



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Профсоюзная ул., д. 65, стр. 2,
вн. тер. г. муниципальный округ
Коньково, г. Москва, 117342
Тел. (495)334 89 10, Факс (495)334 93 40
E-mail: dan@ipu.ru, www.ipu.ru
ОКПО 00229530, ОГРН 1037739269590
ИНН/КПП 7728013512 / 772801001

16.07. 2026 г. № 46-41/1949
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН
Институт проблем управления

В.А. Трапезникова
Российской академии наук

Мик

Новиков Д.А.

2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии
наук на диссертационную работу Сысоева Антона Сергеевича на тему
«Методология анализа чувствительности по факторам математических
моделей сложных систем», представленную на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ,
управление и обработка информации, статистика

Актуальность темы диссертации

В условиях, когда исходные данные для моделей сложных систем имеют стохастическую природу, содержат погрешности или получены в ходе реализации ограниченного числа экспериментальных наблюдений, оценка влияния вариации факторов на результаты становится важной задачей. Анализ чувствительности по факторам позволяет решить ключевые прикладные задачи: во-первых, выявить факторы, вносящие наибольшую неопределенность, что дает возможность оптимизировать сбор данных и снизить вычислительные затраты на идентификацию системы; во-вторых, обоснованно редуцировать модель, исключая малозначимые входы и уменьшая вычислительную сложность без существенной потери точности; в-третьих, верифицировать модель на устойчивость к колебаниям данных, в частности, выявляя случаи переобучения модели; в-четвертых, проводить сценарный анализ для оценки поведения системы в различных режимах ее функционирования.

Несмотря на значительный вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие данного направления, существующие методы анализа чувствительности обладают принципиальными ограничениями,

чувствительности обладают принципиальными ограничениями, определяющими перспективы дальнейших исследований. Основанные на использовании частных производных локальные методы достаточно полно разработаны, однако, дают корректные результаты лишь при малых вариациях факторов и не учитывают их возможные взаимодействия. Глобальные методы допускают учет взаимодействия факторов, но требуют большого числа запусков моделей сложных систем, что зачастую вычислительно нереализуемо. Методы метамоделирования либо ставят ограничения на линейность структуры системы, либо приводят к потере интерпретируемости полученных результатов.

Таким образом, актуальной научной проблемой является преодоление разрыва между точностью и универсальностью методов исследования чувствительности по факторам систем – разработка подходов, применимых к широкому классу нелинейных, иерархических и вычислительно сложных моделей систем.

Структура и содержание диссертации

На рассмотрение ведущей организации представлены диссертация и автореферат. Представленная на отзыв диссертация Сысоева Антона Сергеевича имеет объем 299 страниц и включает в себя введение, шесть глав, заключение, список использованных источников, приложения. Список источников достаточно полон, содержит современные отечественные и зарубежные источники и включает в себя 268 наименований.

Введение диссертации описывает актуальность исследования, цель и задачи работы.

В **первой главе** представлены результаты проведения системного анализа существующих методов исследования чувствительности по факторам математических моделей систем. Представлен подход к декомпозиции системы на структурные элементы, позволяющий выделить подсистемы, описываемые различными моделями, установить взаимосвязи между подсистемами и обоснованно определять приоритеты при анализе влияния входов на каждом уровне декомпозиции. Приведено описание известных детерминированных локальных методов, стохастических глобальных подходов, а также скрининговых процедур, предназначенных для быстрого отбора значимых факторов при большой размерности решаемой задачи. Предложена классификация методов анализа чувствительности, структурирующая их по целям и принципам действия, и сформулированы практические рекомендации по выбору адекватного метода в зависимости от специфики решаемой задачи. На основе выявленных ограничений существующих методов обоснована необходимость разработки новых подходов.

