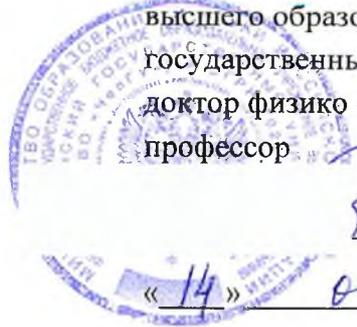


УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе  
федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Челябинский  
государственный университет»,  
доктор физико - математических наук,  
профессор



В.Д. Бучельников

« 14 » 2018 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

на диссертацию Слепухиной Евдокии Сергеевны

«Математическое моделирование и анализ стохастических феноменов нейронной динамики»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Диссертационная работа Слепухиной Евдокии Сергеевны посвящена исследованию стохастических феноменов в нелинейных динамических системах, моделирующих нейронную активность.

Случайные возмущения присущи функционированию реальных систем самой различной природы. Одним из центральных вопросов в исследованиях в области стохастической динамики является анализ взаимодействия нелинейности и стохастичности. Теоретические исследования нелинейных систем сформировали современную теорию бифуркаций, предполагающую изучение аттракторов как регулярных, так и хаотических. В настоящее время в изучении связи нелинейность – стохастичность интерес исследователей смещается в сторону более глубокого изучения стохастичности. Известно множество примеров того, что в нелинейных системах случайные возмущения могут порождать принципиально новые режимы динамики, не имеющие аналогов в детерминированных системах, что позволяет говорить о шуме не только как о неустранимой помехе, но и как об организующем факторе. К таким явлениям относят стохастический резонанс, когерентный резонанс, индуцированные шумом переходы, взаимные трансформации порядок-хаос, стохастическую синхронизацию и другие.

Важно отметить, что основным методом исследования стохастических явлений до сих пор остается прямое численное моделирование, требующее больших затрат вычислительных ресурсов и машинного времени. Поэтому актуальной задачей является разработка новых аналитических методов исследования стохастических феноменов.

В диссертационной работе Слепухиной Е. С. развиваются и разрабатываются новые методы исследования стохастических феноменов в нелинейных системах, моделирующих

нейронную активность, и проводится их апробация на нескольких конкретных моделях. Проводится комплексное исследование вероятностных механизмов возникновения различных стохастических явлений в связи с типами бифуркаций в исходных детерминированных системах.

Диссертация Слепухиной Е. С. состоит из введения, шести глав основного содержания, заключения и списка цитируемой литературы из 102 наименований. Общий объем диссертации составляет 159 машинописных страниц, включая 97 рисунков и 1 приложение.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов. В последующих главах диссертационной работы изложен оригинальный материал.

Первая глава посвящена теоретическим основам вероятностного анализа стохастических систем. В ней приведено изложение методов функции стохастической чувствительности и доверительных областей и разработаны новые методы и алгоритмы анализа стохастических явлений применительно к моделям нейронной активности. Автор связывает возникновение индуцированных шумом феноменов в нейронных моделях со стохастической чувствительностью аттракторов и особенностями геометрии фазового портрета детерминированной системы, такими как наличие в фазовом пространстве сепаратрис и псевдосепаратрис, определяющих различные режимы динамики. Предложенные в диссертации методы учитывают эти свойства рассматриваемых систем.

В следующих четырех главах автор демонстрирует эффективное применение разработанных методов для исследования вероятностных механизмов стохастических феноменов в четырех моделях нейронной активности, проявляющих различные типы детерминированных бифуркаций.

Во второй главе изучается влияние шума на двумерную модель Моррис-Лекара. Рассматриваются различные зоны параметров исходной детерминированной системы вблизи жесткой бифуркации Андронова-Хопфа, седло - узловой на инвариантной кривой, седло-узловой бифуркации предельных циклов. Показывается, что в моностабильных зонах с устойчивым равновесием под действием шума в системе генерируются мультимодальные колебания. С помощью метода доверительных эллипсов проводится анализ причин возникновения этого явления, и находятся оценки пороговых значений интенсивности шума, приводящего к генерации мультимодальных колебаний. В параметрической зоне бистабильности исследуется явление индуцированных шумом переходов между предельным циклом и равновесием и проводится анализ этого феномена с помощью метода доверительных областей. Также для этой модели проводится сравнение воздействия на систему аддитивного и параметрического шума и показывается, что при параметрическом шуме рассматриваемые стохастические феномены происходят при меньших значениях интенсивности возмущений.

В третьей главе исследуются вызванные шумом феномены в двумерной модели Хиндмарш-Роуз. Проводится анализ стохастической генерации мультимодальных колебаний в зоне устойчивого равновесия детерминированной системы вблизи гомоклинической бифуркации влипания предельного цикла в петлю сепаратрисы седла. Изучается явление индуцированных шумом переходов между аттракторами в параметрических зонах

сосуществования предельного цикла и равновесия, а также двух равновесий. С помощью старшего показателя Ляпунова изучается связь этих стохастических явлений с индуцированной шумом хаотизацией системы. Обнаружено, что в этой модели происходят различные типы переходов от порядка к хаосу под действием шума. С помощью предложенных методов, основанных на технике функций стохастической чувствительности, анализируются эти явления и находятся критические значения интенсивности шума, которые хорошо согласуются с результатами прямого численного моделирования.

