*На правах рукописи*

Гранин Сергей Сергеевич

СТАЦИОНАРНЫЕ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СПРОСЕ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Специальность: 05.13.10 –

«Управление в социальных и экономических системах»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН).

|  |  |
| --- | --- |
| Научныйруководитель: | Мандель Александр Соломонович,доктор технических наук, доцент, г.н.с. Института проблем управления им В.А. Трапезникова РАН |
| Официальныеоппоненты: | Гребенюк Елена Алексеевна,доктор технических наук, Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАНМокров Дмитрий Викторович,кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «СИАМ консалтинг» |
| Ведущаяорганизация: | ФИЦ «Информатика и управление» РАН,Институт системного анализа |

Защита состоится \_\_ \_\_\_\_\_ 2021 г. В \_\_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.226.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на сайте ipu.ru.

Автореферат разослан \_\_ \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь

Диссертационного совета

|  |  |
| --- | --- |
| Д002.226.02, д.т.н. |  / А.А. Галяев/ |

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Широкое становление логистики запасов, как сугубо прикладной дисциплины, реализующей достижения теории управления запасами и опирающейся на анализ практического опыта специалистов в области управления снабжением, поставило новые вопросы к самой теории. И, прежде всего, что делать в условиях сбоев, когда, например, изменяется ситуация на рынке или законодательно налоговая база, возникают непредвиденные срывы в работе поставщиков или потребители, вопреки оговоренным условиям договоров, изъявляют желание отказаться от полученных ими поставок, желая, в конечном счете, возвратить купленное продавцу. Часть этих вопросов, благодаря полученным в диссертации новым результатам, удалось разрешить.

В последнее десятилетие в связи с широким внедрением ERP-систем в области теории и приложений управления производственно-складскими системами, включая тот инженерно-экономический раздел этой теории, который получил название логистики, и, в частности, логистики запасов, все большее число работ посвящено решению проблем, собранных под общим наименованием «управление цепями поставок» [[1]](#footnote-1), [[2]](#footnote-2). Интерес к этому классу задач обусловлен прикладной актуальностью этой темы: все большее число предлагаемых моделей, алгоритмов и решений либо изначально разрабатывались для принятия решений в конкретных практических ситуациях, либо рано или поздно находят свои приложения. Однако при этом, важно подчеркнуть, далеко не все из существовавших теоретических наработок, особенно применительно к системам со случайным спросом и с теми или иными видами неопределенности были включены в состав современных *ERP*-систем. Это объяснялось тем, что при создании таких систем (в начале 90-х годов прошлого века – первые *MRP1*-системы, за ними – *MRP2*-системы, а сегодня уже *ERP*) стали широко применяться только те модели и инструменты, которые были обкатаны и доведены, что назевается, до ума. И это, прежде всего, различные модели и алгоритмы решения задач математического программирования – как правило, линейного или квадратичного. Эта работа шла и продолжается бурным ходом, а некоторые классические модели управления запасами при случайном спросе, например, та модель, которая рассмотрена во главе 2 диссертации, и которая будет названа базовой, оказались «приброшенными». Таким модели плохо вели себя в онлайновых системах управления, требовали сложных и времяемких расчетов, а в условиях неопределенности это было неприемлемо. При этом в *ERP*-системах с неопределенностью справлялись за счет создания систем поддержки принятия решений (СППР), аккумулировавших практический опыт специалистов в области логистики запасов и производства. Это, на наш взгляд, ставит перед теорией новый вызов: адаптировать имеющиеся модели к возможностям современных *ERP*-систем. Именно это составляет основное содержание диссертационной работы.

Кроме того, стало понятным, что работы в области управления запасами при случайном спросе при неопределенности в процессе поставок, которые активно велись до начала 90-х годов прошлого века и были приостановлены в связи с широким внедрением *MPR*- и *ERP*-систем[[3]](#footnote-3), которые заняли большое число специалистов в области исследования операций, нуждаются для расширения возможностей их практического применения в дальнейшем развитии.

**Цель диссертационной работы** состоит в том, чтобы развить и адаптировать известные модели управления запасами со случайным спросом к потребностям современных систем управления производством и запасами в условиях параметрической неопределенности и меняющейся инфляции и очертить области их возможного применения.

В работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Рассмотрена возможность использования оптимальных параметров стационарных стратегий управления запасами для синтеза правил управления запасами в системах снабжения со случайным спросом, действующих на реальном рынке. Выполнено сравнение эффективности «дальнозорких», стационарных и «близоруких» стратегий управления запасами. Исследованы различные подходы к синтезу оптимальных стационарных стратегий. Дана сравнительная оценка этих подходов и отмечены особенности их применения. Приведены результаты модельного оценивания оптимальных параметров стационарных стратегий управления запасами как функций от эконометрических параметров модели и уровня инфляции.

2. Рассмотрена задача управления запасами при случайном спросе, связанная с оптимизацией процессов, которые возникают в цепи поставок при наличии нескольких альтернативных поставщиков, обладающих разной степенью надежности и разными эконометрическими характеристиками. Исследовано два случая: (а) фиксированная часть затрат на поставку у всех поставщиков одна и та же при не совпадающих ценах на ед. товара и (б) все компоненты затрат у разных поставщиков различны.

