ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
доцента Воробьева Андрея Владимировича
на диссертационную работу
Сысоева Антона Сергеевича
«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

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Сысоева А.С. «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем» посвящена решению научной проблемы, непосредственно связанной с фундаментальными ограничениями сложившихся методов анализа чувствительности в системном анализе. Существующие подходы (локальные методы на основе частных производных, глобальные методы разложения дисперсии, скрининговые процедуры и метамоделирование) обладают встречными недостатками: первые принципиально ограничены областью малых вариаций факторов и не учитывают эффектов их взаимодействия, вторые требуют многократных запусков модели, что для вычислительно затратных систем часто делает их применение невозможным, а метамодели, в свою очередь, либо опираются на предположение о линейности связи, либо утрачивают интерпретируемость коэффициентов. Предлагаемый автором переход к анализу конечных изменений позволяет преодолеть указанные противоречия за счёт точного разложения приращения отклика по факторам без неразложимого остатка, причём коэффициенты влияния автоматически учитывают нелинейность и взаимодействия благодаря выбору промежуточной точки вдоль траектории изменения факторов. Это особенно важно для задач редукции моделей сложных систем, сценарного анализа при значительных вариациях входных факторов и обоснования управляющих воздействий в условиях неопределённости, когда классические меры чувствительности оказываются либо несостоятельными, либо трудноинтерпретируемыми. Таким образом, тематика исследования соответствует актуальным направлениям теории анализа и управления сложными системами, где существует устойчивый запрос на универсальные, вычислительно

эффективные и при этом содержательно прозрачные инструменты количественной оценки влияния факторов.

С практической стороны работа органично встроена в научно-исследовательскую повестку, реализуемую при поддержке Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований. Соискатель принимал непосредственное участие в выполнении проектов в качестве руководителя и в качестве исполнителя. Такое участие свидетельствует о наличии у автора сложившегося исследовательского опыта в решении прикладных задач, непосредственно связанных с разработкой и внедрением методов анализа чувствительности.

2. Содержание работы и его оценка

В первой главе диссертации выполнен системный анализ предметной области. Представлено формальное описание системы, предложен переход к функциональной модели, сохраняющей внутреннюю структуру. Проведена классификация существующих методов анализа чувствительности по факторам, выявлены их ограничения: локальные методы не учитывают взаимодействия факторов и справедливы лишь при малых вариациях, глобальные требуют большого числа запусков, метамодели теряют интерпретируемость. На этой основе обоснована необходимость разработки нового подхода и сформулированы задачи исследования.

Вторая глава содержит теоретическую основу работы – метод исследования чувствительности по факторам на основе анализа конечных изменений. Использование теоремы Лагранжа о промежуточной точке позволяет получить точное разложение конечного приращения отклика по факторам без неразложимого остатка. Для четырёх типов различительных исчислений доказаны соответствующие теоремы, предложен базовый алгоритм и концептуальная схема методологии. Метод обеспечивает глобальность оценки, автоматический учёт нелинейностей и взаимодействий факторов.

В третьей главе предложены приближённые методы для моделей, не допускающих аналитического дифференцирования или заданных таблично. Рассмотрены аппроксимации регрессионными моделями со взаимодействиями, нейронными сетями и интерполяционными полиномами; для каждого типа выведены выражения градиента в промежуточной точке. Кроме того, разработан алгоритм для смешанных факторов, позволяющий выполнять единое разложение влияния непрерывных и дискретных факторов путём минимизации невязки при поиске промежуточной точки.

Четвёртая глава посвящена иерархическим системам. Предложен метод сквозного анализа чувствительности на основе рекурсивного применения анализа конечных изменений к каждому уровню. Доказаны теоремы о разложении влияния факторов на итоговый отклик в аддитивной и мультипликативной формах, параметры промежуточных точек определяются последовательно – от нижних уровней к верхним. Это позволяет проследить влияние входов через всю структуру системы с учётом её конфигурации.

