллажи для хранения, краны для размещения и извлечения, точки ввода и вывода, а также конвейеры, позволяющие управлять хранением, извлечением и транспортировкой грузов без вмешательства человека [3]. Эти системы могут работать в различных режимах, от однокомандных до многокомандных циклов. В однокомандном режиме система либо перемещает товар с места хранения на складскую станцию, либо обратно. В двукомандном режиме сначала один товар перемещается на место хранения, а затем другой товар извлекается оттуда. В многокомандных циклах системы могут одновременно перемещать несколько товаров, что значительно повышает их эффективность.

AS/RS – системы типа «в-конец-прохода» (end-of-aisle) с ящиками для хранения товаров (totes) или с паллетами. В таких системах ящики с продуктами извлекаются из стеллажей и отправляются на рабочую станцию для комплектования заказов которая располагается в конце прохода. Оператор на рабочей станции изымает необходимое количество товаров из ящика и помещает их в другой ящик для заказа. Если ящик не пуст, он возвращается обратно на стеллаж. Большинство исследований по моделированию AS/RS было направлено на анализ производительности конкретных конфигураций систем, что затрудняет изменение структуры системы или параметров дизайна.

Различные аспекты проектирования и управления влияют на пропускную способность и эффективность AS/RS систем. Frazelle и др. [6] изучали влияния различных стратегий и моделей на пропускную способность AS/RS, включая политику хранения, последовательность извлечения, и зоны высокого и низкого оборота хранения. Regattieri и др. [7] исследовали, как на пропускную способность влияют назначение мест

хранения, политики выполнения заказов, консолидация заказов и стратегии маршрутизации и последовательности. Andriansyah и др. [8] предложили модель имитации для автоматической системы «Mini-load» для подбора заказов и изучили влияние стратегии извлечения и количества мини-загрузочных машин на пропускную способность. Güller и Hegmanns [9] исследовали влияние количества строк заказа на пропускную способность AS/RS систем. Пропускная способность и время выполнения заказов могут значительно варьироваться в зависимости от настройки системы и выбранных стратегий управления. Rooda и др. [10] представили модель для прогнозирования времени выполнения заказа для AS/RS систем, которая отражает надёжность склада в выполнении заказов клиентов. Они анализировали производительность системы в разных условиях, таких как частота поступления продуктов, стратегии выпуска заказов и распределение длины заказа. Для повышения операционной эффективности важно учитывать плотность выбора, правильную маршрутизацию и оптимальные стратегии выполнения заказов [11].

Одной из разновидностью AS/RS систем выступают карусельные конвейеры, которые являются важным типом систем обработки материалов, используемых на складах и в производстве для хранения и извлечения мелких и средних деталей. Классический многоуровневый карусельный конвейер приводится в движение одним приводом, вращается как единое целое и подаёт предметы к точке ввода/вывода по одному, так как каждый уровень не может вращаться независимо. Одной из первых попыток исследования таких систем была статья Wen и др. [12], в которой рассматривалась горизонтальная система карусельного конвейера, где вся карусель вращается горизонтально влево или вправо, что называется неразделимой двунаправленной (UBD – unseparable bidirectional) каруселью. Конвейер имеет множество ячеек для хранения, каждая из которых состоит из нескольких уровней. Ячейка вращается и устанавливается в положение для загрузки или разгрузки ящика оператором (или роботом). Все уровни доступны для любого ящика, а управление может осуществляться полностью компьютером или с помощью считывателя штрих-кодов. Автор предложил несколько эвристических методов для решения проблемы комплектации заказов, основанных на характеристиках карусельных конвейерных систем и постарался предоставить руководителям информацию для оценки производительности карусельного конвейера в автоматизированном складе. Проблема комплектации заказов часто встречается в автоматизированных складах и требует решения сотни раз в день. Потребность в компьютерных кодах для управления такими системами будет продолжать расти. В статье представлены три эвристических метода решения задачи комплектации заказов для системы UBD карусели и обсуждается опыт вычислений для набора тестовых задач среднего размера.

Полностью автоматизированные системы комплектации заказов (AOPS – automated order picking systems) представляют собой специализированное оборудование – A-frame, используемое там, где требуется высокая производительность при обработке большого объема мелких и однородных товаров, таких как музыкальные компакт-диски, или где необходимо сочетание высокой производительности и высокой точности, как в фармацевтической отрасли. Основные факторы, характеризующие среду, где применяются AOPS, включают: очень большое количество различных товаров, которые нужно быстро собирать, требование к сбору по одному предмету, очень высокая интенсивность потока и необходимость минимизации затрат на обработку материалов.

