

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,  
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 03.03.2023 № 31

О присуждении **Аринушкину Павлу Алексеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эффекты синхронизации в неоднородных сетях фазовых осцилляторов с инерцией» по специальности 1.3.4. – Радиофизика принята к защите 28 ноября 2022 года (протокол заседания № 24) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»), Минобрнауки РФ, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 № 1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 № 561-нк (Приложение 1/597); приказ об изменении состава совета от 15.10.2021 № 1046/нк-33.

Соискатель Аринушкин Павел Алексеевич, 1994 года рождения, в 2017 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с присвоением квалификации магистра по направлению 03.04.03 «Радиофизика». В 2021 году освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Радиофизика». Работает ассистентом кафедры радиофизи-

ки и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ.

Диссертация выполнена на кафедре радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Вадивасова Татьяна Евгеньевна, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», кафедра радиофизики и нелинейной динамики.

Официальные оппоненты:

**Осипов Григорий Владимирович**, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (г. Нижний Новгород), кафедра теории управления и динамики систем, заведующий кафедрой,

**Дмитричев Алексей Сергеевич**, кандидат физико-математических наук (01.04.03), Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», (г. Нижний Новгород), отдел нелинейной динамики, старший научный сотрудник,

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Саратовский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук», г. Саратов. Ведущая организация в своем **положительном** отзыве, подписанном Прохоровым Михаилом Дмитриевичем, доктором физико-математических наук (01.04.03), профессором РАН, главным научным сотрудником СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, и Сатаевым Игорем Рустамовичем, кандидатом физико-математических наук (01.04.03), ведущим научным сотрудником СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, указала, что диссертационная работа Аринушкина П.А. представляет собой законченное исследование, выполненное на актуальную для современной радиофизики и теории колебаний и волн тему, и содержит решение ряда новых радиофизических задач, связанных с анализом сложных пространственно-временных структур в неоднородных сетях фазовых осцилляторов с инерцией. Полученные результаты дополняют и расширяют имеющиеся представления о динамике сложных ансамблей фазовых осцилляторов и возможностях реализации различных пространственно-временных структур и эффектов синхронизации при наличии расстройки параметров элементов ансамбля.

Автореферат с достаточной полнотой соответствует основным положениям диссертационной работы. Работа полностью 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 кандидатским диссертациям, а её автор, Аринушкин Павел Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации общим объемом 4.4 п.л., из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Аринушкин П. А.**, Анищенко В. С. Анализ синхронных режимов работы цепочки связанных осцилляторов энергосетей // Известия вузов. ПНД. 2018. Т. 26, № 3. С. 62–77.
2. **Аринушкин П. А.**, Анищенко В. С. Влияние выходной мощности генераторов на частотные характеристики энергосети в кольцевой топологии // Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 6. С. 25-38.
3. Вадивасова Т. Е., **Аринушкин П. А.**, Анищенко В. С. Взаимная синхронизация сложных структур во взаимодействующих ансамблях нелокально-связанных ротаторов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2019. Т. 21, вып. 1. С. 4-20.
4. **Arinushkin P.A.**, Vadivasova T.E. Nonlinear damping effects in a simplified power grid model based on coupled Kuramoto-like oscillators with inertia // Chaos, Solitons & Fractals. 2021. Vol. 152, no 3. Paper 111343. P. 1-9.
5. **Аринушкин П. А.**, Вадивасова Т. Е. Влияние реактивной мощности на динамику ансамбля генераторов, моделируемых фазовыми уравнениями с инерцией // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 1. С. 65-78.

На диссертацию и автореферат поступило 6 положительных отзывов: из Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (г. Нижний Новгород) от д.ф.-м.н. (01.04.03), заведующего кафедрой «Математические методы в радиофизике» Дубкова А. А.; из Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (г. Калининград) от д.ф.-

м.н. (05.13.18), ведущего научного сотрудника Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Куркина С. А.; из Национального исследовательского Томского государственного университета (г. Томск) от к.ф.-м.н. (01.04.05), доцента кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Измайлова И. В. и к.ф.-м.н. (01.04.03), профессора кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Пойзнера Б. Н.; из Пермского государственного национального исследовательского университета (г. Пермь) от к.ф.-м.н. (01.02.05), доцента кафедры теоретической физики Голдобина Д. С.; из Нижегородского филиала Национального исследовательского института «Высшая школа экономики» (г. Нижний Новгород) от к.ф.-м.н. (01.04.03) Станкевич Н. В.; из Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус» (Краснодарский край, пгт. Сириус) от к.ф.-м.н. (01.04.03) Астахова О. В.

