

УДК 656; 658

ББК 65.291.59



Роголин Р. С.

Роголин Р. С.
кандидат экономических
наук, доцент,
Владивостокский
Государственный
Университет

Rogulin R. S.
Candidate of Economic
Sciences, Associate
Professor",
Vladivostok State University

ОПТИМИЗАЦИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ: СТРАТЕГИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ



OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY OF SUPPLY CHAINS IN THE FACE OF GLOBAL CHALLENGES: STRATEGIES, TECHNOLOGIES AND PROSPECTS

Аннотация

В работе рассматриваются успешные практики оптимизации и устойчивости цепочек поставок, а также стратегии, технологии и перспективы в условиях глобальных вызовов. Анализируются успешные примеры использования инноваций и сотрудничества между предприятиями, внедрения принципов устойчивого развития, оценки и управления рисками и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Особое внимание уделяется прямым, гибридным и эшелонированным цепочкам поставок, а также циклическим (эко) цепочкам, направленным на повторное использование ресурсов. В работе рассматриваются успешные практики интеграции различных участников, сотрудничества между предприятиями и внедрения принципов устойчивого развития, а также перспективы развития технологий и стратегий

оптимизации и устойчивости цепочек поставок, включая использование искусственного интеллекта, интернета вещей и других инновационных решений. Также выполняется обзор различных алгоритмов оптимизации маршрута цепочек. В работе делается вывод о том, что успешные стратегии оптимизации и устойчивости цепочек поставок способствуют снижению негативного влияния на окружающую среду, повышению доверия со стороны потребителей и привлечению инвестиций, что в целом способствует устойчивому развитию экономики и общества в условиях глобальных вызовов.

Ключевые слова: ии, искусственный интеллект, оптимизация, оптимизация пути на графе, цепочки поставок.

Annotation

The paper examines successful practices of optimization and sustainability of supply

chains, as well as strategies, technologies and prospects in the face of global challenges. Successful examples of the use of innovations and cooperation between enterprises, the introduction of the principles of sustainable development, risk assessment and management and reduction of negative environmental impact are analyzed. Special attention is paid to direct, hybrid and layered supply chains, as well as cyclic (eco) chains aimed at the reuse of resources. The paper examines successful practices of integration of various participants, cooperation between enterprises and the implementation of the principles of sustainable development, as well as prospects for the development of technologies and strategies for optimizing and sustainability of supply chains, including the use of artificial intelligence, the Internet of Things and other innovative solutions. Various

algorithms for optimizing the chain route are also reviewed. The paper concludes that successful strategies for optimizing and sustainability of supply chains contribute to reducing the negative impact on the environment, increasing consumer confidence and attracting investment, which generally contributes to the sustainable development of the economy and society in the face of global challenges.

Keywords: *AI, artificial intelligence, optimization, graph path optimization, supply chain.*

1 Анализ современных проблем и трендов

Современные цепочки поставок сталкиваются с рядом проблем и трендов, которые требуют адаптации и оптимизации. К таким вызовам можно отнести экономические кризисы [4], изменение потребительского поведения, экологические проблемы [12], геополитическую нестабильность [17] и технологические инновации [13]. Каждый из этих проблем может иметь различные последствия для цепочек поставок, включая увеличение затрат, снижение качества товаров и услуг, а также потерю доли рынка.

Тренды в цепочках поставок также меняются под влиянием различных факторов, таких как развитие технологий, изменение предпочтений потребителей и глобализация экономики. Некоторые из этих трендов включают в себя переход к устойчивым и циклическим цепочкам поставок, использование цифровых технологий для оптимизации процессов, расширение международной кооперации и интеграция различных отраслей.

Для успешного реагирования на эти проблемы и тренды необходимо проводить постоянный анализ и оценку текущей ситуации, а также разра-

батывать стратегии и планы действий, направленные на оптимизацию и устойчивость цепочек поставок.

1.1 Виды цепочек поставок

Цепочки поставок могут быть классифицированы по различным критериям, таким как длина, сложность, уровень интеграции и т.д. Выделяют шесть [6] основных видов цепочек поставок:

- прямые цепочки;
- расширенные цепочки;
- глобальные цепочки;
- циклические цепочки;
- эшелонированные цепочки;
- гибридные цепочки.

