

На правах рукописи



Грибанова Екатерина Борисовна

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ ОБРАТНЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Специальность 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный консультант — доктор технических наук профессор
Мицель Артур Александрович

Официальные оппоненты: **Воскобойников Юрий Евгеньевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной математики Ново-
сибирского государственного архитектурно-
строительного университета

Новичихин Алексей Викторович, доктор техни-
ческих наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой
логистики и коммерческой работы Петербургского
государственного университета путей сообщения
Императора Александра I

Пимонов Александр Григорьевич, доктор техни-
ческих наук, профессор, заведующий кафедрой
прикладных информационных технологий Кузбас-
ского государственного технического университета
им. Т.Ф. Горбачева, г Кемерово

Ведущая организация — Сибирский государственный индустриальный уни-
верситет», г. Новокузнецк

Защита состоится 21 сентября 2023 г. в 15 час. 15 мин. на заседании дис-
сертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе ТУСУРа, по адресу:
634050, г.Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по ад-
ресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на сайте ТУСУРа по адресу:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/czduzgz2>

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

От решений специалистов в области управления зависит эффективность функционирования экономической системы. При этом возникает необходимость анализа большого количества информации, что затруднительно осуществить без соответствующего математического аппарата и программных средств. В связи с этим разработка инструментов для повышения качества управленческих решений и скорости их формирования путем автоматизации обработки данных является актуальной задачей.

Задачи, возникающие перед специалистами, по направлению причинно-следственной связи можно разделить на прямые и обратные. Обратные задачи являются более сложными по сравнению с прямыми и заключаются в определении значений изменяемых входных переменных для достижения заданного значения показателя деятельности объекта. Таким образом, значимость такого рода задач очень высокая, а их решение позволяет ответить на вопрос "как сделать так чтобы?" и осуществить выбор относительно значений входных управляемых переменных, что играет важную роль в формировании решений в области экономики. Кроме того, можно отметить широкое распространение обратных задач в различных областях: экономика, физика, астрономия, обработка изображений и т.д.

Актуальность данного направления исследований подтверждается также государственной политикой, в частности, программа «Цифровая экономика Российская Федерация» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. N 1632-р.) ставит такие задачи как ускорение технологического развития российских компаний, обеспечение ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере. Сокращению сроков разработки систем принятия решений, а также их распространению (тиражируемости) может способствовать разработка простых в компьютерной реализации алгоритмов решения задач, создание моделей на основе выявленных типовых задач и шаблонов разработки программного обеспечения. Таким образом, могут быть созданы научные основы для разработки систем принятия управленческих решений, позволяющих передать часть интеллектуального труда специалистов ЭВМ. Это повысит эффективность и качество работы организаций, обеспечив их конкурентоспособность и прибыльность.

Степень проработанности проблемы.

Интерес к решению обратных задач возник достаточно давно, так отдельные результаты приводятся в трудах античных философов, например, решение Аристотелем задачи восстановления формы Земли по её тени на Луне. При этом актуальность решения обратных задач в различных областях исследования сохраняется и по сей день. Это обусловлено в том числе сложностью решения такого рода задач из-за их некорректности. Определение корректности задачи

было сформулировано Ж. Адамаром, в частности был обозначен такой признак как наличие единственного решения задачи на некотором множестве, которое должно непрерывно зависеть от входных данных.

Значительный вклад в исследование обратных задач принадлежит А. Н. Тихонову, который показал, что определение дополнительных условий на решение позволяет получить устойчивую задачу. Он предложил способ регуляризации некорректной задачи, т.е. сведение исходной задачи решения некоторого операторного уравнения к проблеме поиска минимума некоторого функционала. Также результаты исследования обратных задач отражены в трудах ученых М. М. Лаврентьева и Л. Я. Савельева, В.К. Иванова, В. В. Васина, В. П. Тананы, Р. Латтеса и Ж. Л. Лионса, М.М. Лаврентьева, В. Г. Романова, С. П. Шишатского, В. А. Морозова, О. А. Лисковца, В. В. Васина, А. Л. Агеева, А. М. Федотова, Г. М. Вайникко, В. К. Иванова, И. В. Мельниковой и А. И. Филинкова, В. П. Тананы и А. И. Сидиковой, Ю. Е. Воскобойникова, Кабанихина С. И., A. Tarantola, R. L. Parker, C. W. Groetsch. Отдельным направлением в решении некорректных задач является разработка простых в компьютерной реализации итерационных алгоритмов. Результаты исследований в этом направлении приводятся в работах А. А. Самарского и П. Н. Вабищевича, А. М. Денисова, С. Р. Вогеля, Ю. Е. Воскобойникова, И. В. Емелина, С. Ф. Гилязова и Н. Л. Гольдмана, С. И. Кабанихина, О. В. Матысик, В. Н. Страхова, М. А. Красносельского, Г. М. Вайникко, П. П. Забрейко, Я. Б. Рутицкого, и В. Я. Стеценко и др.

Одной из областей, где обратные задачи широко востребованы, является экономика. Отдельные результаты решения такого рода задач в различных постановках при исследовании экономических объектов приводятся в работах Семенчина Е. А. и Невечеря А. П., Урусовой А. С., Ekeland I. и Djitte N. и других.

В 1996 году Одинцовым Б.Е. был разработан аппарат обратных вычислений, в следующей постановке [40]: определение изменений аргументов функции на основе начальных значений аргументов, заданного значения функции и экспертной информации, в качестве которой выступает направление изменения показателей и коэффициенты относительной важности. В учебном пособии [40] рассмотрено использование данного аппарата для формирования экономических решений, а также для инженерных расчётов: определение параметров геометрических фигур; расчёт характеристик инженерных конструкций, например, вычисление площади оснований каменного быка при изменении высоты моста, в том числе с использованием дифференциальных уравнений первого порядка, логарифмических, показательных, степенных функций. В литературе наибольшее распространение получило использование аппарата для формирования экономических решений

Одинцовым Б.Е. исследуются обратные задачи, которые в отличие от содержания задач, рассмотренных Тихоновым А.Н. [6,7] и другими авторами [8 - 13], характеризуются целью управления и наличием прямой функции, отражающей зависимость следствия от причины. Такие задачи являются трудоемкими и капризными [40], что выражается в непредсказуемости поведения функции и

сложностью определения диапазонов входных данных, при которых задача имеет смысл и решение. Решение данного класса задач может быть точечными, т.е. базироваться на некоторой точке области решения. В качестве метода решения Одинцовым Б.Е. был предложен аппарат обратных вычислений, применение которого требует указания лицом, принимающим решения, прямой зависимости и целевой установки. Таким образом, под решением обратных задач с помощью обратных вычислений понимается получение точечных значений приростов аргументов прямой функции (аргументы определяются только для одной заданной точки функции) на основании её задаваемого значения и дополнительной экспертной информации, в качестве которой выступает направление изменения показателей и коэффициенты относительной важности. При этом прямые вычисления здесь позволяют получить начальное приближение решения задачи.

Существуют работы, направленные на модификацию данного аппарата и его применение для ряда частных случаев. Так, для решения задач с ограничениями был разработан итерационный алгоритм, многократно выполняющий решение обратной задачи с изменением результирующего показателя на некоторую малую величину до тех пор, пока ограничения не будут нарушены. В статье Цветкова М.А. рассмотрен случай, когда один и тот же показатель используется в двух разных обратных задачах. Приводится поиск компромиссного варианта такого аргумента с помощью указания коэффициентов распределения приростов. Збарским А.М. исследуется использование аппарата обратных вычислений для приведения предприятия в равновесное состояние, характеризующееся равенством целевых индикаторов, формирующихся из внешних и внутренних факторов предприятия. Статья Одинцова Б.Е. посвящена нахождению решения обратной задачи с учетом «золотых пропорций» показателей предприятия. Для этого осуществляется последовательная корректировка решений с заданными целевыми установками и с учетом «золотых пропорций» в зависимости от приоритетности способов достижения цели.

Ряд исследований посвящен применению обратных вычислений для решения экономических задач. Так в статье Виштак О. В. и Штыровой И. А. рассмотрено формирование интегрального показателя качества дополнительного образования в ВУЗе, определяемого набором групп показателей более низкого уровня иерархической структуры. В работе Барминой Е. А. и Квятковской И. Ю. формирование интегрального показателя качества работы коммерческой организации также осуществляется с помощью иерархичной структуры, а также представлены методики определения интегрированных показателей качества и множества измеряемых показателей качества на основе когнитивного моделирования. Механизм обратных вычислений в данной работе использован для решения задачи формирования рекомендаций по способам повышения качества работы организации. Блюмин С. Л. и Боровкова Г. С. рассматривают применение обратных вычислений для поиска значений показателей результативности деятельности сотрудников кафедры высшего учебного заведения для достижения желаемого значения рейтинга кафедры. Последующий анализ конечных

изменений позволил определить сотрудников, способных внести наибольших вклад в формирование рейтинга кафедры. Методика совместного использования системы сбалансированных показателей предприятия и метода обратных вычислений рассмотрена авторами Силкина Г. Ю. и Переверзева А. А.

Таким образом, опубликованные результаты исследований свидетельствуют о востребованности аппарата обратных вычислений для решения задач экономики. Однако существует ряд ограничений его применения, в том числе связанных с необходимостью определения согласованной экспертной информации и кругом решаемых задач. Кроме того, в литературе отсутствует описание разработки программных средств для решения обратных задач.

Диссертация посвящена развитию существующего аппарата и разработке комплекса моделей, методов и алгоритмов, являющихся более простыми в компьютерной реализации по сравнению с известными, и предназначенными для решения более широкого круга задач экономики, в том числе не требующих использования экспертной информации либо требующих меньшего её объема. Также в диссертационной работе рассмотрена разработка программных систем решения обратных задач.

Объектом исследования является процесс решения задач на основе обратных вычислений.