Saruto и др. [14] рассматривают проблему определения правильных критериев управления для автоматических систем диспенсеров (A-frame), используемых для комплектации заказов по одному предмету. После краткого обзора вопросов комплектации заказов на складах, с акцентом на автоматизированные системы, обсуждается принцип работы автоматизированной системы комплектации отдельных заказов с целью выявления основных параметров, определяющих производительность, и их взаимодействия. Описывается разработка системы поддержки принятия решений (DSS – decision support system), включающей анализ и модель симуляции работы AOPS. DSS включает в себя некоторые специфические критерии принятия решений, представленные в виде эвристических правил, чтобы помочь менеджерам правильно выбирать рабочие параметры машины для улучшения производительности при стохастическом спросе, устраняя необходимость в ручном принятии решений на основе личного опыта или субъективного суждения. Подробно описывается разработанный набор правил. Приводится пример применения DSS для демонстрации использования системы и оценки эффективности разработанных управленческих правил, а также возможного улучшения производительности системы на примере распределительного центра одного из ведущих фармацевтических оптовиков в Италии.

Для анализа задач планирования комплектации заказов используются методы исследования такие как: аналитические модели, математическое программирование и модели симуляции [15] (см. рис. 3). Авторы классифицируют публикации по методу исследования, используемому для анализа или решения комбинированной проблемы сборки заказов. В литературе были предложены следующие методы исследования: аналитические модели, эксперименты симуляции и математическое программирование. Аналитические модели представляют собой набор математических уравнений, которые приближенно описывают производительность системы. Эксперименты симуляции имитируют работу системы с целью проведения численных экспериментов для выявления закономерностей в

поведении системы. Модели математического программирования описывают проблему сборки заказов с помощью математических выражений, включающих целевую функцию и ограничения.

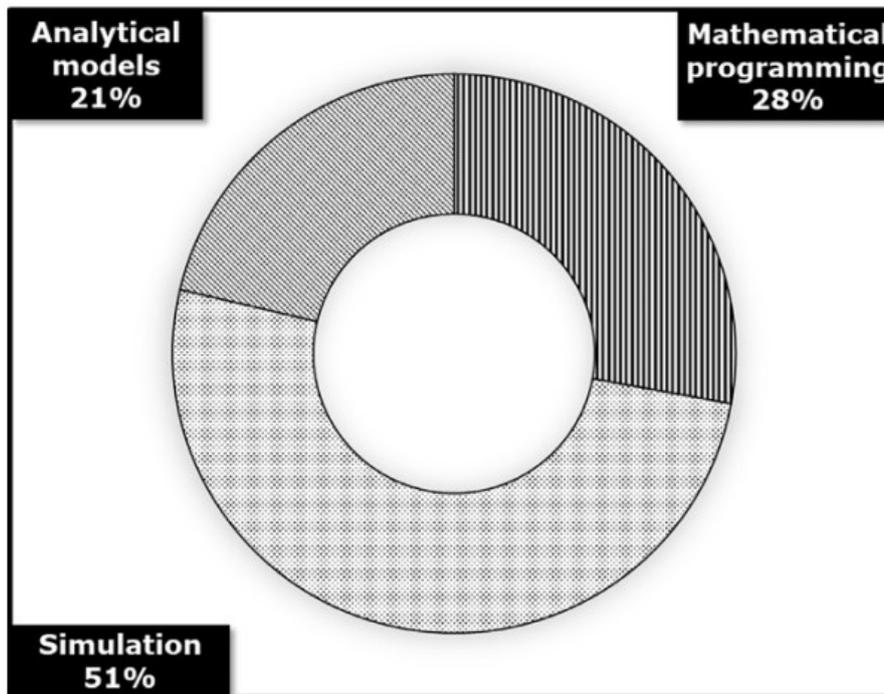


Рис. 3. Метод исследования, используемый для анализа комбинации задач планирования комплектации заказов

Симуляция является наиболее популярным методом для анализа комбинаций проблем сборки заказов, за которым следует математическое программирование. Аналитические модели редко используются для анализа влияния комбинации проблем сборки заказов. Эти модели позволяют менеджерам складов предсказывать производительность системы и сравнивать альтернативные стратегии в стохастической среде. В отличие от симуляции, аналитические модели требуют меньше времени для моделирования и вычислений, но их сложно разрабатывать и они часто представляют упрощённое изображение операций по сборке заказов.

Основные выводы и направления для будущих исследований

По данным Druy [16], до 50 % всех операционных расходов склада может быть отнесено на комплектацию заказов. Следовательно, даже незначительные оптимизационные решения для этого вида работ помогут сократить значительную часть бюджета на обслуживание и сделать предприятие более конкурентным на рынке. Сокращение времени комплектации приводит к значительной экономии трудовых затрат, поскольку позволяет не только сократить необходимое регулярное рабочее время комплектовщиков, но и уменьшить количество дорогостоящих сверхурочных или даже сократить штат сотрудников.

В данной статье мы рассмотрели общие принципы планирования и оптимизации складских комплексов, сделали краткий обзор типовых исследований, посвящённых вариантам оптимизации проектирования и складских операций. В работах мы видим подходы к оптимизациям отдельных процессов и в целом многие из них достаточно хорошо изучены. Большой пласт научных работ посвящён в отдельности операциям комплектации, хранения, сортировки и они продолжают развиваться, охватывая все более широкий спектр вопросов, предлагая инновационные решения для повышения эффективности и гибкости складских систем. Однако отсутствие попыток систематизировать и объединить исследования различных типов складских операций, например, таких как комплектация и хранение, ограничивает понимание взаимного влияния этих функций и возможности их оптимизации в комплексе.

