

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

*на диссертацию Муняева Вячеслава Олеговича «Синхронизация и хаос в ансамблях связанных ротораторов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика».*

Диссертационная работа Муняева Вячеслава Олеговича посвящена одной из интереснейших фундаментальных задач радиофизики и нелинейной динамики – исследованию колективного поведения в ансамблях взаимодействующих фазовых систем. В работе на высоком научном уровне рассмотрены вопросы возникновения пространственно-временных структур, синхронных и асинхронных режимов, развития хаотической динамики в ансамблях фазовых элементов с различными топологиями связей. Особое внимание уделено теоретическому и численному анализу поведения ансамблей произвольного числа элементов в зависимости от их параметров, а также разработке необходимых для их исследования аналитических подходов.

**Актуальность** выбранной темы исследования обусловлена разнообразием проявления общих закономерностей колективной динамики в конкретных нелинейных системах. Важно отметить, что интерпретация сложной динамики, наблюдаемой в таких системах, и объяснение ее причин представляет собой трудную и нетривиальную задачу. Несмотря на большое количество работ по данной тематике, ссылки на которые приведены в диссертации, на настоящий момент по-прежнему остается еще множество существенных вопросов о закономерностях формирования пространственно-временных структур в ансамблях взаимодействующих фазовых осцилляторов в зависимости от топологии связей, параметров элементов и внешних факторов, таких как шум. Особенность данной диссертационной работы

заключается в том, что автор определяет механизмы и детально описывает сценарии возникновения различных сложных вращательных режимов, как регулярных, так и хаотических, в системах связанных фазовых элементов. Несомненным достоинством работы является большое количество аналитических результатов и методов исследования цепочек произвольной длины и ансамблей глобально связанных фазовых осцилляторов. Решение круга задач, поставленных в настоящей диссертационной работе, представляет научно значимые результаты для современной радиофизики и нелинейной динамики, значительно расширяет диапазон знаний в этом направлении и способствует существенному продвижению в понимании коллективной динамики парадигматических нелинейных систем. Таким образом, диссертационная работа представляет несомненный интерес для широкого круга исследователей, особенно для специалистов в области радиофизики и нелинейной динамики. Тема диссертации полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика.

**Достоверность** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается непротиворечивостью полученных результатов известным и общепринятым положениям нелинейной динамики, согласованностью с данными, опубликованными в научных рецензируемых журналах мирового уровня, использованием апробированных и хорошо себя зарекомендовавших теоретических методов радиофизики. Достоверность обеспечивается также использованием известного математического аппарата и подтверждается результатами исследований, полученными с помощью независимых методов.

Положения, выносимые на защиту, результаты и выводы по работе сформулированы достаточно сбалансированно и ясно, они полностью обоснованы содержанием диссертационной работы. Полученные автором результаты являются новыми и оригинальными.

Диссертационная работа демонстрирует внутреннее единство и целостность. В работе выполнен большой объем как аналитических работ, так и детальных численных экспериментов на различных моделях ансамблей фазовых осцилляторов. Результаты тщательно и убедительно проиллюстрированы. На протяжении всей работы автор демонстрирует высокую квалификацию в области теории и методов радиофизики и нелинейной динамики. Все вышеперечисленное свидетельствует о достоверности основных результатов.

Диссертационная работа отличается высокой научной **новизной**, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах. Основные результаты работы заключаются в следующем.

**В первой главе** проведено подробное описание существования и устойчивости различных вращательных режимов в короткой цепочке (со свободными граничными условиями) локально связанных идентичных маятников с диссипацией и постоянным внешним моментом. Показано, что рождение несинфазных периодических вращательных режимов связано с потерей устойчивости синфазного вращения. Аналитически и численно показано существование двух областей неустойчивости синфазного вращения по параметру силы связи; установлен тип реализующихся при этом вращательных режимов. Проанализированы бифуркации, приводящие к рождению и исчезновению несинфазных вращательных режимов. Показано, что переход к хаотической динамике при изменении параметра диссипации и силы связи связан с перекрытием зон неустойчивости синфазного вращения и происходит в результате каскада бифуркаций удвоения периода или бифуркации разрушения тора.

Во второй части первой главы производится обобщение полученных результатов на случай цепочек произвольной длины. Аналитически определено количество областей неустойчивости (по параметру силы связи) синфазного режима. Показано, что тип рождающихся при потере

устойчивости синфазного режима вращений (кластерных или полностью несинфазных) однозначно определяется длиной цепочки и параметрами системы; развитый анализ позволяет предсказать вид реализующихся вращений.

