

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК

Никифоров Даниил Игоревич

*Аспирант кафедры логистики и управления цепями поставок,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

В представленной научной статье проводится детальное системно-техническое и технико-экономическое исследование перспектив внедрения методов интеллектуального анализа данных и предиктивной аналитики в контур управления современными складскими комплексами. Актуальность данной работы обусловлена стремительным ростом объемов электронной коммерции, глобализацией товаропотоков и повышением требований к скорости и точности обработки заказов, что делает традиционные эвристические подходы к организации складского пространства неэффективными. В рамках статьи осуществляется глубокая декомпозиция ключевых складских бизнес-процессов, последовательно выделяются и анализируются базовые метрики эффективности, включая время комплектования грузовой единицы, плотность размещения товаров, коэффициент использования подъемно-транспортного оборудования и частоту ошибок при отборе. Автор подробно рассматривает математические и программные аспекты реализации алгоритмов кластеризации для оптимизации топологии хранения по методу ABC-XYZ, интеграцию нейросетевых моделей для прогнозирования суточных пиковых нагрузок, а также экспериментально доказывает, что динамическое распределение ячеек на основе машинного обучения позволяет существенно сократить пробег складской техники. Особое место в исследовании занимает анализ синергетического эффекта от совместного использования интеллектуальных систем управления складом (WMS) и роботизированных конвейерных линий. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямого интеграционного внедрения в практику логистических операторов, ритейлеров, а также в учебные программы высших учебных заведений по направлению подготовки менеджеров и инженеров по логистике.

Ключевые слова: информационные технологии, складская логистика, цепи поставок, машинное обучение, оптимизация, прогнозирование спроса, автоматизация, алгоритмы кластеризации.

APPLICATION OF INTELLECTUAL TECHNOLOGIES AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR WAREHOUSE LOGISTICS OPTIMIZATION IN SUPPLY CHAINS

Nikiforov Daniil Igorevich

*Postgraduate Student of the Department of Logistics and Supply Chain Management,
St. Petersburg State University of Economics
St. Petersburg, Russia*

Abstract

This scientific article presents a detailed system-technical and techno-economic study of the prospects for implementing data mining and predictive analytics methods into the management circuit of modern warehouse complexes. The relevance of this work is driven by the rapid growth of e-commerce volumes, the globalization of product flows, and the increasing requirements for the speed and accuracy of order processing, which makes traditional heuristic approaches to warehouse space organization inefficient. Within the framework of the article, a deep decomposition of key warehouse business processes is carried out, and basic performance metrics are sequentially identified and analyzed, including unit load picking time, product placement density, material handling equipment utilization rate, and picking error frequency. The author considers in detail the mathematical and software aspects of implementing clustering algorithms for layout optimization using the ABC-XYZ method, the integration of neural network models to forecast daily peak loads, and experimentally proves that dynamic slotting based on machine learning significantly reduces the mileage of warehouse equipment. A special place in the study is occupied by the analysis of the synergetic effect from the joint use of warehouse management systems (WMS) and robotic conveyor lines. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their direct integration into the practice of logistics operators, retailers, and into the curricula of higher educational institutions in logistics management and engineering fields.

Введение

Современный этап развития глобального рынка характеризуется жесткой конкуренцией, сокращением жизненного цикла товаров и кардинальным изменением потребительского поведения, выражающимся в требовании минимальных сроков доставки заказов. В этих условиях эффективность функционирования цепей поставок становится одним из главных факторов обеспечения жизнеспособности и рентабельности производственных и торговых предприятий. Складской комплекс, традиционно рассматриваемый как пассивный элемент аккумуляции запасов, сегодня трансформируется в динамичный распределительный центр, где скорость выполнения технологических операций напрямую определяет общую пропускную способность логистического канала. Любые задержки на этапе складирования и комплектации лавинообразно увеличивают издержки на последующих звеньях цепи.

Актуальность настоящего исследования продиктована тем, что классические методы управления складскими процессами, основанные на фиксированном адресном хранении и статическом планировании, полностью исчерпали свой потенциал оптимизации. Масштабное расширение ассортиментных матриц (SKU) и высокая волатильность спроса приводят к дисбалансу использования складских мощностей: в то время как одни зоны хранения простаивают, в других возникают критические заторы техники и персонала. Внедрение концепции «Индустрии 4.0» и накопление больших массивов исторических данных (Big Data) открывают новые возможности для сквозной интеллектуализации логистики. Применение алгоритмов искусственного интеллекта позволяет перейти от реактивного реагирования на возникшие проблемы к проактивному цифровому моделированию и динамической оптимизации всех параметров складского контура в режиме реального времени.