Во **второй главе** представлены предложения по развитию теоретического аппарата анализа чувствительности модели по факторам на основе концепции анализа конечных изменений. В отличие от классических методов, оперирующих бесконечно малыми изменениями величин,

предложенный подход основан на использовании теоремы Лагранжа о промежуточной точке, что позволяет получать точное разложение конечного изменения отклика на вклады конечных изменений факторов без возникновения неразложимого остатка, вносящего неопределенность в получаемые результаты анализа. Проведена систематизация подходов на основе различных типов различительных исчислений (аддитивного, мультипликативного, аддитивно-мультипликативного, мультипликативно-аддитивного), для каждого из которых сформулированы и доказаны соответствующие аналоги теоремы Лагранжа о промежуточной точке. Разработана методология анализа чувствительности, включающая четыре ключевых этапа: формализацию объекта, применение анализа конечных изменений, реализацию специализированной стратегии анализа (иерархический анализ, планирование эксперимента, определение интервалов чувствительности) и использование полученных результатов для решения прикладных задач. Предложен базовый алгоритм анализа, обладающий свойствами глобальности, учета нелинейности и взаимодействия факторов, независимости от структуры системы и интерпретируемости результатов.

В третьей главе предложен класс методов приближенного анализа чувствительности по факторам для моделей сложных систем, аналитическая форма которых недоступна или сложна для дифференцирования. Систематизированы три подхода: линейные регрессионные модели со взаимодействиями факторов, полносвязные нейронные сети и интерполяционные многочлены. Для каждого подхода получены аналитические выражения градиентов в промежуточной точке, используемые в моделях метода анализа конечных изменений. Кроме того, синтезирован алгоритм анализа чувствительности для моделей систем со смешанными (непрерывными и дискретными) факторами, основанный на минимизации невязки уравнения теоремы Лагранжа и замене производных дискретных факторов их конечно-разностными аналогами. Доказана устойчивость предложенных методов к погрешностям исходных данных.

В четвертой главе приведено описание разработанного метода иерархического анализа чувствительности, позволяющего осуществлять сквозное точное разложение влияния факторов на всех уровнях многоуровневой системы. Для иерархических систем с произвольным числом уровней сформулированы и доказаны теоремы о разложении конечного приращения и конечного индекса результирующего показателя системы на вклады ее входов. Основной результат заключается в том, что параметры промежуточных точек для каждого уровня определяются рекурсивно из соответствующей модели различительного исчисления, что обеспечивает согласованность разложения по всей иерархической цепочке. В частности, для двухуровневой системы получено разложение, обобщающее цепное правило с различными промежуточными точками для каждого уровня. Предложенная методология позволяет учитывать структурные связи и конфигурацию модели, что отличает ее от автономного анализа каждого уровня системы.

В пятой главе предложены три класса планирования эксперимента, интегрированных с методами анализа чувствительности. Первый класс – адаптивные методы обогащения плана, синтезирующие латинский гиперкуб с анализом конечных изменений. В этих методах параметр промежуточной точки служит критерием сгущения плана в областях высокой чувствительности. Второй класс – оптимальные методы (в смысле D , E , A -оптимальности), использующие информационную матрицу на основе градиентов модели системы в промежуточных точках для целенаправленного формирования плана, максимизирующего его информативность. Третий класс – алгоритм определения интервалов чувствительности, основанный на классификации локальных оценок градиента и позволяющий автоматически выявлять области значений факторов системы с качественно различной силой влияния на отклик. Все предложенные методы направлены на снижение вычислительных затрат при сохранении точности оценивания чувствительности.

В шестой главе представлены решения трех прикладных задач, демонстрирующие эффективность разработанных методов. Рассмотрено создание адаптивной системы управления пропускной способностью транспортной сети, где анализ чувствительности нейросетевой модели позволил выявить ключевые факторы, сократить размерность задачи управления и сформировать базу продукционных правил, обеспечивающую увеличение резерва пропускной способности на 12-18%. Представлено решение обратной задачи управления для достижения целевого прироста валового регионального продукта при минимальных затратах, где на основе синтезированного итерационного алгоритма управления конечными приращениями факторов достигнута точность 98,1% от целевого прироста и снижена эффективная размерность задачи с 11 до 3 факторов. Решена задача редукции признакового пространства для обнаружения аномалий в данных об оказании медицинской помощи, где анализ конечных изменений позволил сократить число признаков на 56% при сохранении 92% совокупной факторной нагрузки и снижении вычислительной сложности модели в 2,1 раза.