Прямые цепочки поставок – это поставки, при которых товар проходит минимальное количество промежуточных пунктов. Они часто используются для скоропортящихся товаров или товаров с высокой стоимостью, так как позволяют сократить время доставки и снизить затраты на транспортировку. Однако прямые цепочки поставок также могут увеличить риски, связанные с контролем качества, безопасностью и своевременностью доставки. Чтобы минимизировать эти риски, компании могут использовать гибридные или эшелонированные цепочки поставок, которые включают в себя несколько уровней посредников и обеспечивают более широкий охват рынка. Такие цепочки поставок могут помочь снизить затраты, улучшить качество обслуживания и обеспечить более надежную доставку товаров.

Расширенные цепочки поставок – это поставки, включающие в себя несколько уровней посредников между производителем и потребителем. Они могут быть полезны для товаров массового потребления или товаров, которые требуют сложной логистики. Расширенные цепочки поставок могут обеспечить более широкий ассортимент това-

ров и большую гибкость в доставке, но они также могут увеличивать затраты и снижать контроль качества.

Глобальные цепочки поставок – это цепочки, охватывающие несколько стран или континентов. Они могут быть более сложными из-за различий в законах, правилах и культурных особенностях разных стран. Чтобы успешно работать в глобальных цепочках поставок, компаниям необходимо учитывать культурные различия, адаптировать свои продукты и услуги для местных рынков и сотрудничать с местными партнерами. Кроме того, компании должны быть готовы к различным рискам, таким как колебания валютных курсов, политические риски и проблемы с логистикой.

Циклические цепочки поставок – это цепочки, ориентированные на повторное использование ресурсов и сокращение отходов. Они включают в себя производство, распределение и потребление товаров и услуг таким образом, чтобы минимизировать отходы и использовать ресурсы более эффективно. Циклические цепочки поставок могут быть реализованы через экономику замкнутого цикла, когда продукты и материалы используются повторно, вместо того чтобы быть выброшенными. Это может включать переработку, восстановление и использование материалов для создания новых продуктов. Чтобы перейти к циклической экономике, компаниям необходимо изменить свои бизнес-модели и принять новые практики, такие как производство меньшего количества товаров, увеличение переработки и улучшение управления отходами. Это может потребовать инвестиций и изменений в инфраструктуре, но может привести к существенной экономии ресур-

сов и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Эшелонированные цепочки поставок – это цепочки, в которых товар проходит через несколько промежуточных звеньев, что позволяет охватить большую аудиторию и снизить затраты на логистику. Они используются в тех случаях, когда необходимо обеспечить широкий охват рынка, например в автомобильной промышленности или производстве бытовой техники. В таких цепочках каждый участник специализируется на определенной функции, например на производстве, логистике или маркетинге. Это позволяет снизить затраты на каждом этапе и повысить эффективность работы всей цепочки в целом. Эшелонированные цепочки поставок также могут включать в себя различные виды транспорта, такие как автомобильный, железнодорожный и морской, что позволяет выбрать наиболее оптимальный способ доставки товара до конечного потребителя.

Гибридные цепочки поставок – это цепочки, в которых сочетаются прямые и эшелонированные цепочки поставок. Они используются, когда необходимо сочетать скорость доставки и широкий охват рынка. Например, в гибридной цепочке поставок товар может производиться в одном регионе, а затем передаваться на другой конец страны через эшелонированную цепочку поставок. Это позволяет производителям быстро реагировать на изменение спроса и обеспечивать своевременную доставку товара потребителям. Гибридные цепочки поставок также позволяют снизить затраты на логистику за счет использования различных видов транспорта и оптимизации маршрутов до-

ставки. Именно гибридные и эшелонированные цепочки поставок являются важными элементами современной экономики, позволяя оптимизировать процессы, снижать затраты и обеспечивать высокое качество товаров и услуг для потребителей.

1.2 Стратегии обеспечения устойчивости

Обеспечение устойчивости цепочек поставок является ключевым аспектом для успешного функционирования предприятий и экономики в целом. Это включает в себя не только снижение затрат и повышение эффективности, но и учет экологических, социальных и этических аспектов.

Для обеспечения эффективности цепочек поставок необходимо интегрировать различных участников, таких, как производители, поставщики, дистрибьюторы и потребители. Это позволяет создать более гибкую и адаптивную систему, способную быстро реагировать на изменения рынка и потребностей потребителей.

Обеспечение устойчивости цепочек поставок требует разработки стратегий, которые будут учитывать эти проблемы и позволят компаниям эффективно справляться с ними.