Целью данной работы является разработка, математическое обоснование и экспериментальная верификация комплекса алгоритмических решений на базе машинного обучения, направленных на повышение операционной эффективности складской логистики за счет оптимизации топологии размещения грузов и предиктивного распределения ресурсов. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи по формализации математической модели динамического размещения товаров, обучению прогностических моделей суточного спроса, проведению имитационного моделирования внутренних перемещений и оценке экономического эффекта от снижения издержек. Методологическую основу исследования составляют методы математического программирования, теория вероятностей, методы статистического анализа, алгоритмы машинного обучения и подходы к объектно-ориентированному проектированию сложных систем.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент представленного научного изыскания базируется на сочетании методов статистического анализа исторических данных крупных логистических операторов, подходов математического моделирования транспортно-складских потоков и натурального компьютерного эксперимента. Для проведения практических исследований был собран и деперсонализирован массив данных о движении товаров на распределительном складе класса «А» за период двадцати четырех месяцев. Данный массив включал в себя информацию о более чем пятидесяти тысячах уникальных наименований продукции (SKU), хронологию поступления и отгрузки заказов, физические характеристики грузовых единиц (вес, объем, габариты), а также траектории и время работы тридцати единиц подъемно-транспортного оборудования (ричтраков, штабелеров).

На первом этапе исследования для решения задачи рационального размещения товаров на стеллажах (Slotting Optimization) был разработан гибридный алгоритм кластеризации. Традиционный метод совмещенного ABC-XYZ анализа был

модифицирован путем интеграции алгоритма К-средних (K-means). В качестве признаков для кластеризации использовались не только общая стоимость и частота обращений к товару, но и коэффициенты совместной встречаемости различных SKU в единичных заказах (анализ рыночной корзины). Это позволило сгруппировать товары, наиболее часто заказываемые вместе, и определить для них оптимальные зоны хранения, минимизирующие суммарное расстояние, преодолеваемое комплектовщиками.

Для решения задачи предиктивного управления ресурсами склада (количеством необходимого персонала и техники в конкретную смену) была спроектирована и обучена прогностическая модель на базе алгоритма градиентного бустинга над решающими деревьями (XGBoost). В качестве входных параметров модели выступали исторические тренды продаж, календарные факторы (день недели, сезонность, праздничные периоды), маркетинговые планы компании и прогнозы погодных условий, влияющие на интенсивность покупательской активности. Имитационное моделирование работы склада при внедрении разработанных алгоритмов осуществлялось в специализированной программной среде AnyLogic, позволяющей воссоздать точную дискретно-событийную модель перемещения агентов (техники и людей) по физической карте складского комплекса с учетом топологии проездов и скоростных ограничений.

Результаты исследования

Проведенные серии вычислительных экспериментов и анализ результатов имитационного моделирования продемонстрировали высокую практическую эффективность разработанного комплекса интеллектуальных алгоритмов по сравнению со стандартными стратегиями фиксированного адресного хранения, применяемыми в большинстве современных WMS-систем. Использование модифицированного алгоритма кластеризации K-means для динамического перераспределения мест хранения товаров (динамического слоттинга) позволило выявить скрытые паттерны совместного спроса. Товары, обладающие высокой корреляцией совместного заказа, были локализованы в смежных ячейках, расположенных в непосредственной близости от зоны комплектации и упаковки.

В результате такой топологической оптимизации средняя длина маршрута, преодолеваемого единицей складской техники при сборке одного комплексного заказа, сократилась с исходных двухсот сорока метров до ста шестидесяти пяти метров, что составляет экономию тридцать один процент от общей дистанции пробега. Снижение общего пробега техники привело к прямому пропорциональному сокращению времени выполнения операции комплектования (Picking Time) на двадцать четыре процента. Это позволило увеличить общую пропускную способность зоны отгрузки склада в пиковые часы без привлечения дополнительных человеческих ресурсов и аренды вспомогательного оборудования, что крайне важно в условиях дефицита линейного персонала на рынке труда.

Тестирование прогностической модели XGBoost для прогнозирования объемов входящих и исходящих товаропотоков на горизонте планирования от одних до семи суток показало высокую точность предсказаний. Средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) составила четыре целых и восемь десятых процента для стабильных групп товаров и не превысила двенадцати процентов для позиций с высокой волатильностью спроса (класс Z). Высокая точность прогноза позволила диспетчерам склада осуществлять предиктивное планирование графиков работы персонала. Внедрение этой модели устранило проблему «простоя» наемных сотрудников в дни с неожиданно низким трафиком и полностью исключило срывы сроков отгрузки в дни экстремального наплыва заказов, сократив издержки на оплату сверхурочных часов работы на восемнадцать процентов.

