

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



имени
П.Н.Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: (499) 135 1429
(499) 135 4264
Телефакс: (499) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>
postmaster@lcbcdcv.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физический институт имени П.Н.Лебедева
Российской академии наук,
ул.-корп. РАН Колачевский Н.Н.



09. 2021 г.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской академии наук
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 - Радиоп физика

Актуальность работы

Автоколебания – самоподдерживающиеся периодические колебания в системах без периодического внешнего воздействия – наблюдаются в природе и технике повсеместно, начиная от электронных и оптических систем и вплоть до биологических, экономических и социальных процессов. Общность фундаментальных свойств многих автоколебательных систем позволяет исследовать их поведение вне зависимости от их физической природы. Такой обобщающий подход восходит к трудам А. Пуанкаре и А.М. Ляпунова, получил развитие в работах Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси, А.А. Андропова, которые исследовали нелинейные колебания в радиотехнике, акустике, автоматике, аэродинамике. Созданная ими теория колебаний стала одним из центральных направлений радиоп физики и в настоящее время продолжает бурно развиваться, находя все новые объекты исследования. Так, радиоп физические и теоретико-колебательные методы все чаще начинают применяться при изучении колебаний сложных систем, в том числе сетевых систем и систем отличной от физической природы, например, биофизических. Научные проблемы, возникающие при исследовании нелинейной динамики таких систем, являются, без сомнения, актуальными

задачами современной радиофизики. Именно таким задачам посвящена диссертационная работа В.В. Клиньшова.

Научная новизна

Темой диссертации является изучение колебаний в сложных системах с импульсными взаимодействиями. В работе разработан целый ряд оригинальных методов для аналитического и численного исследования таких систем, а также получено большое число принципиально новых результатов об их динамике, которые в совокупности определяют научную новизну работы.

Диссертационная работа представляет собой целостный, логично структурированный научный труд. Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и дается достаточно полный обзор современной литературы по ней. Также содержатся сведения о новизне работы, вкладе автора, формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава работы посвящена задачам описания воздействия импульсных сигналов на автоколебательные системы. Этот шаг является необходимым для дальнейшего исследования сложных систем, состоящих из нескольких подсистем с импульсными взаимодействиями. Рассматриваются две принципиально разные задачи. Первая задача — описание динамики автоколебательной системы под интенсивным внешним воздействием в форме последовательности сильных импульсных сигналов. Предполагается, что возмущаемая система может существенно отклоняться от аттрактора, однако не покидает его области притяжения. Вводится новый подход к описанию фазовой динамики, позволяющий вычислять отклик системы на очередной импульс в зависимости от фаз получения некоторого числа предыдущих импульсов. Таким образом, многомерная динамическая система фактически сводится к одномерной системе с памятью. Приведенные в работе примеры показывают, что в ряде случаев такой подход может быть эффективным.

Вторая задача касается динамики мультистабильных систем, которые при одних и тех же значениях параметров могут демонстрировать различные режимы поведения в зависимости от начальных условий. Сильное импульсное воздействие на такую систему может привести к ее переходу из одного режима в другой, например, из желательного, рабочего режима, в нежелательный, аварийный. Возникает проблема классификация возмущений на «безопасные» и «опасные», приводящие к нежелательным переключениям. В работе сделан важный шаг к решению этой проблемы, а именно введено понятие «порога устойчивости» - минимального значения амплитуды внешнего воздействия, которое может приводить к переходу на нежелательный режим. Разработаны методы оценки порогов устойчивости для широкого класса систем.

Во второй главе представлена модель сети (ансамбля) автоколебательных элементов с импульсными запаздывающими связями в наиболее общем виде, а также показано, как динамика такой сети может быть сведена к многомерному точечному отображению. Для этого динамика сети рассматривается как последовательность отдельных событий, происходящих в моменты импульсных взаимодействий. Так как между этими моментами взаимодействие элементов сети отсутствует, динамика элементов сети в это время является автономной и может быть легко просчитана. Учитывая также быстрое, в пределе мгновенное изменение состояния элементов в моменты взаимодействия, можно получить отображение, описывающее эволюцию системы между двумя последовательными моментами взаимодействий.