Предметом исследования являются модели, методы, алгоритмы и программное обеспечение решения задач на основе обратных вычислений.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности процесса решения обратных задач за счёт применения математического и программно-алгоритмического инструментария на основе обратных вычислений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ исследований в области решения задач на основе обратных вычислений.
2. Разработать комплекс моделей, методов и алгоритмов решения задач на основе обратных вычислений.
3. Провести вычислительные эксперименты по решению задач с использованием предложенных моделей, методов и алгоритмов, а также сравнение результатов с полученными с помощью известных методов и стандартных математических пакетов.
4. Разработать структуру программы решения обратных задач на основе предложенных методов и алгоритмов.
5. Разработать алгоритм поэтапного формирования аргументов исследуемой функции, образующих дерево цели, с учетом ограничений.

Методы исследования: системный анализ, метод обратных вычислений, методы оптимизации, экономический анализ, экспертные методы, статистические методы, имитационное моделирование, объектно-ориентированный анализ.

Результаты работы, характеризующиеся **научной новизной**:

1. Предложен метод решения задач с помощью обратных вычислений, отличающийся от известного формированием уравнения зависимости между аргументами функции.

2. Предложен стохастический метод решения задач на основе обратных вычислений с ограничениями, отличающийся от известных использованием процедуры выбора аргументов для достижения цели с помощью моделирования полной группы несовместных событий.

3. Разработаны оптимизационные модели для решения задач на основе обратных вычислений при максимизации соответствия экспертным целеполаганиям и при минимизации отклонений аргументов от исходных значений.

4. Разработаны методы и алгоритмы решения задач на основе обратных вычислений, представленных в виде оптимизационных моделей, а также задач нелинейного программирования, отличающиеся от известных использованием двухшаговой процедурой, включающей оптимизацию целевой функции и переход к значениям аргументов, удовлетворяющим ограничению задачи.

5. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для решения задач на основе обратных вычислений, отличающийся от существующих возможностью решения иерархических задач с ограничениями.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов, в частности аппарат обратных вычислений, эконометрическое моделирование, имитационное моделирование, методы оптимизации. Изложены аргументы в пользу создания комплекса моделей, методов, алгоритмов и концепций разработки программного обеспечения для решения задач на основе обратных вычислений. Раскрыты недостатки и ограничения существующих методов решения обратных и оптимизационных задач. Изучены характеристики разработанных алгоритмов, показано соответствие результатов их работы и результатов, полученных с помощью известных алгоритмов, а также математических пакетов. Проведена модернизация аппарата обратных вычислений, методов нелинейной оптимизации, что позволило получить комплекс моделей, методов и алгоритмов для решения обратных задач, уменьшить объем используемой экспертной информации, снизить временные затраты на решение задач.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении комплекса моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения решения задач на основе обратных вычислений. Определены пределы и перспективы практического использования результатов исследования, которые могут быть применены предприятиями и организациями различных сфер деятельности при создании систем поддержки принятия решений для эффективного стратегического и оперативного управления, а также разработанные алгоритмы могут быть применены в других областях исследования, в частности, при создании программных систем, включающих решение оптимизационных задач. Используемый подход позволит обеспечить экономию ресурсов при создании

программного обеспечения и быстродействие реализованных программных систем.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы.

Разработанные модели, алгоритмы, а также программы ЭВМ внедрены в организациях: ООО «Томская нефть», АО «Разрез «Степановский», ООО «Гамарджоба», г. Томск, ООО «ФОРС», г. Реутов, ООО «Сибмед», г. Томск, ООО «Вокифудтомск», г. Томск, ООО «Титан», г.Томск, ООО «Интенс-строй», г. Томск, ООО «Дельта», г.Юрга, МАОУ ДО Дворец творчества детей и молодежи, г. Томск.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники в виде учебных пособий, методических указаний для выполнения практических, лабораторных работ по дисциплинам «Эконометрика», «Математическое и имитационное моделирование экономических процессов», «Технико-экономический анализ деятельности предприятия», «Исследование операций и методы оптимизации». Теоретические положения использовались для постановки задач научно-исследовательской работы студентов, 25 выпускных квалификационных работ, в том числе 11 магистерских диссертаций.

Результаты диссертации использованы в ФГБОУ ВО «ТУСУР» при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2020-0036 «Методическое и инструментальное обеспечение принятия решений в задачах управления социально-экономическими системами и процессами в гетерогенной информационной среде».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод на основе формирования уравнения зависимости между аргументами функции позволяет определить решение задачи на основе обратных вычислений без необходимости проверки согласованности экспертной информации: соответствия поставленной цели коэффициентам относительной важности и направлениям их изменения. Это позволяет снизить объем экспертной информации и предотвратить ошибки, связанные с определением входных данных. Соответствует п. 2 паспорта специальности 1.2.2.

2. Стохастический метод позволяет находить решение многоаргументных задач на основе обратных вычислений при отсутствии необходимости указания направлений изменения аргументов, что приводит к уменьшению времени определения входных данных задачи. Соответствует п. 2, 9 паспорта специальности 1.2.2.

3. Оптимизационные модели решения задач на основе обратных вычислений позволяют осуществлять формирование значения ключевого показателя при максимизации соответствия экспертным целеполаганиям, при использовании показателей в нескольких функциях расчёта, а также при минимальном отклонении значений входных переменных от исходных величин. Соответствует п. 8 паспорта специальности 1.2.2.

4. Оптимизационные методы и алгоритмы на основе обратных вычислений позволяют эффективно решать задачи условной оптимизации. В качестве

основных критериев эффективности рассматривается качество (точность, достоверность, сходимость) и время решения задачи. Соответствует п. 2 паспорта специальности 1.2.2.

5. Проблемно-ориентированный комплекс программ позволяет осуществлять формирование ключевого показателя путем поэтапного решения иерархических задач с ограничениями на основе обратных вычислений и снизить временные затраты на обработку данных в среднем на 25%. Соответствует п. 3 паспорта специальности 1.2.2.

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: «Научная сессия ТУСУР», 2005, 2006, 2007, 2008, 2022 г. (Томск); «Студент и научно-технический прогресс», 2005 г. (Новосибирск); «Молодежь и современные информационные технологии», 2007, 2014 г. (Томск); «Современное образование: традиции и новации», 2006 г. (Томск); «Электронные средства и системы управления», 2007 (Томск); «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», 2008 г. (Юрга); «Современные техника и технологии», 2008 (Томск); «Современные технологии принятия решений в цифровой экономике», 2018 (Юрга); «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере, медицине», 2018 (Томск); «Инноватика-2019», 2019 (Томск); «Перспективы развития фундаментальных наук», 2019 (Томск); «Математическое и информационное моделирование», 2022 г. (Тюмень); «Информационные системы и технологии в образовании, науке и бизнесе», 2022 г. (Улан-Удэ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 96 работ, в том числе: 27 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК; 3 монографии; 10 статей в журналах, индексируемых Scopus/Web of Science; 6 статей в сборниках конференций, индексируемых Scopus/Web of Science; 10 учебных пособий (из них 2 с грифом СибРумц, 3 с грифом УМО). Получено 9 свидетельств о регистрации программ ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Без соавторов опубликовано 32 работы, в т.ч. 1 научная монография, 1 коллективная монография, 13 статей в журналах из перечня ВАК, 6 статей в журналах, индексируемых Scopus/Web of Science; 3 статьи в сборниках конференций, индексируемых Scopus/Web of Science; 1 учебное пособие с грифом УМО.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены лично автором. Программные продукты созданы автором либо на основе моделей, методов и алгоритмов автора, под его руководством и при непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 331 страницу (включая 139 рисунков и 55 таблиц). Список литературы состоит из 244 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, представлена степень проработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены основные защищаемые положения.

В **первой главе «Методы решения обратных задач»** приводится решение обратной задачи с использованием регуляризации и оптимизационных методов, а также обратных вычислений. Рассмотрены представленные в литературе аналитические формулы решения обратной задачи с помощью обратных вычислений и их модификации в случае многоаргументной функции, наличия ограничений, использования аргумента в нескольких функциях. Представлены экономические модели, которые применены диссертационной работе (аддитивная, мультипликативная, нелинейная аддитивная, мультипликативная нелинейная, мультипликативно-аддитивная). Сделан вывод об ограничениях и недостатках существующего аппарата, в том числе связанных с необходимостью определения согласованной экспертной информации и кругом решаемых задач.

Во **второй главе «Разработка методов и алгоритмов для решения задач на основе обратных вычислений»** приводится описание метода решения обратных задач на основе формирования уравнения зависимости между аргументами функции и стохастического метода решения обратных задач с ограничениями.

Решение обратных задач на основе формирования уравнения зависимости заключается в определении аргументов функции f на основании её указанного значения, начальных значений аргументов, коэффициентов относительной важности и виду зависимости между аргументами (изменение аргументов в одном направлении, изменение аргументов в разных направлениях). Разработанный метод предполагает построение линейного уравнения связи между аргументами x вида $x_1 = a \pm bx_2$ (где a, b – числовые параметры, определяемые на основе значений коэффициентов относительной важности и исходных значений аргументов) с помощью минимаксного метода и подстановку полученного уравнения в исходное соотношение. Таким образом решение задачи сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} y^* = f(x_1^*, x_2^*); \\ x_1^* = a \pm bx_2^*; \end{cases}$$

где x^* – искомые значения аргументов;

y^* – заданное значение результирующего показателя.

В отличие от классического метода обратных вычислений представленный метод позволяет избежать проверок согласованности дополнительной информации, поступающей от специалиста: соответствия поставленной цели коэффициентам относительной важности и направлениям их изменения. Для мультипликативно-аддитивной модели (рисунок 1) решение представлено в таблице 1.