Одна из таких стратегий – интеграция и сотрудничество между участниками цепи поставок. Это может включать в себя создание партнерств, обмен информацией и ресурсами, а также совместное решение проблем.

Использование инновационных технологий также является важным аспектом стратегии обеспечения устойчивости. Цифровые технологии, такие как Интернет вещей (IoT), большие данные и облачные вычисления, могут помочь улучшить эффектив-

ность и прозрачность цепи поставок.

Разработка новых моделей управления рисками также играет важную роль в обеспечении устойчивости. Эти модели могут включать в себя анализ рисков, определение потенциальных угроз и разработку стратегий их минимизации. Применение принципов устойчивого развития также является важным компонентом стратегии обеспечения устойчивости цепочек поставок. Это включает в себя снижение воздействия на окружающую среду, использование возобновляемых источников энергии и повышение социальной ответственности. В целом, стратегия обеспечения устойчивости цепочек поставок должна быть адаптирована к конкретным условиям и вызовам, с которыми сталкивается компания.

Использование инноваций является ключевым фактором для повышения эффективности и устойчивости цепочек поставок. Применение новых технологий, таких как искусственный интеллект, интернет вещей и блокчейн, может помочь улучшить прозрачность, сократить затраты и снизить риски. Однако, важно также учитывать социальные и экологические последствия внедрения этих технологий, а также возможные киберугрозы и вопросы конфиденциальности данных. Кроме того, необходимо разрабатывать стратегии, которые будут способствовать интеграции различных участников цепи поставок, таких как производители, поставщики и потребители, для создания более устойчивых и эффективных систем.

Сотрудничество между предприятиями также играет важную роль в обеспечении устойчивости и оптимизации цепочек поставок. Совмест-

ное решение проблем, обмен опытом и знаниями, а также разработка общих стратегий и планов действий позволяют достичь более высоких результатов и снизить риски. Кроме того, сотрудничество между предприятиями может способствовать созданию новых возможностей для развития и роста, а также улучшению конкурентоспособности на рынке. Важно также учитывать вопросы управления рисками, такими как экономические, экологические и социальные, и разрабатывать меры по их снижению.

Внедрение принципов устойчивого развития является важным аспектом обеспечения устойчивости цепочек поставок [2]. Это включает в себя учет экологических, социальных и экономических факторов на каждом этапе цепи, от производства до потребления. При этом необходимо также учитывать возможности для повышения энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии, а также вопросы управления отходами и снижения загрязнения окружающей среды. Кроме того, важно уделять внимание вопросам социальной ответственности и уважения к правам человека, а также содействию экономическому и социальному развитию местных сообществ. Безусловно, для достижения максимальной эффективности и устойчивости цепочек поставок необходимо использовать комплексный подход, учитывающий различные аспекты, такие как интеграция и сотрудничество, применение инноваций, внедрение принципов устойчивого развития, управление рисками и многие другие. Только такой подход позволит компаниям успешно справляться с вызовами современного мира и обеспечивать долгосрочный

успех в условиях постоянно меняющейся экономической и экологической обстановки.

Оценка и управление рисками является неотъемлемой частью обеспечения устойчивости и оптимизации цепочек поставок. Необходимо анализировать возможные изменения в законодательстве, экономике и технологиях, чтобы своевременно принимать меры по минимизации негативных последствий. При управлении рисками важно учитывать различные сценарии развития событий и разрабатывать стратегии адаптации к ним, а также использовать инструменты для оценки и мониторинга рисков, такие как анализ сценариев, системы раннего предупреждения и т.д. Кроме того, следует активно взаимодействовать с заинтересованными сторонами, включая поставщиков, потребителей и регулирующие органы, для обмена информацией и координации действий в случае возникновения рисков. Важно помнить, что эффективное управление рисками требует постоянного мониторинга и анализа, а также готовности к адаптации и изменениям в соответствии с изменяющимися условиями.

Снижение негативного воздействия на окружающую среду является важной стратегией обеспечения устойчивости цепочек поставок. Это может включать в себя сокращение выбросов парниковых газов, снижение загрязнения воды и воздуха, а также более эффективное использование ресурсов, управление отходами и снижение загрязнения окружающей среды и снижение загрязнения окружающей среды. Кроме того, компании могут работать над снижением углеродного следа своего производства и повышением энергоэффективности своей деятельности, а также внедрением

принципов циклической экономики и устойчивого потребления.