3. Предложено существенное обобщение модели теории управления запасами со случайным спросом – модель с возвратами, применение которой на практике представляется весьма ограниченным, однако показано, что результаты, полученные на этой модели, могут быть перенесены на решение одного класса прикладных и широко распространённых задач управления систем массового обслуживания.

4. Исследованы аналогии между задачами теории управления запасами и теории управляемых систем массового обслуживания. На основе выявленных аналогий предложены новые постановки задач теории управления запасами и производством и новые пороговые алгоритмы решения задач управления системами массового обслуживания.

**Методы исследования.** Основным методом исследования являлось математическое моделирование. При этом использовался и был развит математический аппарат теории управления запасами и теории массового обслуживания. Для прикладной части разработаны специальные алгоритмы и создан оригинальный код программ в среде *MATLAB*.

**Научная новизна.** Полученные в диссертации результаты существенно развивают понимание того, как строить оптимальные стратегии управления запасами и каковы их свойства в условиях параметрической неопределенности. Впервые выполнен качественный анализ сравнительных достоинств и недостатков «близоруких», стационарных и «дальнозорких» стратегий управления запасами. Существенно развита классическая модель управления запасами при ненадёжных поставщиках. Предложена новая модель управления запасами с возвратами. Еще одним продвижением стало обнаружение и изучение аналогий между задачами управления запасами с возвратами и некоторыми задачами теории управляемых систем массового обслуживания. Это позволило, с одной стороны, существенно продвинуть теорию управляемых систем массового обслуживания, а, с другой, наметить новые постановки задач теории управления запасами.

**Защищаемые положения.**

1. Для базовой модели продемонстрированы преимущества «дальнозорких» и стационарных стратегий управления запасами при случайном спросе по сравнению с «близорукими» стратегиями. Выявлены и проинтерпретированы свойства оптимальных стратегий управления запасами в условиях параметрической неопределенности.

2. Создан инструмент для построения «альбома» характеристик систем управления запасами при случайном спросе при изменении эконометрических характеристик базовой модели и даны рекомендации по процессу поддержки принятия решений в условиях изменения параметров модели.

3. Исследованы задачи управления запасами при случайном спросе и неопределенности в процессе пополнения запасов, обусловленной наличием нескольких альтернативных и разно надежных поставщиков. Для некоторого класса моделей построены новые конструктивные алгоритмы одновременного построения оптимальных стратегий управления запасами и выбора наилучших поставщиков. В общем случае, когда все компоненты затрат у разных поставщиков различны, предложена общая схема формирования оптимальных стратегий.

4. Описана принципиально новая модель управления запасами при случайном спросе – модель с возвратами. Продемонстрирована ее связь с моделями теории управляемых систем массового обслуживания. Построены новые алгоритмы оптимизации управляемых системам массового обслуживания – алгоритмы выбора пороговых стратегий переключения каналов.

**Практическая значимость.**

1. В рамках класса моделей, для которых оптимальны двухуровневые стратегии управления запасами, удалось оптимизировать процесс вычислений для задачи динамического программирования, что позволило совершить качественный скачок в производительности вычислений. Благодаря выявленным особенностям основного алгоритма динамического программирования, радикально сокращено общее число операций и тем самым уменьшено время обсчёта типовой серии с одних суток до нескольких минут. Это позволило строить «альбомы» характеристик систем управления запасами при изменении, а, стало быть, и неопределенности эконометрических характеристик и состояния внешней среды, являющиеся крайне ценным дополнением в системах поддержки принятия решений (СППР) в системах снабжения.

2. Для СППР разработаны рекомендации по выбору параметров стратегий управления запасами при случайном спросе при изменении эконометрических характеристик модели и уровня инфляции.

3. Предложенные алгоритмы выбора поставщиков и построенная общая схема формирования оптимальных стратегий управления позволяют снизить общие экономические затраты и повысить надёжность процесса пополнения запасов.

4. Подмеченная аналогия между задачами теории управления запасами при наличии возвратов и некоторых задач теории управляемых систем массового обслуживания. Предложенные алгоритмы позволили применить наработанный аппарат теории управления запасами для решения практических задач управления системами массового обслуживания.

**Личный вклад.** Все основные результаты получены автором самостоятельно при научном руководстве доктора технических наук, главного научного сотрудника Манделя А.С.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях «*Управление развитием крупномасштабных систем*» в Москве (*MLSD’2015*; *MLSD’2017*; *MLSD’2018* и *MLSD’2019*), на международной конференции *IEEE International Conference on Logistics, Informatics and Services Sciences* в Пекине (*LISS 2018*) и на «*62-й Всероссийской научной конференции МФТИ*».

**Публикации.** По теме диссертационной работы было опубликовано 12 научных работ. Из них 2 публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 5 публикаций в изданиях, индексируемых в международных научных базах данных.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения, списка литературы и приложений в виде исходного кода программ, моделирующих задачи, рассматриваемые в данной работе. Работа, не считая приложений, содержит 120 страниц текста, список использованных источников включает в себя 163 наименования.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводится историческая справка по становлению логистики запасов как чисто прикладной дисциплины, с указанием основных поворотных моментов, авторов и их работ, повлиявших на её развитие. Обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы для решения практических задач управления запасами и производством.