Метод точечных отображений далее используется при исследовании динамики различных импульсных систем. Так, исследовано влияние импульсной запаздывающей обратной связи на колебания автогенераторов. Впервые показано, что при определенных условиях колебания с периодом, близким к собственному, теряют устойчивость, порождая сложные длиннопериодические, квазипериодические и хаотические колебания, названные «дрожащими» режимами. Изучена синхронизация двух автогенераторов с запаздывающими связями. Показано, что даже при задержках, существенно превышающих период колебаний, возможны различные виды синхронизации — синфазная, противофазная, кросс-частотная. Вычислены зоны синхронизации в пространстве параметров. Для экспериментального подтверждения теоретических результатов разработаны и изучены электронные макеты исследуемых систем.

В третьей главе продолжается исследование сложных систем с импульсными связями, в ней рассмотрены сетевые системы, состоящие из большого количества элементов. Показано, что в системе с кольцевой структурой связей могут распространяться фазовые волны, форма фронта и устойчивость которых могут быть получены с помощью решения вспомогательного уравнения с запаздыванием. В кольце автогенераторов с импульсными связями изучены дрожащие волны, аналоги дрожащих режимов в одном автогенераторе с обратной связью. Исследована синхронизация больших ансамблей автогенераторов с запаздывающими импульсными связями, получены условия синхронизации, описаны специфические механизмы ее разрушения. Изучено влияние неоднородности параметров элементов на динамику ансамблей, показано, что она приводит к формированию сложной бифуркационной структуры разбиения пространства параметров на различные режимы коллективной активности — режим покоя, синхронных и асинхронных колебаний. Впервые продемонстрирована возможность гистерезисных переходов между различными режимами.

Четвертая глава содержит результаты моделирования реалистичной структуры нейронных кортикальных сетей и их динамики. Модель структуры связей в таких сетях

предложена на основе данных ряда недавних экспериментов, в которых получены статистические характеристики топологии и распределения весов синаптических связей между пирамидальными нейронами визуальной коры головного мозга крысы. Предложенная в работе простая модель сети воспроизводит данные характеристики, предполагая наличие в кортикальных сетях небольших выделенных групп нейронов, так называемых кластеров, с более сильными и плотными связями, чем в среднем по сети. Также в работе предложен подход, позволяющий приближенно сводить коллективную динамику сетей с кластерами к редуцированным низкоразмерным динамическим системам для усредненных переменных. Продемонстрирована работоспособность подхода в широкой области параметров, в дальнейшем он использовался для аналитического исследования динамики сетей с кластерными связями.

Показано, что наличие кластеров приводит к существенному изменению динамических свойств сети по сравнению со случаем однородных связей. При достаточно высокой степени кластеризации в сети формируются режимы повышенной локализованной активности, при которых группа нейронов, формирующая кластер, демонстрирует существенно более высокую активность, чем сеть в среднем. В зависимости от параметров и размера кластеров такие режимы могут быть либо устойчивыми, либо метастабильными, то есть проявляться либо сколь угодно долго, либо в течение конечного времени. Бифуркационный анализ редуцированных моделей позволил определить области существования режимов повышенной локальной активности в пространстве параметров.

Замечания по диссертации

1. В первой главе при введении понятий порога устойчивости и порога переключения следовало бы обсудить случай, когда переменные фазового пространства системы имеют разную физическую размерность. Интересным представляется вопрос, как в таком случае следует сравнивать расстояние вдоль различных компонент фазового пространства между собой.

2. Большая часть результатов второй и третьей главы о динамике и синхронизации автогенераторов с импульсными запаздывающими связями получена для упрощенной модели фазового осциллятора, то есть без учета амплитудной динамики. Было бы интересно и важно обсудить, как могут измениться наблюдаемые эффекты в случае более реалистичных моделей.

3. На бифуркационной диаграмме на Рис. 3.14 обращает на себя внимание необычная структура точки Богданова-Тakensа: линия бифуркации петли сепаратрисс седла не касается линий седло-узловой бифуркации и бифуркации Андронова-Хопфа, а пересекает их. Следовало бы прокомментировать этот момент.

4. Следовало бы более детально изложить результаты о спонтанной переключающей динамике в сети с кластерными структурами связей. Несмотря на наличие качественного объяснения эффекта, в работе он проиллюстрирован лишь одним примером при конкретном значении параметров системы (Рис. 4.16). Было бы полезно сравнить области параметров, в которых наблюдаются переключения в однородной и кластерной сетях.

