

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Башкирцевой Ирины Адольфовны
“Нелинейные стохастические системы в зонах порядка и хаоса:
математическое моделирование, анализ и управление”,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 05.13.18 - Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Башкирцевой Ирины Адольфовны посвящена разработке новых методов математического моделирования, анализа и управления стохастическими режимами нелинейных систем со сложной динамикой, а также решению на их основе ряда актуальных прикладных задач.

Необходимость решения подобных проблем связана с широким спектром стохастических нелинейных явлений, возникающих в последнее время в физике, химии, нейродинамике, биологии и экологии. К таким явлениям можно отнести относительно недавно открытые эффекты с конструктивной ролью шума: стохастический резонанс, резонансную активацию, повышение шумом устойчивости системы, броуновские моторы. Для изучения динамического поведения сложных систем с успехом применяется универсальный математический аппарат, использующий бифуркационный анализ и теорию устойчивости. Однако любая реальная система функционирует под воздействием внешних случайных возмущений и внутренних шумов, последние из которых, как правило, принципиально неустранимы. Следует отметить, что за последние пятьдесят лет для нелинейных динамических систем с шумовыми возмущениями различной негауссовой природы, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями в обыкновенных или частных производных, разработаны мощные функциональные методы статистического анализа, не требующие применения аппарата теории марковских случайных процессов, но которые, однако, оказываются эффективными лишь для достаточно простых систем. В силу вышесказанного, стохастическое поведение нелинейных систем со сложной динамикой остается пока малоизученным даже для относительно слабых случайных воздействий и требует разработки адекватных математических подходов, алгоритмов и программ. Несомненно, актуальной остается и задача разработки конструктивных методов управления сложными режимами таких нелинейных систем. Все эти обстоятельства однозначно свидетельствуют об **актуальности темы диссертационной работы.**

Диссертация изложена на 388 страницах, включающих 208 рисунков, и состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 341 наименований.

Во Введении обоснована актуальность избранной темы научного исследования, сформулирована цель и результаты диссертационной работы, указана их научная новизна. Введение также содержит основные положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации полученных результатов.

Первую главу можно рассматривать в качестве основного математического базиса дальнейших исследований, поскольку в ней развивается аппарат приближенного отыскания вероятностных распределений переменных нелинейных стохастических систем достаточно общего вида с дискретным временем вблизи их притягивающих состояний. Сначала применяется линейное приближение для анализа нелинейной динамики малых отклонений случайных состояний системы от равновесия и получено уравнение для матрицы вторых моментов. Доказана теорема, дающая спектральный критерий существования ее устойчивого равновесия. Эта матрица используется для построения стационарного вероятностного распределения решений в гауссовой аппроксимации. Полученные результаты применяются затем к исследованию стохастической чувствительности равновесного состояния системы к воздействию малых шумов. Далее аналогичный анализ проводится для системы с детерминированным аттрактором в форме экспоненциально устойчивого k -цикла. Теория стохастической чувствительности в разделе 1.3 распространяется автором на осцилляционный аттрактор, задаваемый замкнутой инвариантной кривой, а в разделе 1.4 – на одномерные дискретные системы с однокусочными и многокусочными хаотическими аттракторами, а также на двумерные системы. Из результатов первой главы я бы отметил введенное диссертантом важное понятие стохастической чувствительности состояний нелинейной динамической системы и наглядную иллюстрацию общих теоретических положений на простых примерах.

Дальнейшее развитие аппарата выполнено во **второй** главе, посвященной анализу стохастической чувствительности состояний равновесия нелинейных динамических систем в непрерывном времени, моделируемых дифференциальными уравнениями Ито с цветными шумовыми возмущениями (раздел 2.1.3). В частности показано, что стохастическая чувствительность равновесного состояния существенно зависит от времени корреляции воздействующих шумов. В разделе 2.2.4 изучается

стохастическая чувствительность циклов, генерируемых периодическими возмущениями. Эта теория эффективно применяется к динамике популяций для анализа механизмов вымирания при наличии периодических изменений размера экологической ниши. Из результатов второй главы диссертации можно выделить полученные явные соотношения для стохастической чувствительности нелинейных осцилляторов и найденную автором зону резонансных значений времени корреляции, в который исследуемый осциллятор переходит в режим возбуждения.

В богато иллюстрированной **третьей** главе диссертации результаты двух предыдущих глав применяются к исследованию стохастических переходов и бифуркаций “порядок-хаос” и “хаос-порядок” в нелинейных динамических системах. Так в разделе 3.1.1 на примере модели климатической динамики с помощью матрицы стохастической чувствительности проводится диагностика индуцированных шумом переходов между сосуществующими состояниями равновесия. Если в разделе 3.1.2 возможность стохастических переходов между равновесием и предельным циклом демонстрируется на осцилляторе Ван-дер-Поля с жестким режимом возбуждения, то в разделе 3.1.3 на основе аналогичной техники проиллюстрированы индуцированные шумом переходы между хаотическим аттрактором и равновесием на примере модели с кубической нелинейностью и дискретным временем. Наконец, в разделе 3.1.4 метод стохастической чувствительности применяется к анализу переходов между сосуществующими циклами в известной модели Лоренца. Далее проведено исследование обратных стохастических бифуркаций и трансформаций от порядка к хаосу, а также явлений генерации новых аттракторов вследствие стохастического возбуждения и индуцированных шумом сдвигов вероятностных распределений на примерах дискретных и непрерывных систем. Здесь я бы выделил обнаруженное диссертантом в разделе 3.3.3 новое явление, обусловленное воздействием шума, - генерацию фантомного аттрактора.

