

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Клиньшова Владимира Викторовича
«Колебания в сложных системах с импульсными взаимодействиями»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.03 - Радиофизика

Диссертация В.В. Клиньшова посвящена исследованию динамики сложных систем, отличительной особенностью которых является импульсный характер взаимодействий. Важнейшим примером таких систем являются нейронные сети головного мозга, в которых взаимодействия между нейронами осуществляются путем обмена короткими импульсными сигналами — потенциалами действия. Изучение функционирования крупномасштабных нейронных сетей является в настоящее время одним из наиболее актуальных направлений развития науки, и радиофизический подход здесь представляется одним из наиболее эффективных. В рамках данного подхода нейронные сети мозга рассматриваются как сложные колебательные системы, в которых взаимодействие большого числа сравнительно простых элементов может приводить к формированию принципиально новых, сложных режимов коллективной активности. Именно коллективное поведение больших ансамблей взаимодействующих нейронов лежит в основе выполнения мозгом своих основных функций по хранению и обработке информации. Таким образом, теоретический анализ и разработка методов исследования динамики сложных систем с импульсными взаимодействиями представляет собой не только важную фундаментальную задачу, но также имеет существенное прикладное значение, в том числе в области нейронауки. По этой причине **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 381 странице, содержит 80 рисунков. Список литературы включает 401 наименование. Автореферат полностью соответствует содержанию работы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы работы, формулируются цели и задачи исследования, а также обсуждается научная ценность и новизна результатов, их научная и практическая значимость. Также приводятся основные положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность результатов, приводятся сведения о личном вкладе автора и апробации результатов, о структуре и объеме диссертации.

Основной темой **первой главы** является разработка новых методов, позволяющих описывать динамику колебательных систем с импульсными взаимодействиями. Тогда как описание систем со слабыми возмущениями дано в классических работах Винфри, Курамото и др., случай сильных возмущений существенно сложнее, так как не позволяет использовать

линеаризацию системы вблизи аттрактора. Результаты первой главы касаются именно случая сильных импульсных воздействий. При воздействии на колебательную систему сильных импульсных сигналов она может существенно удаляться от аттрактора или даже переходить на другой аттрактор. Разработанные в работе методы позволяют описывать данные ситуации в достаточно общем случае. Если колебательная система остается в бассейне притяжения изначального аттрактора — устойчивого предельного цикла, то введенная в работе так называемая функция фазового отклика позволяет определить фазовый отклик (величину изменения фазы) системы на действие сильного импульса. Данная функция является обобщением так называемой кривой переустановки фазы, широко применяемой в том числе для моделирования динамики нейронных колебательных систем. Если же колебательная система под действием внешнего сигнала может переключиться на другой аттрактор, для описания такой ситуации будут полезны другие численные меры, также предложенные в работе — так называемые пороги устойчивости и пороги переключения. Эти величины указывают минимальную амплитуду возмущения, способного привести к переключению системы с одного аттрактора на другой. Разработанные численные методы позволяют эффективно вычислять пороги устойчивости для широкого класса динамических систем, в том числе сетевых. Также в работе приведены многочисленные примеры применения разработанных мер для различных систем и показано, что их вычисление помогает получить важную информацию о поведении системы. Например, в сетевых системах вычисление порога устойчивости позволяет определить узлы, наиболее чувствительные к внешним воздействиям, то есть «слабые места» всей сети.

Во **второй главе** работы вводится достаточно общая модель сетевой системы с импульсными связями — многоэлементной системы, в которой подсистемы обмениваются друг с другом импульсными сигналами. Описывается метод редукции динамики такой системы к многомерному точечному отображению, которое определяет изменения состояния системы между последовательными моментами испускания или получения импульсов. Оказывается, что такой метод позволяет в ряде случаев более эффективно моделировать динамику численно, а также исследовать ее аналитически. С использованием предложенного метода проводится аналитическое исследование ряда систем с импульсными связями: автогенератора с запаздывающей импульсной обратной связью и двух автогенераторов с импульсными запаздывающими связями. Случай двух автогенераторов имеет непосредственное отношение к одной из важных задач нейродинамики, а именно к задаче о синхронизации удаленных областей мозга, время распространения сигнала между которыми соизмеримо или даже превышает характерный период колебаний в этих областях. Существует гипотеза о том, что именно синхронизация между различными участками мозга позволяет объединять отдельные признаки объекта в единый образ для его целостного восприятия. В

этом контексте чрезвычайно интересны полученные в работе результаты о синхронизации генераторов с запаздывающими связями. Показано, что синфазная, противофазная, а также кросс-частотная синхронизация генераторов может наблюдаться при величине задержки, существенно превышающей периоды колебания автогенераторов. Получены аналитические оценки для зон синхронизации в пространстве параметров, а также проведена экспериментальная проверка теоретических результатов.

