

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора Алексеева Владимира Витальевича
на диссертацию Сысоева Антона Сергеевича «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Актуальность темы диссертационного исследования

Развитие методов системного анализа и управления сложными системами сегодня неразрывно связано с широким применением их математических моделей. Эффективность управленческих решений, принимаемых на их основе, напрямую зависит от достоверности результатов моделирования, в частности прогнозов поведения или перехода системы из одного состояния в другое. Это обстоятельство делает этап исследования чувствительности модели к изменению входных параметров или внешних факторов необходимым. В условиях неопределённости, а также при анализе многокомпонентных систем с иерархической структурой, роль этого исследования становится определяющей для корректной интерпретации результатов моделирования.

Существующие методы анализа чувствительности, как правило, разделяются на две большие группы. Локальные методы, базирующиеся на дифференциальном исчислении, как правило, эффективны в окрестности номинальных значений и не учитывают взаимодействие факторов, влияющих на систему. Другие методы, такие, как например, метод, основанный на декомпозиции дисперсии (индексы Соболя), метод Морриса или метод дисперсионного анализа, лишены этих недостатков, но их применение сопряжено с большими вычислительными затратами, что делает их применение для сложных моделей, требующих значительных ресурсов, практически невозможным. Кроме того, применение классического подхода к анализу чувствительности моделей систем предполагает представление модели системы в виде «черного ящика», что затрудняет интерпретацию влияния факторов в системах с выраженной иерархической структурой. Диссертация Сысоева А.С. направлена на преодоление указанных ограничений. Предложенная автором методология, базирующаяся на аппарате анализа конечных изменений и теореме Лагранжа о промежуточной точке, позволяет осуществлять точное глобальное разложение влияния факторов без неразложимого остатка, обеспечивая при этом существенное снижение вычислительных затрат. В диссертации получили развитие методы планирования эксперимента, направленные на сокращение числа запусков моделей, и предложены алгоритмы анализа чувствительности для систем со смешанными и иерархическими факторами.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования определяется объективной потребностью в создании методологии, обеспечивающей анализ чувствительности модели системы при сохранении приемлемой вычислительной сложности, что остаётся открытой проблемой в современном системном анализе. Исследование проведено в рамках тематики сложившейся на-

учной школы Липецкого государственного технического университета «Вычислительная математика» и получила поддержку грантов Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований, что свидетельствует о признании значимости заявленной проблемы научным сообществом.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 268 наименований, и приложений. Работа изложена на 299 страницах, включает 36 рисунков и 24 таблицы.

Во *введении* обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также приведены сведения об апробации и внедрении результатов.

Первая глава посвящена системному анализу существующих методов исследования чувствительности моделей систем по факторам. Автором подробно описаны локальные, глобальные и скрининговые методы исследования свойств систем. На основе проведенного анализа обоснована необходимость разработки нового подхода к исследованию чувствительности моделей систем по факторам, сочетающего общность оценок и высокую вычислительную эффективность. На этой основе сформированы задачи диссертационного исследования.

Во *второй главе* изложены теоретические основы предложенного метода. Основное внимание уделено построению точного разложения общего изменения результирующего показателя на факторные составляющие на основе аппарата анализа конечных изменений. Автором введены и систематизированы различные формы представления изменений (аддитивная, мультипликативная и их комбинации). Предложен базовый алгоритм анализа чувствительности и проведено исследование его устойчивости к погрешностям входных данных, что является важным аспектом для практического применения.

В *третьей главе* развиваются методы приближенного анализа чувствительности, предназначенные для работы с функциями, заданными таблично, либо для моделей, аналитическое дифференцирование которых затруднительно. Рассмотрены способы аппроксимации производных, включая конечно-разностные схемы, интерполяционные полиномы, а также методы регуляризации для зашумленных данных. Особого внимания заслуживает разработка автором алгоритма анализа чувствительности для моделей со смешанными факторами – непрерывными и дискретными, что существенно расширяет применимость методологии.

Четвертая глава посвящена разработке метода иерархического анализа чувствительности. Автором предложены алгоритмы сквозного анализа, позволяющие проследивать влияние входных факторов на выходной показатель через все уровни иерархической системы с учётом нелинейных связей. Представлены строгие математические доказательства для аддитивной и мультипликативной форм, а также вычислительные алгоритмы определения параметров промежуточных точек.

В *пятой главе* представлено описание методов планирования эксперимента при проведении анализа чувствительности. Автором предложены оригинальные

нальные алгоритмы, обоснованность которых определена применением адаптивных методов планирования эксперимента, методов оптимального планирования, основанных на исследовании информационной матрицы градиентов в промежуточных точках. Важным обоснованным результатом является алгоритм определения интервалов чувствительности, позволяющий выявлять области значений факторов с качественно различной силой влияния на отклик.

