

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям
ФГАОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»
доктор географических наук, профессор
Пьянков Сергей Васильевич



24 » января 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на диссертационную работу **Муняева Вячеслава Олеговича** на тему **«Синхронизация и хаос в ансамблях связанных ротаторов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Диссертационная работа В.О. Муняева посвящена исследованию коллективных явлений в конечных и больших ансамблях связанных ротаторов. Рассматриваются различные режимы синхронизации и хаотической динамики, а также сценарии перехода между ними. Задачи решаются в рамках математических постановок, при которых результаты в равной степени справедливы как для механических (оптомеханических и т.д.) ротаторов, так и для осцилляторов, в модели фазовой редукции которых можно пренебречь старшими гармониками.

Ротаторы и фазовые модели дают точное математическое описание для ряда важных физических систем и являются достаточно хорошим приближением – для других. Естественным образом, они стали парадигматическими моделями для теории коллективных явлений в ансамблях осцилляторов и ориентационных элементов. Вместе с тем, ряд таких моделей ансамблей обладает нетривиальными особыми свойствами и в некоторых предельных случаях – свойством частичной интегрируемости (теория Ватанабэ-Строгаца). Наличие вырожденных ситуаций или близость к ним в пространстве параметров делает динамику таких ансамблей весьма разнообразной и сложной. Вместе с тем, естественность этой близости для реальных систем, делает сложность и разнообразие режимов поведения не математическим артефактом, а отражением универсальных закономерностей поведения реальных ансамблей. Корректное понимание этих закономерностей неразрывно связано с точными аналитическими/«полуаналитическими» результатами для таких моделей.

В свете всего вышеизложенного становится очевидной актуальность диссертационной работы В.О. Муняева. В работе выявляются и детально анализируются пространственно-временные структуры, синхронные и асинхронные режимы, регулярные и хаотические процессы в ансамблях взаимодействующих фазовых систем. Основной

акцент делается на теоретическом и численном исследовании поведения ансамблей произвольного числа элементов с различными топологиями связей в зависимости от их параметров (сила связи между элементами, размер ансамбля, неоднородность ансамбля по характеристикам элементов, влияние шума и т.д.), а также разработке соответствующих аналитических подходов к их изучению. Не только полнота параметрического исследования режимов, но и глубокая проработка теоретического описания и получение точных аналитических результатов определяют новизну работы и ее качество.

Диссертация изложена на 128 страницах, состоит из введения, четырех оригинальных глав, заключения и дополнительных материалов, организованных в 6 разделов. Каждая оригинальная глава посвящена отдельным крупным задачам в рамках общей тематики диссертации.

В первой главе изучаются регулярные и хаотические режимы в цепочке локально связанных маятников с линейным трением и постоянным моментом силы. Исследуются механизмы разрушения симметрии состояний, несинфазная вращательная динамика и переход к хаотическим режимам. Рассмотрение проводится для малых ансамблей и цепочек произвольной длины. Строится классификация кластерных режимов и устанавливаются закономерности переходов между ними.

Вторая глава посвящена вопросу возникновения хаоса и гиперхаоса в цепочке маятников произвольной длины. Построена систематизированная картина структуры областей разных мод неустойчивости синфазных режимов. Описываются сценарии перехода к хаосу.

В третьей главе исследуются пространственно-временные структуры в ансамбле глобально связанных маятников. Выясняется природа нарушения симметрии состояний в ансамблях с такой связью, исследуется устойчивость синфазного вращательного режима. Проводится теоретический и численный анализ устойчивости несимметричных режимов в ансамблях с малым и большим количеством элементов. Исследуются хаотические режимы в этих ансамблях.

В четвертой главе изучается влияние шума на ансамбли глобально связанных фазовых осцилляторов с инерцией. На основе уравнения Фоккера-Планка, для макроскопически стационарных состояний ансамбля строится матричное описание, позволяющее получать результаты с любой наперед точностью при конечной инерции. В пределе малых значений параметра инерции данный подход позволяет получить аналитические стационарные решения для параметра порядка. Для различных типичных распределений собственных частот элементов теоретически (на основе аналитического решения) и численно построены диаграммы макроскопических состояний системы и описаны гистерезисные переходы. Показано построение среднеполевого описание для ансамблей, в которых распределены различные параметры, а не только собственные частоты.

В работе впервые получен ряд важных результатов, позволяющих лучше понять универсальные закономерности поведения ансамблей фазовых систем с инерцией и, при необходимости, разработать способы управления макроскопическими режимами поведения таких ансамблей. К наиболее существенным результатам можно отнести следующие:

- Получена иерархия эволюции синфазного режима в несинфазный для цепочки локально связанных идентичных маятников произвольной длины.
- Построено систематическое описание сценариев возникновения хаотической динамики в цепочках из трех и более связанных маятников, обнаружена квазилинейная корреляция между размерностью гиперхаоса и длиной цепочки.
- Для ансамбля глобально связанных маятников установлена единственная область параметрической неустойчивости синфазного состояния и описан сценарий возникновения хаотической динамики. При малой диссипации аналитически получены асимптотические решения для вращательных мод и исследованы их свойства устойчивости.
- Построено аналитическое описание стационарных синхронных режимов в ансамбле глобально связанных роторов с внутренним шумом. Основной аналитический результат справедлив для малых значений параметра инерции.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы (в том числе, научных положений и выводов) обеспечивается использованием строгих математических методов теоретического и численного анализа, хорошо зарекомендовавших себя при исследовании нелинейных процессов в сложных системах. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью с использованием различных подходов и численных схем, а также согласием с данными, полученными ранее другими авторами для различных предельных случаев.