В заключении изложены основные результаты исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки, которые подтверждают достижение сформулированной цели и реализации поставленных задач.

Название диссертации отражает ее содержание, материал представлен корректно. Основное содержание диссертации имеет внутреннюю логику и последовательную структуру.

Представленный автореферат правильно отражает содержимое диссертации, соответствует требованиям установленных стандартов. Основные научные результаты и достижения достаточно полно изложены в публикациях, в том числе в журналах из перечня ВАК и изданиях из международных наукометрических баз Scopus и Web of Science.

Научная новизна полученных результатов

Необходимо отметить следующие научные результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Предложен метод анализа чувствительности по факторам, основанный на применении анализа конечных изменений и используемый для объективной количественной оценки влияния факторов.
2. Предложен класс методов приближенного анализа чувствительности по факторам, отличающихся использованием анализа конечных изменений и аппроксимированных усредненных коэффициентов влияния без необходимости аналитического дифференцирования математических моделей системы.
3. Предложен алгоритм анализа чувствительности для смешанных факторов, основанный на модификации методов анализа конечных изменений, отличающийся способностью к единому точному разложению влияния факторов различных типов.
4. Предложен метод иерархического анализа чувствительности, отличающийся использованием анализа конечных изменений и способностью сквозного точного разложения влияния факторов на всех уровнях системы с учетом структурных связей и конфигурации системы.
5. Предложен класс адаптивных методов планирования эксперимента для анализа чувствительности по факторам, отличающихся использованием анализа конечных изменений с автоматической концентрацией точек плана в областях высокой вариации отклика и позволяющий сократить количество вычислений моделей системы.
6. Предложен класс оптимальных методов планирования эксперимента для анализа чувствительности, отличающихся целенаправленным формированием плана, максимизирующего информативность градиентов модели в промежуточных точках, и применяемых для сокращения количества вычислений моделей системы.
7. Предложен алгоритм определения интервалов чувствительности по факторам математических моделей систем, основанный на классификации локальных оценок градиента в точках, полученных методом анализа конечных изменений, отличающийся автоматическим выявлением областей значений факторов с качественно различной силой влияния на отклик и применяемый для выделения рабочих диапазонов и пороговых значений факторов.
8. Предложен алгоритм управления конечными приращениями факторов, основанный на итеративной комбинации методов анализа конечных изменений и задач условной оптимизации и используемый для поиска оптимального набора изменений

факторов для заданного достижения целевого приращения отклика модели системы.

Значимость результатов исследования для науки и практики

Полученные в диссертации Сысоева Антона Сергеевича результаты имеют важное теоретическое и практическое значение. Теоретические результаты могут быть использованы в организациях для создания конкретных инструментов решения актуальных прикладных задач. Разработанные алгоритмы позволяют существенно сократить вычислительные затраты на анализ моделей сложных систем, предоставляют количественное обоснование для управляющих решений и дают возможность проводить глубокую диагностику поведения систем. Это обеспечивает эффективную поддержку процессов моделирования, оптимизации и управления в условиях неопределённости.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением разработанных моделей и программных модулей в деятельность Управления Госавтоинспекции УМВД России по Липецкой области, Министерства экономического развития Липецкой области и Территориального фонда обязательного медицинского страхования Липецкой области. Предложенный подход, основанный на интеграции стохастического моделирования, нейросетевых аппроксимаций и количественного анализа чувствительности по факторам, обеспечивает обоснованное снижение размерности решаемых задач и, как следствие, сокращение потребляемых вычислительных и административных ресурсов при сохранении высокой точности управляющих воздействий. В частности, в задаче управления транспортными потоками разработанная адаптивная замкнутая система позволила повысить резерв пропускной способности загруженных участков на 12-18%, при этом выявлено, что три ключевых фактора обеспечивают более 85% совокупного влияния, что сокращает размерность задачи управления в 3-4 раза. В экономическом блоке алгоритм решения обратной задачи поиска управляющих приращений для достижения целевого уровня валового регионального продукта показал точность 98,1%, а эффективное число значимых факторов снижено с 11 до 3 (в 3,7 раза), что напрямую влияет на адресность бюджетной политики. В задачах обработки массивов медицинских данных применение методов редукции на основе анализа чувствительности позволило сократить размерность признакового пространства в системе обнаружения аномалий на 56% с сохранением 92% совокупной факторной нагрузки и снижением вычислительной сложности. Таким образом, практическая ценность полученных результатов заключается в создании универсального инструмента для обоснованного выбора ключевых факторов влияния и минимизации ресурсных затрат при реализации управленческих решений в разнородных предметных областях.