В *шестой главе* приведено описание решения прикладных задач, таких, как моделирование и управление пропускной способностью автомагистралей, управление региональными экономическими показателями и редукция модели обнаружения аномалий в медицинских данных. Эти примеры наглядно демонстрируют универсальность и практическую ценность разработанной методологии. Необходимо отметить, что в диссертации предложен алгоритм управления конечными приращениями факторов, позволяющий решать обратные задачи путём нахождения минимально затратного набора изменений для достижения заданного целевого приращения отклика.

В *заключении* сформулированы основные результаты и выводы по диссертации.

Приложения содержат акты о внедрении и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Достоверность и научная новизна результатов

Наиболее значимыми научными результатами, полученными в диссертации и обладающими признаками новизны, являются:

Метод анализа чувствительности модели системы по факторам на основе метода анализа конечных изменений. В отличие от существующих методов, разработанный метод позволяет получать точные оценки чувствительности для конечных (в том числе значительных) изменений факторов, полностью устраняя проблему неразложимого остатка.

Класс методов приближенного анализа чувствительности модели системы с использованием метода анализа конечных изменений и аппроксимированных усредненных коэффициентов влияния.

Алгоритм анализа чувствительности для систем со смешанными факторами, обеспечивающий единое количественное разложение вклада непрерывных и дискретных переменных.

Метод иерархического анализа чувствительности моделей многоуровневых систем, отличающийся учётом структурных связей и нелинейных взаимодействий между уровнями системы и построенной на этой основе процедурой декомпозиции общего изменения выходного показателя целевой функции по входным факторам.

Класс адаптивных методов планирования эксперимента анализа чувствительности модели системы к изменению факторов, отличающийся процедурой автоматической концентрации точек плана в областях высокой вариации отклика, что сокращает количество вычислений моделей системы

Класс оптимальных методов планирования эксперимента, отличающийся применением критерия максимизации информативности градиентов в проме-

жуточных точках плана, что позволяет значительно сократить количество вычислительных экспериментов (запусков модели).

Алгоритм определения интервалов чувствительности модели системы, отличающийся процедурой автоматического выявления диапазона значений факторов, в которых чувствительность модели к их изменению качественно изменяется, что важно для выделения рабочих диапазонов и пороговых значений факторов.

Алгоритм управления конечными приращениями факторов, отличающийся итеративной интеграции применения методов анализа конечных изменений и условной оптимизации при поиске оптимального набора изменений факторов для заданного достижения заданного приращения отклика модели системы.

Таким образом, представленные в диссертации теоретические положения и решения образуют внутренне согласованную методологию, охватывающую все ключевые этапы анализа чувствительности модели системы к изменению факторов – от точного глобального разложения влияния конечных изменений до практического решения прикладных задач.

Достоверность полученных в работе научных результатов и выводов обеспечивается строгим использованием аппарата системного анализа, математического анализа, теории вероятностей и методов оптимизации. Теоретические положения, такие как теоремы о разложении приращений и условия сходимости алгоритмов планирования, обоснованы математическими доказательствами.

Важным свидетельством достоверности результатов является их успешная апробация при решении практических задач в различных предметных областях: управление транспортными потоками (Управление Госавтоинспекции УМВД России по Липецкой области), управление региональными экономическими показателями (Министерство экономического развития Липецкой области), анализ медицинских данных (Территориальный фонд обязательного медицинского страхования Липецкой области). Сравнительный анализ полученных оценок чувствительности с классическими методами (индексы Соболя, метод Морриса, алгоритм Гарсона) на тестовых примерах также подтверждает корректность разработанного подхода.

По теме диссертации опубликованы 15 статей в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных в Перечне ВАК РФ, 16 статей в базах WoS и Scopus, а также другие работы, в том числе получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты, представленные в диссертации, прошли широкую апробацию на представительных международных и всероссийских конференциях.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в системном развитии методологии оценки качества создаваемых моделей система и анализа чувствительности модели системы, в частности, на основе математического аппарата анализа конечных изменений. Это позволяет преодолевать принципиальные ограничения классических методов оценки чувствительности модели системы, основанных на линеаризации, обеспечивается точное глобаль-

ное разложение влияния факторов без неразложимого остатка. Синтезированы новые классы методов, интегрирующих этот аппарат в теорию планирования эксперимента, задачи оптимизации и подходы к анализу и синтезу сложных систем.

Результаты, представленные в диссертации, имеют высокую **практическую значимость**. Разработанные методы и алгоритмы доведены до уровня программного обеспечения, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Практическая значимость результатов исследования также заключается в создании инструментальной базы для количественной оценки влияния факторов на модель системы, позволяющей существенно сократить вычислительные затраты по сравнению с классическими методами анализа моделей систем и оценки чувствительности в частности. Предложенные алгоритмы позволяют обосновывать управленческие решения в транспортной и экономической сферах, оптимизировать структуру моделей, исключая малозначимые факторы, и строить интерпретируемые экспертные системы на основе продукционных правил. Метод редукции модели, разработанный для задачи обнаружения аномалий в медицинских данных, доказал свою эффективность, сократив размерность признакового пространства на 56 % при сохранении точности классификации, что критически важно для систем больших данных. Практическая значимость результатов исследования Сысоева А.С. подтверждается еще и тем, что они внедрены в деятельность различных учреждений и организаций, учебный процесс вуза.