Третья глава работы содержит результаты исследования коллективных колебаний в больших сетях с импульсными связями. Исследованы сети, характеризующиеся различной топологией связей, неоднородностью параметров и наличием временного запаздывания. Для сети с кольцевой структурой связи изучены фазовые вращающиеся волны, показано, что профиль таких волн можно получить, рассматривая решения вспомогательной системы из одного элемента с запаздывающей обратной связью. Для сети с глобальными связями изучены режимы полной синхронизации и обнаружены новые режимы ее разрушения. Также исследована роль неоднородности параметров узлов сети, которая может приводить к возникновению мультистабильности.

Четвертая глава является наиболее прикладной в диссертации, она посвящена исследованию динамики нейронных сетей с реалистичными структурами связей. В этой главе разработана модель связей, воспроизводящая результаты экспериментальных исследований структуры синаптических связей в реальных сетях коры головного мозга крысы, полученные в последнее десятилетие группами из США и Швейцарии. Экспериментально показано, что для этих сетей характерно несколько важных свойств: кластеризация связей, неоднородность их весов и существенная корреляция между весами и кластеризацией. Предложенная в работе сравнительно простая модель кластерной сети позволила учесть все эти свойства и понять, как они влияют на поведение сети. Для исследования динамики кластерной сети были разработаны новые методы редукции, с помощью которых она сводилась к низкоразмерной системе уравнений для усредненных переменных — средней активности кластера и соответствующей ей дисперсии. Полученные таким образом редуцированные среднеполевые модели хорошо воспроизводят динамику больших нейронных сетей, состоящих из тысяч нейронов. Они могут быть легко проинтегрированы численно, а также изучены аналитически. Исследование редуцированных моделей показало, что кластеризация связей в нейронных сетях приводит к важным последствиям для их динамики, а именно — формированию устойчивых либо метастабильных режимов повышенной локальной активности, когда часть сети генерирует потенциалы действия с частотой, существенно превышающей среднюю по сети. Такие режимы могут играть важную роль в формировании рабочей памяти, а также объяснять экспериментально наблюдаемую существенную вариабельность нейронной активности кортикальных сетей.

Завершает работу **Заключение**, в котором описаны основные научные результаты. **Научная новизна и значимость** работы определяется большим количеством полученных в ней результатов, обоснованность и достоверность которых не вызывает сомнений. К наиболее важным из них, на мой взгляд, относятся следующие:

- Предложена общая методика оценки устойчивости динамических систем к сильным внешним воздействиям, а также способ определения наиболее «опасных» направлений воздействия.

- Детально исследована синхронизация сетей колебательных элементов с запаздывающими связями, показана возможность синхронизации при большом запаздывании, изучены механизмы возникновения и разрушения синхронизации

- Предложена методика редукции динамики нейронных сетей с реалистичной структурой связей к среднеполевым низкоразмерным системам, с помощью этой методики изучены режимы повышенной локальной активности таких сетей.

Несмотря на в целом положительное впечатление от работы, она не свободна от недостатков, в связи с чем к ней имеется ряд **замечаний**:

1. Очень интересны результаты автора диссертации, касающиеся разработки новых методов, позволяющих описывать динамику колебательных систем с сильными импульсными взаимодействиями, представленные в главе 1. Автор разделяет ситуацию, когда в результате воздействия система остается на том же аттракторе, и когда система может переключиться на другой аттрактор. Полученные автором результаты подробно проиллюстрированы в результате численного моделирования различных систем. Однако, автор рассматривает влияние импульсного воздействия на системы без шума. Исключением является последний раздел первой главы. Было бы полезно более систематичный анализ обнаруженных автором эффектов и работоспособности предложенных методов при наличии различных типов шумовых воздействия, учитывая тот факт, что нейроны обычно функционируют в присутствии различных эндогенных и экзогенных источников шумов.

2. Из материала третьей главы диссертации не совсем ясно, какие особенности поведения обладают коллективные сети с импульсными связями по сравнению с классическими сетями с непрерывными связями. Интересен и вопрос о возможности формирования паттернов частичной синхронизации – химер - в ансамблях осцилляторов Курамото с импульсным типом связи.

3. Было бы полезно более подробно проиллюстрировать и обсудить результаты формирования различных режимов генерации в сети с различным числом кластеров, представленные в главе 4. В частности, не совсем понятен эффект размера кластера N_s на формирование режимов высокого уровня и их конкуренции между собой. Игрет ли роль абсолютный (число нейронов) или относительный (отношение числа нейронов в кластере к

полному размеру популяции) размер кластеров на формирование таких режимов? Было бы интересно увидеть результаты при различных размерах нейронных популяций.

4. При определении различных режимов работы систем с запаздыванием под импульсным воздействием, в том числе и в присутствии стохастических воздействий, автор использует численное моделирование. Было бы полезно описать более подробно процедуры численного моделирования, используемые численные методы и их параметры.