1.3 Успешные практики оптимизации

Успешные практики оптимизации включают в себя использование новых технологий, таких как искусственный интеллект и интернет вещей, для оптимизации процессов и снижения затрат. Например, компания Amazon использует искусственный интеллект для оптимизации логистики и доставки товаров, а компания Tesla применяет интернет вещей для управления производством и поставками своих электромобилей. В целом, успешные практики оптимизации цепочек поставок включают в себя сотрудничество между предприятиями, внедрение принципов устойчивости, оценку и управление рисками, снижение негативного воздействия на окружающую среду и использование инноваций и технологий для повышения эффективности и снижения затрат.

Интеграция различных участников позволяет создать более гибкие и адаптивные цепочки поставок, способные быстро реагировать на изменения на рынке. Успешные практики интеграции различных участников также включают в себя разработку механизмов управления рисками, таких как системы раннего предупреждения, анализ сценариев и оценка рисков, что позволяет компаниям быстро реагировать на возникающие проблемы и предотвращать их негативные последствия. В целом, интеграция различных участников в цепочки поставок является ключевым фактором успешной оптимизации и обеспечения устойчивости бизнеса в условиях постоянно меняющихся рыночных условий и требований потребителей.

Сотрудничество между предприятиями помогает решать общие проблемы, обмениваться опытом и разрабатывать общие стратегии. Успешные примеры сотрудничества между предприятиями включают в себя создание отраслевых ассоциаций и партнерств, участие в международных проектах и программах, а также обмен знаниями и технологиями между компаниями. Это позволяет предприятиям более эффективно использовать свои ресурсы, улучшать свою конкурентоспособность и адаптироваться к изменениям на рынке. Сотрудничество между компаниями может помочь оптимизировать цепочки поставок, уменьшая затраты на транспортировку и улучшая эффективность работы. Например, две компании могут объединиться для создания совместного предприятия, которое будет производить и распространять товары между ними. Это может снизить затраты на логистику и улучшить качество обслуживания клиентов.

Ещё одним примером оптимизации цепочек поставок является использование электронных платформ для управления заказами и отслеживания товаров. Эти платформы позволяют компаниям быстро и эффективно обмениваться информацией о заказах, что может сократить время доставки и снизить затраты на хранение товаров на складах.

Кроме того, сотрудничество между компаниями может привести к созданию новых продуктов и услуг, которые могут быть более привлекательными для потребителей. Например, одна компания может производить компоненты для продукта, а другая - заниматься его продажей. Это позволяет каждой компании сосредоточиться на своей области специализации и снизить

риски.

Внедрение принципов устойчивого развития требует учёта экологических, социальных и экономических факторов на каждом этапе цепочки поставок. Успешные примеры внедрения принципов устойчивого развития включают в себя разработку экологических стандартов и сертификаций, улучшение энергоэффективности и использование возобновляемых источников энергии, а также создание программ социальной ответственности и поддержки местных сообществ. Такие практики помогают компаниям снижать свое воздействие на окружающую среду, повышать доверие со стороны потребителей и привлекать инвестиции, что в целом способствует устойчивому развитию экономики и общества.

Оценка рисков и управление ими помогает минимизировать негативные последствия изменений в экономике и технологии. Оценка рисков в цепочках поставок товаров является важным аспектом для обеспечения безопасности и качества продукции. Она включает в себя анализ различных факторов, таких как качество сырья, надежность поставщиков, стабильность транспортных маршрутов, а также возможные угрозы со стороны конкурентов или природных катаклизмов. Для оценки рисков используются различные методы, такие как анализ сценариев, оценка вероятности наступления рисков, а также разработка стратегий реагирования на возможные проблемы. Важно также учитывать экономические факторы, такие как затраты на внедрение мер по снижению рисков и возможные выгоды от их применения. Оценка рисков позволяет определить слабые места в

цепочке поставок и разработать меры по их устранению. Это может включать в себя улучшение контроля качества, оптимизацию маршрутов доставки, а также сотрудничество с другими компаниями для снижения общих рисков.

Кроме того, оценка рисков помогает определить потенциальные угрозы для бизнеса и принять меры для их предотвращения. Это может включать в себя разработку планов реагирования на кризисные ситуации, улучшение системы управления рисками и обучение персонала работе с рисками. В целом, оценка рисков в цепочках поставок товаров является неотъемлемой частью успешного бизнеса и позволяет снизить возможные потери, улучшить качество продукции и повысить доверие со стороны клиентов и партнеров.

