

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Лобова Сергея Анатольевича на тему «Спайковые модели динамики и обучения локальных сетей нейронов мозга» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика

Разработка и исследование моделей нейронных сетей мозга относится к ряду наиболее актуальных и перспективных задач современной математической биофизики. Моделирование с помощью импульсных или спайковых нейронных сетей является одним из необходимых подходов для понимания принципов работы мозга. В свою очередь, данные принципы могут быть использованы в будущих практических приложениях, таких как «живой компьютер» на основе нейронных сетей *in vitro*, аппаратно-реализованные искусственные нейронные сети новых поколений, устройства нейроинтеграции и нейропротезирования.

Диссертационная работа С.А. Лобова посвящена систематическому применению импульсных нейронных моделей для анализа и интерпретации процессов функционирования и обучения сетей нейронов мозга, исследуемых экспериментально, и созданию на основе биофизических нейросетевых моделей действующих прототипов нейроморфных робототехнических систем и нейроинтерфейсов.

Таким образом, актуальность темы диссертации и ее соответствие специальности 1.5.2 – биофизика не вызывает сомнения.

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и список использованной литературы

Во введении диссертационной работы освещается проблематика современного моделирования нейронных сетей, приводится обоснование актуальности исследования на основе анализа степени разработанности темы, поставлена цель работы, сформулированы задачи для достижения цели, указаны достоверность и обоснованность научных результатов, их научная новизна, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту, их научная и практическая значимости, сведения о методологии исследования, личном вкладе автора, апробации работы и научных публикациях, соответствующих ее содержанию.

Первая глава посвящена разработке многокомпонентной импульсной биофизической модели нейронных сетей, экспериментально выращиваемых в условиях *in vitro*. Формулируются необходимые требования к модели и анализируется ее характеристики. Для моделирования работы элементов нейронной сети используются модели, обладающие биологической релевантностью с одной стороны и вычислительной эффективностью с другой:

модель Ижикевича, модель Цодыкса-Маркрама, модель долговременной синаптической пластичности STDP. Для соответствия многокомпонентной сетевой модели экспериментальным данным, в сети учитываются аксональные задержки и эффект гетеросинаптического ослабления.

Следует подчеркнуть, что для демонстрации ряда сетевых эффектов и их использовании в практических приложениях применяется нейроробототехнический подход. Соответственно, в первой главе описаны основные принципы сопряжения нейронных сетей с внешними роботизированными устройствами - нейроаниматами.

Исследования, освещенные **во второй главе**, главным образом сконцентрированы на анализе динамики сетевых характеристик при внешнем воздействии и основных проявлениях сетевой пластичности. Описан эффект сетевой синхронизации и предложены методы отображения пространственной гетерогенности и нейронной активности сети с помощью векторных полей, что позволило проанализировать структурно-функциональные перестройки сети, лежащие в основе сетевой синхронизации.

Предложена биофизическая модель глобальной сетевой памяти, демонстрирующая ускорение возникновения адаптивных ответов под действием повторных стимуляций. Показано, что данный эффект согласуется со «степенным законом практики», экспериментально наблюдаемом при обучении человека и животных. Интересно, что предложенная биофизическая нейросетевая модель демонстрирует свойства, схожие с известным эффектом реконсолидации памяти, свойственным животным и человеку.

Полученные результаты используются **в третьей главе** для создания модели нейрональных когнитивных карт с негативным подкреплением. Показано, что управляемый нейронной сетью робот-нейроанимат учится избегать негативных зон и способен переучиваться при изменении их локализации.

Также в третьей главе исследуется модель обобщенных когнитивных карт, работающих на основе эффектов взаимодействия фронта распространяющегося возбуждения с областями сети, подвергнутых торможению. На основании ряда теоретических и экспериментальных исследований дается более широкая трактовка функционала нейрональных когнитивных карт мозга. Последовательно и аргументированно показывается, что данные нейронные сети могут решать не только задачу навигации в пространстве, но и участвовать в любом сенсомоторном взаимодействии с внешним миром. На основе психофизического эксперимента с привлечением большого количества испытуемых показано, что скорость обучения человека в задаче классификации динамических ситуаций может определяться предварительным обучением на

основе статических ситуаций, что соответствует центральной гипотезе модели об эквивалентности статичных и динамических нейрональных когнитивных карт.