Общая оценка работы

Сделанные замечания не изменяют положительной оценки работы, которая выполнена на высоком научном уровне с использованием совокупности аналитических, численных и экспериментальных подходов. По результатам работы опубликованы многочисленные статьи в ведущих российских и зарубежных журналах, они представлены на известных международных научных конференциях. Работа представляет собой завершённый научный труд, имеющий важное значение для развития радиофизики и перспективы приложений.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Клиньшова Владимира Викторовича «Колебания в сложных системах с импульсными взаимодействиями» соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории нелинейной динамики и теоретической биофизики Отделения теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской академии наук, протокол № 1 от 10 сентября 2021 года.

Контактные данные организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

Тел.: 8 (499) 132-65-54

email: office@lebedev.ru

Сайт: <https://www.lebedev.ru/ru/main>

Отзыв подготовил:

д.ф.-м.н., гнс.,

зав. лаб. нелинейной динамики

и теоретической биофизики

Полежаев Андрей Александрович

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации за последние пять лет:

1. Якупов Э. О., Губернов В., Полежаев А. А. Моделирование волновых структур на фронте горения // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, вып. 4. С. 538-548. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-4-538-548
2. Hellen, EH; Volkov, E. Emergence of multistability and strongly asymmetric collective modes in two quorum sensing coupled identical ring oscillators. *Chaos*, 30, 121101 (2020)
3. Stankevich, N; Volkov, E. Evolution of quasiperiodicity in quorum-sensing coupled identical repressilators. *Chaos*, 30, 043122 (2020)
4. Kuznetsov, M; Polezhaev, A. Widening the criteria for emergence of Turing patterns. *Chaos*, 30(3), 033106 (2020)
5. Yakupov, EO; Gubernov, VV; Polezhaev, AA. Mathematical modeling of spatiotemporal patterns formed at a traveling reaction front. *Chaos*, 30(8), 083147 (2020)
6. Miroschnichenko, TP; Yakupov, EO; Gubernov, VV; Kurdyumov, VN; Polezhaev, AA. Combustion wave in a two-layer solid fuel system. *Applied Mathematical Modelling* 77, 1082-1094 (2020)
7. Kichatov, B., Korshunov, A., Sudakov, V., Kolobov, A., Gubernov, V., Golubkov, A., Kiverin, A. Kinetics of cluster formation in active suspension: Coarsening regime. *The Journal of Chemical Physics*, 153(8), 084902 (2020)
8. Huang, Z., Sidhu, H. S., Towers, I. N., Jovanoski, Z., Watt, S., Gubernov, V. V. Properties of nonadiabatic combustion waves in competitive exothermic reactions. *Applied Mathematical Modelling*, 77, 1216-1228 (2020)
9. Yakupov, EO; Polezhaev, AA; Gubernov, VV; Miroschnichenko, TP. Investigation of the mechanism of emergence of autowave structures at the reaction front. *Physical Review E* 99 (4), 042215 (2019)
10. Yakupov, EO; Polezhaev, AA. Study of the Mechanism of the Autowave Structure Formation at the Reaction Front. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 45(6), 165-169 (2018)
11. Hellen, EH; Volkov, E. How to couple identical ring oscillators to get quasiperiodicity, extended chaos, multistability, and the loss of symmetry. *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, 62, 462-479 (2018)
12. Hellen, EH; Volkov, E. Flexible dynamics of two quorum-sensing coupled repressilators. *Physical Review E*, 95(2), 022408 (2017)
13. Gubernov, VV; Kudryumov, VN; Kolobov, AV; Polezhaev, AA. Propagation of combustion waves in the shell-core energetic materials with external heat losses. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 473(2199), 20160937 (2017)
14. Kuznetsov, M; Kolobov, A; Polezhaev, A. Pattern formation in a reaction-diffusion system of Fitzhugh-Nagumo type before the onset of subcritical Turing bifurcation. *Physical Review E*, 95(5), 052208 (2017)
15. Kuznetsov, M. B., Gubernov, V. V., Kolobov, A. V. Influence of interstitial fluid dynamics on growth and therapy of angiogenic tumor. Analysis by mathematical model. *Biophysics*, 62(1), 129-137 (2017)