**В первой главе** обозреваются математические модели управления запасами и производится их классификация.

*В разделе 1.1* исследуется, как технический прогресс вкупе с развитием технических и экономических наук создавали необходимые предпосылки для становления дисциплин, связанных с управлением запасами и производством. Современные методы производства и экономические отношения требовали передовых (а главное, научно обоснованных) методов управления хозяйственными системами. Представлена история развития и классификация моделей управления запасами.

*В разделе 1.2* представлен обзор исследований в области передовых методов управления сложными хозяйственными системами. Подавляющее количество работ посвящено методам проектирования (и управления) складских систем с целью повышения их устойчивости к внешним негативным воздействиям случайной природы.

*В разделе 1.3* рассмотрено одно из самых популярных и перспективных направлений в области проектирования цепей поставок - *волновой эффект*, вобравший в себя большой пласт научных исследований, связанных с теорией управления запасами. Волновой эффект может выступить в роли явления, которое в состоянии объединить исследование в области управления (и восстановления стабильности) нештатными ситуациями в цепях поставок, подобно *эффекту хлыста* (относительно колебаний времени выполнения заказа и спроса). Это может задать повестку для будущих исследований в области динамики, управления, непрерывности и управления сбоями в цепях поставок, делая их более робастными, гибкими и прибыльными. Рассмотрены достоинства и недостатки методов, представленных исследователями данной области.

*В разделе 1.4* описан один из фундаментальных результатов теории управления запасами, который принадлежит Герберту Скарфу[[4]](#footnote-4) и заключается в том, что при достаточно общих предположениях о характере процессов, происходящих в системе снабжения, и выборе критерия управления запасами в форме минимизации суммарных средних затрат в периоде планирования, оптимальные стратегии управления запасами оказываются параметрическими.

*В разделе 1.5* отдельно рассмотрены методы синтеза алгоритмов управления запасами в условиях неопределенности и нестационарности (процессов, протекающих внутри системы снабжения). Для задачи управления многономенклатурными запасами проанализирован общий подход к её решению. Он основан на том, что в условиях неопределенности и нестационарности и отсутствия достоверной информации о статистических характеристиках спроса практическое решение задачи должно опираться на представленную в работе многоэтапную процедуру. Суть процедуры заключается в том, что на первых этапах происходит классификация всех видов товаров по методу *ABC-анализа*. Далее для полученных классов осуществляется выделение трендов (включающих и сезонные компоненты спроса), на основе которых решается детерминированная многономенклатурная задача управления запасами. На последующих этапах решается проблема формирования дополнительных (страховых) запасов для компенсации флуктуаций спроса относительно выделенных трендов. В работе представлен алгоритм решения, основанный на калмановской фильтрации.

**Во второй главе** исследуется возможность использования оптимальных параметров стационарных стратегий управления запасами для синтеза правил управления запасами в системах снабжения со случайным спросом, действующих на реальном рынке.

*В разделе 2.1* рассматривается модель управления однономенклатурным запасом с запоминанием задолженного спроса в течение периода планирования *T* = (0, *N*τ), где *N* – достаточно большое натуральное число, в котором спрос описывается моделью независимых в совокупности, одинаково распределенных случайных величин {*z*(*n*), *n* = 1, 2, …, *N*} с функцией распределения *F*(*z*). Такой моделью, которую в дальнейшем мы будем называть базовой, хорошо описываются системы управления запасами продуктов массового потребления, спрос на которые не подвержен (или мало подвержен) сезонным изменениям. Среди таких продуктов можно назвать основные продукты питания (хлебобулочные изделия, мясо, молочные продукты и т.д.), лекарственные средства от хронических заболеваний и многие-многие другие.

*В разделе 2.2* производится сравнение эффективности использования «дальнозорких» и стационарных стратегий над «близорукими». Была создана дополнительная модель, которая рассчитывает значения *C*(*x*) суммарных средних затрат за *N* шагов методом Монте-Карло для значений *R*, *r*, полученных при решении одношаговой и многошаговой задач. Моделирование показало, что «выигрыш» по уровню средних суммарных затрат при использовании стационарных стратегий управления запасами вместо «близоруких» (широко применяемых на практике) может составлять порядка 25% при типичных для практических проблем управления запасами соотношениях параметров затрат.

*В разделе 2.3* демонстрируется, как определить оптимальную стратегию функционирования в системах, находящихся в стационарном режиме, используя подход, связанный с функциональными уравнениями.

*В разделе 2.4* рассматриваются свойства оптимальных стратегий управления запасами. Представлены результаты моделирования значений оптимальный параметров *R* и *r* от эконометрических параметров (таких как *A*, *c*, *h* и *d*) и нестационарности рынка (изменения коэффициента дисконтирования 𝛂) для трёх функций распределения спроса: Гауссова, экспоненциального и равномерного. Проанализировано поведение этих параметров. В результате моделирования было установлено, что при больших значениях 𝛂 мы всё дальше «заглядываем» в будущее и обнаруживаем, что экономически целесообразно делать большие заказы, а не ограничиваться «интересами» только ближайшего шага принятия решений. Так же с ростом значения 𝛂 уменьшается уровень допустимого дефицита товара.