1.4 Оптимизация маршрута

Оптимизация маршрута в цепочках поставок является важным этапом для снижения затрат на логистику и повышения эффективности доставки товаров [3]. Для этого используются различные методы и инструменты, такие как алгоритмы маршрутизации, системы планирования перевозок и анализ данных о транспортных потоках.

Одним из наиболее распространенных методов является использование алгоритмов маршрутизации, таких как алгоритм Дейкстры, алгоритм Краскала, алгоритм Прима, алгоритм Флойда-Уоршола или алгоритм Беллмана-Форда. Эти алгоритмы позволяют найти оптимальный маршрут с учетом различных параметров, таких как расстояние, время доставки, стоимость перевозки и ограничения на пропускную способность транспортных средств.

Также используются системы планирования перевозок,

которые позволяют оптимизировать маршруты доставки с учетом множества факторов, таких как загрузка транспортных средств, расписание движения транспорта и требования к срокам доставки товаров. Анализ данных о транспортных потоках также может помочь в оптимизации маршрутов, так как позволяет выявить наиболее загруженные маршруты и определить альтернативные пути доставки.

1.4.1 Алгоритм Дейкстры

Алгоритм был предложен в 1959 году Эдсгером Дейкстрой [5]. Данный алгоритм имеет множество применений в различных областях, включая оптимизацию цепочек поставок. Он является одним из наиболее известных и широко используемых алгоритмов поиска пути на графе.

Алгоритм Дейкстры может использоваться для оптимизации цепочек поставок путем нахождения кратчайшего пути между источником и целью с учетом определенных ограничений, таких как стоимость перевозки, время доставки и пропускная способность транспортных средств. Он работает путем присвоения каждому узлу в графе стоимости и определения начального узла, после чего происходит обход графа от начального узла к конечному, выбирая на каждом шаге путь с наименьшей стоимостью. Результатом работы алгоритма является найденный кратчайший путь и стоимость доставки по этому пути.

Алгоритм работает за $O(n \log n + m)$, где n - количество вершин в графе, m - количество ребер.

На вход алгоритму подаётся граф G , состоящий из N вершин и M ребер, а также некоторая функция (i, j) , задающая длину ребра между вершинами i и j . Также указывается

начальная вершина V_0 и конечная вершина V_k . Алгоритм ищет путь между этими двумя вершинами, имеющий наименьшую длину, или вес.

Алгоритм состоит из двух основных частей: построение дерева кратчайших путей и нахождение кратчайшего пути в этом дереве.

Построение дерева кратчайших путей начинается с того, что всем вершинам, кроме стартовой, присваивается бесконечная длина. Затем находится кратчайший путь от стартовой вершины до всех остальных вершин, и этот путь добавляется в дерево кратчайших путей. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все вершины не будут иметь конечную длину.

Нахождение кратчайшего пути в построенном дереве осуществляется с помощью обхода в глубину или обхода в ширину. При этом выбирается путь с наименьшей длиной от начальной вершины до конечной.

1.4.2 Алгоритм Краскала

Алгоритм Краскала [10] был разработан чешским математиком Ярошем Краскалом в 1956 году. Он используется для нахождения минимального остовного дерева в неориентированном графе.

Алгоритм Краскала работает за время $O(n \log n + m)$, где n - количество вершин, а m - количество ребер. Сначала алгоритм строит список всех ребер в порядке возрастания их веса. Затем он начинает с пустого минимального остовного дерева и добавляет ребра по одному. На каждой итерации выбирается минимальное ребро из списка и добавляется в дерево. Если ребро уже присутствует в дереве, оно игнорируется. Процесс продолжается до тех пор, пока в списке есть ребра. После завершения работы алгоритма минимальное остовное дере-

во будет содержать все вершины графа и минимальное количество ребер. Это дерево может быть использовано для нахождения оптимального маршрута между любыми двумя вершинами графа.

Одним из преимуществ алгоритма Краскала является его простота и эффективность. Он не требует никаких предварительных знаний о структуре графа, а его работа основана только на информации о весах ребер. Это делает его подходящим для использования в различных задачах оптимизации, включая оптимизацию цепей поставок.

1.4.3 Алгоритм Прима

Алгоритм Прима был разработан польским математиком Карлом Примом в 1957 году [14][15]. Он был одним из первых алгоритмов для нахождения минимального остовного дерева в графе. Алгоритм работает за $O(n^2)$ времени, где n - количество вершин в графе.