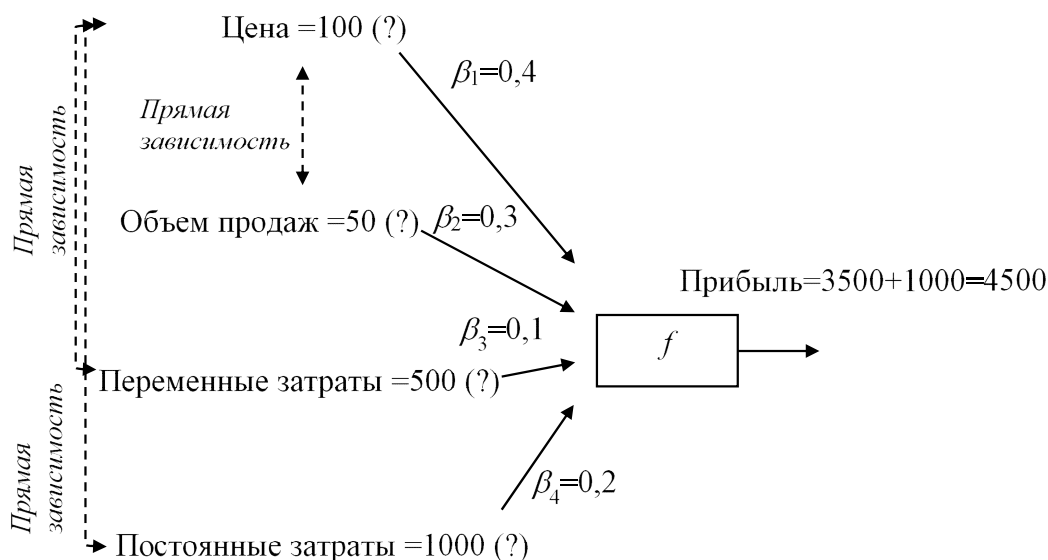


Рисунок 1 – Задача формирования прибыли

Таблица 1 – Решение задачи в случае многоаргументной функции

Название аргумента 1	Название аргумента 2	КОВ1	КОВ2	Значение аргумента 1	Значение аргумента 2
Маржинальная прибыль	Постоянные затраты	0,8	0,2	5833	1333
Выручка	Переменные затраты	0,875	0,125	6555	722
Цена	Объем продаж	0,571	0,429	111,62	58,73

Стохастический метод решения обратных задач с ограничениями позволяет выполнить решение многоаргументных задач при наличии ограничений на величины аргументов. Основные операции алгоритма связаны с изменением результирующего показателя на малую величину и выбором одного из аргументов для изменения. Выбор осуществляется с помощью процедуры моделирования полной группы несовместных событий, в которой коэффициенты важности рассматриваются в качестве вероятности. При этом при выходе значения аргумента за границы (задаются минимальное и максимальное значения), аргумент исключается из кандидатов на изменение и осуществляется выбор другого аргумента. Для того, чтобы определить возможность изменения аргумента, каждый показатель имеет индикатор u , характеризующий допустимость использования данного элемента для формирования результирующего показателя, и принимающий два значения: 1 (использование возможно) и 0 (использованием невозможно). Использование стохастического алгоритма обеспечивает нахождение решения только для случая, когда сумма абсолютных изменений аргументов минимальна, таким образом, отсутствует необходимость определения направлений изменения аргументов.

Проведенные вычислительные эксперименты показали соответствие результатов, полученных с помощью разработанных методов, и решения с применением классического аппарата обратных вычислений. Для оценки полученных с помощью стохастического алгоритма результатов использован t-критерий Стьюдента. Значения t-статистики представлены на рисунке 2 (использовано 50 случайных реализаций).

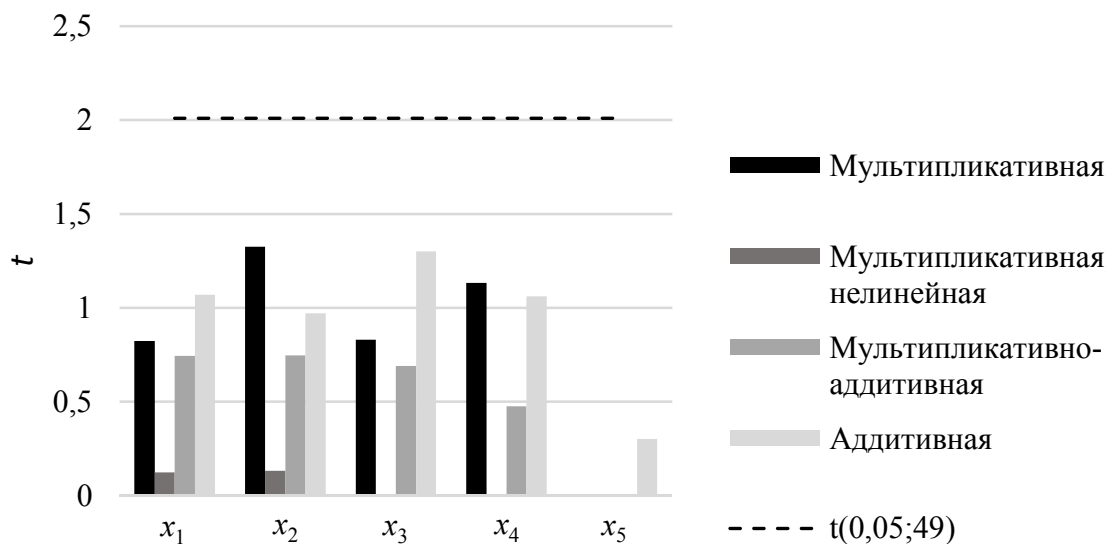


Рисунок 2 – Значения t-статистики

Также выполнено исследование сходимости алгоритма. Так, на рисунке 3 представлен график сходимости значения x_1^* для аддитивной модели в зависимости от величины шага Δy^* изменения результирующего показателя.

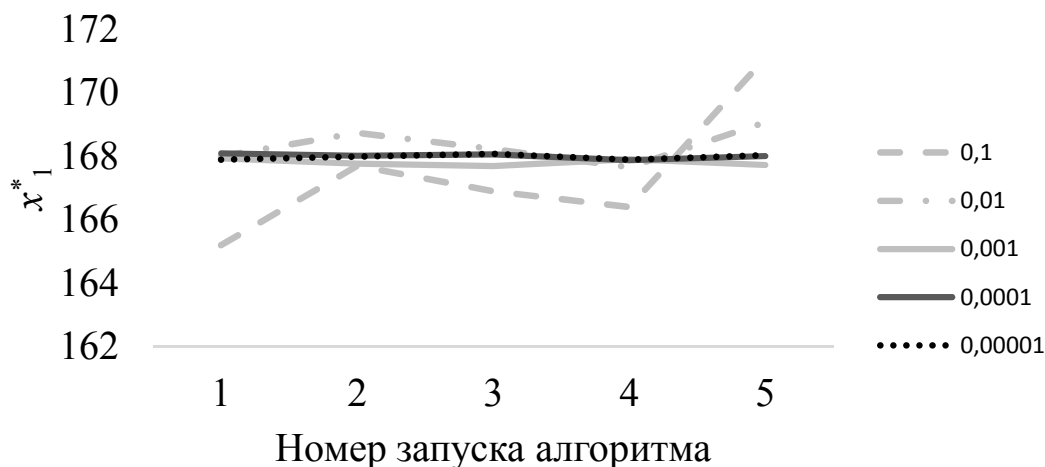


Рисунок 3 – График сходимости значения x_1^* при величине шага Δy^* 0,1, 0,01, 0,001, 0,0001, 0,00001

Третья глава «Модели и алгоритмы решения обратной задачи на основе расстояния от исходных значений аргументов» посвящена решению обратной задачи без привлечения экспертной информации путем поиска максимально близкого к исходному решения, т.е. при минимальном изменении аргу-

ментов. Здесь исходные значения характеризуют текущее состояние объекта, следовательно, меньшее их изменение требует меньше ресурсов для достижения поставленной цели. В качестве меры удаленности полученного решения от исходного рассмотрены классические метрики: сумма квадратов изменений и сумма модулей изменений аргументов и приведены соответствующие оптимизационные модели.

Методы решения обратной задачи при минимизации суммы квадратов изменений аргументов позволяют определять решение оптимизационной задачи следующего вида:

$$g(\Delta x) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 \rightarrow \min,$$

$$f(\Delta x) = y + \Delta y = y^*,$$

где Δy – заданное изменение результирующего показателя;

y^* – заданное значение результирующего показателя;

Δx – искомые изменения аргументов, обеспечивающие заданное значение результирующего показателя;

n – число аргументов.

Для решения оптимизационной задачи были разработаны два алгоритма: алгоритм, основанный на построении кривой уровня, и градиентный.

Алгоритм, основанный на построении кривой уровня, предполагает выражение одного из аргументов и определение частных производных полученной функции. Значения частных производных в полученных на каждой из итераций точках используются для определения соотношения изменений аргументов. Алгоритм включает следующие шаги (исходное значение переменных $\hat{x} = x$, начальный номер итерации $s = 1$):

Шаг 1. Выражение k -го аргумента x_k через остальные аргументы:

$$x_k(x) = \varphi_k(y^*; x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n).$$

Шаг 2. Вычисление частных производных по каждому из аргументов функции φ_k .

Шаг 3. Решение системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_i}{\Delta x_k} = -\frac{\partial \varphi_k(\hat{x})}{\partial x_i}, & i = 1, \dots, n; i \neq k, \\ f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) = y^*. \end{cases}$$

Шаг 4. Проверка окончания работы алгоритма: если $s \geq 2$ и абсолютное изменение нормы приращений аргументов меньше заданной точности ε :

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_{is} - \Delta x_{is-1})^2} \leq \varepsilon,$$

либо квадрат евклидовой метрики (значение целевой функции) увеличился по сравнению с предыдущим шагом:

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_{is}^2 > \sum_{i=1}^n \Delta x_{is-1}^2,$$

то алгоритм завершается. Иначе $\hat{x}_i = x_i + \Delta x_i$, $s = s + 1$, переход на шаг 1.

Однако представленный алгоритм может быть использован для ограниченного круга задач по причине того, что не всегда можно выразить один аргумент через оставшиеся аргументы. В связи с этим для решения более сложных задач был разработан градиентный метод. Основная идея заключается в изменении аргументов функции в соответствии со значениями элементов вектора градиента функции ограничения до достижения заданного значения результирующего показателя.

Решение обратной задачи при использовании вектора-градиента включает следующие шаги:

Шаг 1. Определение направления изменения параметров. Если результирующий показатель необходимо увеличить ($y^* > y$), то используются элементы вектора-градиента ($t = 1$), если уменьшить ($y^* < y$) – антиградиента ($t = -1$).