*В разделе 2.5* исследуется феномен «лестничного» поведения графиков *R* от эконометрических характеристик модели. Чтобы разобраться в этом, важно вспомнить, что нормальный или равномерный законы распределения описывают случайные величины, которые «более детерминированы», нежели случайные величины, описываемые экспоненциальным законом распределения. В самом деле, при стремлении среднеквадратического отклонения *σ* гауссова закона к 0 это распределение вырождается в чисто детерминистский скачок. То же самое можно сказать о равномерном законе распределении при стремлении его правой *b* и левой *a* границ к среднему значению *μ*. В этом контексте только экспоненциальный закон распределения максимально далек от описания детерминированных величин.

Представлены результаты моделирования системы управления запасами в дискретном времени. Моделирование позволило оценить роль случайных возмущений в эволюции системы и обнаружить, что в характере изменения параметров оптимальных стратегий возможно наличие флуктуаций, обусловленных тем, насколько отличаются от детерминированных реальные распределения спроса.



*Рис. 1. Поверхности R(A,c) и r(A,c) для случая гауссова распределения спроса. Параметры модели: A = 0 ÷ 100; c = 0 ÷ 20; h = 1; d = 20; 𝛂 = 0,9.*

Важно отметить, что такое представление результатов моделирования, ввиду своей наглядности, крайне полезно в исследовании задач управления запасами и позволяет строить предположения о поведении параметров модели при определённых соотношениях эконометрических параметров. В условиях нестационарности процессов, протекающих внутри системы управления запасами, крайне полезно иметь под рукой некий «атлас», который мог бы подсказать – как будут изменяться оптимальные параметры *R* и *r*. По своей сути, «атлас» — это *M*-мерные массив значений *R* и *r*, в зависимости от значений *M* эконометрических параметров модели, таких как: *A*, *c*, *h*, *d*, 𝛂 (в этот список можно включить параметры функций плотности вероятности спроса). Рассчитав эти массивы, их можно включать в различное программное обеспечение для предсказания поведения рынка или как прикладные СППР для управляющих хозяйством. Исходный код модели в приложении *А*, благодаря оптимизации скорости вычислений, позволяет быстро находить оптимальные параметры *R*, *r* как зависимость от одного (график) или двух (поверхность) эконометрических параметров. Структура алгоритма позволяет легко добавить новые «степени свободы» в эту модель и рассчитывать «атласы», упомянутые выше.

*В разделе 2.6* рассматривается вопрос о скорости сходимости параметров *Rn* и *rn* стратегии управления запасов к своим предельным значениям. Были проведены эксперименты для трёх функций распределения спроса: гауссова, экспоненциального и равномерного. Для выбранного набора входных данных, моделирование показало, что *Rn* сходится к своим предельным значениям быстрее всего в случае равномерного распределения, на втором месте оказалось экспоненциальное и на последнем гауссово. Было любопытно отметить, что параметры сходились тем медленнее, чем больше были значения стоимости единичной поставки *A* или коэффициента дисконтирования 𝛂. В случае больших *A* это объясняется тем, что с увеличением стоимости поставки единичного заказа система начинает делать выбор в пользу больших по размерам и более редким заказам. В случае с большим коэффициентом дисконтирования мы «заглядываем» всё дальше в будущее, что увеличивает значение параметра *Rn* и разность *Rn* - *rn*,равную максимально допустимому размеру заказа.

*В разделе 2.7* производится анализ целесообразности использования оптимальных стационарных стратегий управления запасами по сравнению с «дальнозоркими» стратегиями. Также рассматривается случай изменения эконометрических параметров базовой модели. При помощи результатов, полученных Первозванским А. А.[[5]](#footnote-5) оцениваются различные стратегии управления доступные лицу, принимающему решение (ЛПР).

**В третьей главе** рассматривается задача управления запасами, связанная с оптимизацией процессов, которые возникают в цепи поставок при наличии нескольких альтернативных поставщиков, обладающих разной степенью надежности и разными эконометрическими характеристиками. Представляется, что именно такая модель с возможными ее модификациями может быть заложена с основу процедур проведения тендеров при выборе наилучших поставщиков, а также быть использована как теоретическое обоснование правил проведения тендеров и при оперативном управлении процессом поставок.

*В разделе 3.1* дан краткий обзор проблем, собранных под общим наименованием «управление цепями поставок».

 *В разделе 3.2* Рассматривается однономенклатурная система управления запасами в дискретном времени на периоде планирования *T* = *Nτ*. Здесь *τ* – период контроля состояния запасов. Моментами принятия решений о размере заказов являются дискретные моменты времени *tk* = *kτ*, *k* = 1, 2, …, *N* – 1. Весь неудовлетворенный сразу потребительский спрос учитывается. В качестве правила оценки эффективности системы выбран критерий минимума суммарных средних затрат на периоде планирования *T*. Интервал длительности *τ* называется шагом процесса управления. В начальный момент каждого такого интервала, шага, измеряется значение фиктивного уровня запасов *x*, и на основании результатов измерения следует принять решение о необходимости подачи (или не подаче) заказа на пополнение запасов и размере заказа *u*.

В суммарные затраты входят затраты на пополнение запасов, затраты на хранение и потери вследствие дефицита. В силу дискретности измерения времени считается, что на очередном шаге периода планирования в конце его, завершаемом с уровнем фиктивного запаса *y*, выплачиваются затраты на хранение в размере *hy*, если *y* > 0, или несутся потери вследствие дефицита в размере – *dy*, если *y* < 0.