В пятой главе разработаны инструменты сокращения вычислительных затрат. Предложен класс адаптивных методов планирования эксперимента, в которых параметр промежуточной точки используется как индикатор локальной чувствительности для концентрации точек плана в областях высокой вариации отклика. Разработан класс оптимальных методов (D-, A-, E-оптимальность), где информационная матрица градиентов служит критерием пополнения плана. Для всех алгоритмов доказана сходимость. В этой же главе представлен алгоритм выделения интервалов чувствительности по факторам на основе классификации локальных оценок градиента.

В шестой главе приведены результаты применения методологии к трём прикладным задачам. Для управления транспортными потоками построена нейросетевая модель и продукционная экспертная система, позволившая увеличить пропускную способность на 12-18%. Для регионального управления разработан итерационный алгоритм поиска минимально затратных изменений факторов, обеспечивающий заданный прирост валового регионального продукта с точностью 98,1% и снижением размерности управления в 3,7 раза. Для обнаружения аномалий в медицинских данных анализ чувствительности позволил сократить размерность признакового пространства на 56% при сохранении 92% факторной нагрузки и снижении вычислительной сложности вдвое.

3. Основные научные результаты и их новизна

Предложен метод анализа чувствительности по факторам на основе анализа конечных изменений. Новизна заключается в переходе от локальных оценок в окрестности базовой точки к точному разложению конечного приращения отклика на вклады факторов без неразложимого остатка. В отличие от классических методов, основанных на частных производных, предложенный подход автоматически учитывает взаимодействия факторов и нелинейность связи, применим при произвольных вариациях факторов и обеспечивает глобальную оценку влияния на всём интервале их изменения.

Разработан класс приближённых методов анализа чувствительности для моделей, заданных сложной аналитической формой или таблично. Новизна состоит в комбинировании анализа конечных изменений с аппроксимацией модели регрессионными моделями со взаимодействиями, нейронными сетями или интерполяционными полиномами. Это позволяет получать усреднённые коэффициенты влияния без необходимости аналитического дифференцирования исходной модели, что существенно расширяет класс применимых систем.

Предложен алгоритм анализа чувствительности для моделей со смешанными факторами. Новизна заключается в модификации метода анализа конечных изменений, обеспечивающей единое количественное разложение влияния непрерывных и дискретных факторов. В отличие от существующих подходов, требующих раздельной обработки факторов разных типов, предложенный алгоритм строит множество кандидатов для дискретной компоненты промежуточной точки и минимизирует невязку, что позволяет получить сопоставимые оценки вклада факторов любой природы в рамках единой конфигурации модели.

Разработан метод иерархического анализа чувствительности для многоуровневых систем. Новизна состоит в рекурсивном применении анализа конечных изменений к каждому уровню иерархии с последовательным определением параметров промежуточных точек. В отличие от изолированного анализа отдельных подсистем, предложенный подход обеспечивает сквозное точное разложение влияния входных факторов на итоговый отклик с учётом структурных связей и конфигурации системы, что позволяет локализовать источники влияния внутри сложной иерархической структуры.

Предложен класс адаптивных методов планирования эксперимента для анализа чувствительности. Новизна заключается в использовании параметра промежуточной точки как индикатора локальной чувствительности, что обеспечивает автоматическую концентрацию точек плана в областях наибольшей вариации отклика. В отличие от традиционных методов планирования, не учитывающих поведение модели в процессе исследования, предложенные алгоритмы позволяют существенно сократить количество вычислений модели без потери точности оценок чувствительности.

Разработан класс оптимальных методов планирования эксперимента для анализа чувствительности. Новизна состоит в целенаправленном формировании плана, максимизирующего информативность градиентов модели в промежуточных точках на основе критериев D-, A- и E-оптимальности. В отличие от адаптивных методов, ориентированных на

покрытие области, оптимальные методы обеспечивают максимальную информационную эффективность каждого дополнительного расчёта модели, что критически важно при высокой вычислительной сложности системы.

Предложен алгоритм определения интервалов чувствительности по факторам. Новизна заключается в классификации локальных оценок градиента, полученных методом анализа конечных изменений, с автоматическим выделением областей значений факторов, соответствующих различным уровням влияния на отклик. В отличие от традиционных подходов, дающих одну усреднённую оценку на всю область определения, предложенный алгоритм позволяет выявлять рабочие диапазоны и пороговые значения факторов, что имеет значение для калибровки моделей и задач оптимизации.