Шаг 2. Определить необходимые приращения аргументов Δx_i для достижения заданного значения функции y^* путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_\eta}{\Delta x_i} = \frac{t \cdot \frac{\partial f(x)}{\partial x_\eta}}{t \cdot \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}}; i = 1..n, i \neq \eta, \\ f(\Delta x) = y^*, \end{cases}$$

где η – номер аргумента, выбранного в качестве базового.

Шаг 3. Определить новые значения аргументов функции:

$$x_i^* = x_i + \Delta x_i.$$

Таким образом, решение задачи также сводится к решению системы уравнений. Данный метод показал высокую точность при линейной функции зависимости результирующего показателя от аргументов, при нелинейных функциях, происходит изменение направления наибольшего возрастания/убывания функции, вследствие чего, данный метод может иметь большую погрешность.

В связи с этим на основе данных алгоритмов были разработаны итерационные алгоритмы, предполагающие пошаговое изменение аргументов в соответствии с некоторым параметром α до достижения результирующим показателем заданного значения. Изменение осуществляется с помощью итерационных формул до выполнения условия останова: значение целевой функции увеличилось по сравнению с предыдущим шагом либо значение результирующего показателя соответствует заданному с установленной точностью. Для алгоритма на основе формирования кривой уровня итерационные формулы имеют вид:

$$x_k^* = x_k + t \cdot \alpha,$$

$$x_i^* = x_i + t \cdot \alpha \cdot \frac{-\partial \varphi(x_i)}{\partial x_i}, i \neq k, i = 1..n.$$

При использовании градиентного метода итерационная формула имеет вид:

$$x_i^* = x_i + t \cdot \alpha \cdot \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i}.$$

Разработанные алгоритмы не требуют по сравнению с классическим методом штрафов многократной оптимизации модифицированной функции, вследствие чего обеспечивают экономию ресурсов при решении задачи. В главе представлены результаты сравнения методов по числу арифметических операций и времени решения задачи.

На рисунке 4 для оценки временной сложности представлено изменение времени решения в зависимости от размера задачи (мультипликативная нелинейная модель). Можно увидеть, что скорость роста времени решения задачи выше для итерационного алгоритма на основе формирования кривой уровня. Однако данный алгоритм обеспечивает меньшее значение абсолютной погрешности.

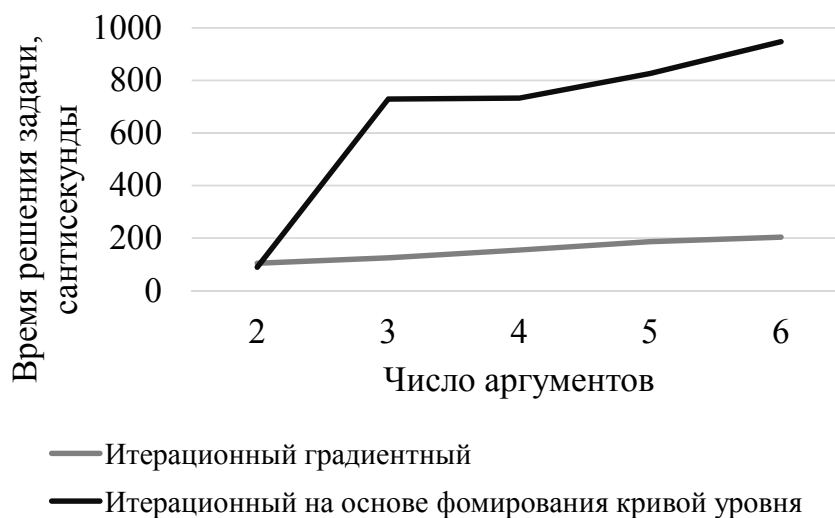


Рисунок 4 – График изменения времени решения задачи в зависимости от числа аргументов

Метод решения задачи на основе минимизации суммы модулей изменений аргументов предназначен для решения обратных задач вида:

$$g(\Delta x) = \sum_{i=1}^n |\Delta x_n| \rightarrow \min,$$

$$f(\Delta x) = y + \Delta y.$$

Алгоритм решения задачи включает следующие шаги:

Шаг 1. Используя исходные данные, вычислить величину функции ограничения $f(x)$ и сравнить с заданным значением $y + \Delta y$:

Если $f(x) < y + \Delta y$, то изменение аргументов необходимо выполнить в направлении увеличения величины функции ограничения (направлении вектора-градиента): $t=1$.

Если $f(x) > y + \Delta y$, то изменение аргументов необходимо выполнить в направлении уменьшения величины функции ограничения (направлении вектора-антиградиента): $t = -1$.

Шаг 2. Определить абсолютную разницу между величиной функции ограничения и заданным значением $y + \Delta y$:

$$d_0 = |f(x) - y - \Delta y|.$$

Шаг 3. Вычислить величины c_i ($c_i = \frac{\partial f}{\partial \Delta x_i}$) и определить номер аргумента k , для которого величина c_k максимальна ($c_k = \max_i \{c_i\}$). Определить новое значение аргумента путем движения в сторону градиента/антиградиента:

$$\Delta x_k^* = \Delta x_k + t \cdot \alpha \cdot c_k.$$

Шаг 4. Вычислить значение функции ограничения $f(x_i^*)$ и отклонение d_1 от заданного значения $y + \Delta y$.

Проверка: если $d_1 > d_0$ или d_1 меньше заданной точности, то работа алгоритма завершается. Иначе $d_0 = d_1$, $\Delta x_k = \Delta x_k^*$, переход на шаг 3.

Решением задачи будут значения Δx .

В случае линейного ограничения задача решается в одну итерацию путем поиска аргумента для изменения и решения уравнения относительно этого аргумента.

В главе также представлено применение разработанных алгоритмов для решения задач с использованием тестовых моделей (таблица 2, 3).

Таблица 2 – Решение задач по формированию показателей при минимизации суммы квадратов изменений аргументов

Модель	Показатель	Итерационный градиентный алгоритм	Итерационный алгоритм на основе формирования кривой заданного уровня, $\varepsilon=10^{-3}$	Функция Mathcad
Аддитивная	Δx_1	34	34	34
	Δx_2	34	34	34
	Δx_3	34	34	34
	Δx_4	34	34	34
	Δx_5	34	34	34
	g	5780	5780	5780
	d	0	0	0

Модель	Показатель	Итерационный градиентный алгоритм	Итерационный алгоритм на основе формирования кривой заданного уровня, $\varepsilon=10^{-3}$	Функция Mathcad
Мультипликативная, $a=10^{-13}$	Δx_1	0,5131	0,51491	0,51512
	Δx_2	0,20162	0,20667	0,20672
	Δx_3	0,5131	0,51512	0,51512
	Δx_4	0,63279	0,62796	0,62778
	g	0,967594	0,967533	0,967533
	d	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$
Мультипликативно-аддитивная	Δx_1	4,045	4,192	4,19187
	Δx_2	7,66592	7,58462	7,58467
	Δx_3	-0,07517	-0,0728	-0,0728
	Δx_4	-0,07517	-0,0728	-0,0728
	g	75,140	75,10959	75,10957
	d	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3 – Решение задач по формированию показателей при минимизации суммы абсолютных значений изменений аргументов

Модель	Показатель	Предложенный метод	Функция Mathcad
Аддитивная	Δx_1	34	34
	Δx_2	34	34
	Δx_3	34	34
	Δx_4	34	34
	Δx_5	34	34
	g	170	170
	d	0	0
Мультипликативная	Δx_1	0	0
	Δx_2	0	0
	Δx_3	0	0
	Δx_4	1,615385	1,615013
	g	1,615385	1,615399
	d	0	$5,9 \cdot 10^{-4}$
Нелинейная аддитивная	Δx_1	0	0
	Δx_2	0	0
	Δx_3	1,126161	1,126164
	g	1,126161	1,126164
	d	0	$9,4 \cdot 10^{-7}$
Мультипликативная нелинейная	Δx_1	1,672	1,673
	Δx_2	1,053	1,051
	g	2,7248	2,7249
	d	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Модель	Показатель	Предложенный метод	Функция Mathcad
Аддитивно-мультимпликативная	Δx_1	0	0
	Δx_2	10	10
	Δx_3	0	0
	Δx_4	0	0
	g	10	10,0005
	d	0	$2 \cdot 10^{-4}$

В четвертой главе «Алгоритмы решения задач нелинейного программирования» рассматривается использование и модификация разработанных алгоритмов решения обратных задач для решения обратных задач с использованием коэффициентов относительной важности, а также оптимизационных задач более широкого круга.

Алгоритм решения оптимизационных задач нелинейного программирования с одним ограничением предназначен для решения задач вида:

$$g(x) \rightarrow \min,$$

$$f(x) = y^*,$$

где $g(x)$ – нелинейная функция, частные производные которой являются одномерными функциями.

Основное отличие решения такой задачи от градиентного алгоритма решения обратной задачи заключается в том, что в качестве начальных значений аргументов используются величины, полученные путем безусловной оптимизации целевой функции, а также в учёте влияния изменения аргументов на величину целевой функции, что выражается в делении элемента вектора-градиента на вторую производную. Алгоритм будет включать шаги:

Шаг 1. Осуществить безусловную оптимизацию целевой функции $g(x)$, в результате последующего использования обратных вычислений происходит корректировка полученных значений аргументов x^* . Т.е. вместо исходных значений x , применяемых в обратной задаче, используются значения, полученные в результате безусловной оптимизации целевой функции $g(x)$.