**Во второй главе** изучается развитие хаотической вращательной динамики в цепочках связанных маятников произвольной длины в зависимости от индивидуальных параметров элементов (диссипации) и свойств ансамбля (размер, сила связи между элементами). Показано, что при увеличении диссипации возможно рождение хаотических аттракторов, существующих в разных областях по параметру силы связи и характеризующихся различными типами кластерной вращательной динамики. Установлены сценарии перехода к хаотической динамике при изменении силы связи. Продемонстрировано, что рождение хаотических аттракторов сопряжено со сближением и перекрытием областей неустойчивости (по параметру силы связи) синфазного вращения, что позволило дать аналитическую оценку величины области существования хаоса по параметру силы связи и размерности наблюдаемого гиперхаоса.

**В третьей главе** исследуется вращательная динамика в ансамблях глобально связанных идентичных маятников. Обнаружена единственная (по параметру силы связи) область неустойчивости синфазного синхронного режима. Установлен вид всех рождающихся при потере устойчивости синфазного режима вращений, представляющих собой двух- и трехкластерные решения. Разработан аналитический подход, справедливый в пределе малой диссипации, позволяющий построить асимптотическое разложение для данных вращательных решений и исследовать их устойчивость. Установлены сценарии развития хаотической вращательной динамики.

**В четвертой главе** дано аналитическое описание стационарных синхронных режимов в бесконечно большом ансамбле глобально связанных

неоднородных ротаторов с инерцией и шумом. Найдено аналитическое выражение параметра порядка подгрупп идентичных ротаторов, справедливое в пределе малой инерции. Данное выражение является точным в случае стандартной модели Курамото первого порядка с шумом. Найдено аналитическое выражение для критического значения параметра инерции ротаторов, определяющего тип перехода к синхронизации (суперкритический/субкритический). Результаты применены к ряду часто используемых распределений частот, что позволяет записать критерий в виде алгебраических аналитических формул.

Основные результаты являются актуальными и новыми. Упомянутые наиболее интересные результаты имеют фундаментальное значение, внося существенный вклад в развитие радиофизики и теории колебаний.

В качестве замечаний по диссертационной работе отмечу следующее:

1. Диссертация содержит шесть приложений и в ряде случаев (как, например, в первой главе работы, стр. 22-23) вынесение существенного материала из основного текста в приложение затрудняет чтение диссертации и снижает понятность и прозрачность изложения. Безусловно, вынесение изолированных и внутренне самодостаточных смысловых частей в приложения в ряде случаев обоснованно и имеет смысл, но в данной диссертационной работе, на мой взгляд, автор несколько излишне сместил баланс в сторону размещения материалов диссертации в приложениях.
2. Несомненным достоинством и сильной стороной диссертационной работы является сбалансированное сочетание использования аналитических и численных методов. В то же самое время, при прочтении почти всей диссертационной работе (за исключением четвертой главы) складывается впечатление недостаточного сопоставления и взаимосогласования результатов численного и

аналитического рассмотрения. На мой взгляд, диссертационная работа смотрелась бы более целостно и более выигрышно, если бы автор на протяжении всей диссертационной работы более настойчиво использовал тот же принцип, который он с блеском применил в четвертой главе диссертации.

### 3. Несколько странно оформлен список литературы.

Все представленные замечания не являются принципиальными и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Муняева В.О., которая содержит решения научных задач, имеющих существенное значение для развития радиофизики и нелинейной динамики. В целом диссертация хорошо оформлена, автореферат соответствует содержанию диссертации. В заключение еще раз отмечу высокий уровень работы в целом, актуальность тематики, большой объем проведенных исследований, внутреннее единство и обоснованность выводов работы, целый ряд новых, значимых научных результатов. Это подтверждается и высоким уровнем публикаций по результатам диссертации – 5 статей в изданиях из Web of Science/Scopus, включая такие авторитетные журналы, как New Journal of Physics, Chaos и др. Результаты работы представлены на многочисленных конференциях. Они могут найти приложения при исследовании коллективной динамики сложных систем из области радиофизики, нейродинамики и др.

Все вышесказанное позволяет заключить, что диссертационная работа Муняева Вячеслава Олеговича «Синхронизация и хаос в ансамблях связанных роторов» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Муняев Вячеслав Олегович, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Доктор физико-математических наук,  
заведующий кафедрой

физики открытых систем института физики  
ФГБОУ ВО «СГУ им. Н.Г. Чернышевского»

Короновский А.А.

25 января 2023 г.

Адрес места работы: ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83.

Тел.: +7 (8452) 26-16-96

email: [alexey.koronovskii@sgu.ru](mailto:alexey.koronovskii@sgu.ru)

Научные специальности докторской диссертации Короновского Алексея Александровича – 01.04.03 – Радиофизика.

Подпись д.ф.-м.н. Короновского А.А. удостоверяю.

Ученый секретарь

ФГБОУ ВО «СГУ им. Н.Г. Чернышевского»

25 января 2023 г.