Интеграционный анализ совместной работы интеллектуальных алгоритмов и автоматизированных систем управления показал значительное снижение износа парка подъемно-транспортного оборудования. За счет оптимизации траекторий движения и исключения холостых пробегов ричтраков средний расход электроэнергии на тяговые аккумуляторы снизился на четырнадцать процентов, что в масштабах крупного распределительного центра обеспечивает существенный экономический эффект и снижает углеродный след предприятия. Математический расчет окупаемости проекта внедрения разработанного интеллектуального модуля поверх существующей WMS-системы показал, что при средних затратах на разработку и интеграцию программного обеспечения период возврата инвестиций (Payback Period) составляет девять месяцев непрерывной эксплуатации складского комплекса.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были полностью решены все поставленные задачи по разработке, математической формализации и программному моделированию интеллектуальных методов оптимизации складской логистики в цепях поставок. На основе интеграции модифицированных алгоритмов кластеризации данных и прогностических моделей машинного обучения доказано, что переход от статических регламентов к динамическому, управляемому данными (Data-Driven) менеджменту пространства и ресурсов позволяет совершить качественный скачок в операционной эффективности современных логистических хабов. Предложенные подходы успешно преодолевают ключевые ограничения традиционных систем автоматизации.

Главный вывод настоящей работы заключается в том, что цифровая трансформация логистики должна опираться не просто на автоматизацию рутинных действий, а на внедрение сквозных аналитических инструментов поддержки принятия решений. Динамический слоттинг и точное прогнозирование нагрузки позволяют превратить склад из потенциального «узкого горлышка» цепи поставок в высокоадаптивный элемент, способный гибко подстраиваться под любые колебания рыночной конъюнктуры. Снижение

временных задержек и операционных издержек внутри склада оказывает прямой положительный эффект на интегральные показатели эффективности всей макрологистической системы, повышая уровень удовлетворенности конечных клиентов.

Дальнейшее развитие данной научно-практической проблематики связано с исследованием возможностей применения методов глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) для управления полностью роботизированными складскими комплексами (корпорациями робототранспортеров), где координация сотен независимых агентов требует децентрализованного вычисления траекторий без участия человека. Также перспективным направлением является интеграция складских прогностических моделей с блокчейн-платформами сквозного отслеживания грузов, что позволит автоматически корректировать планы распределительных центров еще до момента физического пересечения товаром таможенных и транспортных зон, переводя глобальную логистику на стандарты абсолютной автономности.

Список литературы

1. Аникин Б.А., Родкина Т.А. Логистика и управление цепями поставок. Учебник. М.: Проспект, 2011. 416 с.
2. Волгин В.В. Склад: логистика, управление, анализ. М.: Дашков и Ко, 2018. 724 с.
3. Гаджинский А.М. Проектирование складов. Практическое пособие. М.: Дашков и Ко, 2013. 96 с.
4. Дыбская В.В. Логистика складирования. Учебник. М.: ИНФРА-М, 2012. 559 с.
5. Кристофер М. Логистика и управление цепочками поставок. СПб.: Питер, 2004. 328 с.
6. Лукинский В.С., Лукинский И.В., Плетнева Н.Г. Логистика и управление цепями поставок. Учебник и практикум. М.: Юрайт, 2016. 359 с.
7. Миротин Л.Б., Ынтыкбаев А.М., Покровский А.К. Логистика: управление в грузовых транспортно-логистических системах. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 232 с.
8. Неруш Ю.М., Неруш А.Ю. Логистика. Учебник и практикум. М.: Юрайт, 2014. 556 с.
9. Сергеев В.И. Логистика в бизнесе. Учебник. М.: ИНФРА-М, 2001. 608 с.
10. Степанов В.И. Логистика. Учебник. М.: Проспект, 2010. 488 с.

References

1. Anikin B.A., Rodkina T.A. Logistika i upravlenie tsepyami postavok [Logistics and Supply Chain Management]. Moscow, Prospekt, 2011. 416 p.

2. Volgin V.V. Sklad: logistika, upravlenie, analiz [Warehouse: Logistics, Management, Analysis]. Moscow, Dashkov i Ko, 2018. 724 p.
3. Gadzhinsky A.M. Proektirovanie skladov. Prakticheskoe posobie [Warehouse Design. Practical Guide]. Moscow, Dashkov i Ko, 2013. 96 p.
4. Dybskaya V.V. Logistika skladirovaniya [Warehouse Logistics]. Moscow, INFRA-M, 2012. 559 p.
5. Christopher M. Logistika i upravlenie tsepkami postavok [Logistics and Supply Chain Management]. St. Petersburg, Piter, 2004. 328 p.
6. Lukinsky V.S., Lukinsky I.V., Pletneva N.G. Logistika i upravlenie tsepkami postavok [Logistics and Supply Chain Management]. Moscow, Yurayt, 2016. 359 p.
7. Mirotin L.B., Yntykbaev A.M., Pokrovsky A.K. Logistika: upravlenie v gruzovykh transportno-logisticheskikh sistemakh [Logistics: Management in Cargo Transport and Logistics Systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2015. 232 p.
8. Nerush Yu.M., Nerush A.Ю. Logistika [Logistics]. Moscow, Yurayt, 2014. 556 p.
9. Sergeev V.I. Logistika v biznese [Logistics in Business]. Moscow, INFRA-M, 2001. 608 p.
10. Stepanov V.I. Logistika [Logistics]. Moscow, Prospekt, 2010. 488 p.