Шаг 2. Выполнить решение обратной задачи по формированию заданного значения y^* . При этом необходимо выполнить корректировку, которая отражает влияние изменения аргумента на изменение целевой функции. Данная операция выполняется путем деления частных производных функции ограничения первого порядка на частные производные второго порядка целевой функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 g(x^*)}{\partial x_\eta^2} \cdot t \cdot \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_\eta} \\ \frac{\Delta x_\eta}{\Delta x_i} \frac{\partial^2 g(x^*)}{\partial x_i^2} = \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_i}; i = 1..n, i \neq \eta \\ f(x^* + \Delta x) = y^* \end{array} \right.$$

Алгоритм решения оптимизационных задач нелинейного программирования при нескольких ограничениях подразумевает преобразование ограничений в одно и последующее использование алгоритма решения оптимизационных задач при одном ограничении. Для этого могут быть рассмотрены два способа:

1. замена переменных: последовательное выражение переменной из одного ограничения и подстановка её во второе ограничение и целевую функцию;

2. формирование ограничения в виде суммы квадратов разницы между функцией ограничения и её заданным значением (r – число ограничений):

$$f(x^* + \Delta x) = \left(f_1(x^* + \Delta x) - y_1^* \right)^2 + \dots + \left(f_r(x^* + \Delta x) - y_r^* \right)^2.$$

В главе также представлены итерационные алгоритмы решения оптимизационных задач нелинейного программирования. В итерационных алгоритмах решение обратной задачи осуществляется с помощью последовательных вычислений по итерационной формуле:

$$x_i^* = x_i^* + t \cdot \alpha \cdot \frac{\frac{\partial f(x_i^*)}{\partial x_i}}{\frac{\partial^2 g(x_i^*)}{\partial x_i^2}}.$$

В главе представлены примеры решения классических оптимизационных задач с использованием разработанных алгоритмов, а также результаты применения математического пакета.

В пятой главе «Оптимизационные модели и алгоритмы решения обратной задачи с использованием коэффициентов относительной важности» приведены оптимизационные модели и алгоритмы для решения классической обратной задачи с использованием коэффициентов относительной важности, а также для решения задачи при использовании переменных в расчёте нескольких показателей.

Оптимизационная модель решения обратной задачи при максимальном соответствии целеполаганию в виде заданной экспертной информации имеет вид:

$$g(\Delta x) = \sum_{i=1, i \neq j}^n \left(\Delta x_j \pm \Delta x_i \frac{\beta_j}{\beta_i} \right)^2 \rightarrow \min,$$

$$f(\Delta x) = y + \Delta y.$$

Целевая функция отражает соответствие полученного решения коэффициентам относительной важности, а ограничение – равенство результирующего показателя заданному значению.

Разработанные и представленные в третьей главе алгоритмы решения задач нелинейного программирования имеют ограничение, согласно которому частные производные целевой функции должны быть одномерными функциями. Для обратной задачи при максимальном соответствии целеполаганию в виде заданной экспертной информации данное условие не выполняется, поэтому была выполнена модификация алгоритма:

Шаг 1. Установить начальное значение изменения j -го аргумента Δx_j , номер итерации $k=0$, шаг h изменения переменной Δx_j .

Шаг 2. Выполнить безусловную оптимизацию целевой функции $g(\Delta x)$ при фиксированном значении Δx_j . Полученные значения Δx используются для дальнейшей корректировки.

Шаг 3. Используя итерационную формулу выполнить изменение значений аргументов ($i \neq j$):

$$\Delta x_i^* = \Delta x_i + t \cdot \alpha \cdot \frac{\frac{\partial f(\Delta x)}{\partial \Delta x_i}}{\frac{\partial^2 g(\Delta x)}{\partial \Delta x_i^2}}.$$

Шаг 4. Проверка: если $d(\Delta x_i^*) > d(\Delta x_i)$ (где $d(\Delta x) = |f(\Delta x) - (y + \Delta y)|$), то $k = k+1$, $g_k = g(\Delta x)$, переход на шаг 5. Иначе: $\Delta x_i = \Delta x_i^*$, переход на шаг 3.

Шаг 5. Проверка: если $k > 1$ и $g_k > g_{k-1}$, то завершение работы алгоритма, иначе изменение переменной Δx_j на шаг h , переход на шаг 2.

В качестве решения задачи принимаются значения Δx на $k-1$ шаге.

Величина шага h определяет точность полученного решения, с увеличением величины шага ошибка вычислений также будет увеличиваться.

В отличие от аппарата обратных вычислений представление задачи в виде оптимизационной позволяет найти решение, соответствующее заданному значению результирующего показателя в случае, когда коэффициенты относительной важности не позволяют достичь поставленной цели и требуется их корректировка.

Оптимизационная модель решения обратной задачи при использовании показателей в нескольких функциях расчёта имеет вид:

$$g(\Delta x) \rightarrow \min,$$

$$f_i(\Delta x) = y_i + \Delta y_i.$$

Количество функций f определяется числом показателей, значения которые необходимо сформировать.

В случае использования коэффициентов относительной важности может быть рассмотрено два способа решения задачи. Первый способ заключается в формировании целевой функции, характеризующей степень отклонения соотношения полученных изменений аргументов от соотношения коэффициентов относительной важности, установленных экспертом. Таким образом, для всех подзадач формируется единая задача нелинейного программирования. Второй способ заключается в отдельном решении каждой подзадачи. Далее выполняется последующая корректировка аргументов при минимизации суммы квадратов изменений аргументов.

Шестая глава «Алгоритмы и структура программы решения обратных задач» посвящена разработке программного обеспечения для решения задач на основе обратных вычислений. Приведены существующие подходы к разработке программ.

Рассматривается использование объектно-ориентированного анализа для создания инструмента решения обратных задач, который с одной стороны обеспечивал бы решение специфических задач в предметной области, а с другой – гибкую модификацию, расширяемость, т.е. наращивание функциональных возможностей. Для разработки программы решения обратных задач был использован подход, предполагающий декомпозицию дерева цели и представление показателей в виде графа (рисунок 5).

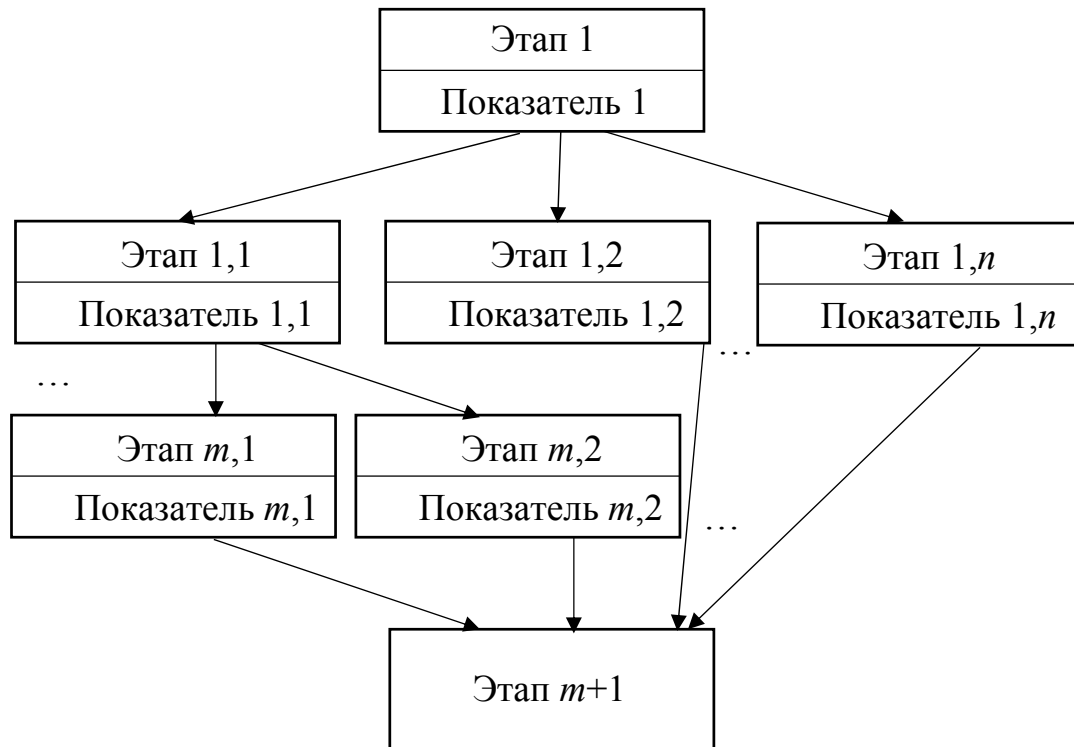


Рисунок 5 – Этапы системы решения обратных задач

Представлено описание алгоритма для решения общей задачи формирования результирующего показателя дерева цели. Рассмотрено два варианта алгоритма: одновременное изменение аргументов (алгоритм минимизации суммы квадратов изменений аргументов, алгоритм максимизации соответствия экспертным целеполаганиям) (рисунок 6) и выбор аргумента для изменения (алгоритм минимизации суммы модулей изменений аргументов, стохастический алгоритм).

