

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

доктор физико-математических наук, профессор

Алексей Александрович Короновский



» октябрь 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по диссертации **Аринушкина Павла Алексеевича** «Эффекты синхронизации в неоднородных сетях фазовых осцилляторов с инерцией» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика, выполненной на кафедре радиофизики и нелинейной динамики института физики

Соискатель **Аринушкин Павел Алексеевич** в 2017 г. окончил ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению 03.04.03 «Радиофизика» с присвоением квалификации «Магистр».

В период с 2017 г. по 2021 г. соискатель обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Радиофизика». Диплом об окончании аспирантуры № 106431 0284719 выдан 30 августа 2021 года ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

В настоящее время прикреплен для написания диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук к ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по специальности «Радиофизика» (приказ о прикреплении № 139–Д от 11.10.2021 г.).

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ № 165-Д от 15 ноября 2021 года.

Научный руководитель – **Вадивасова Татьяна Евгеньевна**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденная приказом ректора СГУ № 165-Д от 15 ноября 2021 года, представила положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ. На заседании присутствовали:

1. *Стрелкова Галина Ивановна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

2. *Вадивасова Татьяна Евгеньевна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
3. *Шабунин Алексей Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
4. *Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
5. *Астахов Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
6. *Колосов Дмитрий Андреевич*, кандидат физико-математических наук (01.03.05), ассистент кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
7. *Титов Алексей Владимирович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
8. *Слепнев Андрей Вячеславович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
9. *Павлов Алексей Николаевич*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
10. *Сергеев Константин Сергеевич*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
11. *Шепелев Игорь Александрович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), старший преподаватель кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
12. *Бух Андрей Владимирович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), ассистент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
13. *Корнеев Иван Александрович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), ассистент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
14. *Рыбалова Елена Владиславовна*, ассистент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
15. *Елизаров Евгений Михайлович*, инженер учебной лаборатории кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
16. *Рамазанов Ибадулла Рамзесович*, инженер учебной лаборатории кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
17. *Богатенко Татьяна Романовна*, инженер учебной лаборатории кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

Рецензенты диссертации:

*Шабунин Алексей Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,

*Павлов Алексей Николаевич*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,

представили положительные отзывы.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

### **Заключение**

по диссертации **Аринушкина Павла Алексеевича** «Эффекты синхронизации в неоднородных сетях фазовых осцилляторов с инерцией» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

**Актуальность работы.** В диссертационной работе Аринушкина П.А. решены актуальные задачи в области радиофизики и нелинейной динамики, заключающиеся в исследовании явления синхронизации в неоднородных ансамблях и сетях фазовых осцилляторов с инерцией, таких как ансамбль осцилляторов, моделирующий работу энергосети, для которого рассматривается устойчивость синхронного режима при изменении параметров сети с учетом неоднородности, инерционности и нелинейного коэффициента потерь осцилляторов, и двухслойная мультиплексная сеть фазовых осцилляторов с инерцией, для которой установлены эффекты синхронизации сложных пространственно-временных структур в слоях, в том числе при наличии частотной расстройки осцилляторов. Результаты работы, расширяют и дополняют имеющиеся на сегодняшний день представления в актуальной области науки, связанной с изучением нелинейных явлений в ансамблях и сетях осцилляторов с цилиндрическим фазовым пространством, а также в области моделирования работы энергосетей на основе ансамблей осцилляторов такого типа.

Тема и содержание диссертации полностью соответствует специальности «Радиофизика». Основные положения диссертации полно отражены в научных публикациях в рецензируемых журналах с высоким значением импакт-фактора.

**Личный вклад автора.** Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Соискателем разработаны оригинальные программы, с помощью которых проводились все численные расчеты и обработка полученных численных данных. Планирование и постановка задач, интерпретация и обсуждение результатов, написание научных статей осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается: а) применением обоснованных методов теоретического и численного анализа нелинейных процессов в радиофизических системах, демонстрирующих сложное поведение; б) использованием специальных программных комплексов, разработанных и протестированных на широком классе задач нелинейной динамики; в) отсутствием противоречий с уже известными результатами, полученными другими авторами, и установившимися представлениями в данной области знаний.