В отзывах сделаны замечания: а) о недостаточно подробном описании перехода от модели энергосети с кольцевой топологией к эффективной сети с глобальными связями; б) о необходимости объяснения ограничения применимости нелинейной диссипации для стабилизации синхронного режима энергосети; в) об отсутствии более детальных характеристик различных режимов исследуемых ансамблей фазовых осцилляторов, а также сделаны замечания по формулировкам аспектных характеристик диссертации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации в области радиофизики и теории колебаний, что подтверждено их высокой публикационной активностью в высокорейтинговых журналах по данной тематике. Выбор официальных оппонентов также объясняется отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается также отсутствием договорных отношений с соискателем. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовлетворяет критериям, сформулированным в пп. 22 и 24 действующего «Положения о присуждении учёных степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**определены** синхронные, асинхронные динамические режимы, а также режимы сосуществования двух типов динамик (синхронного и асинхронного состояния)

неоднородного ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией, моделирующего работу энергосети с кольцевой топологией, состоящей из синхронных генераторов и потребителей, при изменении параметров исходной энергосети, построены карты режимов на плоскости параметров, задающих инерционность и полную мощность синхронных генераторов;

**выявлены** эффекты синхронизации химерных структур и уединенных состояний в двухслойной мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией в случае идентичных слоев и слоев с частотной расстройкой;

**разработан** программный комплекс, позволяющий исследовать динамику произвольных ансамблей связанных фазовых осцилляторов, проводить анализ динамических и статистических характеристик пространственно-временных режимов в ансамблях с различной топологией;

**предложен** основанный на введении зависимости коэффициента диссипации осцилляторов от абсолютного значения мгновенной частоты в форме монотонно-возрастающей функции способ увеличения области синхронизации фазовых осцилляторов с инерцией, описывающих работу генерирующих узлов в модели энергосети;

**выполнено** исследование влияния параметров полной мощности и инерционности генерирующих узлов модели энергосети на устойчивость синхронного режима при наличии неоднородности узлов сети, моделируемых фазовыми осцилляторами с инерцией;

**выполнен** пространственно-временной анализ эффектов синхронизации слоев мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией при различном характере исходных пространственных структур в слоях, различных видах межслойной связи и различных значениях межслойного фазового сдвига.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**установлен** характер влияния параметров инерции и активной и реактивной мощности генерирующих элементов исходной энергосети на динамические режимы модели энергосети, представляющей собой ансамбль фазовых осцилляторов с инерцией, при учете неоднородности сети (отличия параметров одного из генерирующих узлов);

**установлено** влияние нелинейной диссипации осцилляторов, задаваемой монотонной зависимостью коэффициента диссипации от абсолютной величины мгно-

венной частоты, на динамику ансамбля и устойчивость синхронного режима по отношению к различным видам внешнего воздействия;

**выявлен** эффект синхронизации пространственных распределений средних частот и пространственных структур в слоях мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией, характеризующихся расстройкой собственных частот.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**определена** область синхронного поведения ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией, моделирующего поведение энергосети с кольцевой топологией при изменении таких характеристик энергосети, как активная и реактивная мощности отдельного генерирующего узла и параметр инерционности, предполагаемый одинаковым для всех генераторов; **показано**, что в зависимости от характера комплексной проводимости выходного узла генератора, рост абсолютной величины реактивной компоненты мощности приводит к разному результату: при индуктивной проводимости область синхронизации, увеличивается, а при емкостной – уменьшается и происходит переход к несинхронному режиму;

**установлено**, что при фиксированном значении активной мощности всех генераторов модели энергосети, изменение параметра инерции генераторов приводит к изменению динамического режима ансамбля фазовых осцилляторов, моделирующих работу энергосети (в частности, увеличение параметра инерции ведет к асинхронному режиму).