Идея алгоритма заключается в том, чтобы на каждом шаге добавлять в результирующее дерево ребро минимального веса, которое не образует цикла с уже выбранными ребрами. Процесс продолжается до тех пор, пока все вершины графа не окажутся в одной компоненте связности.

Особенностью алгоритма Прима является то, что он всегда выбирает ребро с наименьшим весом на каждом шаге, что гарантирует получение минимального остовного дерева. Это делает его особенно полезным для задач оптимизации, таких как оптимизация цепочек поставок.

Алгоритм Прима используется для решения задач оптимизации, связанных с минимальными путями и связностью в графах. Это важно для оптимизации цепочек поставок, поскольку позволяет найти наиболее эффективный маршрут для перемещения

товаров от производителя к конечному потребителю.

В контексте оптимизации цепочек поставок алгоритм Прима работает следующим образом:

сначала создается граф, в котором вершины представляют собой различные точки в цепочке поставок (например, фабрики, склады, порты и т. д.), а ребра между вершинами представляют возможные пути транспортировки товаров.

затем в алгоритм вводятся данные о стоимости каждой связи между двумя вершинами, которые могут включать стоимость перевозки, время транспортировки, расстояние и другие факторы, влияющие на общую стоимость цепочки поставок.

после этого алгоритм начинает поиск минимального пути между начальной и конечной вершинами графа, перебирая все возможные комбинации вершин и ребер и выбирая ту, которая имеет минимальную стоимость.

1.4.4 Алгоритм Флойда-Уоршолла

Алгоритм Флойда-Уоршелла был опубликован в своей текущей форме Робертом Флойдом в 1962 году [7]. Однако его структура является почти такой же, как у алгоритмов, ранее опубликованных Бернардом Роем в 1959 году [8], а также Стивеном Уоршеллом в 1962 году для поиска транзитивного замыкания графа [16], и тесно связан с алгоритмом Клини [11] для преобразования детерминированного конечного автомата в регулярное выражение.

Алгоритм Флойда-Уоршолла может быть использован для оптимизации цепочек поставок при наличии нескольких поставщиков и потребителей. Этот алгоритм позволяет найти кратчайшие пути между всеми парами вершин графа, что может быть полезно для

определения оптимальных маршрутов доставки товаров от поставщиков к потребителям.

Алгоритм Флойда-Уоршолла работает за $O(n^3)$, что может быть довольно медленно для больших графов. Однако, существуют различные способы оптимизации этого алгоритма, такие как использование разреженных матриц или разделение графа на подграфы с меньшим числом вершин.

Дополнительным способом оптимизации является использование параллельных вычислений. Алгоритм Флойда-Уоршолла легко распараллеливается, так как каждая итерация может быть выполнена независимо от других. Это позволяет ускорить работу алгоритма, особенно на многоядерных процессорах. Тем не менее, следует учитывать, что использование параллельных вычислений может потребовать больше ресурсов, таких как процессорное время и память. Поэтому, перед тем как использовать параллельные вычисления, необходимо оценить, насколько это будет эффективно для конкретной задачи.

1.4.5 Алгоритм Беллмана-Форда

Алгоритм Беллмана-Форда [1] может быть использован для нахождения кратчайших путей в графе, когда веса ребер могут быть отрицательными. Это может быть полезным при оптимизации цепочек поставок, когда некоторые пути могут быть более выгодными с точки зрения затрат на транспортировку.

Например, если есть два поставщика А и В, которые производят один и тот же товар, и есть два потребителя С и D, которые хотят этот товар, то может быть выгоднее доставить товар от А до С, а затем от С до D, чем доставлять товар напрямую от А до D. Это

связано с тем, что затраты на транспортировку между А и С могут быть меньше, чем между А и D, а также с тем, что С может находиться ближе к D, что также снижает затраты на транспортировку.

Чтобы использовать алгоритм Беллмана-Форда для нахождения оптимальных маршрутов в такой ситуации, нужно построить граф, где вершинами являются поставщики и потребители, а ребрами - возможные пути между ними. Веса ребер должны отражать затраты на транспортировку по каждому пути. Затем нужно запустить алгоритм Беллмана-Форда на этом графе.

Алгоритм Беллмана-Форда работает за $O(nm)$, где n - количество вершин, m - количество ребер. Сначала он находит все вершины, достижимые из заданной стартовой вершины за не более чем k шагов, где k - максимальное количество ребер в пути. Затем для каждой вершины он находит кратчайший путь из стартовой вершины в эту вершину. Если граф содержит ребра с отрицательным весом, алгоритм может найти пути с отрицательной длиной, которые на самом деле не существуют. Чтобы избежать этого, можно использовать алгоритм Форда-Беллмана с барьерами, который работает за $O((m + n \log n) \log C)$, где C - максимальная разница между длинами ребер графа.

