ОТЗЫВ

официального оппонента, **доктора технических наук, профессора Клюева Романа Владимировича** на диссертацию ***Сысоева Антона Сергеевича «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем»***, представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

1. Актуальность темы исследования

Анализ чувствительности по факторам математических моделей представляет собой один из ключевых этапов системного анализа. Суть этого этапа заключается в количественной оценке того, как разброс и вариация входных данных отражаются на выходных показателях функционирования системы. Необходимость подобной оценки продиктована фундаментальными свойствами, присущими сложным системам, – неопределённостью, многокомпонентностью, иерархичностью, а также объективной потребностью в обосновании управленческих решений.

Практическая ценность анализа чувствительности проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, он позволяет выделить из множества входных факторов те, которые создают основную неопределённость на выходе модели, тем самым обеспечивая решение задачи реакции системы на внешние и внутренние возмущения. Результаты такого анализа служат основой для редукции модели. Сложные системы, как правило, включают гетерогенные компоненты, каждый из которых обладает собственным набором входов. Выявление факторов, слабо влияющих на результат, даёт возможность исключить их из рассмотрения, что ведёт к снижению вычислительных затрат без ощутимой потери точности и напрямую отвечает требованиям к эффективным алгоритмам обработки информации. Во-вторых, анализ чувствительности применяется для проверки устойчивости модели системы. Если оценки чувствительности существенно различаются на обучающих и тестовых данных, это свидетельствует об идентификации моделью шума, а не истинной зависимости. Такой контроль необходим для оценки адекватности модели и принятия обоснованных решений в условиях неопределённости. В-третьих, анализ чувствительности по факторам используется для сценарного анализа, когда определяют набор ключевых факторов с заданным пространством вариантов и оценивают поведение системы в различных режимах функционирования.

Развитие методов анализа чувствительности по факторам открывает перспективы в прикладных исследованиях, позволяя перейти от моделей типа «чёрный ящик» к прозрачным, устойчивым и интерпретируемым решениям, что соответствует принципу раскрытия внутренней структуры системы для преодоления неопределённости.

Вместе с тем существующие методы исследования чувствительности имеют ограничения, не позволяющие применять их к широкому классу моделей. Локальные методы, основанные на частных производных, применимы лишь при малых вариациях факторов и не учитывают их взаимодействие. Глобальные методы требуют большого числа запусков модели, что для вычислительно сложных систем зачастую неприемлемо. Методы метамоделирования либо предполагают линейность связи, либо теряют

интерпретируемость. Применение же концепции анализа конечных изменений позволяет избежать некоторых из этих ограничений и исследовать более широкий класс систем, обеспечивая точное разложение конечного изменения выходного показателя по факторам без неразложимого остатка и с учётом структуры системы.

В настоящее время существует неоднородность в исследовании чувствительности математических моделей по факторам. Некоторые аспекты этого направления изучены хорошо. Например, локальные методы анализа чувствительности, основанные на исследовании частных производных и применимые для широкого класса прикладных задач, имеют высокую степень разработанности. Однако среди недостатков таких исследований необходимо указать устойчивую применимость методов только для малых вариаций исследуемых факторов и отсутствие учёта взаимодействия факторов. Глобальные методы анализа чувствительности, основанные на разложении дисперсии отклика модели, спектральном анализе и скрининге значимых факторов, также имеют высокую степень исследованности и применимости в прикладных задачах широкого класса. Такие методы уже допускают исследование взаимодействия факторов. Однако ограничениями применимости здесь являются высокие вычислительные затраты для сложных моделей, что связано с большим числом их запусков. Использование метамоделирования, основанного на изучении стандартизированных коэффициентов линейных регрессий, замещающих исходные модели, и на применении случайного леса с методом оценки важности входов, также имеет высокую степень разработанности и применимости, однако предполагает линейность или слабую нелинейность связи отклика с определяющими его факторами.

Актуальной задачей является разработка подходов, способствующих повышению универсальности применения анализа чувствительности по факторам к различным типам систем. Одним из направлений является применение анализа конечных изменений, направленного на решение задачи нахождения точного разложения конечного изменения результирующего показателя на конечные изменения оказывающих на него влияние факторов. Такая задача связана с проблемами экономического факторного анализа. В некоторых случаях при анализе чувствительности по факторам интерес представляет учёт сложной иерархической структуры рассматриваемой системы.

Таким образом, уровень развития моделей и методов анализа чувствительности сложных систем, а также имеющиеся ограничения таких методов определяют важность и значимость решения научной проблемы создания основ прикладной методологии анализа чувствительности по факторам при исследовании моделей различной структуры с учётом доступной информации. Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» «Вычислительная математика».