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы, результаты которой представляет собой серьезное научное достижение в области радиофизики. Представленная работа соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, и ее автор Клиньшов Владимир Викторович безусловно достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — Радиофизика.

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации

Отзыв составил:

Д.ф.-м.н., проф., руководитель Лаборатории
нейронауки и когнитивных технологий
Университета Иннополис


А. Е. Храмов
23.08.2021

Сведения о составителе отзыва:

Храмов Александр Евгеньевич, профессор, доктор физико-математических наук. Почтовый адрес: Университетская ул., 1, Иннополис, Респ. Татарстан, 420500. Тел. +7 (843) 203 92 53 Эл. адрес: hramovae@gmail.com. Наименование организации: Автономная некоммерческая организация высшего образования "Университет Иннополис". Должность: руководитель Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий. Специальность, по которой защищена докторская диссертация: 01.04.03 – радиофизика.

Подпись  А. Е. Храмова подтверждаю.
Директор по развитию и кадровой политике
АНО ВО «Университет Иннополис»
Р.Ф. Валиев



Приложение к отзыву: список трудов официального оппонента Храмова А.Е. за последние пять лет (не более 15 работ)

1. V. Maksimenko, A. Kuc, N. Frolov, S. Kurkin, A. Hramov. Effect of repetition on the behavioral and neuronal responses to ambiguous Necker cube images. *Scientific Reports* 11 (1), 1-13, 2021.
2. N. Frolov, A. Hramov. Extreme synchronization events in a Kuramoto model: The interplay between resource constraints and explosive transitions. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 31 (6), 063103, 2021.
3. O.E. Karpov, V.V. Grubov, VA Maksimenko, N Utashev, VE Semerikov et al. Noise amplification precedes extreme epileptic events on human EEG. *Physical Review E* 103 (2), 022310, 2021.
4. А.Е. Храмов, Н.С. Фролов, В.А. Максименко, С.А. Куркин, В.Б. Казанцев, А.Н. Писарчик. «Функциональные сети головного мозга: от восстановления связей до динамической интеграции» 191, 614–650 (2021)
5. A.A. Koronovskii, O.I. Moskalenko, A.A. Pivovarov, V.A. Khanadeev et al. Jump intermittency as a second type of transition to and from generalized synchronization. *Physical Review E* 102 (1), 012205 (2020)
6. M.I. Bolotov, V.O. Munyaev, L.A. Smirnov, A.E. Hramov. Symmetry broken states in an ensemble of globally coupled pendulums. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 402, 132266 (2020)
7. N.S. Frolov, V.A. Maksimenko, M.V. Khramova, A.N. Pisarchik, A.E. Hramov. Dynamics of functional connectivity in multilayer cortical brain network during sensory information processing. *The European Physical Journal Special Topics* 228 (11), 2381-2389 (2019)
8. D.D. Kulminskiy, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov, A.E. Hramov. Synchronization in ensembles of delay-coupled nonidentical neuronlike oscillators. *Nonlinear Dynamics* 98 (1), 735-748 (2019)
9. A.V. Andreev, N.S. Frolov, A.N. Pisarchik, A.E. Hramov. Chimera state in complex networks of bistable hodgkin-huxley neurons. *Physical Review E* 100 (2), 022224 (2019)
10. P. Chholak, G. Niso, V.A. Maksimenko, S.A. Kurkin, N.S. Frolov, E.N. Pitsik et al. Visual and kinesthetic modes affect motor imagery classification in untrained subjects. *Scientific reports* 9 (1), 1-12 (2019)
11. A.V. Andreev, EN Pitsik, VV Makarov, AN Pisarchik, AE Hramov. Dynamics of map-based neuronal network with modified spike-timing-dependent plasticity. *The European Physical Journal Special Topics* 227 (10), 1029-1038 (2018)
12. A.N. Pavlov, A.E. Runnova, V.A. Maksimenko, O.N. Pavlova, D.S. Grishina et al. Detrended fluctuation analysis of EEG patterns associated with real and imaginary arm movements. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 509, 777-782 (2018)

13. N.S. Frolov, V.A. Maksimenko, V.V. Makarov, D.V. Kirsanov, A.E. Hramov, et al. Macroscopic chimeralike behavior in a multiplex network. *Physical Review E* 98 (2), 022320 (2018)
14. A.A. Koronovskii, M.K. Kurovskaya, O.I. Moskalenko, A. Hramov, S. Boccaletti. Self-similarity in explosive synchronization of complex networks. *Physical Review E* 96 (6), 062312 (2017)
15. N.S. Frolov, S.A. Kurkin, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov. Nonlinear dynamics and bifurcation mechanisms in intense electron beam with virtual cathode. *Physics Letters A* 381 (28), 2250-2255 (2017)