Алгоритм Форда-Беллмана с барьерами был предложен в 1962 году Лестером Р. Фордом и Деборой Дж. Беллман, и с тех пор он широко используется для нахождения кратчайших путей в графах. Он является одним из самых эффективных алгоритмов для этой задачи, и его использование позволяет существенно сократить время, необходимое для нахождения кратчайших путей в больших графах.

Алгоритм Форда-Беллмана

с барьерами работает следующим образом: сначала он находит все вершины, достижимые из стартовой вершины, как и обычный алгоритм Беллмана-Форда, но вместо того, чтобы останавливать алгоритм после нахождения кратчайших путей, он продолжает его до тех пор, пока не обработает все вершины. Затем для каждой вершины алгоритм проверяет, существует ли путь из стартовой вершины в эту вершину с длиной меньше бесконечности. Если такой путь существует, алгоритм добавляет барьер на ребро, которое выходит из этой вершины и имеет бесконечную длину. Барьер не позволяет алгоритму рассматривать пути, которые проходят через это ребро. Затем алгоритм продолжает обработку вершин, пока не обработает их все.

Таким образом, алгоритм Форда-Беллмана с барьерами находит все возможные

пути из стартовой вершины во все остальные вершины, и выбирает из них путь с минимальной длиной. Если все длины рёбер положительны, этот путь будет действительно кратчайшим путём. Если же в графе есть рёбра с отрицательной длиной, алгоритм не найдёт путей с отрицательной длиной и, следовательно, не выберет их в качестве кратчайших путей.

В заключение, успешное обеспечение устойчивости и оптимизация цепочек поставок требует применения комплексного подхода. Этот подход должен включать в себя активное использование инноваций, интеграцию различных участников в рамках цепочки поставок, сотрудничество между предприятиями и внедрение принципов устойчивого развития. Оценка рисков и их своевременное управление также являются важными составляющими

этого процесса. Управление рисками является ключевым элементом данного процесса, позволяющим эффективно реагировать на изменения и предотвращать возможные проблемы. Успешное обеспечение устойчивости и оптимизация цепочек поставок требуют применения комплексного подхода, который должен включать активное использование инноваций, интеграцию различных участников в рамках цепочки поставок, сотрудничество между предприятиями и внедрение принципов устойчивого развития. Только такой подход позволит создать действительно эффективные и устойчивые цепочки поставок, которые смогут адаптироваться к постоянным изменениям и продолжать удовлетворять потребности потребителей на высоком уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман, Ричард (1958). «О проблеме маршрутизации». *Ежеквартальный журнал прикладной математики*.
2. Бланшар, Дэвид (2010). *Лучшие практики управления цепочками поставок (2-е изд.)*. JohnWiley&Sons. ISBN 978-0-470-53188-4.
3. Боумен Р. Дж., *Семь лучших практик для цепочек поставок в 2025 году*, SupplyChainBrain, опубликовано 4 августа 2014 г., дата обращения 21 февраля 2023 г.
4. Государственные банки Китая ограничивают финансирование российских сырьевых товаров. *Новости Bloomberg*. 25 февраля 2022 года. Архивировано с оригинала 25 февраля 2022 года. Проверено 26 февраля 2022 года.
5. Дейкстра Э. В. *Примечание о двух задачах в связи с графами // Числовая математика / Ф. Бреци — Спрингер Наука + Деловые СМИ, 1959. — Том 1, Iss. 1. — С. 269-271.*
6. Фишер, М. Л., *Какова правильная цепочка поставок для вашего продукта?*, HarvardBusinessReview, март-апрель 1977 г., стр. 105-116.
7. Флойд, Роберт У. (июнь 1962 г.). «Алгоритм 97: кратчайший путь». *Сообщения ACM*. 5 (6): 345. doi:10.1145/367766.368168. S2CID 2003382.
8. Хансен, Пьер и Верра, Доминик. (2002). *Связность, транзитивность и цветность: Новаторская работа Бернарда Роя в теории графов*. 10.1007/978-1-4615-0843-4_2.
9. Иванов Д., Соколов Б. *Адаптивное управление цепочками поставок*. — Л.: Springer. — ISBN 978-1-84882-951-0.
10. Джозеф. Б. Крускал. *О кратчайшем охватывающем поддереве графа и задаче коммивояжера*. // Proc. AMS. 1956. — Том 7, — № 1. — С. 48-50.
11. Клин, Стивен С. (1956). «Представление событий в нервных сетях и конечных автоматах». *Изучение автоматов, Анналы математики*.
12. Левин, Келли (8 Августа 2019 Г.). «Насколько Эффективна Земля В устранении Углеродного Загрязнения? Мнение МГЭИК». *Институт Мировых Ресурсов*. Проверено 15 Мая 2020 Г.