Разработан алгоритм управления конечными приращениями факторов. Новизна состоит в итеративной комбинации метода анализа конечных изменений и задач условной оптимизации с заданной функцией стоимости изменений факторов. В отличие от прямых задач анализа чувствительности, данный алгоритм решает обратную задачу – поиск минимально затратного набора изменений факторов для достижения заданного целевого приращения отклика, что обеспечивает обоснованное принятие управленческих решений в условиях ограниченных ресурсов.

4. Обоснованность и достоверность научных положений и результатов диссертации

Все предложенные методы и алгоритмы базируются на аппарате системного анализа, математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики, теории оптимизации, математического моделирования. Для каждого класса методов представлены доказательства сходимости, получены оценки вычислительной сложности, сформулированы и доказаны соответствующие теоремы. Достоверность результатов подтверждается совокупностью экспериментальных данных. Разработанные методы апробированы на системах различной природы: транспортных системах, экономических региональных показателях, массивах медицинских данных. Достоверность также обеспечивается использованием корректных методов статистической обработки данных. Для оценок чувствительности предложен статистический протокол оценки устойчивости, включающий анализ чувствительности к вариациям начальных условий и параметров алгоритмов. Результаты экспериментов воспроизводимы, что подтверждено расчётами на различных наборах данных. При построении

нейросетевых аппроксимаций использованы стандартные процедуры кросс-валидации и разделения выборок на обучающую, валидационную и тестовую, что исключает переобучение и гарантирует обобщающую способность моделей.

Практическая апробация результатов в трёх организациях (Управлении Госавтоинспекции УМВД России по Липецкой области, Министерстве экономического развития Липецкой области и Территориальном фонде обязательного медицинского страхования Липецкой области) подтверждает работоспособность предложенных решений в реальных условиях. Для каждой из этих задач получены количественные показатели эффективности: прирост пропускной способности на 12-18%, точность достижения целевого прироста валового регионального продукта в 98,1%, сохранение 92% факторной нагрузки модели пропускной способности при сокращении её размерности на 56%.

Результаты диссертации прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях, что обеспечило их независимое обсуждение и оценку научным сообществом. Основные результаты опубликованы в 60 научных работах, включая 15 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 16 статей в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, что подтверждает их соответствие современному уровню исследований в данной области. Три свидетельства о регистрации программ для ЭВМ подтверждают практическую реализуемость разработанных алгоритмов.

Таким образом, обоснованность и достоверность научных положений и результатов диссертации обеспечиваются: теоретическим обоснованием с доказательствами основных утверждений; корректным применением математических методов; сопоставлением результатов с известными решениями; положительными результатами экспериментальной проверки на различных типах систем; воспроизводимостью экспериментов; практическим использованием разработок; публичной апробацией на научных конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях.

5. Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке методологии анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем, использующей анализ конечных изменений. Методология охватывает полный цикл исследования: от формализации объекта и выбора формы представления изменений до получения количественных оценок влияния факторов и их использования для управления. В её рамках решены

ключевые теоретические проблемы, ранее ограничивавшие применение анализа чувствительности: устранён неразложимый остаток при конечных изменениях факторов, обеспечен учёт взаимодействий и нелинейности, разработаны способы работы с иерархическими структурами и смешанными факторами, синтезированы алгоритмы планирования эксперимента, позволяющие сократить вычислительные затраты. В отличие от существующих подходов, предлагающих отдельные методы для частных случаев, разработанная методология представляет собой целостную систему, применимую к широкому классу систем различной природы.

Практическая значимость подтверждена использованием результатов диссертации в трёх организациях. Разработанные программные модули зарегистрированы в Роспатенте. Результаты используются в учебном процессе Липецкого государственного технического университета. Методология может применяться для редукции моделей, сценарного анализа, обоснования управленческих решений и построения планов эксперимента в различных системах.