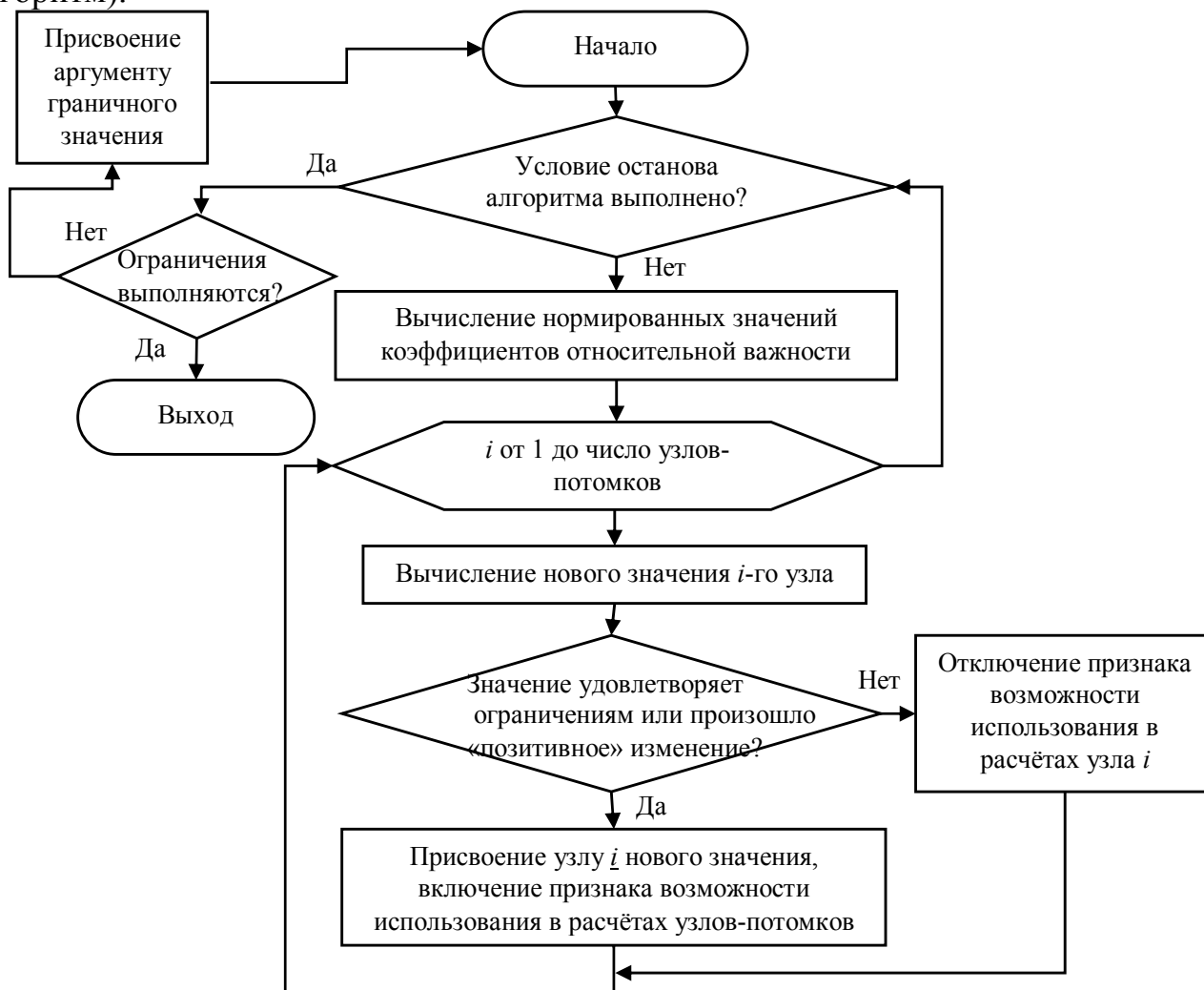


Рисунок 6 – Алгоритм решения обратной задачи при одновременном изменении аргументов

На рисунке 7 представлена диаграмма классов. Каждый этап является объектом класса Узел, который может ссылаться на любое количество узлов-предков и узлов-потомков. Класс Узел для решения своей задачи содержит ссылку на абстрактный класс Расчёт. Реализация алгоритмов решения обратных и прямых задач выполняется в классах наследниках Расчёт. Каждый объект класса Узел содержит ссылку на объект наследник класса Расчёт, таким образом, для вершины устанавливается способ решения прямой и обратной за-

дачи. В частности, в методах «расчётОбр» реализованы итерационные формулы расчёта, используемые для решения обратной задачи. Методы «вызовПотомков» и «вызовПредков» предназначены для рекурсивного обхода графа/дерева. Алгоритм решения обратной задачи с учётом ограничений реализован в методе «решение», который вызывается при реализации рекурсивного обхода.

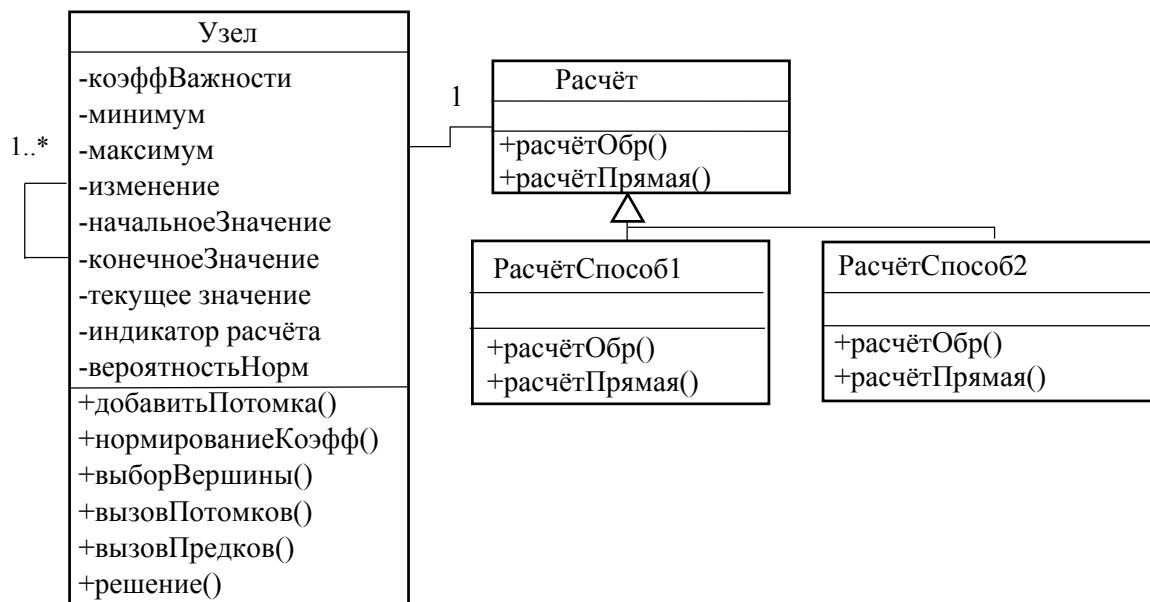


Рисунок 7 – Структура классов

После решения обратной задачи также могут возникать задачи корректировки (например, в случае использования показателя в разных функциях расчёта) и обработки результатов (при необходимости вычисления новых показателей и проверки достижимости полученных значений). Таким образом, решение обратной задачи включает прохождение трех уровней, на каждом из которых формируется своё дерево/граф (рисунок 8).

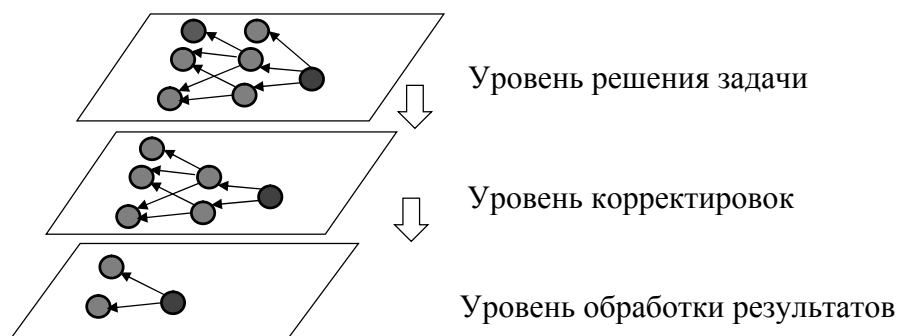


Рисунок 8 – Уровни системы решения обратных задач

Также рассмотрен алгоритм в случае зависимости между аргументами функции, представленной в виде регрессионного уравнения, которое

используется для проверки достижимости результата.

В седьмой главе «Проблемно-ориентированное программное обеспечение решения задач на основе обратных вычислений» приведено описание использования предложенного подхода для разработки двух программ: программы формирования прибыли и программы формирования интегрального показателя.

На рисунке 9 представлено дерево показателей задачи формирования прибыли.

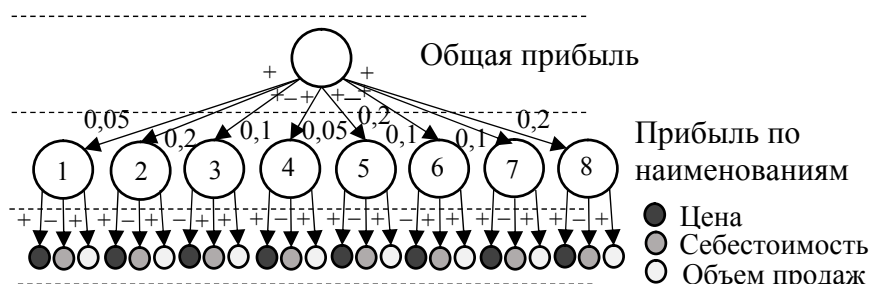


Рисунок 9 – Дерево цели задачи формирования прибыли

Дерево цели программы формирования интегрального показателя приведено на рисунке 10.

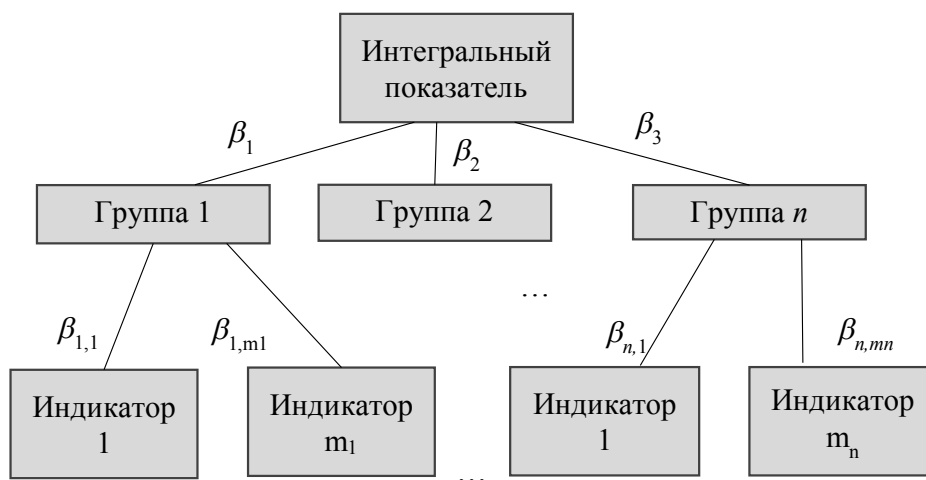


Рисунок 10 – Дерево цели задачи формирования интегрального показателя

Последовательность решения задачи определения интегрального показателя представляется в виде графа, который содержит узлы трех типов: группа, индикатор и конечный узел. Узлы типа «Индикатор» хранят исходные значения показателей и выполняют их нормировку, а также возврат к исходным значениям. Кроме того, в узлах такого типа осуществляется выбор значения для использования в расчётах (порядковый номер в списке либо прогнозное значение). Вершины «Группы» предназначены для преобразования значений своих потомков в единую интегральную характеристику. При этом также может быть выполнена нормировка с использованием значений узлов-потомков.