Диссертация написана на высоком научно-методическом уровне. Изложение материала отличается логичностью и строгостью. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и характеризует результаты проведенного Сысоевым А.С. исследования.

Рекомендации и замечания по диссертации

При общей высокой положительной оценке работы, следует сделать некоторые рекомендации и отметить замечания:

1. Формулировка научной проблемы не в полной мере отражает, в явном виде, выявленное автором противоречие между необходимостью повышения точности оценок чувствительности моделей систем к изменениям, как параметров элементов системы и связей между ними, так и внешних факторов, и ограничениями существующих моделей и методов анализа чувствительности сложных систем, не всегда позволяющими применять их к широкому классу моделей гетерогенных систем.

2. В алгоритме 2.1 (с. 91) для анализа малых конечных изменений неявно предполагается, что все факторы претерпевают ненулевые приращения. Однако в реальных прикладных задачах нередки ситуации, когда часть входных переменных остаётся фиксированной. В таких случаях вклад фактора тождественно равен нулю, а параметр промежуточной точки α определяется по подмножеству изменяющихся переменных. В этой связи в диссертации не рассматривается вопрос о том, каким образом следует корректно исключать неизменные факторы из уравнения баланса и как это влияет на процедуру поиска α , хотя данный случай представляет значительный практический интерес.

3. Автор предлагает использовать регрессионные модели со взаимодействиями для аппроксимации таблично заданных функций. Однако при увеличении числа факторов d и порядка взаимодействия k число коэффициентов модели растёт экспоненциально ($C(d,k)$), что приводит к проблеме переобучения, особенно для ограниченных выборок. В диссертации не приведены рекомендации по выбору максимального порядка взаимодействия в зависимости от объёма доступных данных и числа факторов.

4. В алгоритме 3.1 для дискретных факторов используется конечно-разностный аналог производной, что приводит к переходу от точного уравнения Лагранжа к задаче минимизации невязки (формула 3.63). При этом остаётся неясным, как интерпретировать полученную минимальную невязку – как характеристику качества аппроксимации или как систематическую погрешность метода. Данный вопрос требует пояснения, поскольку влияет на достоверность оценок чувствительности для систем со смешанными факторами.

5. В пункте 2.6 диссертации проведён анализ устойчивости метода анализа чувствительности к погрешностям входных данных для одноуровневой системы. Однако для иерархических систем погрешности на нижних уровнях могут накапливаться и усиливаться при переходе на вышележащие уровни. Было бы целесообразно привести оценки того, как погрешности определения параметров α на нижнем уровне влияют на точность оценок вкладов факторов в итоговый показатель.

6. Интервалы чувствительности строятся на основе локальных оценок градиента, которые очень чувствительны к шуму в данных. В диссертации не анализируется, как уровень шума влияет на границы интервалов и на классификацию уровней чувствительности, и не предлагаются способы робастного оценивания интервалов при наличии шума.

7. В пункте 6.1 для описания пропускной способности используется распределение Вейбулла. Однако в тексте отсутствует обоснование выбора именно этого распределения. Стоило бы провести сравнение с другими распределениями (например, логнормальное, гамма-распределение). Также не приведены результаты проверки гипотезы о согласии эмпирических данных с распределением Вейбулла (например, критерий Колмогорова-Смирнова).

Указанные рекомендации и замечания не ставят под сомнение научную новизну, теоретическую и практическую значимость результатов диссертации Сысоева А.С., их достоверность, а связаны с критическим ее рассмотрением.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук

Диссертация Сысоева А.С. «Методология анализа чувствительности по факторам математических моделей сложных систем» обладает внутренним единством, является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, содержит решение научной проблемы создания теоретически обоснованной и практически реализуемой методологии глобального анализа чувствительности по факторам для широкого класса математических моделей, характеризующихся сложной структурой и высокой вычислительной сложностью, имеющей существенное значение для развития ме-

« 10 » сентября 2026 г.

Действительный член РАЕН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

В.В. Алексеев

Почтовый адрес (рабочий): Российская Федерация. 392000, г. Тамбов, ФГБОУ ВО «ТГТУ», ул. Советская, д.106/5, помещение 2. Телефон рабочий: +7 (4752) 63-13-58. Эл. почта: is.tstu@mail.ru, vvalex1961@yandex.ru, Официальный сайт организации: <https://www.tstu.ru/>

