

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Масленникова Олега Владимировича «Коллективная динамика и функциональные свойства обучаемых нелинейных сетей активных элементов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Диссертационная работа О.В. Масленникова затрагивает одну из центральных проблем современной нелинейной науки — выяснение того, каким образом процесс обучения перестраивает динамику многоэлементной нелинейной системы и наделяет её способностью выполнять предписанные вычислительные функции. Тематика работы лежит на пересечении нескольких быстро развивающихся областей: теории нелинейных колебаний и волн, вычислительной нейронауки и нейроморфных технологий. Каждая из этих областей порождает свой круг задач, однако все они нуждаются в едином физическом языке, позволяющем связать свойства отдельных активных элементов, топологию их соединений и алгоритм настройки параметров с результирующим коллективным поведением. Именно разработке такого языка — на базе понятий и методов радиофизики — и посвящена рецензируемая диссертация.

Актуальность темы. Нелинейные сети, способные обучаться, давно перестали быть предметом интереса исключительно специалистов по машинному обучению. Рекуррентные нейронные сети используются сегодня в качестве моделей нейронных структур мозга, а физические реализации резервуарных вычислителей на осцилляторных, мемристивных и оптических элементах становятся основой нового поколения энергоэффективных процессоров. При этом вопрос о внутренних динамических механизмах, обеспечивающих работоспособность таких систем, остаётся в значительной мере открытым. Диссертация О.В. Масленникова предлагает рассматривать обучение как управляемую перестройку фазового пространства — рождение и уничтожение аттракторов, трансформацию бассейнов притяжения, организацию переходных траекторий. Такая трактовка превращает задачу обучения в задачу нелинейной динамики и делает её доступной аппарату бифуркационного анализа, теории показателей Ляпунова и топологических методов. Присуждение Нобелевской премии по физике 2024 года за работы, связанные с физическими основами нейронных сетей, лишний раз подчёркивает своевременность избранного направления исследований.

Обоснованность научных положений. Работа построена так, что каждое из девяти защищаемых положений опирается на собственную доказательную базу, а весь массив результатов образует внутренне непротиворечивую систему.

Для утверждений о хаотической бёрстовой динамике одиночных дискретных элементов (положения 1, 2) автор выстраивает полноценную аналитическую конструкцию: доказывает существование инвариантной области в фазовом

пространстве быстро-медленного отображения, получает явную оценку старшего показателя Ляпунова через коэффициент заполнения и показатель быстрой подсистемы, выводит приближённое выражение для вероятности выживания переходного хаоса при периодическом воздействии на управляющий параметр. Численная проверка на модели Курбажа–Некоркина демонстрирует хорошее количественное согласие с аналитикой.

Утверждение об оптимальности топологии «малого мира» для бассейновой устойчивости синхронизации бёрстов (положение 3) подкреплено обширным вычислительным экспериментом на графах Уоттса–Строгаца. Автор варьирует все существенные параметры задачи — вероятность перестройки рёбер, плотность и силу связей, характеристики элементов, размер сети — и показывает немонотонную зависимость.

Гиперсетевая модель адаптивных ансамблей (положение 4) проверена не только численно, но и аппаратно: на программируемой логической интегральной схеме Xilinx Artix-7 реализована сеть с нейронными временными масштабами, и зарегистрированные осциллограммы воспроизводят теоретически предсказанные последовательности кластерных переключений. Такая верификация существенно повышает доверие к модели.

Механизмы формирования функциональности в резервуарных сетях (положения 5,6,7) исследованы с привлечением широкого арсенала средств: спектрального анализа эффективных матриц, персистентной гомологии, проекций на главные компоненты, прореживания весов. Важно, что ключевые закономерности — спектральные выбросы при обучении FORCE, переходные метастабильные маршруты, принцип вычислительного соответствия — воспроизводятся для нескольких принципиально различных типов активных элементов и подтверждены измерениями на физическом электронном резервуаре. Сопоставление резервуарных и полностью обучаемых архитектур проведено корректно: на единой задаче, с усреднением по множеству инициализаций.

Наконец, положения 8 и 9, касающиеся аттракторного ландшафта полностью обучаемых сетей и его зависимости от парадигмы обучения, обоснованы многоплановым анализом ансамблей из 50 сетей для каждого режима. Классификация аттракторов, популяционный анализ, информационно-теоретические метрики и разъединённые главные компоненты дополняют друг друга и рисуют согласованную картину.

В целом уровень обоснованности положений, выводов и рекомендаций диссертации следует признать высоким.

Научная новизна и достоверность. Перечислю те результаты, которые представляются наиболее значимыми с позиций теории нелинейных колебаний и пространственно-временной динамики.

Прежде всего, это описание нового механизма хаотического бёрстинга в дискретных системах. В отличие от хорошо изученных сценариев, где хаос возникает на медленном масштабе или через перемежаемость пачек, здесь хаотичность

порождается граничным кризисом быстрого аттрактора. Аналитическая формула для показателя Ляпунова физически прозрачна. Не менее интересен результат о двунаправленном управлении временем жизни переходного хаоса: автор показывает, что периодическая модуляция параметра способна как ускорять, так и замедлять выход с хаотического седла, тогда как монотонное изменение допускает лишь задержку. Карта времён жизни с мозаичной структурой и фрактальными границами сама по себе представляет красивый динамический объект.