Обход графа подразумевает обратный ход и прямой. В процессе прямого хода снизу/вверх осуществляется нормирование индикаторов и формирование интегральной характеристики каждого уровня. При прямом ходе вычисление узлов осуществляется последовательно, конечный узел является фиктивным и предназначен для запуска рекурсивной процедуры обхода графа, которая подразумевает вычисление текущей вершины только в том случае, если рассчитаны все её потомки. Обратный ход сверху/вниз запускается для узлов-групп, он предназначен для решения обратной задачи по определению значений узлов-потомков. При обратном ходе вычисление узлов, относящихся к одному предку, осуществляется параллельно.

Рассмотрено применение подхода для создания трех программ: программы оценки и прогнозирования уровня социально-экономического развития региона, программы оценки групп социальной сети для реализации маркетинговых мероприятий, программы оценки момента времени размещения сообщения в социальной сети. Работоспособность созданных программ подтверждает реализуемость предложенного подхода.

В заключении представлены основные результаты работы:

1. На основе анализа существующих подходов к решению обратных задач обоснована актуальность задачи разработки моделей, методов и алгоритмов решения задач на основе обратных вычислений.

2. С использованием литературных источников выбраны тестовые модели.

3. Разработан метод решения задач с использованием обратных вычислений на основе построения уравнения зависимости между аргументами функции. При использовании данного метода отсутствует необходимость проверки согласованности дополнительной информации, поступающей от специалиста: соответствия поставленной цели коэффициентам относительной важности и направлениям их изменения.

4. Для решения задач на основе обратных вычислений с ограничениями разработан стохастический метод, основанный на последовательном изменении результирующей величины и выбора аргумента для достижения результата с помощью моделирования полной группы несовместных событий.

5. Разработаны оптимизационные модели для решения задач с использованием обратных вычислений, где в качестве целевой функции рассматривается мера отдаленности от исходных значений входных параметров. Разработаны методы и алгоритмы, в том числе итерационные, для решения обратных задач на основе минимизации суммы квадратов аргументов и минимизации суммы абсолютных изменений аргументов.

6. Предложены модели и алгоритмы решения задач на основе обратных вычислений при максимизации соответствия экспертным целеполаганиям, а также при участии переменных в расчете нескольких показателей. Приведены результаты решения с помощью разработанного

алгоритма классических задач оптимизации: закупок, цены, портфеля ценных бумаг, запасов предприятия

7. На основе объектно-ориентированного подхода разработана структура программного обеспечения решения задач с использованием обратных вычислений, основанная на формировании дерева цели. Предложен алгоритм для решения общей задачи формирования результирующего показателя дерева цели.

8. Рассмотрена реализация предложенной структуры для создания программ: формирования прибыли и формирования интегрального показателя. Использование выбранного подхода обуславливает возможность гибкой модификации и расширения системы.

9. Проведенные вычислительные эксперименты по формированию стандартных экономических показателей, разработанных показателей и решению классических оптимизационных задач показали соответствие результатов, полученных с помощью разработанных методов и алгоритмов, и решения с применением классических методов, а также математических пакетов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Грибанова, Е. Б. Методы и алгоритмы решения обратных экономических задач с помощью модифицированного аппарата обратных вычислений / Е. Б. Грибанова. – Чебоксары: ИД «Среда», 2020. – 133 с.

2. Gribanova, E. B. An Iterative Algorithm for Solving Inverse Problems of Economic Analysis Using Weighting Factors. *Advances in Engineering Research* / E. B. Gribanova. – New York: Nova Publishers. – 2021. – P. 49–79.

3. Мицель, А. А. Имитационное моделирование экономических объектов. Алгоритмы и комплекс программ / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 148 с.

Учебные пособия

4. Грибанова, Е. Б. Эконометрика. Практикум. Учебное пособие / Е. Б. Грибанова. – М.: «Горячая линия-Телеком», 2019. – 148 с.

5. Грибанова, Е. Б. Имитационное моделирование экономических процессов. Практикум в Excel. Учебное пособие / Е. Б. Грибанова, И. Н. Логвин. – М.: Кнорус, 2020. – 228 с.

6. Мицель А. А. Практикум по имитационному моделированию экономических процессов / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова, Е. А. Ефремова. – Томск: ТУСУР, 2007. – 270 с.

7. Грибанова, Е. Б. Сборник задач по имитационному моделированию экономических процессов / Е. Б. Грибанова, А. А. Мицель. – Томск: ТУСУР, 2007 – 274 с.
8. Мицель, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов. Учебное методическое пособие / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова. – Томск: ТМЦДО, 2007 – 50 с.
9. Мицель, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов. Учебное пособие / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова. – Томск: ТМЦДО, 2007 – 143 с.
10. Грибанова, Е. Б. Сборник задач по математическому и имитационному моделированию экономических процессов / Е. Б. Грибанова, А. А. Мицель. – М.: «Горячая линия-Телеком», 2019. – 252 с.
11. Мицель, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов: Учеб. пособие: в 2-х частях / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова – Томск.: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2005. – 236 с.
12. Мицель, А. А. Имитационное моделирование экономических объектов: Лабораторный практикум / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова. – Томск.: Изд-во НТЛ, 2005. – 160 с.
13. Мицель, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов: Методические указания по выполнению лабораторных работ и курсового проекта / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова. – Томск: ТУСУР, 2006. – 108 с.

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

14. Грибанова, Е. Б. Стохастический алгоритм поиска глобального минимума функции / Е. Б. Грибанова // Прикладная информатика. – 2017. – № 2. – С. 130–139.
15. Грибанова, Е. Б. Методы решения обратных задач экономического анализа / Е. Б. Грибанова // Корпоративные финансы. – 2016. – №1. – С. 119–130.
16. Грибанова, Е. Б. Решение обратных задач экономики с помощью модифицированного метода обратных вычислений / Е. Б. Грибанова // Проблемы управления. – 2016. – № 5.– С. 35–40.
17. Грибанова, Е. Б. Стохастические алгоритмы решения обратных задач экономического анализа с ограничениями / Е. Б. Грибанова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – № 4. – С. 112–116.
18. Грибанова, Е. Б. Методы решения обратных задач экономического анализа с помощью минимизации приращений аргументов / Е. Б. Грибанова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – № 2. – С. 95–99.
19. Грибанова, Е. Б., Мустакимов, Р. Р. Разработка алгоритма решения обратной задачи формирования прибыли при ограничении целочисленности //

Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2022. – № 3. – С. 63–68.

20. Грибанова, Е. Б. Алгоритм решения задачи линейного программирования с помощью обратных вычислений / Е. Б. Грибанова // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2017. – №9. – С. 1062–1075.

21. Грибанова, Е. Б. Решение задачи оптимизации цены с помощью обратных вычислений / Е. Б. Грибанова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 1–10.

22. Грибанова, Е. Б. Решение задачи оптимизации закупок с помощью обратных вычислений / Е. Б. Грибанова // Экономический анализ: теория и практика. – 2018. – № 3. – С. 586–596.

23. Грибанова, Е. Б. Модели прогнозирования выручки ресторана быстрого питания / Е. Б. Грибанова, Е. С. Соломенцева // Экономический анализ: теория и практика. – 2018. – № 4. – С. 754–767.

24. Gribanova, E. V. Models to forecast revenue of fast food restaurants / E. V. Gribanova, E. S. Solomentseva // Дайджест-финансы. – 2018. – № 2. – С. 212–220.

25. Грибанова, Е. Б. Модель оценки удовлетворенности потребителей на основе онлайн-отзывов с помощью метода главных компонент / Е. Б. Грибанова, В. В. Саулин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – № 2. – С. 6–7.

26. Грибанова, Е. Б. Процессно-ориентированное моделирование систем массового обслуживания в Excel / Е. Б. Грибанова // Прикладная информатика. – 2015. – № 6. – С. 83–90.

27. Грибанова, Е. Б. Табличная имитационная модель системы обслуживания ресторана быстрого питания / Е. Б. Грибанова, Е. А. Кармановская, И. Н. Логвин // Прикладная информатика. – 2019. – № 5. – С. 111–119.

28. Грибанова, Е. Б. Табличное моделирование как инструмент интерактивного обучения базовым понятиям эконометрики / Е. Б. Грибанова // Статистика и экономика. – 2016. – №1. – С. 40–45.

29. Грибанова, Е. Б. Метод решения обратных задач экономического анализа на основе статистических данных / Е. Б. Грибанова, П. Э. Тугар-оол // Корпоративные финансы. – 2017. – №3. – С. 111–120.

30. Грибанова, Е. Б. Модель оценки групп социальной сети для реализации маркетинговых мероприятий / Е. Б. Грибанова, А. В. Катасонова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – №2. – С. 68–72.

31. Грибанова, Е. Б. Алгоритмы моделирования распространения информации при маркетинговых мероприятиях в группах онлайн-социальной сети / Е. Б. Грибанова // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 66–73.

32. Грибанова, Е. Б. Алгоритм оценки маркетинговых мероприятий онлайн-социальной сети «ВКонтакте» на основе каскадной модели распространения информации / Е. Б. Грибанова, И. Н. Логвин, И. В. Ширенков // До-

клады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – №3. – С. 69–74.

33. Грибанова, Е. Б. Оптимизационные модели выбора групп социальной сети для размещения рекламы / Е. Б. Грибанова // Экономический анализ: теория и практика. – 2017. – №10. – С. 1989–2000.

34. Грибанова, Е. Б. Разработка программы оценки времени размещения сообщения в онлайн-социальной сети ВКонтакте / Е. Б. Грибанова, А. С. Савицкий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – №1. – С. 13–14.

35. Мицель, А. А. Разработка системы имитационного моделирования управления запасами на основе объектно-ориентированной технологии / А. А. Мицель, И. В. Бойченко, Е. Б. Грибанова // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – т. 4. №3. – С. 59–64.

36. Мицель, А. А. Разработка системы имитационного моделирования экономических объектов на основе объектно-ориентированного подхода / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова // Известия ТПУ. – 2007. – т. 311. №6. – С. 11–15.

37. Грибанова, Е. Б. Алгоритмические имитационные модели управления материальными запасами на складе / Е. Б. Грибанова, А. А. Мицель // Известия ТПУ. – 2006. – т. 309. №8. – С. 201–207.