В четвертой главе рассматривается трехмерная модель Хиндмарш-Роуз. Воздействие шума изучается в различных параметрических зонах вблизи таких бифуркаций детерминированной системы, как бифуркации удвоения и добавления периода, бифуркация Неймарка-Сакера рождения инвариантного тора. Изучается феномен вызванных шумом переходов от унимодальных (спайковых) колебаний к мультимодальным (берстовым) колебаниям в различных вариантах. Обнаружено новое стохастическое явление генерации тора в параметрических зонах, где аттрактором детерминированной системы является предельный цикл или устойчивое равновесие. Показывается, что эти явления сопровождаются индуцированной шумом хаотизацией системы. Эти явления автор интерпретирует как стохастические P- и D-бифуркации. Для анализа этих явлений применяются новые разработанные методы с конструированием доверительных областей и нахождением сепаратрис (псевдосепаратрис).

В пятой главе на основе двумерной модели ФитцХью-Нагумо изучается новое необычное явление расщепления стохастического цикла, наблюдаемое в зоне так называемых предельных циклов-канардов. Показывается, что данное явление характеризуется как перемежаемостью колебаний больших и малых амплитуд, так и частотным расщеплением. Автор расценивает это как особый тип стохастической P-бифуркации. Показывается, что в этом случае шум также приводит к хаосу в системе, что интерпретируется как стохастическая D-бифуркация. Проводится анализ этого феномена с помощью метода доверительных полос. Находятся оценки порогового уровня шума.

В шестой главе описываются программные комплексы, разработанные автором для исследования стохастических феноменов в рассматриваемых системах. Приводятся используемые технологии, состав программных комплексов, функциональные возможности, примеры работы.

В заключении подведены итоги диссертационной работы, сформулированы основные результаты и возможные направления для продолжения исследований по тематике диссертации.

Достоверность результатов диссертационной работы обуславливается строгостью используемого математического аппарата. Также отмечается, что результаты, полученные с помощью разработанных теоретических методов, согласуются с данными компьютерного моделирования, а корректность и эффективность разработанных методов и программных комплексов протестированы на модельных примерах и подтверждены результатами численных экспериментов. Один из разработанных программных комплексов прошел процедуру государственной регистрации.

Важно отметить, что разработанные в диссертационной работе и апробированные при решении различных задач методы исследования стохастических феноменов могут быть эффективно использованы при изучении других моделей нейронной активности.

Проведенные в диссертационной работе научные исследования могут представлять интерес для весьма широкого круга специалистов, занимающихся изучением новых стохастических явлений в сложных нелинейных системах. Содержание работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. В обзоре литературы недостаточно полно написано об исследованиях российских ученых в области стохастической нейродинамики. Следовало бы упомянуть, например, работы Некоркина В. И., Макарова В. А. и соавторов.

2. Обзор аналитических методов нахождения вероятностных характеристик стохастических аттракторов недостаточно подробный; в работе упоминается только подход, основанный на аппроксимации стационарной плотности распределения с помощью квазипотенциала.

3. В главе 2, в разделе 2.1 описываются две зоны бистабильности детерминированной системы Моррис-Лекара (для двух наборов значений параметров). При изучении стохастической системы рассматривается только одна зона бистабильности (раздел 2.2.2). Изучалось ли влияние шума на систему в другой зоне бистабильности? Будут ли там также наблюдаться индуцированные шумом переходы между предельным циклом и равновесием и будет ли отличаться механизм этих переходов от случая, рассмотренного в разделе 2.2.2?

4. В главе 4, в разделе 4.1 недостаточно подробно описана бифуркационная диаграмма трехмерной модели Хиндмарш-Роуз. Как именно происходят бифуркации добавления периода циклов?

5. На стр. 79, абзац 3, написано: «При переходе через точку  $I_0$  в результате седло-узловой бифуркации рождается пара предельных циклов – устойчивый и неустойчивый.» Почему на рис. 4.1.1, на котором изображена бифуркационная диаграмма, не показан неустойчивый предельный цикл?

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

В целом, работа имеет высокую научную и практическую значимость. Диссертация Слепухиной Е.С. выполнена на высоком уровне и является законченным научным исследованием в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Полученные в диссертации результаты являются новыми и интересными. Научные положения и выводы являются обоснованными. Основные результаты диссертации представлены докладами на научных конференциях и хорошо отражены в публикациях автора, среди которых можно отметить 11 статей в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ и рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Автореферат и опубликованные работы в достаточной мере отражают содержание работы.

Таким образом, по степени новизны, обоснованности и достоверности полученных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, актуальности темы диссертационного исследования, практической значимости полученных результатов диссертация Слепухиной Евдокии Сергеевны полностью удовлетворяет всем требованиям п. 9 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв одобрен и принят на заседании кафедры теории управления и оптимизации  
10 мая 2018г., протокол № .13

Отзыв на диссертационную работу подготовил

Заведующий кафедрой теории управления и оптимизации,  
д. ф.-м. н., профессор  
05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

 Ухоботов Виктор Иванович

Почтовый адрес:  
454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129  
Телефон: (351) 799-72-28  
Электронный адрес: [ukh@csu.ru](mailto:ukh@csu.ru)

Подпись В. И. Ухоботова заверяю

  
 Специалист по кадрам  
В.И. Акутина  
14.05.2018