**Научная новизна результатов исследования.** Диссертационная работа содержит решение принципиально новых радиофизических задач анализа динамики фазовых осцилляторов инерции в модели энергосети. Постановка задач по изучению особенностей

эффектов синхронизации фазовых осцилляторов с инерцией модели энергосети является приоритетной.

В диссертации впервые получены следующие научные результаты:

- Для фазовых осцилляторов с инерцией в модели энергосети с парциальными параметрами методами численного моделирования построены карты режимов при вариации активной мощности одного из генераторов и коэффициента инерции, который полагался одинаковым для всех генераторов. Было показано, что в зависимости от параметров инерции при одних и тех же значениях активной мощности возможны различные режимы поведения сети, среди которых режим фазовой синхронизации всех генераторов, режим сосуществования синхронной и несинхронной динамики поведения, режим асинхронного поведения.
- На примере простого ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией модели энергосети продемонстрирован характер влияния реактивной мощности одного из генераторов на режимы функционирования сети. Были определены области различных режимов энергосети в зависимости от значений активной и реактивной мощности одного из генераторов. Показано, что степень влияния реактивной мощности генератора на режимы работы энергосети зависит от величины активной мощности генератора.
- Был предложен и исследован способ стабилизации синхронного режима сети, основанный на использовании нелинейной диссипации генераторов. Показано существенное увеличение области синхронного поведения неоднородной сети при вариации параметров, за счет нелинейной диссипации осцилляторов.
- На примере простого ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией модели энергосети, исследована устойчивость синхронного режима сети при различных внешних воздействиях на отдельный узел, таких как импульсное воздействие, шумовое воздействие и разрыв связей. Показано, что введение в систему нелинейной диссипации может предотвратить асинхронное поведение осцилляторов и повысить устойчивость сети к возмущениям.
- Для двухслойной мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией, впервые были установлены эффекты полной и частичной синхронизации сложной пространственно-временной динамики слоев, находящихся в режиме химерных и уединенных состояний. Показан эффект взаимного захвата средних частот колебаний осцилляторов в двух слоях и установления идентичного пространственного распределения средних частот.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. В неоднородном ансамбле фазовых осцилляторов с инерцией, моделирующем энергосеть из генераторов и нагрузок с кольцевой топологией, изменение значений параметров ансамбля, связанное с ростом активной компоненты мощности одного из генераторов моделируемой энергосети, приводит к нарушению синхронного поведения. При этом возможно возникновение такого режима, когда синхронизация или ее отсутствие определяются начальными условиями. Изменение значений параметров ансамбля, связанное с ростом абсолютной величины реактивной компоненты мощности, в зависимости от характера комплексной проводимости выходного узла генератора, приводит к разному результату: при индуктивной проводимости область синхронизации, увеличивается, а при емкостной – уменьшается и происходит переход к несинхронному режиму.

2. В неоднородном ансамбле фазовых осцилляторов с инерцией, моделирующих энергосеть из генераторов и нагрузок с кольцевой топологией, с ростом параметра инерционности осцилляторов наблюдается разрушение синхронного режима.
3. Введение определенного вида нелинейной диссипации в фазовые осцилляторы, моделирующие динамику генераторов, позволяет расширить область синхронного режима сети при вариации параметров (активной мощности одного из генераторов и коэффициента инерции, одинакового для всех генераторов) и стабилизировать синхронный режим сети при различных внешних воздействиях (импульсное воздействие, шумовое воздействие и разрыв связей).
4. В двухслойной мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией, характеризующейся частотной расстройкой осцилляторов в двух слоях и сложными пространственно-временными режимами, при достаточно сильной межслойной связи наблюдается синхронизация средних частот взаимодействующих осцилляторов, что приводит к идентичности распределения средних частот в двух слоях. Данный эффект наблюдается в режиме химер, в режиме уединенных состояний, а также в случае существования структур разного типа в двух слоях: химеры в одном слое и уединенных состояний в другом.