38. Грибанова, Е. Б. Обучающие системы имитационного моделирования экономических процессов / Е. Б. Грибанова, А. А. Мицель // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 1. – С.131–138.

39. Грибанова, Е. Б. Информационная система рейтинговой оценки объектов экономики / Е. Б. Грибанова, А. Н. Алимханова, П. Э. Тугар-оол // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – №2. – С. 51–55.

40. Грибанова, Е. Б. Имитационная модель аукциона, проводимого с целью поставки товаров, услуг для государственных и муниципальных нужд / Е. Б. Грибанова // Доклады ТУСУР. – 2007. – №2 (16). – С. 204–210.

Статьи в изданиях, индексируемых Scopus/Web of science

41. Griбанова, E. Elaboration of an Algorithm for Solving Hierarchical Inverse Problems in Applied Economics / E. Griбанова // Mathematics. – 2022. – № 10 (15).

42. Griбанова, E. Construction of algorithms for solving the inverse problem when using indicators in several calculation functions / E. Griбанова // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – № 4 (115). – P. 44–50.

43. Griбанова, E. Development of spreadsheet simulation models of gas cylinders inventory management / E. Griбанова, A. Mitsel, A. Shilnikov // Eureka: Physics and Engineering. – 2022. – № 2. – С. 116–127.

44. Griбанова, E. A method for solving the procurement optimization problem based on inverse calculations // Proceedings on Engineering Sciences. – 2020. – № 4. – P. 441–452.
45. Griбанова, E. B. Development of iterative algorithms for solving the inverse problem using inverse calculations / E. B. Griбанова // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4 (3). – P. 27–34.
46. Griбанова, E. B. Algorithm for solving the inverse problems of economic analysis in the presence of limitations / E. B. Griбанова // EUREKA: Physics and Engineering. – 2020. – № 1. – P. 70–78.
47. Griбанова, E. Stochastic Algorithm to Solve the Problem of Linear Programming with Backward Calculations / E. Griбанова // Proceedings of the international workshop "Applied methods of statistical analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis", Krasnoyarsk. – Novosibirsk: NSTU publisher, 2017 – С. 196–203.
48. Griбанова, E. Algorithm for regression equation parameters estimation using inverse calculations / E. Griбанова // Proceedings of the international workshop "Applied methods of statistical analysis. Statistical computation and simulation", Novosibirsk. – Novosibirsk: NSTU, 2019. – С. 357–364.
49. Griбанова, E. B. Development of a price optimization algorithm using inverse calculations / E. B. Griбанова // Eastern-European journal of Enterprise technologies. – 2019. – № 5 (4). – P. 18–25.
50. Гвоздев, E. B. Методология анализа показателей влияния человеческого фактора на комплексную безопасность электроэнергетических предприятий / E. B. Гвоздев, E. B. Грибанова, Ю. Г. Матвиенко // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 12. – С. 38–43.
51. Grigoreva, M. Research Activities of Students and Information Technology as a Method to Support Interdisciplinary Teaching in Training Process of Technical University / M. Grigoreva, E. Griбанова, T. Kust // Advances in Computer Science Research: Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine, Tomsk. – Atlantis Press, 2016. – С. 322–327.
52. Griбанова, E. B. Econometric models for evaluation of marketing activities' indicators of social network / E. B. Griбанова, I. V. Shirenikov, A. V. Katsasonova // Advances in Economics, Business and Management Research: Proceedings of the conference «Trends of Technologies and Innovations in Economic and Social Studies», Tomsk. – Atlantis Press, 2017. – P. 227–233.
53. Griбанова, E. B. Algorithms for Solving Inverse Problems of Simulation Modeling / E. B. Griбанова // International Journal of Computing. – 2021. – №3. – С. 433–439.
54. Griбанова, E. B. Economic analysis inversion mechanism taking into account argument interrelation / E. B. Griбанова, I. N. Logvin. // Proceedings of the 1st International Scientific Conference "Modern Management Trends and the Digital Economy: from Regional Development to Global Economic Growth", Ekaterinburg. – Atlantis Press, 2019. – P. 86–92.

55. Griбанова, Е. В. Algorithm for Estimating the Time of Posting Messages on Vkontakte Online Social Network / Е. В. Griбанова, А.С. Savitsky // International Journal on Information Technologies and Security. – 2020. – №1. – P. 3–14.

56. Griбанова, Е. В. Gaming simulation models of economic entities / Е. В. Griбанова // Advances in Computer Science Research, Proceedings of the IV International research conference "Information technologies in Science, Management, Social sphere and Medicine", Tomsk. – Atlantis Press, 2017. – P. 30–34.

Статьи в прочих рецензируемых научно-технических журналах и трудах конференций (всего 31, приводятся основные)

57. Грибанова, Е. В. Разработка стохастического алгоритма для решения обратных иерархических задач прикладной экономики / Е.В. Грибанова // Информационные системы и технологии в образовании, науке и бизнесе: сб. материалов всероссийской научно-практической конференции, Улан-Удэ. – Улан-Удэ: БГУ, 2022. – С. 23–28.

58. Грибанова, Е. В. Разработка программы для решения иерархической обратной задачи формирования прибыли предприятия / Е. В. Грибанова // Математическое и информационное моделирование: сб. материалов Всероссийской конференции молодых учёных, Тюмень. – Тюмень: ТюмГУ-Press, 2022. – С. 63–66.

59. Грибанова, Е. В. Задача выбора наилучшего момента размещения сообщений в группах онлайн-социальной сети / Е. В. Грибанова, К. А. Бозымбаева // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти: сб. материалов международной научно-методической конференции, Томск. – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 361–364.

60. Грибанова, Е. В. Система решения обратной задачи формирования маржинальной прибыли предприятия / Е. В. Грибанова, И. Н. Логвин // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные технологии принятия решений в цифровой экономике», Юрга. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 242–244.

61. Логвин, И. Н. Реализация сценария обработки формул системы табличного моделирования экономических процессов / И. Н. Логвин, Е. В. Грибанова // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019, Т.5. – С. 96-98.

62. Логвин, И. Н. Сценарий многократной имитации системы табличного моделирования экономических процессов / И. Н. Логвин, Е. В. Грибанова // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сборник научных трудов V Международной конференции, Томск. –

Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2018. – Ч.2. – С. 82–84 .

63. Грибанова, Е. Б. Разработка имитационных моделей экономических систем на основе объектно-ориентированного подхода / Е. Б. Грибанова // Современные техника и технологии: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Томск. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – С. 276–277.

64. Грибанова, Е. Б. Разработка автоматизированной системы имитационного моделирования аукционов / Е. Б. Грибанова, И. В. Бойченко // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: доклады международной научно-практической конференции. – Томск. – Томск.: В: Спектр. – 2007. – С. 221–224.

65. Грибанова, Е. Б. Компьютерная система имитационного моделирования экономических объектов, разработанная на основе объектно-ориентированной технологии / Е. Б. Грибанова // Научная сессия ТУСУР: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов, Томск. – Томск: В-Спектр, 2008. – С. 56–59.

66. Грибанова, Е. Б. Имитационное моделирование систем управления запасами / Е. Б. Грибанова // Современное образование: традиции и новации: материалы Всероссийской научно-методической конференции, Томск. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2006. – С. 173–174.

67. Бойченко, И. В. Автоматизированная система имитационного моделирования управления запасами / И. В. Бойченко, Е. Б. Грибанова, А. А. Мицель // Информационные системы: тр. постоянно действующего науч.-техн. семинара. – 2006. – № 4 – С. 118–125.

68. Грибанова, Е. Б. Система имитационного моделирования экономических объектов / Е. Б. Грибанова // Студент и научно-технический прогресс: материалы Международной научной студенческой конференции, Новосибирск. – Новосибирск: Редакционно-издательский отдел НГУ, 2005. – С. 50–54.

69. Мицель, А. А. Компьютерное имитационное моделирование экономических объектов / А. А. Мицель, Е. Б. Грибанова // Доклады ТУСУР. – 2005. – №3. – С. 49–56.

70. Грибанова, Е. Б. Система имитационного моделирования торгов, проходящих в форме аукциона / Е. Б. Грибанова, О. В. Каштанова, А.А. Мицель А.А. // Доклады ТУСУР. – 2007. – №1 (15). – С. 63–70.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

71. Свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ № 2022662734. Программа решения иерархической многономенклатурной обратной задачи формирования прибыли предприятия / Грибанова Е.Б.; заявл. 30.06.2022; зарег. 07.07.2022.

72. Свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ № 2021662008. Оценка групп социальной сети для реализации маркетинговых мероприятий / Грибанова Е.Б.; заявл. 07.07.2021; зарег. 20.07.21

73. Свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ № 2021662008. Программа оценки времени размещения сообщений в группах онлайн-социальной сети ВКонтакте / Грибанова Е.Б., Савицкий А.С.; заявл. 07.07.2021; зарег. 09.07.21

74. Свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ № 2021661430. Формирование маржинальной прибыли предприятия / Грибанова Е.Б., Логвин И.Н.; заявл. 07.07.2021; зарег. 12.07.21

75. Каштанова О.В., Грибанова Е.Б. Программа имитационного моделирования торгов, проходящих в форме аукциона «Аукцион», М., 2007. – зарег. в Отраслевом фонде алгоритмов и программ 17 апреля 2007, № 50200700854.

76. Бойченко И.В., Грибанова Е.Б. Программная система имитационного моделирования управления запасами «Запас», М., 2006. – зарег. в Отраслевом фонде алгоритмов и программ 26 октября 2006, № 50200601855.

77. Мицель А.А., Грибанова Е.Б. Программа имитационного моделирования экономических объектов «Имитатор», М., 2006. – зарег. в Отраслевом фонде алгоритмов и программ 26 октября 2006, № 50200601854.

78. Свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ № 2021615840. Программа формирования интегрального показателя социально-экономического объекта / Грибанова Е.Б.; заявл. 09.03.2021; зарег. 13.04.21

79. Свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ № 2021615540. Программа решения обратной задачи формирования прибыли с помощью стохастических алгоритмов / Грибанова Е.Б.; заявл. 09.03.2021; зарег. 09.04.21