Обоснованность и достоверность научных результатов и выводов

Обоснованность предложенных методов и алгоритмов определяется тем, что они опираются на использование методов системного анализа, математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики, анализа данных, теории оптимизации, а также объектно-ориентированного программирования. Достоверность результатов обусловлена корректным использованием теоретических методов исследования и подтверждена результатами сравнительного анализа данных вычислительных и натурных экспериментов.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (Арзамас, 2014; Волгоград, 2015; Самара, 2016; Новочеркасск, 2024); Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 2018, 2019, 2022, 2023, 2025); Всероссийская Поспеловская конференция с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» (Калининград, 2020, 2022); XX Международная конференция «Reliability and Statistics in Transportation and Communication» (Латвия, Рига, 2020); Международная научная конференция «Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)» (Липецк, 2019-2025); VI Международная конференция «Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems» (Чехия, Прага, 2020); Международная научная конференция «Transport Infrastructure and Systems in a Changing World. Towards a more Sustainable, Reliable and Smarter Mobility, TIS Roma» (Италия, Рим, 2019); Международная научная конференция «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (Республика Беларусь, Минск, 2020); Международная научная конференция «Complex Systems: Control and Modeling Problems» (Самара, 2019); XIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2016); IX Международная научная конференция «Application of Information and Communication Technologies, AICT 2015» (Ростов-на-Дону, 2015); Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (Казань, 2020; Ярославль, 2022; Минск, 2022, 2023); XIV Международная конференция по распознаванию образов и обработке информации «PRIP'2019» (Республика Беларусь, Минск, 2019); Международная конференция «Information and Control Systems» (КНР, Бэньси, 2026). Полученные научные результаты обсуждались на межлабораторном семинаре Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в 60 научных работах, в том числе в 15 статьях в журналах из перечня ВАК, 16 работах в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, в 22 публикациях в прочих научных изданиях и материалах конференций. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ,

опубликована 1 монография и 3 учебных пособия. Определено авторское участие в публикациях.

Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования

Результаты диссертационного исследования, в частности, разработанный класс методов приближенного и иерархического анализа чувствительности на основе методов анализа конечных изменений, рекомендуется использовать в деятельности аналитических подразделений органов государственной власти, например, при формировании и корректировке программ социально-экономического развития. Предложенная концепция позволяет осуществить переход от эвристического отбора управляющих воздействий к их строгому количественному ранжированию, что обеспечивает обоснованную редукцию размерности задачи управления и идентификацию доминантных факторов, определяющих целевую динамику результирующего показателя. Кроме того, в сфере контроля методы редукции признаков пространства, апробированные в работе, рекомендуются для построения систем предварительной фильтрации информационных массивов, обеспечивающих снижение нагрузки на экспертный персонал при сохранении заданного уровня полноты выявления отклонений от установленных нормативов.

Организациям, специализирующимся на разработке автоматизированных и адаптивных систем управления сложными организационно-техническими объектами, рекомендуется к внедрению предложенная в диссертации архитектура замкнутого контура управления, интегрирующая стохастическое прогностическое моделирование, модуль анализа чувствительности и блок формирования управляющих решений на основе продукционных правил. Подобная структура обеспечивает рациональное использование вычислительных ресурсов и повышает оперативность выработки решений в системах, функционирующих в режиме времени, близком к реальному.