Среди достоинств диссертационной работы следует отметить аналитическое решение ряда значимых для работы задач в точной или приближенной постановках. Представленные решения свидетельствуют о высоких квалификации и способностях соискателя и очень широком научном кругозоре. Интересно, что многие из этих решений остаются довольно точными далеко за пределами области параметров, где они являются строгим асимптотическим результатом, и должны рассматриваться как приближение.

Полученное в четвертой главе аналитическое решение позволяет воспроизвести фазовый переход к синхронизации в системе Курамото с распределением частот, имеющим плато. При этом фазовом переходе параметр порядка меняется в точке перехода на конечную величину, но при этом не возникает гистерезиса. Внутренний шум разрушает эту особенность, но дает формально сингулярное поведение при устремлении интенсивности шума к нулю. Полученное в диссертации аналитическое решение (4.23) позволяет разобрать этот случай не только при малом шуме, но и малой инерции.

В то же время, имеются некоторые замечания и вопросы по диссертационной работе, на которые следует обратить внимание в дальнейших исследованиях.

К работе имеются следующие замечания:

1. Решение (4.23) является аналитической функцией частоты. С использованием Теоремы о вычетах, многие задачи среднеполового описания для гетерогенных систем с дробно-рациональным распределением параметра (например, распределение Лоренца) могут быть сведены к алгебраическим уравнениям или нульмерным динамическим системам (см., например, §3.2 в [Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука. 1984.]). Встает вопрос, может ли Теорема о вычетах применяться

для результата (4.23). Это зависит от свойств аналитического продолжения на комплексную плоскость неоднородного параметра. Анализ поведения на полной комплексной плоскости заслуживает внимания, даже если он покажет, что применение Теоремы о вычетах невозможно (как, например, в приложении работы [di Volo M. *et al.* // Chaos. – 2022. – Vol. 32. – 023120.]).

2. Если работать с модифицированным уравнением Смолуховского, полученным для плотности вероятности в Приложении Е, в Фурье-пространстве, то вопрос о возможности применения Теоремы о вычетах остается открытым — для лоренцева распределения частот возможность замыкания контура интегрирования для $a_{0,1}(\omega)$ необоснованна. Однако, интересен вопрос о формальном приближении — записать уравнения, какими они были бы при допустимом замыкании, и сопоставить результат с тем, что дает интегрирование точного аналитического выражения (4.23) с распределением Лоренца. Практическую важность такого приближения, если оно возможно, для работ по влиянию второй гармоники в связи на кластеризацию, невозможно переоценить.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. В целом на основании рассмотрения всего представленного материала, можно сделать вывод, что диссертация Муняева Вячеслава Олеговича представляет собой законченное исследование, которое вносит важный вклад в развитие теории колебаний и волн в нелинейных распределенных системах радиофизической и иной природы. Практическая значимость работы связана с тем, что для многих реальных колебательных систем фазовая редукция близка к той, которая допускает теории Отта-Антонсена и Ватанабэ-Строгаца. Вместе с тем, эти теории запрещают динамику кластеризации в ансамблях. Строгие результаты докторанта для систем, соответствующих одним из самых типичных нарушений свойств Отта-Антонсена, важны для понимания универсальных закономерностей кластеризации в ансамблях реальных осцилляторов. При этом кластеризация лежит в основе работы систем анализа сложных данных.

Результаты работы по теме диссертации представлены в 14 научных публикациях, 5 из которых являются статьями в журналах (New Journal of Physics, Physica D, Chaos, Nonlinear Dynamics), входящих в системы Web of Science, Scopus и в список изданий, рекомендованных ВАК РФ. Результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях. Кроме того, материалы диссертационных исследований использовались при выполнении научных грантов (РФФИ и РНФ). Публикации по теме диссертации в полной мере отражают основные результаты диссертационной работы. Автореферат полностью соответствует задачам и результатам диссертационной работы.

Результаты диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских организациях (ИРЭ РАН и его филиалы, ИПФ РАН, ФИАН и др.), а также в высших учебных заведениях при разработке ряда учебных дисциплин радиофизической направленности (СГУ, СПбГУ, ННГУ, ПГНИУ, МГУ и др.).

Диссертация В.О. Муняева по актуальности решенных задач, объему проведенных исследований, степени научной новизны и практической значимости результатов полностью соответствует специальности 1.3.4 – Радиофизика и удовлетворяет всем

требованиям пп. 9-11, 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Считаю, что автор диссертации, В.О. Муняев достоин присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Отзыв подготовлен доцентом кафедры теоретической физики физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», кандидатом физико-математических наук, Голдобиным Денисом Сергеевичем.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры теоретической физики физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», «12» января 2023 г., протокол № 3.

Доцент кафедры теоретической физики ФГАОУ ВО «ПГНИУ»,
кандидат физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Телефон: +7 (342) 2-396-227
e-mail: Denis.Goldobin@gmail.com


Голдобин Денис Сергеевич
«24» января 2023

Заведующий кафедры теоретической физики ФГАОУ ВО «ПГНИУ»,
доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Телефон: +7 (342) 2-396-227
e-mail: demin@psu.ru


Демин Виталий Анатольевич
«24» января 2023

Подписи доктора физико-математических наук Демина Виталия Анатольевича и
кандидата физико-математических наук Голдобина Дениса Сергеевича заверяю

ученый секретарь ФГАОУ ВО «ПГНИУ»
«24» января 2023 г.



Рабочий адрес организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский Государственный Национальный Исследовательский Университет» (ФГАОУ ВО «ПГНИУ»)

Почтовый адрес: 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Телефон/факс: +7(342) 239-64-35 / +7(342) 237-16-11

Адрес электронной почты: info@psu.ru (www.psu.ru)