

Отзыв официального оппонента о диссертационной работе

Башкирцевой Ирины Адольфовны

«Нелинейные стохастические системы в зонах порядка и хаоса:
математическое моделирование, анализ и управление»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

В настоящее время исследование сложных систем при помощи математического моделирования активно применяется не только в традиционных физических и технических областях, но и в науках о живом. Модели живых систем отличаются существенной нелинейностью и высокой чувствительностью к изменению параметров, обеспечивающей возможность переключения между устойчивыми режимами функционирования системы, а в ряде случаев переходы от порядка к хаосу. Случайные возмущения являются естественным атрибутом живых систем, что также требует разработки и применения специального аппарата для их исследования. Создание нелинейных динамических моделей, учитывающих стохастическую природу процессов, разработка методов их анализа, компьютерная реализация и применение разработанных методов для получения новых знаний о поведении систем в различных областях естествознания, т.е. весь комплекс задач, решаемых в данной диссертационной работе является несомненно актуальной.

В данной диссертационной работе представлены результаты цикла исследований по разработке и применению универсальной методики оценки функции стохастической чувствительности для анализа поведения непрерывных и дискретных систем нелинейных стохастических уравнений в областях устойчивости и неустойчивости регулярных и хаотических аттракторов. Данная методика является оригинальной, реализована в виде

комплекса программ и применена для анализа многочисленных моделей в различных областях знания, что позволило автору сформулировать методологию для обнаружения новых, индуцированных шумами режимов функционирования систем, для определения условий динамического перехода между аттракторами и переключения между регулярным и хаотическим режимами функционирования, а также разработать методы управления стохастическими системами.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Список цитируемых источников включает 341 публикацию, в основном за последние годы. Во введении дан обзор состояния исследований в данной области нелинейной динамики, демонстрирующий профессиональное владение материалом и указание на оригинальность и новизну задач, поставленных и решенных автором в рамках диссертационной работы. Материал первой главы диссертации посвящен разработке теории аппроксимации вероятностных распределений для решений нелинейных дискретных стохастических систем. Здесь последовательно рассматриваются аттракторы с усложняющейся структурой: равновесия, дискретные циклы, замкнутые инвариантные кривые, хаотические аттракторы. В формальном математическом анализе при получении спектральных критериев автор удачно использует общий подход, опирающийся на теорию положительных операторов. Получены уравнения для приближения вторых моментов распределения стохастического решения при малых шумах с использованием функции стохастической чувствительности, на ее основе предложен метод построения доверительных областей в форме эллипсоидов и полос для рассмотренных типов аттракторов.

Во второй главе диссертации изучаются непрерывные динамические модели, представленные стохастическими дифференциальными уравнениями. Автором получены новые результаты по теории стохастической чувствительности систем с цветными шумами, а также

стохастической чувствительности неавтономных систем с периодическими коэффициентами. Предложенная автором функция стохастической чувствительности задает простую аппроксимацию вероятностного распределения случайных состояний вблизи аттракторов и позволяет достаточно точно отразить пространственные особенности этого распределения.

Результаты первой и второй глав являются теоретической основой для построения методов анализа динамики систем со сложными осцилляционными режимами, представленных в третьей главе. Здесь автором изучены явления, связанные с шумом-индуцированными переходами между аттракторами разных типов, а также разработаны методы обнаружения новых аттракторов, не наблюдаемых в исходных детерминированных моделях. Особый интерес вызывают результаты автора, посвященные стохастической генерации так называемых фантомных аттракторов.

Четвертая глава посвящена решению актуальных задач управления нелинейными стохастическими системами в зонах порядка и хаоса. Конструктивный характер результатов предыдущих глав позволяет эффективно решить задачу синтеза динамических режимов с наперед заданными вероятностными характеристиками. Здесь даются алгоритмы построения регуляторов, подавляющих сложные стохастические осцилляции, в том числе хаотические.