2. Оценка содержания диссертационной работы

Объектом исследования диссертационной работы являются сложные системы, составные части которых описываются математическими моделями различной структуры, а предметом исследования – методологический подход к анализу чувствительности по факторам математических моделей сложных систем, направленный на учёт доступной информации при решении прикладных задач упрощения систем и повышения их интерпретируемости.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 268 наименований и приложений.

Содержание работы выстроено в строгой логической последовательности: от анализа состояния вопроса к разработке теоретического аппарата, синтезу методов и алгоритмов, и апробации результатов на прикладных задачах.

Первая глава представляет собой системный анализ и критический обзор методологии исследования чувствительности математических моделей по факторам. Автор корректно разграничивает анализ по факторам и по параметрам, структурирует основные классы методов – детерминированные локальные, стохастические глобальные и скрининговые – и на этой основе вырабатывает практические рекомендации по выбору адекватного метода в зависимости от цели исследования и свойств модели. Глава завершается чёткой постановкой задач работы.

Вторая глава закладывает теоретический фундамент предлагаемой методологии. Автор обосновывает переход к аппарату анализа конечных изменений и с использованием теоремы Лагранжа и функциональных уравнений Коши строит четыре типа различительных исчислений. Предложенная систематизация позволяет получить точные формулы разложения изменений отклика. Важным достоинством главы является исследование устойчивости оценок к погрешностям входных данных и описание методологии анализа чувствительности.

Третья глава посвящена приближённым методам анализа для случаев, когда аналитическое дифференцирование невозможно. Автор систематизирует подходы к аппроксимации производных (конечно-разностные схемы, интерполяция, сглаживание и регуляризация) и синтезирует алгоритмы на основе аппроксимирующих моделей. Особого внимания заслуживает алгоритм для систем со смешанными факторами, модифицирующий теорему Лагранжа для учёта дискретных состояний.

Четвёртая глава решает проблему анализа чувствительности в системах с иерархическими связями. Автор показывает ограниченность традиционных подходов и предлагает метод сквозного иерархического анализа, основанный на доказанных теоремах разложения в аддитивной и мультипликативной формах. Разработан алгоритм рекурсивного поиска параметров промежуточных точек, позволяющий выявлять критические пути влияния и значимые подсистемы.

Пятая глава представляет синтез разработанного аппарата с теорией планирования эксперимента. Предложены оригинальные алгоритмы неадаптивного, адаптивного и оптимального планирования (D-, E- и A-оптимального), интегрированные с анализом конечных изменений. Автор приводит строгие доказательства сходимости всех алгоритмов. Завершается глава алгоритмом определения интервалов чувствительности, выявляющим диапазоны качественного изменения влияния факторов.

Шестая глава демонстрирует практическую применимость методологии на трёх разнородных задачах: управление пропускной способностью автомагистралей (прирост 12-18%), решение обратной задачи регионального управления (с достигнутой точность 98,1%) и редукция модели обнаружения аномалий в медицинских данных (сокращение размерности задачи на 56%). Во всех случаях анализ чувствительности обеспечил объективное обоснование управляющих решений и повышение эффективности моделей.

Заключение содержит перечень основных результатов, рекомендации по практическому использованию и перспективы дальнейших исследований, включая интеграцию с цифровыми двойниками и управление в реальном времени.

Приложения включают акты и справки о внедрении результатов диссертационного исследования в деятельность ряда организаций Липецкой области. Также в приложениях представлены свидетельства о государственной регистрации разработанного программного обеспечения в Роспатенте и справка об использовании результатов в учебном процессе Липецкого государственного технического университета, что подтверждает практическую реализацию и востребованность полученных научных результатов.

3. Основные научные результаты и степень их новизны

В результате выполнения диссертационного исследования получен ряд новых научных результатов, имеющих важное теоретическое и практическое значение. Основные из таких результатов:

- метод анализа чувствительности по факторам, основанный на применении аппарата анализа конечных изменений, отличающийся использованием теоремы Лагранжа о промежуточной точке и обеспечивающий точное разложение общего изменения результирующего показателя на факторные составляющие без неразложимого остатка в условиях конечных изменений факторов;
- класс методов приближённого анализа чувствительности по факторам, отличающийся использованием аппроксимации численного представления частных производных моделей и последующим применением анализа конечных изменений, что позволяет проводить количественную оценку влияния факторов для моделей, заданных таблично, алгоритмически или в условиях зашумлённых данных, без необходимости аналитического дифференцирования;
- алгоритм анализа чувствительности для смешанных факторов, отличающийся модификацией классической теоремы Лагранжа путём поиска допустимой промежуточной точки в конечном множестве состояний дискретных факторов, и обеспечивающий единое точное количественное разложение вклада факторов различных типов (непрерывных и дискретных) в рамках единой конфигурации модели;
- метод иерархического анализа чувствительности, отличающийся использованием анализа конечных изменений и обеспечивающий сквозное точное разложение влияния входных факторов на выходной показатель с учётом структуры и конфигурации многоуровневой системы, а также позволяющий выявлять критические пути распространения влияния и идентифицировать наиболее значимые подсистемы;
- класс адаптивных методов планирования эксперимента для анализа чувствительности по факторам, отличающихся использованием метода латинского гиперкуба в качестве начального плана и процедурами автоматического выбора числа соседних точек, оценки чувствительности через конечные приращения или эластичность, а также адаптивного порога для включения новых точек в план, что позволяет сократить количество вычислений модели за счёт концентрации точек в областях высокой вариации отклика;
- класс оптимальных методов планирования эксперимента для анализа чувствительности (D- , E- и A-оптимального), отличающихся использованием

информационной матрицы плана, интегрированной с анализом конечных изменений, и обеспечивающих целенаправленное формирование плана, максимизирующего информативность градиентов модели в промежуточных точках, что позволяет сократить количество вычислений модели при сохранении полноты анализа;

- алгоритм определения интервалов чувствительности по факторам математических моделей систем, основанный на классификации локальных оценок градиента, полученных методом анализа конечных изменений и отличающийся автоматическим выявлением и описанием областей значений факторов с качественно различной силой влияния на отклик модели;
- итерационный алгоритм управления конечными приращениями факторов, основанный на комбинации методов анализа чувствительности и задач условной оптимизации и отличающийся способностью находить минимально затратный (по заданной функции стоимости) вектор изменений факторов для точного достижения заданного целевого приращения отклика модели.

4. Обоснованность и достоверность результатов научного исследования

В процессе разработки методологии анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем соискатель опирался на фундаментальные положения системного анализа, математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики, теории оптимизации, теории нейронных сетей и анализа данных. Надёжность полученных результатов гарантируется корректным применением аппарата анализа конечных изменений, теоремы Лагранжа о промежуточной точке, методов численного дифференцирования, теории планирования эксперимента, а также объектно-ориентированного программирования при разработке программного обеспечения.

В работе уделено значительное внимание верификации адекватности предложенных моделей и алгоритмов. Достоверность защищаемых положений подтверждается результатами компьютерного моделирования, в ходе которого проводилось сопоставление полученных оценок чувствительности с известными классическими методами, такими как метод Морриса, индексы Соболя и алгоритм Гарсона. Высокая степень согласованности результатов на тестовых функциях (включая функцию Ишигами) и моделях различной природы свидетельствует о корректности разработанного подхода.

Теоретические положения и алгоритмические решения прошли всестороннюю апробацию на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях.

5. Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость исследования заключается в разработке и обосновании методологии анализа чувствительности по факторам, которая позволяет количественно оценивать влияние входных переменных на выходные показатели моделей систем, а также использовать полученные оценки для повышения обоснованности управленческих решений, редукции моделей и оптимизации вычислительных затрат.

Применение разработанных в диссертации методов и алгоритмов даёт возможность решать широкий круг прикладных задач, связанных с управлением техническими и социально-экономическими системами в условиях неопределённости. В частности, предложенные подходы позволяют сокращать размерность задач управления за счёт выявления и исключения слабо влияющих факторов, что приводит к снижению вычислительной сложности и повышению интерпретируемости моделей. Разработанные алгоритмы планирования эксперимента обеспечивают существенное сокращение числа необходимых запусков моделей при сохранении полноты и достоверности анализа, что особенно важно для систем с высокой вычислительной стоимостью одного прогона.

Результаты исследования доведены до практической реализации в виде программных модулей и алгоритмов, что, судя по актам внедрения, позволило решить актуальные задачи в различных предметных областях. Разработанная система адаптивного управления пропускной способностью автомагистралей обеспечила повышение пропускной способности загруженных участков на 12-18% за счёт использования продукционных правил, сформированных на основе объективного ранжирования факторов. Предложенный алгоритм управления конечными приращениями факторов позволил определить минимально затратные наборы управляющих воздействий для достижения целевых приростов валового регионального продукта в заданных кластерах регионов с точностью 98,1%. Метод редукции модели обнаружения аномалий в медицинских данных дал возможность сократить размерность признакового пространства на 56% при сохранении более 92% совокупной факторной нагрузки, что значительно повысило вычислительную эффективность и интерпретируемость модели.