**Научная и практическая значимость.** Результаты диссертации определяется тем, что в работе рассматриваются особенности динамики, эффекты синхронизации важного с теоретической и практической точек зрения и недостаточно изученного класса колебательных систем - фазовых осцилляторов с инерцией, которые широко используются в моделях функционирования энергетических сетей. Полученные результаты существенным образом дополняют существующие на сегодняшний день представления нелинейной теории колебаний и волн. Установлены основные режимы работы модели энергосети, представляющей собой ансамбль фазовых осцилляторов с инерцией. Построены карты режимов на плоскости управляющих параметров. Установлено влияние активной и реактивной мощности генераторов на поведение осцилляторов энергосети. Показана важная роль нелинейной диссипации фазовых осцилляторов в достижении синхронизации ансамбля и при стабилизации синхронного поведения в случае внешних воздействий на осцилляторы сети. Значение работы для развития представлений нелинейной динамики заключается также в установлении эффектов частичной и полной синхронизации в двухслойной мультиплексной сети фазовых осцилляторов с инерцией (ротаторов). Были установлены эффекты синхронизации пространственных структур, как в режиме химер, так и в режиме уединенных состояний. При идентичности взаимодействующих слоев была установлена полная синхронизация пространственных структур и поведения во времени. При взаимодействии слоев осцилляторов с частотной расстройкой, установлена синхронизация частот осцилляторов, что приводит к установлению одинаковых пространственных распределений мгновенных частот в двух слоях.

Прикладное значение результатов исследования определяется перспективами применения в системах первичного контроля частоты синхронных машин различных энергосетей. Использование полученных результатов также может быть применено при моделировании и анализе синхронных режимов энергосетей.

Результаты диссертации получены в рамках выполнения грантов Российского научного фонда (проект № 20-12-00119) и Немецкого Физического Общества (DFG) в рамках проекта SFB 910.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на всероссийских и международных конференциях, школах и семинарах:

«Dynamics, Bifurcations and Chaos» (Нижний Новгород, 2018); «Saratov Fall Meeting» (Саратов, 2018); «Workshop on Control of Self-Organizing Nonlinear Systems» (Лютерштадт-Виттенберг, Германия, 2019); «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2021» (Саратов, 2021).

Результаты работы также неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликованы 5 статей в центральных реферируемых научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Анализ синхронных режимов работы цепочки связанных осцилляторов энергосетей / **Аринушкин П. А.**, Анищенко В. С. // Известия вузов. ПНД. — 2018. — Т. 26(3). — С. 62–77.
2. Влияние выходной мощности генераторов на частотные характеристики энергосети в кольцевой топологии / **Аринушкин П. А.**, Анищенко В. С. // Известия вузов. ПНД. — 2019. — Т. 27(6). — С. 25-38.
3. Взаимная синхронизация сложных структур во взаимодействующих ансамблях нелокально-связанных ротаторов / Вадивасова Т. Е., **Аринушкин П. А.**, Анищенко В. С. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. — 2019. — Т. 21(1). — С. 4-20.
4. Nonlinear damping effects in a simplified power grid model based on coupled Kuramoto-like oscillators with inertia / **Arinushkin P.A.**, Vadivasova T.E. // Chaos, Solitons & Fractals. — 2021. — Vol. 152. — Pp. 1–9.
5. Влияние реактивной мощности на динамику ансамбля генераторов, моделируемых фазовыми уравнениями с инерцией / **Аринушкин П. А.**, Вадивасова Т. Е. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. — 2022. — Т. 65(1). — С. 1-14.
6. Эффекты нелинейной диссипации в модели энергосистемы на основе связанных Курамото-подобных осцилляторов с инерцией / **Аринушкин П. А.**, Вадивасова Т. Е. // Нелинейные дни в Саратове для молодых: сборник статей. — Россия, Саратов. — С. 62-63.

Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Программа для численного анализа пространственно-временной динамики ансамблей фазовых осцилляторов с инерцией / **Аринушкин П. А.**, Вадивасова Т. Е. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619850. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 18.06.2021.

**Итоговое заключение.** Диссертация «Эффекты синхронизации в неоднородных сетях фазовых осцилляторов с инерцией» Аринушкина Павла Алексеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика» как удовлетворяющая критериям, установленным пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842) для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». Присутствовало на заседании 6 докторов наук и 7 кандидатов наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» - 13 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет (протокол заседания кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 4 от 7 октября 2022 г.).

Председатель заседания  
доктор физико-математических наук,  
заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики  
института физики  
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Стрелкова Галина Ивановна