В пятой главе разработанная теория эффективно применена для решения многочисленных практических задач, демонстрирующих широкий спектр возможных приложений разработанной теории. Среди исследованных динамических систем -- модели химической кинетики, популяционной, нейронной, климатической и вулканической динамики. Каждый пример иллюстрирует возможности использования разработанной теории при различных вариантах аттракторов в этих системах, наблюдаемых в природе

и технике. При этом выбранные примеры представляют самостоятельную ценность, являясь актуальными задачами в различных областях естествознания, а проведенный автором анализ дает новые знания о поведении этих систем. Среди результатов хотелось бы отметить исследование стохастических явлений в нейронной модели Ходжкина-Хаксли, описывающей генерацию электрического импульса в нервных клетках в рамках 4-х мерной системы дифференциальных уравнений. Несмотря на десятки работ, посвященных анализу этой классической модели, открывшей эпоху в теоретической и практической электрофизиологии, автору удалось получить теоретическое обоснование чередований фаз активности нейрона в виде переходов между состоянием покоя и высокочастотными релаксационными колебаниями потенциала (режим спайкинга) при бистабильном режиме функционирования клеток и найти параметры системы, где вариабильность межспайковых интервалов в колебательном режиме становится наибольшей. Анализ функции стохастической чувствительности, определение главных направлений, характеризующих область притяжения аттракторов, анализ расстояния в метрике Махаланобиса от аттрактора до поверхности сепаратрисы теоретически подтвердили предсказания, сделанные на основе прямого моделирования. Результаты данной главы опубликованы в высокоимпактных специализированных журналах, подтверждая их значимость и с математической точки зрения и для предметной области. Данные подходы были развиты в цикле последующих совместных работ автора с коллегами.

Для реализации разработанных в диссертации численных процедур и алгоритмов автором был разработан комплекс программ, описание которого содержится в главе 6.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты.

По диссертационной работе имеются несколько незначительных замечаний.

1) В представленных в диссертации результатах исследования моделей нейронной активности рассматривается влияние только аддитивных шумов. Позволяет ли разработанная теория охватить случай параметрических шумов и проводились ли такие исследования?

2) В диссертации описано интересное явление циклов-канардов для гликолитической модели Селькова, нейронных моделей Рулькова и Фитцхью-Нагумо, популяционной модели Траскотт-Бриндли. При значении параметра, отвечающем такому канардовскому взрыву, система становится суперчувствительной к шуму. Какими изменениями в стохастической динамике это сопровождается? Можно ли эти изменения изучать в терминах стохастических Р-бифуркаций?

3) В главе 5 при описании используемых моделей из разных областей естествознания можно было более явно отразить элементы новизны постановок задач и полученных результатов.

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

Диссертация И.А. Башкирцевой является самостоятельной и завершённой исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Содержание работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Полученные в диссертации результаты являются новыми и существенными для научной области исследований. Научные положения и выводы являются обоснованными. Диссертационную работу можно квалифицировать как научное достижение, состоящее в разработке нового направления в анализе нелинейных стохастических систем.

Основные результаты диссертации представлены докладами на научных конференциях и полностью отражены в публикациях автора, среди которых можно отметить 49 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных высокоимпактных научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, а также 11 программ для ЭВМ, получивших свидетельства о регистрации.

Таким образом, по степени новизны, обоснованности и достоверности полученных научных положений, выводов и рекомендаций, актуальности темы диссертационного исследования и практической значимости полученных результатов диссертационная работа «Нелинейные стохастические системы в зонах порядка и хаоса: математическое моделирование, анализ и управление» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор Башкирцева Ирина Адольфовна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующая лабораторией математической физиологии,
директор ФГБУН «Институт иммунологии и физиологии»
Уральского отделения РАН

 Соловьева Ольга Эдуардовна

05.11.2020

Почтовый адрес:

620049 г. Екатеринбург, ул. Первомайская, д.106

Электронный адрес: o.solovyova@iip.uran.ru

Подпись О.Э. Соловьевой заверяю