Спрос на *k*-м шаге (в интервале между (*k* – 1)-м и *k* –м моментами контроля описывается случайной величиной *zk*. Предполагается, что случайные величины не зависимы в совокупности и имеют одно и то же вероятностное распределение с функцией распределения *F*(*z*) с плотностью вероятности *f*(*z*).

Затраты на пополнение запасов в размере *u* связаны с подачей заказа одному из *M* поставщиков. Эти затраты при подаче заказа *j*-му поставщику описываются функцией *Aj***1**(*u*) + *cju*, где *Aj* – фиксированная часть затрат на поставку у *j*-го поставщика, **1**(*u*) – функция Хэвисайда, а *cj* – закупочная цена ед. продукции у *j*-го поставщика. Предполагается, что поставщики ненадежны и для каждого из них существует вероятность *pj* того, что *j*-й поставщик полностью сорвет поставку. Считается, что сорвавший пополнение запасов поставщик не получает платы за поставку. При этом считается, что время запаздывания поставки *θ* у всех поставщиков равно 0, поэтому при срыве поставки одним из поставщиков заказ на поставку тут же передается другому поставщику. Таким образом, каждый из поставщиков характеризуется тройкой (*Aj*, *cj*, *pj*).

В дальнейшем будет рассмотрено 2 варианта предложенной постановки задачи: (а) когда все величины *Aj* равны между собой, т.е. *Aj* = *A*, и (б) когда все *Aj* – разные. Как будет ясно из дальнейшего, в варианте (а) удается получить гораздо более конструктивные результаты. Однако более глубокой причиной выделения варианта (а) является то, что он гораздо чаще встречается на практике. Дело в том, что, как правило, фиксированная часть затрат на пополнение запасов связана с необходимостью использования транспортных средств для перевозки на склад потребляемой продукции, которые заказываются ее получателем. При этом цена на транспортное средство оказывается для всех поставщиков одной и той же.

*В разделе 3.3* показано, что для задачи управления запасами с ненадёжными поставщиками справедливы все выводы классической теории управления запасами и, в частности, факт оптимальности двухуровневых (*R*, *r*)-стратегий управления запасами.

*В разделе 3.4* рассматривается вопрос формирования правил рационального выбора поставщиков. Рассматривается 2 случая.

В случае (а), когда каждый из поставщиков характеризуется парой (*cj*, *pj*), очевидно, что, если найдутся два поставщика с номерами *i* и *j*, для которых одновременно выполнены следующие два неравенства: *cj* ≥ *ci* и *pj* ≥ *pi*, то поставщик под номером *j* заведомо проигрывает поставщику *i* (он и дороже, и менее надежен). Таким образом, если в качестве критерия выбран минимум суммарных средних затрат, то в множестве *M* поставщиков следует выделить подмножество Парето-оптимальных поставщиков, удалив из списка поставщиков всех поставщиков, у которых пара (*cj*, *pj*) обладает тем свойством, что найдется другой поставщик под номером *i*, для которого пара (*ci*, *pi*) обладает тем свойством, что *cj* ≥ *ci* и *pj* ≥ *pi*, причем хотя бы одно из этих неравенств строгое. Итак, в дальнейшем будем считать, что множество поставщиков *L* является подмножеством Парето. Иначе говоря, для всех *i*, *j*  {1, 2, …, *L*} справедливы пары неравенств *cj* ≥ *ci* и *pi* ≥ *pj* либо *cj* ≤ *ci* и *pi* ≤ *pj*. Причем будем считать, что номера поставщиков упорядочены по возрастанию цены ед. товара, т. е. . Будем также считать, что *pL* = 0, т.е. среди поставщиков имеется, по крайней мере, один абсолютно надежный (разумеется, с самой высокой ценой товара).

**Теорема 1**. На каждом шаге оптимальная последовательность обращений к поставщикам совпадает с их нумерацией (т.е. сначала заказчик обращается к поставщику 1, затем при его неудаче – к поставщику 2, … вплоть до обращения к последнему поставщику под номером *L* из подмножества Парето.

В случае (б) считается, что последовательность выбора поставщиков обусловлена тем, что размер платежа поставщику должен быть как можно меньше. Однако та логика, которой можно было руководствоваться в случае (а), перестает работать. Правда, можно исключить поставщиков с характеристической тройкой параметров (*Ai*, *ci*, *pi*), для которых найдется такой поставщик под номером *j*, у которого *Aj*≤*Ai*, *cj*≤*ci* и *pj ≤ pi*. Считая, что подобное «прореживание» выполнено, воспользуемся результатом предыдущего раздела, который в данном случае будет использоваться как следующее *эвристическое правило*: последовательность обращения к поставщикам обуславливается их упорядочением по возрастанию затрат на поставку размера *u*, т.е. в данном случае последовательность обращений зависит от размера заказа *u*.