6. Общая оценка содержания диссертации и автореферата

Диссертация Сысоева А.С. имеет чёткую внутреннюю логику: от системного анализа предметной области и выявления ограничений существующих методов – к построению теоретического аппарата, затем к разработке специализированных классов методов и завершается решением прикладных задач управления. Объём диссертации (299 страниц, 36 рисунков, 24 таблицы, 268 наименований в списке литературы) соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

— п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

— п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

— п. 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

— п. 17. Прикладные статистические исследования, направленные на выявление, измерение, анализ, прогнозирование, моделирование складывающейся конъюнктуры и разработки перспективных вариантов развития сложных систем.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нём представлены все ключевые положения, выносимые на защиту, приведены основные математические выкладки, описаны алгоритмы и результаты экспериментов. Автореферат даёт достаточное представление о научной новизне, теоретической и практической значимости выполненного исследования. Степень разработанности темы обоснована ссылками на труды ведущих отечественных и зарубежных учёных. Основные научные результаты достаточно полно отражены в 60 публикациях, в т.ч. в 15 работах по перечню изданий ВАК.

7. Замечания

1) Избыточная математизация и недостаток инженерных примеров. Работа перенасыщена теоретическими выкладками (теоремы, доказательства, различительные исчисления), в то время как практические примеры, особенно в главах 2-4, часто носят иллюстративный характер (простые функции типа $y=x_1 \cdot x_2$). Не хватает демонстрации работоспособности предложенной методологии на реальных, сложных системах с высокой размерностью, где классические методы действительно дают сбой.

2) Вычислительная сложность итерационных процедур. Предложенные итерационные алгоритмы (например, поиск параметра α, алгоритмы 5.2, 5.3, 6.1) требуют многократного решения нелинейных уравнений и оптимизационных задач на каждой итерации. В диссертации не проведен сравнительный анализ вычислительной сложности предложенных методов с классическими (например, методом Монте-Карло или индексами Соболя) на примерах высокой размерности, что вызывает сомнения в их практической эффективности для «дорогих» моделей.

3) Субъективность выбора формы представления изменений. В главе 2 предложено четыре формы анализа конечных изменений (аддитивная, мультипликативная и их комбинации). Однако критерии выбора конкретной формы для той или иной прикладной задачи остаются размытыми. Этот выбор может существенно влиять на результаты ранжирования факторов, что вносит элемент субъективности, которого автор пытался избежать.

4) Ограниченность применения для смешанных факторов. Алгоритм 3.1 для смешанных (непрерывных и дискретных) факторов основан на минимизации невязки и переборе кандидатов из множества X_{cand}. При росте

числа дискретных факторов размерность этого множества растет экспоненциально. Автор не предлагает эффективных эвристик для сокращения перебора, что делает метод неприменимым для задач с большим числом категориальных признаков.

5) Недостаточная обоснованность пороговых значений. В ряде алгоритмов (например, алгоритмы 5.2, 5.3, 5.4) используются эмпирические параметры (порог λ, скорость затухания γ, доля θ). В работе не приведено строгих рекомендаций по их выбору в зависимости от свойств модели. Это снижает воспроизводимость результатов и требует от пользователя высокой квалификации для настройки алгоритмов.

6) Стоит отметить, что указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

8. Заключительная оценка о соответствии диссертации критериям, установленным для диссертации на соискание ученой степени доктора наук

Диссертация Сысоева А.С. «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям. Работа является завершённым научным исследованием, содержащим решение научной проблемы, имеющей значение для развития системного анализа и управления сложными системами. Предложенная методология анализа чувствительности по факторам на основе анализа конечных изменений представляет собой научный результат, позволяющий преодолеть принципиальные ограничения существующих методов и применимый к широкому классу моделей различной природы. Автор диссертации Сысоев Антон Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент
доктор технических наук, доцент
заведующий кафедрой информатики
ФГБОУ ВО «Уфимский университет
науки и технологий»

Воробьев
Андрей
Владимирович

14.09.2026г.

Контактная информация
Воробьев Андрей Владимирович,
научная специальность, по которой защищена докторская диссертация:
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»
Адрес: 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32
Телефон: +7 (908) 350-35-56 (добавочный 43-45)
E-mail: geomagnet@list.ru

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и дальнейшую их обработку.

Подпись Воробьева А.В. удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета
ФГБОУ ВО «Уфимский университ
науки и технологий»,
кандидат филологических наук, до Н.В. Ефименко