Четвертая глава преимущественно сконцентрирована на прикладных аспектах работы. В частности, здесь описаны этапы разработки нейромышечного (ЭМГ) интерфейса на основе формальных, а затем и импульсных нейронных сетей. Работоспособность интерфейса была продемонстрирована с различными исполнительными устройствами. На основе сети формальных нейронов предложен ЭМГ-интерфейс с командно-пропорциональным управлением, а также разработан ряд динамических и синтетических тестов, необходимых для оценки эффективности использования интерфейса. Результатом проведенного исследования послужило выявление основных факторов, лимитирующих работу нейромышечного интерфейса, а также предположение о характере пластических изменений, происходящих в человеческом мозге во время управления.

В качестве основы для создания биологически реалистичного ЭМГ-интерфейса использовались самоорганизующиеся нейронные карты с Хеббовским обучением. Это позволило осуществлять кластеризацию сигналов с их последующей классификацией. В качестве заключительного этапа перехода от формальных нейронных сетей к импульсным можно рассматривать предложенный способ выделения характерного признака ЭМГ-сигнала с помощью спайковых нейронов.

Пятая глава диссертации является заключительной и посвящена исследованию принципов ассоциативного обучения в импульсных нейронных сетях. К таким принципам в работе относятся Хеббовское обучение и элементы конкуренции в нейронной сети, в частности синаптическая и нейрональная конкуренция. Разработаны и исследуются две сетевые архитектуры, реализующие данные принципы в импульсных нейронных сетях с временным и частотным кодированием информации. Ассоциативное обучение демонстрируется с помощью нейроаниматного подхода на «поведенческом» уровне на примере моделей условного рефлекса и оперантного обучения.

Ассоциативное обучение также используется в основе предложенного спайкового ЭМГ-интерфейса. Нейроны, реализующие данный интерфейс способны распознавать не только совершаемое движение, но и степень усилия мышц для его совершения. Кроме того, на основе исследованных принципов ассоциативного обучения, также предложен новый метод обучения импульсной нейронной сети с учителем, в котором в качестве обратной связи используются дополнительная стимуляция обучаемых нейронов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Получен целый ряд новых интересных результатов, среди которых, наибольшее теоретическое и практическое значение имеют следующие:

- Обнаружение сетевой синхронизации в импульсной сетевой модели с локальными пластичными связями и эффекта, во многом сходного со стохастическим резонансом в нелинейных системах с шумом.

- Обнаружение в психофизических экспериментах элементов поведения системы, обусловленных включением исследованной автором модели обобщенных когнитивных карт.

- В целом, многоуровневое использование теоретических моделей в практических приложениях и в объяснении экспериментов с реальными сетями нейронов мозга.

Замечания к диссертационной работе следующие.

1. В работе отсутствует сопоставление спектральных характеристик исследуемых сетевых моделей с экспериментальными данными, полученными в условиях *in vitro* (сигнал с мультиэлектродных матриц) и *in vivo* (ЭЭГ) при исследовании живых нейронных сетей.

2. В Главе 2 не совсем понятно каким образом введенное автором векторное поле весов связей соотносится со структурой сети и начальными значениями весов связей. В частности, не исследован вопрос о том, будет ли векторное поле отличаться в разных вычислительных экспериментах с одними и теми же параметрами, и начальными условиями.

3. В работе не обсуждается возможность применения полученных при моделировании результатов в экспериментах по исследованию реальных сетей нейронов мозга.

Однако указанные замечания и вопросы носят уточняющий характер и не ставят под сомнение высокий уровень новизны и полезности работы.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих зарубежных (Journal of Advanced Research, IEEE Access, Frontiers in Neuroscience, Frontiers in Neurorobotics, Sensors) и российских (Математическая биология и биоинформатика, Физиология человека, Прикладная нелинейная динамика) специализированных научных журналах и доложены на тематических российских и международных научных конференциях. Общее количество публикаций по теме диссертации в рецензируемых журналах, входящих в

Перечень ВАК РФ – 29. По работе получен 1 патент и 7 документов на программные продукты, которые позволяют внедрять результаты работы в исследовательскую, образовательную и нейро-реабилитационную практику.

Таким образом, можно заключить, что данная диссертационная работа содержит всю необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов, которые можно квалифицировать как заметное научное достижение в области биофизики, удовлетворяет всем требованиям пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 20.03.2021), предъявляемых к докторским диссертациям, а её автор, Лобов Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук
(03.00.02 - Биофизика), профессор,
Главный научный сотрудник, руководи-
тель Отдела нейроинформатики Центра
оптико-нейронных технологий
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

Дунин-Барковский Виталий Львович

“9” ноября 2021 г.

Выражаю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук" (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН). Почтовый адрес: 117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

Телефон: +7 495 718 21 10, доб. 1746; электронная почта: wldbar@gmail.com

Подпись руки *В.Л. Дунин-Барковский* заверяю
Начальник отдела кадров *Татьяна А. Павлова*