Например, Henn и др. [17] пришли к выводу, что взаимодействие комплектации заказов с другими смежными вопросами планирования (планировка, расположение товаров, зонирование, маршрутизация комплектовщиков) до сих пор не было достаточно рассмотрено в литературе. Таким образом, возможно, стоит предложить соответствующие подходы к одновременному решению для получения «глобального» оптимума.

Именно комплексный подход, включающий системное проектирование, оптимизацию процессов и использование передовых технологий, позволит достичь значительных улучшений в управлении складскими операциями и логистическими процессами в целом. Направлением для дальнейших исследования видится в выработке механизмов объединения сразу нескольких складских функций и разработки алгоритмов оптимизации при взаимном влиянии этих функций друг на друга.

Среди типовых складских решений автоматизации, как мы видим, недостаточно уделено вниманию складам с многопроходными системами хранения с однопоточными конвейерными линиями по периметру и станциями сборки возле стеллажей хранения. Определение размера станций сборки, их количества и группировки товаров в зоне каждой станции с учётом анализа SKU в каждом заказе видится перспективным для дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Petersen C. G., Schmenner R. W. An evaluation of routing and volume-based storage policies in an order picking operation // *Decision Sciences*. – 1999. – Vol. 30(2). – Pp. 481–501.
2. De Koster R., De Brito M. P., Van de Vendel M. Return handling: an exploratory study with nine retailer warehouses // *International Journal of Retail & Distribution Management*. – 2002. – Vol. 30(8/9). – Pp. 407–421.
3. De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen, K. J. Design and control of warehouse order picking: a literature review // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – Vol. 182(2). – Pp. 481–501. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>.

4. Tompkins J. A., White J. A., Bozer Y. A., Frazelle E. H., Tanchoco J. M. A. *Facilities Planning*. – NJ: John Wiley & Sons, 2003.
5. Kim B.-I., Heragu S. S., Graves R. J., Onge A. S. Clustering-based order-picking sequence algorithm for an automated warehouse // *International Journal of Production Research – INT J PROD RES*. – 2003. – Vol. 41(15). – Pp. 3445–3460. – DOI:10.1080/0020754031000120005.
6. Park B. C., Foley R. D., Frazelle E. H. Performance of miniload systems with two-class storage // *European Journal of Operational Research*. – 2006. – Vol. 170(1). – Pp. 144–155.
7. Manzini R., Gamberi M., Regattieri A. Design and control of an AS/RS // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 28(7). – Pp. 766–774.
8. Andriansyah R., De Koning W. W. H., Jordan R. M. E., Etman L. F. P., Rooda J. E. A process algebra based simulation model of a miniload-workstation order picking system // *Computers in Industry*. – 2011. – Vol. 62(3). – Pp. 292–300.
9. Güller M., Hegmanns T. Simulation-based performance analysis of a miniload multishuttle order picking system // *47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – Pp. 475–480. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.041>.
10. Andriansyah R., Etman L. F. P., Rooda J. Aggregate modeling for flow time prediction of an end-of-aisle order picking workstation with overtaking // In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. – IEEE, 2010. – Pp. 2070–2081.
11. Su W., Li L., Zhou X., Liao X. Application of optimized Dijkstra algorithm in storage/retrieval routes scheduling of a stacker crane // In: *International Conference on Information Engineering and Computer Science*. – IEEE, 2009. – Pp. 1–4.
12. Wen Ue-Pyng, Chang Ding-Tsair. Picking rules for a carousel conveyor in an automated warehouse // *Omega*. – 1988. – Vol. 16, Iss. 2. – Pp. 145–151. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(88\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0305-0483(88)90045-X).
13. Li Lin, Bozer Ya. A. Retrieval strategies for multi-tier automated carousel conveyors with multiple robots // *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*. – 2010. – Vol. 86(7). – Pp. 395–404. – DOI: [10.1177/0037549709340734](https://doi.org/10.1177/0037549709340734).
14. Caputo A., Pelagagge P. M. Management criteria of automated order picking systems in high-rotation high-volume distribution centers // *Industrial Management and Data Systems*. – 2006. – Vol. 106. – Pp. 1359–1383. – DOI: [10.1108/02635570610712627](https://doi.org/10.1108/02635570610712627).
15. Van Gils T., Ramaekers K., Caris A., de Koster R. B. M. Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 267, Iss. 1. – Pp. 1–15. – ISSN 0377-2217. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.002>.
16. Drury J. *Towards more efficient order picking*. IMM Monograph No. 1. – Cranfield, U.K.: The Institute of Materials Management, 1988.
17. Henn S., Koch S., Wäscher G. Order batching in order picking warehouses: a survey of solution approaches // In: R. Manzini (ed.) *Warehousing in the Global Supply Chain*. – London: Springer, 2012. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6_6.