Итак, каждое упорядочение поставщиков (*i*1(*u*), *i*2(*u*), …, *iL*(*u*)) строится по возрастанию величины *Aj***1**(*u*) + *cju*. При этом одношаговые затраты определяются формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где

|  |  |
| --- | --- |
| *A*(*u*) = (1 – *pi*1(*u*))*Ai*1(*u*) + *pi*1(*u*) (1 – *pi*2(*u*))*Ai*2 + +\_*pi*1(*u*)*pi*2(*u*)(1 – *pi*3(*u*))*Ai*3+ … + *pi*1(*u*)*p*i2(*u*) … p*iL*-1(*u*)*AL*, | (2) |

а

|  |  |
| --- | --- |
| *с*(*u*) = (1 – *pi*1(*u*))*ci*1(*u*) + *pi*1(*u*) (1 – *pi*2(*u*))*ci*2 +*+ pi*1(*u*)*pi*2(*u*) (1 – *pi*3(*u*))*ci*3+…+ *pi*1(*u*)*pi*2(*u*) … p*iL*-1(*u*))с*L*. | (3) |

Функции *ϕ*(*x*,*u*) из формул (1) – (3) подставляются в классический алгоритм для расчета оптимальных стратегий управления запасами, который и позволяет рассчитать оптимальные размеры заказов.

*В разделе 3.5* приводятся результаты компьютерного моделирования, которое проводилось для трёх функций распределения спроса: гауссова, экспоненциального и равномерного. Моделирование подтвердило, что при изменении порядка выбора поставщиков (относительно оптимального) будет возрастать средняя цена поставки, что в свою очередь будет вызывать понижение значений оптимальных параметров двухуровневой стратегии управления запасов *R* и *r* (а также снижение значения *R* ***–*** *r*), что на практике приводит к уменьшению размера заказов на каждом шаге.

**Четвёртая глава** посвящена исследованию аналогий между задачами теории управления запасами и теории управляемых систем массового обслуживания. На основе выявленных аналогий предложены новые постановки задач теории управления запасами и производством и новые пороговые алгоритмы решения задач управления системами массового обслуживания.

*В разделе 4.1* рассматривается принципиально новая модель управления запасами, в которой спрос может быть и отрицательным. Эта модель называется моделью управления запасами с возвратами. При этом считается, что областью определения функции распределения спроса на одном шаге *F*(*z*) является вся вещественная ось: – ∞ < *z* < + ∞. Пусть также математическое ожидание этого распределения положительно. Возможность отрицательных значений спроса будем интерпретировать, как возвращение потребителем приобретенной на складе продукции. Будем также считать, что при возврате товара потребителю возвращается вся сумма, которую он заплатил при ее покупке. Склад тоже получает возможность вернуть товар своему поставщику, заплатив за это фиксированную сумму *A*2, но цена *c*2, по которой деньги возвращаются, меньше цены его приобретения: *c*2< *c*1. В нашей стране такие модели весьма редко встречаются в практике управления складскими системами (хотя за рубежом они есть). Впрочем, можно отметить, что подобные ситуации нередко встречаются в лизинговых схемах.

Теперь вместо классических уравнений теории управления запасами выписывается следующее уравнение динамического программирования:

|  |  |
| --- | --- |
|   | (4) |

или

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где функция представлена в классической теории, а – формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

В рамках экономики подсчета затрат функция описывает минимальные затраты при принятии решения о подаче заказа (без учета фиксированной части ), включая случай неподачи заказа (*u* = 0), а функция минимальные затраты при принятии решения о возвращении товара поставщику (без учета фиксированной части ). Заметим также, что в силу вида функций и точка *Sn* абсолютного минимума функции находится правее точки *Rn* абсолютного минимума функции .

На рис. 2 показан гипотетический вид и взаимное расположение функций и .



*Рис. 2. Вид и взаиморасположение функций* и

Для функций и , представленных на рис. 2, оптимальный закон управления запасами задается формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Итак, если функции и для всех *n* обладают свойствами, которые качественно охарактеризованы рис. 2, то оптимальная стратегия управления запасами оказывается четырехуровневой (*Rn*, *rn*, *Sn*, *sn*)–стратегией (*rn* < *Rn* < *Sn* < *sn*), которая устроена так, что, если фиктивный уровень запасов *x* в момент принятия решений за *n* шагов до конца периода планирования меньше или равен *rn*, то подается заказа, пополняющий уровень запаса на складе до величины *Rn*. Если же *x* больше или равен *sn*, то часть запаса со склада возвращается поставщику так, чтобы довести уровень запасов на складе до величины *Sn*.

*В разделе 4.2* приводится доказательство оптимальности четырехуровневой (*Rn*, *rn*, *Sn*, *sn*)–стратегии управления запасами. Оно идейно повторяет доказательство аналогичного факта для двухуровневых стратегий в классической теории управления запасами[[6]](#footnote-6) с поправкой на альтернативность (заказы и возвраты) целевого функционала.

*В разделе 4.3* рассматривается СМО, в которой число рабочих каналов обслуживания является управляемой величиной и может быть изменено в периодически разнесенные (с шагом 1) на оси времени моменты контроля за состоянием СМО. Считается, что в СМО поступает простейший входящий поток, интенсивность которого *λ* в моменты контроля претерпевает скачкообразные изменения, принимая счетное или конечное число значений *λj*из дискретного множества *Λ*. Задана матрица вероятностей перехода соответствующей однородной марковской цепи , где –вероятность перехода (в момент контроля) от интенсивности *λi* на предыдущем шаге к интенсивности *λj*.