**доказана** возможность синхронизации сложных структур (химер и уединенных состояний) в слоях мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией в условиях частотной расстройки осцилляторов, принадлежащих разным слоям;

**предложен** способ стабилизации синхронного режима ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией, моделирующего работу энергетической сети с кольцевой топологией и наличием неоднородности (отличие параметров одного из узлов), основанный на использовании зависимости параметра диссипации от модуля мгновенной частоты, и показана его эффективность в случае внешних воздействий и временного нарушения связей;

**результаты исследований** были поддержаны научными фондами - РФФ (20-12-00119) и Немецкого Физического Общества (SFB 910).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**методика проведения исследований базируется** на современных теоретических представлениях и технологиях компьютерного моделирования в области исследований колебательных процессов в радиофизических системах;

**использованы** математические процедуры и методы численного моделирования, зарекомендовавшие себя при проведении научных исследований по радиофизике и теории динамических систем;

**Личный вклад соискателя.** Все защищаемые положения и результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Автором разработаны оригинальные программные комплексы и программы, с помощью которых проводились все численные расчеты и обработка экспериментальных данных. Планирование и постановка задач, интерпретация и обсуждение результатов, написание научных статей осуществлялись совместно с научным руководителем.

Результаты работы рекомендуются к использованию в научных исследованиях в академических НИИ (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, и его Саратовский филиал); Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, и др.), а также в учебном процессе в высших учебных заведениях, ведущих подготовку в области радиофизики и нелинейной динамики (Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Воронежский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет и др.).

В ходе защиты диссертации были заданы вопросы и высказаны следующие критические замечания **об отсутствии**: 1) применения аналитических методов; 2) обоснования выбранной модели энергосети; 3) анализа характера границ областей различных режимов моделирующей энергосети ансамбле фазовых осцилляторов, 4) данных исследования бифуркационных механизмов разрушения или установления синхронного режима; 5) обоснования выбора функции нелинейной диссипации осцилляторов в модели энергосети; 6) пояснения понятия «нелинейная диссипация» применительно к генераторам энергии; 7) о недостаточно подробном описании различных режимов функционирования двух моделей ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией с включением расчета спектров мощности и ляпуновских показателей; 8) данных о зависимости эффектов синхронизации (включая пороговые значения ко-

эффициентов связи и влияние фазового сдвига) от исходных состояний слоев сети; 9) использованного численного метода; 10) должного обоснования применимости метода «эффективной сети»; 11) более полной иллюстрации динамических режимов, устанавливающихся в ансамбле фазовых осцилляторов, моделирующих работу энергосети, при вариации управляющих параметров; 12) границ изменения коэффициента нелинейной диссипации; 13) количественных характеристик обнаруженных закономерностей и эффектов в выносимых на защиту положениях 1–4. Был задан вопрос о возможности существования в данной системе многочастотных квазипериодических режимов и динамического хаоса. Сделаны замечания об использовании некоторых терминологий.

Соискатель Аринушкин П.А. ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы и замечания, в частности: 1) дал пояснение соотношения фазовых осцилляторов с моделью энергосети; 2) подробно представил расчет параметров фазовых уравнений полученных из параметров энергосети; 3) дал описание и представил работу сторонних программных комплексов используемых в исследовании энергосети; 4) предоставил информацию об общем количестве рассматриваемых элементов энергосети и прокомментировал влияние исходного числа элементов на динамику сети фазовых осцилляторов с инерцией в модели энергосети; 5) подтвердил универсальность полученных результатов для модели мультиплексной сети в случае увеличения количества рассматриваемых слоев сети; 6) пояснил различие между амплитудной и фазовой динамикой осцилляторов; 7) ответил на вопрос о выборе исследуемой топологии энергосети и ее различие с топологиями реально существующими энергосетей; 8) дал подробное описание модели мультиплексной сети; 9) дал пояснение полученных результатов пространственно-временной динамики мультиплексной сети в случае различных режимов синхронизации фазовых осцилляторов; 10) прокомментировал различие фазовой динамики между фазовыми осцилляторами первого и второго порядка; 11) ответил на вопрос о сходстве и различии выбранной модели энергосети с реально существующими энергосистемами; 12) прокомментировал вопрос о влиянии реактивной мощности на динамику поведения модели энергосети.

Содержание диссертации А.А. Аринушкина удовлетворяет пп. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного по-



становлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

На заседании 3 марта 2023 года диссертационный совет принял решение присудить за решение актуальной задачи радиофизики, заключающейся в обнаружении ряда новых эффектов синхронизации в неоднородных сетях фазовых осцилляторов с инерцией и в объяснении их механизмов, Аринушкину П.А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек (17 человек находились в месте проведения заседания, 3 человека участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 7 докторов по специальности 1.3.4. – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета: проголосовал: за – 20, против – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель  
диссертационного совета



Аркин Валерий Михайлович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Сысоев Илья Вячеславович

3 марта 2023 г.