В **четвертой** главе диссертации решаются задачи управления стохастическими режимами в нелинейных динамических системах в условиях полной и неполной информации. Ее целью является формирование желаемых вероятностных характеристик с помощью синтеза задаваемой стохастической чувствительности. В разделе 4.1 решаются задачи построения регуляторов в дискретных системах, сформулированные в виде ряда теорем, а в разделе 4.2 – задачи синтеза стохастической чувствительности в нелинейных системах с непрерывным временем. Так, в разделе 4.2.8 показано, что общие теоретические результаты по управлению

стохастической чувствительностью аттракторов могут быть применены для структурной стабилизации и подавления хаоса.

Наибольший практический интерес, на мой взгляд, представляют результаты **пятой** главы, где разработанный математический аппарат применяется для решения ряда актуальных задач из различных областей естествознания: стохастических эффектов в потоках сложной жидкости (раздел 5.1), стохастического варианта модели проточного химического реактора (раздел 5.2), кинетики гликолиза в присутствии случайных возмущений (раздел 5.3), индуцированных шумом явлений в нейронной динамике на моделях Рулькова, Фитцхью-Нагумо, Ходжкина-Хаксли (раздел 5.4), концептуальных моделей динамики популяций, где решаются задачи предотвращения индуцированного шумом вымирания (раздел 5.5), стохастической динамики геофизических процессов – трехмерной климатической модели и модели вулканической активности (раздел 5.6).

В последнюю **шестую** главу диссертации вынесено описание комплексов программ, реализующих разработанные численные процедуры и алгоритмы и позволяющие эффективно применять методы моделирования и управления нелинейными динамическими системами. Этот комплекс программ является необходимым контентом специальности, по которой защищается диссертация.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается статистической корректностью применяемого математического аппарата, содержащего доказательства ряда теорем. Достоверность большинства результатов численного моделирования следует из их стыковки с ранее полученными в литературе результатами, а также из удовлетворительного совпадения с выполненными теоретическими расчетами и результатами, полученными другими численными методами.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы косвенно подтверждается достаточно высокой библиографической цитируемостью публикаций соискателя, их количеством (154 – в базе Web of Science) и, как следствие, высоким (для отечественных ученых) индексом Хирша автора – 21. В диссертации разработана универсальная методика математического моделирования и анализа стохастических явлений в дискретных и непрерывных нелинейных системах со сложной динамикой. Полученные в работе результаты позволяют, с одной стороны, глубже понять общие закономерности, присущие индуцированным шумами переходам и бифуркациям в таких системах, а, с другой, имеют неоспоримое прикладное значение для решения актуальных задач современного естествознания.

В то же время, по диссертационной работе имеется ряд замечаний.

1) В первых двух главах предложены методы исследования стохастической чувствительности устойчивых аттракторов динамических систем в предположении малости воздействующих шумов и флуктуаций динамических переменных, когда можно ограничиться изучением матрицы вторых моментов. Очевидно, что статистика флуктуаций становится принципиально важной при анализе поведения траекторий системы вблизи бифуркационных значений параметров. Хотелось знать, как в этой ситуации проводить ее корректный статистический анализ?

2) Во второй главе в разделе 2.2.1 диссертации проводится анализ чувствительности детерминированного цикла на основе рассмотрения стохастических дифференциальных уравнений с мультипликативными шумами, понимаемых в смысле Ито. Однако, как известно, существует и другая интерпретация стохастического интеграла - в смысле Стратоновича. В диссертации, к сожалению, не обсуждается целесообразность выбора того или иного представления.

3) В разделах 3.2.1 и 3.2.2 третьей главы диссертационной работы на примере дискретных и непрерывных моделей изучаются индуцированные шумами переходы между отдельными частями сложного аттрактора, которые автор называет обратными стохастическими бифуркациями. В работе не уточняется, можно ли обнаруженный эффект трактовать как "упрощение" шумом динамики сложной системы?

4) В двумерной модели течения жидкости в разделе 5.1 теоретически обнаружена узкая зона сверхвысокой чувствительности автоколебаний, наличие которой соискателю не удалось подтвердить численным моделированием. Непонятно, стоит ли верить этому эффекту, открытому на "кончике пера"? Нет ли тут выхода за рамки применяемых приближений?

5) В качестве пожелания считаю необходимым отметить, что диссертационную работу могло бы обогатить рассмотрение в рамках используемых приближений влияния на стохастическую чувствительность нелинейной системы негауссовых шумов с финитным вероятностным распределением (пуассоновские случайные последовательности, телеграфный шум и пр.), в которых исключаются большие выбросы.

Указанные замечания носят, скорее, характер пожеланий и не снижают ценности проведенных исследований и общего хорошего впечатления от диссертационной работы.

В заключение следует отметить, что представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием на актуальную тему. В диссертации автором разработаны теоретические положения и комплекс программ для численного моделирования и исследования стохастической чувствительности дискретных и непрерывных нелинейных систем, совокупность которых следует квалифицировать как **научное достижение**. Сложность решенных задач свидетельствует о высоком уровне квалификации автора в области математического моделирования поведения нелинейных стохастических систем с богатой динамикой. Получено множество новых и интересных результатов. Приведены свидетельства о регистрации разработанных автором программ, использованных при выполнении работы. Основные результаты диссертации достаточно полно представлены в почти 50-ти публикациях в ведущих отечественных и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК, и докладами на многочисленных российских и зарубежных научных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует требованиям п.9 "Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ" и паспорту специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор Башкирцева И.А. несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского",
заведующий кафедрой "Математические методы в радиофизике"

Дубков Александр Александрович

22.10.2020г.
Почтовый адрес:
603009 Нижний Новгород, ул. Вологодина 3, 61
Телефон: (831)4656886
Электронный адрес: dubkov@rf.unn.ru

Подпись А.А. Дубкова заверяю



Александр Александрович Дубков

uf