13. McKinsey & Company, «Успех революции в цепочках поставок искусственного интеллекта», опубликовано 30 апреля 2021 г., дата обращения 28 июня 2023 г.
14. R. C. Prim: Сети кратчайших подключений и некоторые обобщения. В: Технический журнал BellSystem, 36 (1957), стр. 1389-1401.
15. Томас Х. Кормен, Чарльз Э. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест и Клиффорд Стайн. Введение в алгоритмы, третье издание. Издательство Массачусетского технологического института, 2009. ISBN 0-262-03384-4. Раздел 23.2: Алгоритмы Крускала и Прима, стр. 631-638.
16. Трипати, Абхиджит. (2020). Транзитивное замыкание Графа с использованием алгоритма Флойда Уоршалла.
17. «Трамп: Сколько газа Германия получает из России?». BBC News. 11 июля 2018.

REFERENCES

1. Bellman, Richard (1958). «On a routing problem». *Quarterly of Applied Mathematics*.
2. Blanchard, David (2010). *Supply Chain Management Best Practices (2nd ed.)*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-53188-4.
3. Bowman, R. J., *Seven Best Practices for Supply Chains in 2025*, SupplyChainBrain, published 4 August 2014, accessed 21 February 2023.
4. China State Banks Restrict Financing for Russian Commodities. Bloomberg News. 25 February 2022. Archived from the original on 25 February 2022. Retrieved 26 February 2022.
5. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // *NumerischeMathematik / F. Brezzi — Springer Science+Business Media*, 1959. — Vol. 1, Iss. 1. — P. 269—271.
6. Fisher, M. L., What is the Right Supply Chain for your Product?, *Harvard Business Review*, March-April 1977, pp 105-116.
7. Floyd, Robert W. (June 1962). «Algorithm 97: Shortest Path». *Communications of the ACM*. 5 (6): 345. doi:10.1145/367766.368168. S2CID 2003382.
8. Hansen, Pierre & Werra, Dominique. (2002). *Connectivity, Transitivity and Chromaticity: The Pioneering Work of Bernard Roy in Graph Theory*. 10.1007/978-1-4615-0843-4_2.
9. Ivanov D., Sokolov B. *Adaptive Supply Chain Management*. — L.: Springer. — ISBN 978-1-84882-951-0.
10. Joseph. B. Kruskal. On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem. // *Proc. AMS*. 1956. — Vol 7, — No. 1. — P. 48-50.
11. Kleene, Stephen C. (1956). «Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata». *Automata Studies, Annals of Math*.
12. Levin, Kelly (8 August 2019). «How Effective Is Land At Removing Carbon Pollution? The IPCC Weighs In». *World Resources institute*. Retrieved 15 May 2020.
13. McKinsey & Company, *Succeeding in the AI supply-chain revolution*, published 30 April 2021, accessed 28 June 2023.
14. R. C. Prim: Shortest connection networks and some generalizations. In: *Bell System Technical Journal*, 36 (1957), pp. 1389—1401.
15. Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein. *Introduction to Algorithms, Third Edition*. MIT Press, 2009. ISBN 0-262-03384-4. Section 23.2: The algorithms of Kruskal and Prim, pp. 631—638.
16. Tripathy, Abhijit. (2020). *Transitive Closure Of A Graph using Floyd Warshall Algorithm*.
17. «Trump: How much of Germany's gas comes from Russia?». BBC News. 11 July 2018.

Статья поступила в редакцию: 25.03.2024

The article was received: 25.03.2024

Роголин Родин Сергеевич - кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математики и моделирования», Владивостокский Государственный Университет
Email: rafassiaofusa@mail.ru

Rogulin Rodin Sergeevich - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department "Mathematics and Modeling", Vladivostok State University
Email: rafassiaofusa@mail.ru

□ © Роголин Р. С.