Введем эконометрические характеристики рассматриваемой СМО: *c*1 – стоимость эксплуатации одного рабочего устройства обслуживания; *c*2 – стоимость отключения одного рабочего устройства обслуживания (*c*1 > *c*2); *A*1 – фиксированная цена принятия решения о подключении новых рабочих устройств; *A*2 – фиксированная цена принятия решения об отключении части рабочих устройств; *d* – стоимость единицы времени пребывания одного требования в очереди на обслуживание; *h* – доход, связанный с окончанием обслуживания одного требования; *m*1 – текущее число рабочих каналов (до принятия управляющего решения); *m* – выбираемое число рабочих каналов.

*В разделе 4.4* исследуются алгоритмы построения оптимальных стратегий переключения каналов. Зададим функционал качества управления, который при заданной интенсивности входящего потока *λj*, текущем числе рабочих устройств *m*1 и принятии решения о фактическом числе рабочих устройств *m* описывается величиной среднего суммарного одношагового дохода :

|  |  |
| --- | --- |
| , | (8) |

где – это выручка на 1 шаге, а – это средние затраты на 1 шаге, а

|  |  |
| --- | --- |
| . | (9) |

Из формулы (8) очевидно, что в качестве критериальной функции можно выбрать функцию , которую в отличие от функции нужно минимизировать, а не максимизировать. Итак, для того чтобы построить оптимальную «близорукую» стратегию переключений необходимо найти

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Формула (10) – прямой аналог формулы (5).

*В разделе 4.5* рассматриваются аналогии между задачами теории управления запасами и задачами теории управляемых систем массового обслуживания и отмечается пороговый характер оптимальных стратегий переключения каналов.

*В разделе 4.6* приводятся данные компьютерного моделирования управляемой системы массового обслуживания.

**В пятой главе** детально описываются ключевые моменты компьютерного моделирования (основанного на решении уравнений динамического программирования) задач теории управления запасами.

*В разделе 5.1* описан путь развития компьютерной модели, созданной в среде *MATLAB*, для поиска оптимальных параметров задачи управления запасами. Расписаны возможные проблемы и неочевидные подводные камни, с которыми может столкнуться исследователь задач данного класса.

*В разделе 5.2* описана методика перехода от последовательных вычислений при расчёте модели к параллельным для серий зависимостей *R*, *r* от различных эконометрических параметров. В рассматриваемом случае это позволило добиться 3,55-кратного ускорения вычислений. На процессорах с большим количеством физических и логических ядер прирост производительности будет ещё больше.

*В разделе 5.3* рассматривается эвристическое правило, по которому, в случае если заданное количество последних рассчитанных значений *Rn* равнялись друг другу – цикл по *n* прерывался. Данное правило помогло радикально сократить время расчётов примерно в 1,5 - 2 раза только за счёт отсечения лишних операций.

*В разделе 5.4* рассмотрен выработанный подход, суть которого состоит в том, чтобы решить подходящие подзадачи (общей задачи динамического программирования) на каждом шаге только один раз, кардинально сократив тем самым общее количество вычислений. То есть для избранных подзадач сохраняются («кэшируются») результаты их решения, полученные в процессе работы алгоритма динамического программирования, и используются в дальнейших итерациях задачи. Данный подход позволяет очень сильно ускорить вычисления и на практике рассчитывать сложные задачи в течении нескольких минут. Принцип «кэширования» данных показал колоссальный прирост производительности вычислений.

*В разделе 5.5* изложены соображения по поводу дальнейшей возможной оптимизации скорости вычислений. По сути, для того чтобы вывести продукт (в данном случае программу) на рынок необходимо переписать её на более низкоуровневом (по доступу к аппаратной части) языке программирования. Разобраны основные претенденты на эту роль – это *Java*, *Python*, *C*, *C#* и *C++*. Каждый подходит для выполнения конкретного проекта.

*В разделе 5.6* даны рекомендации по работе с компьютерными моделями, которые использовались в данном исследовании и исходный код которых приложен к диссертации.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

В диссертационной работе получены следующие результаты:

* Выполнено сравнение эффективности использования «дальнозорких», стационарных и «близоруких» стратегий управления запасами. Анализ показал, что выигрыш по уровню средних суммарных затрат при использовании стационарных стратегий вместо «близоруких» (широко применяемых на практике) может составлять порядка 25% при типичных для практических проблем управления запасами соотношениях параметров затрат.
* Для условий параметрической неопределенности даны рекомендации по выбору стратегии управления запасами при случайном спросе и изменениях эконометрических параметров базовой модели.
* Дано объяснение «лестничного» характера поведения зависимости верхнего уровня стационарной стратегии *R* от параметров системы и состояния рынка. Это объяснение опирается на выявленную аналогию между детерминированной моделью управления запасами и моделями управления запасами при случайном спросе. Моделирование системы управления запасами позволило оценить роль случайных возмущений в эволюции системы и обнаружить, что в характере изменения параметров оптимальных стратегий возможно наличие флуктуаций, обусловленных наличием острых пиков у реальных вероятностных распределений спроса.
* Разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать значения двух параметров стационарной стратегии оптимального управления запасами для трёх функций распределения спроса: (а) Гауссова распределения, (б) экспоненциального распределения и (в) равномерного распределения. Данный комплекс позволяет строить параметрические «атласы» для СППР в системах управления запасами и производством.
* В условиях сбоев в действиях поставщиков поставлена и решена задача управления запасами при случайном спросе при наличии альтернативных поставщиков, обладающих различной степенью надёжности и разными эконометрическими характеристиками.
* Предложена принципиально новая модель управления запасами при случайном спросе – модель с возвратами, описывающая системы управления запасами, в которых в условиях неопределенности спроса допускается отказ потребителей от уже приобретенной ими продукции. Для этой модели доказана оптимальность четырехуровневой стратегии управления запасами, существенно обобщающей базовую двухуровневую стратегию.
* Рассмотрена модель управляемой системы массового обслуживания с переключением каналов с широкими практическими применениями. Показано, что эта модель эквивалентна модели управления запасами с возвратами, поэтому результаты, полученные для модели с возвратами, переносятся и на рассмотренную модель теории массового обслуживания.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Гранин С.С. и Мандель А.С. Стационарные стратегии управления запасами в системах снабжения в условиях инфляции // Проблемы управления. 2015. № 4. - стр. 19-24.
2. Granin S. and Mandel А. Stationary Inventory Control Policies in Supply Systems under Inflation Condition // Automation and Remote Control. 2016. v. 77, No. 8. - pp. 1453-1460.
3. Гранин С.С., Мандель А.С. и Барладян И.И. Моделирование стационарных параметрических стратегий управления запасами в условиях инфляции // Материалы 8-ой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2015, Москва). - Москва: ИПУ РАН, 2015. Том 2. - стр. 117-119.
4. Вильмс М.А, Гранин С.С. и Мандель А.С. Моделирование процесса управления запасами в цепи поставок при наличии нескольких поставщиков // Управление развитием крупномасштабных систем. Труды десятой международной конференции. Том. 1. - Mосква: ИПУ РАН, 2017. - стр. 186-190.
5. Mandel А., Granin S. and Vilms М. Simulation of inventory control process for supply chain with several suppliers // Proceedings of the 10th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2017). - Мoscow: IEEE, 2017. https://ieeexplore.ieee.org/document/8109628/.
6. Mandel А. and Granin S. Optimization of Inventory Management Process // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Logistics, Informatics and Service Science (LISS2018). - Beijing: IEEE CFP18LIS-CDR, 2018. - pp. 178-182.
7. Гранин С.С., Мандель А.С. Оптимизация процесса управления запасами в цепи поставок при наличии альтернативных поставщиков. // Проблемы управления, 2018. № 6. - стр. 24-28.
8. Мандель А.С. и Гранин С.С. Исследование аналогий между задачами теории управления запасами и задачами теории управляемых систем массового обслуживания // Материалы 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018). - Москва: ИПУ РАН, 2018. Т. 1. - стр. 279-281.
9. Granin S. and Mandel А. Investigation of Analogies: Problems of Inventory Control and Queuing Systems Theories // Eleventh International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD’2018). -M.: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551852/.
10. Гранин С.С. и Мандель А.С. Новые свойства стратегий управления запасами и их интерпретация // Материалы 12-ой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD’2019). - Москва: ИПУ РАН, 2019. - стр. 368.
11. Granin S. New Properties of Stock Management Strategies and Their Interpretation // Proceedings of the Twelfth International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD). - Moscow: IEEE, 2019. https://ieeexplore.ieee.org/document/8911088/. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911088
12. Гранин С.С. Методика ускорения вычислений при моделировании процесса управления запасами // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 18–24 ноября 2019 года. Радиотехника и компьютерные технологии. - Москва: МФТИ, 2019. - стр. 41.

Личный вклад автора в работах с соавторами заключается в следующем: в [1– 10] – разработка новых модификаций математических моделей управления запасами и производством, разработка и реализация новых численных алгоритмов и методов компьютерного моделирования, проведение вычислительных экспериментов и анализ их результатов.

*Научное издание*

**Гранин Сергей Сергеевич**

**СТАЦИОНАРНЫЕ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СПРОСЕ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.2021. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 666.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

**Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова**

Российской академии наук

117997,

ул. Профсоюзная, д. 65

Россия, Москва

http://www.ipu.ru

1. Шапиро Д. Моделирование цепи поставок. - СПб.: Питер, 2006. [↑](#footnote-ref-1)
2. Ivanov D., Sokolov B. Adaptive Supply Chain Management. - London: Springer, 2010. [↑](#footnote-ref-2)
3. А в России еще и перестройкой. И это при том, что пионером этих исследований в мире был В.А. Лотоцкий, который подытожил полученные им результаты в итоговой совместной монографии - Лотоцкий В. А. и Мандель А. С. Модели и методы управления запасами. - Москва: Наука, 1991. [↑](#footnote-ref-3)
4. Scarf H., Arrow K. J., Karlin S. and Suppes P. The optimality of (S, s) policies in the dynamic inventory problem // Proc. of the first Stanford symposium, Stanford mathematical studies in the social sciences. - Stanford: 1959. [↑](#footnote-ref-4)
5. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством. - Москва: Наука, 1975. - стр. 616. [↑](#footnote-ref-5)
6. Hadley G. and Whitin Т. M. Analysis of Inventory Systems. - Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1969. [↑](#footnote-ref-6)