Кроме того, полученные результаты используются в учебном процессе Липецкого государственного технического университета при реализации бакалаврский и магистерских образовательных программ по направлению «Прикладная математика». На разработанные алгоритмы и программные модули получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте.

6. Оценка содержания диссертации и автореферата

Работа написана на высоком научно-методическом уровне. Диссертация оформлена в соответствии с установленными требованиями, содержит основные структурные элементы. Структура и объём автореферата соответствуют требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», а его содержание отражает основные положения диссертации.

Диссертация содержит результаты работы, которые могут быть в дальнейшем использованы при проектировании и анализе сложных систем в условиях неопределённости для оценки влияния факторов в математических моделях энергетических, транспортных и производственных систем, при обосновании редукции многоуровневых иерархических моделей, в задачах сценарного анализа и оптимизации управляющих воздействий на основе обратных задач, а также для построения адаптивных и оптимальных планов эксперимента при высокой вычислительной сложности системы.

Требования «Положения о присуждении учёных степеней» к публикации основных результатов соблюдены. По теме диссертации опубликованы 15 статей в изданиях из перечня ВАК РФ, 16 статей из БД WoS и Scopus, 3 учебных пособия, а также получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

7. Замечания по диссертации и автореферату

1) В анализе надёжности важную роль играет не только чувствительность к входным факторам, но и к параметрам самой модели - коэффициентам, калибровочным константам, которые могут быть определены с погрешностью. В диссертации чётко разграничены анализ по факторам и по параметрам, но методология развита преимущественно для первого случая. Стоило бы указать, каким образом предложенный аппарат анализа конечных изменений можно адаптировать для одновременной оценки чувствительности как по факторам, так и по параметрам модели.
2) Анализ конечных изменений предполагает, что функция $f(x)$ определена для всех промежуточных точек на отрезке между состояниями. Однако во многих системах выходной показатель может иметь ограничения (например, неотрицательность, верхние и нижние границы). В работе следовало бы дополнительно исследовать, как предложенный метод учитывает такие ограничения, если промежуточная точка выходит за допустимую область?
3) В главе 3 при численном дифференцировании таблично заданных функций предполагается, что данные доступны для всех необходимых точек. Однако в реальных задачах данные могут содержать пропуски. В работе не раскрыт вопрос, как предлагаемые методы (интерполяция, регрессия) адаптируются к неполным данным
4) В алгоритме 2.1 предлагается находить параметр α как корень нелинейного уравнения. Однако в работе не приводится строгого доказательства того, что это уравнение всегда имеет решение на интервале (0,1), помимо ссылки на теорему Лагранжа, которая гарантирует лишь существование, но не конструктивность. Для практической реализации важно понимать, при каких условиях уравнение $F(\alpha) = 0$ имеет единственное решение, а при каких возможно множество решений или их отсутствие (например, для немонотонных функций).
5) Методология даёт точечные оценки вкладов факторов, но не предоставляет статистических критериев для определения того, является ли вклад фактора статистически значимым. В классических методах (например, регрессионный анализ) существуют p-значения и доверительные интервалы. В работе не обсуждается, как можно оценить значимость полученных коэффициентов чувствительности, особенно при работе с зашумлёнными данными.
6) Из текста автореферата не ясно, каким именно образом осуществляется анализ устойчивости параметра α к погрешностям входных данных и как эта устойчивость связана со свойствами исследуемой функции.

Отмеченные замечания не снижают теоретическую и практическую ценность полученных соискателем результатов. Считаю, что автором диссертации выполнено самостоятельное и законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему, которое имеет важное научно-техническое и прикладное значение.

8. Общее заключение о соответствии диссертации критериям, установленным для диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Диссертация «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем» Сысоева А.С. является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно. В диссертации решена крупная научная проблема создания основ прикладной методологии анализа чувствительности по факторам при исследовании моделей различной структуры с учётом доступной информации, имеющая важное значение. Диссертация отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, соответствует паспорту научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, а её автор, Сысоев Антон Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук.

Официальный оппонент
Доктор технических наук (специальность
05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (промышленность)
по техническим наукам), профессор
Заведующий кафедрой электроснабжения
промышленных предприятий,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Северо-Кавказский
горно-металлургический институт
(государственный технологический
университет)»

Клюев Роман Владимирович

Подпись Клюева Р.В. заверяю:

ученого совета ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»

_____ /Беликова Светлана Борисовна/

«10» 08 2026 г.

Я, Клюев Роман Владимирович, согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и дальнейшую их обработку.

ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»
Адрес: 362021, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44
Телефон: +7(8672)407-371
E-mail: kluev-roman@rambler.ru
https://www.skgmi-gtu.ru