На сетевом уровне заслуживает внимания обнаруженное линейное (а не экспоненциальное, как для осцилляторов Рёсслера) убывание бассейновой устойчивости синхронизации бёрстовых элементов с ростом случайности графа. Этот факт указывает на качественно иную робастность бёрстовых ансамблей и может иметь значение для понимания устойчивости синхронных режимов в биологических нейронных сетях. Корреляция экстремумов устойчивости со скачками числа спайков в пачке — тонкое наблюдение, вскрывающее связь внутренней структуры колебания элемента с макроскопическим свойством всей сети.

Спектральный механизм формирования аттракторов при обучении резервуара методом FORCE я нахожу одним из ключевым результатов работы. Аналогия с превышением порога генерации мод в многомодовом автогенераторе не только красива, но и конструктивна: она позволяет предсказывать, какие именно собственные значения эффективной матрицы связей «выйдут» за пределы спектрального круга и какой режим при этом возникнет. Обнаруженный компенсаторный механизм — обратная зависимость дисперсии обученных весов от дисперсии активности элементов — раскрывает внутреннюю логику процедуры обучения на языке, понятном физикам.

Концепция переходного вычисления, при котором хаос в резервуаре не подавляется, а используется как ресурс для формирования детерминированных метастабильных маршрутов, меняет привычное представление о роли хаотической динамики. Принцип вычислительного соответствия, проверенный на трёх типах резервуаров, даёт практический критерий оценки качества вычислений по топологии представления. Разрешение парадокса спайкового резервуара через динамическое считывание, интерпретируемое в духе теоремы Такенса, — неожиданный и элегантный ход.

Результаты по полностью обучаемым сетям демонстрируют, что тип задачи диктует тип аттракторной архитектуры, причём эта архитектура не закладывается в модель, а возникает спонтанно в ходе оптимизации. Особенно интересно систематическое сопоставление обучения с подкреплением и обучения с учителем: при сопоставимой точности эти парадигмы порождают качественно различные фазовые портреты — гибридные аттракторы со сбалансированными конкурирующими популяциями в первом случае и преимущественно точечные аттракторы с доминирующими ансамблями во втором. Совпадение скачка производительности с бифуркацией бистабильности убедительно свидетельствует о причинной связи динамической перестройки и функционального прогресса.

Достоверность всей совокупности результатов обеспечена сочетанием строгих аналитических методов, масштабных численных экспериментов со статистическим усреднением и экспериментальной верификацией на двух аппаратных платформах. Согласованность выводов, полученных для принципиально разных моделей элементов — от дискретных отображений до непрерывных генераторов ФитцХью–Нагумо, — дополнительно укрепляет уверенность в их справедливости.

Личный вклад соискателя. О.В. Масленников является единственным или первым автором в большинстве ключевых публикаций. Три статьи выполнены единолично. Характер результатов — от аналитических доказательств до разработки оригинальной методологии анализа обучаемых сетей — однозначно свидетельствует об определяющем вкладе соискателя.

Структура и полнота работы. Диссертация выстроена как последовательное восхождение по уровням сложности: одиночный элемент → сеть без обучения → сеть с частичным обучением (резервуар) → сеть с полным обучением. Классификация одиннадцати моделей активных элементов, предложенная в первой главе, задаёт единую систему координат для всей работы. Объём (376 страниц, 95 иллюстраций) соразмерен широте охваченного материала. Автореферат точно передаёт содержание диссертации.

Замечания. При всём высоком качестве работы хочу обратить внимание на ряд моментов.

1. Автор убедительно демонстрирует спектральный механизм формирования аттракторов для метода обучения FORCE. Вместе с тем хотелось бы видеть более развёрнутое обсуждение того, насколько этот механизм универсален: сохраняется ли он при использовании иных алгоритмов настройки весов резервуара (например, градиентных) и при существенном увеличении размерности сети?
2. Принцип вычислительного соответствия сформулирован для циклических целевых сигналов. Было бы полезно обсудить, каким образом он может быть обобщён на случай аperiodических или стохастических целевых функций, которые часто встречаются в приложениях.
3. Экспериментальный электронный резервуар реализован на цепочке связанных генераторов ФитцХью–Нагумо с фиксированной линейной топологией. Представляет интерес вопрос о том, как изменятся вычислительные характеристики при переходе к другим топологиям (кольцевой, двумерной решётке) и при увеличении числа элементов до масштабов, сопоставимых с численными моделями.
4. При сопоставлении парадигм обучения (с подкреплением и с учителем) анализ проведён на задачах принятия решений с дискретным набором вариантов. Было бы интересно узнать мнение автора о том, сохранится ли качественное различие динамических стратегий для задач с непрерывным пространством действий.

Высказанные замечания носят дискуссионный характер и ни в коей мере не снижают общей оценки работы.

Заключение. Диссертация О.В. Масленникова выполнена на высоком научном уровне и содержит совокупность новых результатов, которые в полной мере могут быть квалифицированы как крупное научное достижение в области радиофизики. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Результаты работы апробированы в ведущих международных журналах и являются оригинальными. Актуальность и значимость проведённых исследований не вызывает сомнений. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.4 – радиофизика и удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а Масленников Олег Владимирович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики
Института физики Саратовского национального исследовательского
государственного университета имени Н.Г. Чернышевского


Г.И. Стрелкова

Тел. (8452) 210-710

E-mail: strelkovagi@sgu.ru

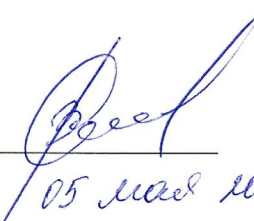
Согласен на обработку моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Подпись Г.И. Стрелковой заверяю.

Учёный секретарь СГУ,
к. полит. наук

М.П.




В.Г. Семенова
05 мая 2026 г.

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского

410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

«05»  2026 г.