Образовательным организациям высшего образования и научно-исследовательским учреждениям, осуществляющим подготовку кадров и проведение фундаментальных и прикладных исследований в области системного анализа, математического моделирования и обработки информации, рекомендуется включение теоретических положений и прикладных алгоритмов диссертации в содержание учебных дисциплин и тематику научно-квалификационных работ. Универсальный характер предложенных решений допускает их адаптацию к задачам моделирования в различных предметных областях без необходимости внесения принципиальных изменений в алгоритмическое ядро разработанных методов.

Замечания

1. Предложенный метод анализа чувствительности по факторам на основе анализа конечных изменений не учитывает динамику состояний или запаздывание, что ограничивает его прямое применение к чистым динамическим системам. Однако на примере моделирования и анализа транспортных потоков автор компенсирует это использованием адаптивного контура с переобучением модели системы. Такой переход возможен при невысокой скорости изменения состояний факторов системы. В работе следовало бы явно указать ограничения по допустимой скорости изменения состояний, при которых пренебрежение динамикой переходных процессов не приводит к потере адекватности прогноза.

2. Предложенный в работе метод исследования чувствительности опирается на свойство непрерывной дифференцируемости функции отклика, что следует из использования теоремы Лагранжа о промежуточной точке. В реальных системах, особенно при наличии смены режимов функционирования, данное свойство часто нарушается, а чувствительность в окрестности фазового перехода стремится к бесконечности или терпит разрыв. Применение глобального анализа чувствительности может привести к неконтролируемой погрешности и сглаживанию критически важных особенностей модели.

3. В работе недостаточно полно отражен вопрос существования множества промежуточных точек, в которых производится анализ конечных изменений. Теорема Лагранжа о промежуточной точке гарантирует существование такой точки, однако, не говорит о ее единственности. При наличии нескольких точек выбор конкретного значения параметра промежуточной точки осуществляется эвристически, что не позволяет говорить об оптимальности полученного решения. Для повышения строгости метода следовало бы ввести обоснованный критерий выбора из множества найденных допустимых точек.

4. Полносвязные нейронные сети используются в работе как один из основных инструментов аппроксимации систем в решаемых прикладных задачах. Однако автор не приводит рекомендаций по выбору архитектуры в зависимости от характеристик решаемой задачи. Также следовало бы указать способы предотвращения переобучения, что важно, поскольку переобученная модель искажает оценки чувствительности факторов и снижает достоверность анализа.

5. В работе отсутствует исследование качества исходных данных, используемых для построения моделей системы и дальнейшего анализа. Данные, которые поступают из внешних источников, потенциально могут содержать пропуски, выбросы, ошибки при регистрации. Следовало бы выполнять проверку полноты и достоверности исходной информации, что гарантирует повышение достоверности результатов анализа чувствительности.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Сысоева Антона Сергеевича на тему «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем» представляет собой законченное научное исследование, в котором представлена методология исследования чувствительности по факторам математических моделей сложных систем, основанная на применении методов анализа конечных изменений и позволяющая повысить точность получаемых результатов анализа и сократить необходимые для этого вычислительные ресурсы, что можно квалифицировать как научное достижение.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор, Сысоев Антон Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на семинаре ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, протокол №1 от 09.07. 2026 г.

Бахтадзе Наталья Николаевна,
заведующий лабораторией №41
«Идентификации систем управления
им. Н.С. Райбмана»
ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук,
доктор технических наук, профессор

117342, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Коньково, ул.
Профсоюзная, д. 65, стр. 2
телефон: +7 495 198-17-20, доб. 1304
e-mail: bahfone@ipu.ru

Подпись
ЗАВЕРЯЮ
ВЕД. ИНЖЕНЕР
ЗАЛОЖНЕВА Д.А.