

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»

доктор физико-математических наук, профессор

Алексей Александрович Короновский



«июль» 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского»

по диссертации **Елизарова Евгения Михайловича** «Влияние запаздывания и топологии связи на динамику сложных систем» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика, выполненной на кафедре радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 12 февраля 2026 года № 23–Д.

Соискатель **Елизаров Евгений Михайлович** с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского» в 2020 году по направлению «Радиофизика» с присвоением квалификации «Магистр».

С 2019 г. Елизаров Е.М. работает инженером учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского». С 2020 г. по 2024 г. Евгений Михайлович обучался в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» по группе научных специальностей 1.3. Физические науки. В 2024 г. был прикреплен в качестве соискателя на кафедру радиофизики и нелинейной динамики (приказ ректора от 01 октября 2024 года № 131-Д) для написания диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.3.4. - Радиофизика.

Справка о сданных кандидатских экзаменах №28–2026 выдана 11.06.2026 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского».

Научный руководитель – **Стрелкова Галина Ивановна**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора от 12 ноября 2024 года №163–Д, 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. *Астахов Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
3. *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»;
4. *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»;
5. *Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
6. *Петров Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
7. *Аникин Валерий Михайлович*, доктор физико-математических наук (01.04.03 и 05.13.18), профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
8. *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»;
9. *Слепченков Михаил Михайлович*, кандидат физико-математических наук (05.27.01), доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
10. *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»;
11. *Семенов Владимир Викторович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), заведующий научно-образовательной лабораторией компьютерного моделирования в электронике института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
12. *Семенова Надежда Игоревна*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
13. *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»;
14. *Бух Андрей Владимирович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;

15. *Торгашов Роман Антонович*, кандидат физико-математических наук (1.3.4.), ассистент кафедры прикладной физики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
16. *Ростунцова Алена Александровна*, кандидат физико-математических наук (1.3.4.), ассистент кафедры динамических систем на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН.

Рецензенты диссертации:

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

Москаленко Ольга Игоревна, доктор физико-математических наук, профессор, 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 Елизарова Евгения Михайловича «Влияние запаздывания и топологии связи на динамику сложных систем» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Актуальность работы. Проблема коллективного поведения взаимодействующих осцилляторов остаётся актуальной, несмотря на длительную историю исследований. Наибольший интерес сегодня вызывают системы со сложными типами связи. Использование мгновенной связи оправдано лишь тогда, когда время распространения сигнала много меньше характерного временного масштаба системы. Однако в радиофизических (микроволновый диапазон), лазерных, медицинских и биологических системах необходимо учитывать конечную скорость распространения сигнала, что приводит к моделям с запаздывающей связью. В связи с этим востребованным являются проведение исследований по выявлению роли запаздывающей связи на динамику малых и больших ансамблей нелинейных осцилляторов различной природы и выявление бифуркационных механизмов формирования и эволюции динамических режимов при изменении управляющих параметров систем и времени запаздывания. Другой важный аспект, определяющий развитие сложной динамики связанных систем, связан с анализом влияния топологии связи на пространственно-временные и волновые структуры. Данное направление исследований является особенно важным и актуальным как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, так как позволяет моделировать динамику реальных систем и сетей и определять эффективные методы и способы управления сложными процессами, реализуемыми в таких системах.

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Автором разработаны оригинальные программные комплексы и программы на языках С и Python, с помощью которых проводились все численные расчеты, обработка экспериментальных данных и построение графиков. Постановка задач, планирование проведения исследований, интерпретация и обсуждение результатов, написание научных статей осуществлялись совместно с научными руководителями и соавторами опубликованных работ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных в рамках диссертации результатов обеспечивается применением классических методов численного

моделирования нелинейных процессов в системах связанных нелинейных осцилляторов, а также обоснованных методов бифуркационного анализа динамических режимов, которые регулярно применяются в широком спектре радиофизических задач. Кроме того, в ходе работы были использованы программные комплексы, разработанные для конкретных целей и протестированные на большом классе радиофизических задач. Согласованность описанных выводов с полученными ранее результатами других авторов в данной научной сфере также подтверждает их достоверность.

Научная новизна результатов исследования. Диссертационная работа посвящена решению актуальной радиофизической задачи - анализу влияния запаздывания и топологии связи на динамику систем связанных нелинейных осцилляторов. Совокупность результатов диссертации позволяет расширить представления о механизмах формирования мультистабильности, синхронизации, возникновения и гашения автоколебаний в малых и больших ансамблях связанных осцилляторов с различным характером связи. Новизна основных результатов работы подтверждается их публикацией в ряде научных статей в отечественных и зарубежных журналах, входящих в Белый список, международные и российские системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, а также в трудах международных конференций и всероссийских школ. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.3.4. - Радиофизика.

В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты:

- Впервые выявлен и описан бифуркационный механизм формирования мультистабильности в системе двух связанных осцилляторов Ван дер Поля с запаздыванием в слагаемом связи. Выявлена и описана зависимость наблюдаемых динамических режимов и эффектов (возникновение и гашение колебаний, синхронизация периодических автоколебаний, бистабильность) от изменения времени запаздывания в канале связи.
- Показано, что при больших значениях параметра возбуждения, когда квазигармонические автоколебания превращаются в релаксационные, пилообразной формы, и при определенных расстройках по частоте формируются новые мультистабильные состояния на базе синфазного цикла. Выявлен бифуркационный механизм формирования мультистабильных состояний при увеличении параметра возбуждения автогенератора.
- Обоснована возможность применения длинной линии в канале связи для моделирования запаздывания в системах связанных автоколебательных осцилляторов. Показано, что включение линейного осциллятора с определенной добротностью между двумя идентичными автогенераторами приводит с увеличением связи к гашению автоколебаний, что аналогично введению временного запаздывания в канал связи.
- Установлено, что в системе двух автогенераторов с распределенной связью в виде конечной цепочки пассивных колебательных контуров возможно управлять режимами синхронизации и амлитудного вымирания путем изменения силы связи между взаимодействующими осцилляторами и выборе определенного числа контуров и уровня их добротности.
- Показано, что параметр диссипации индивидуального осциллятора ФитцХью-Нагумо существенно влияет на порог возникновения колебаний, индуцированных запаздыванием: чем меньше потери в индивидуальном осцилляторе (выше параметр диссипации), тем ниже порог по силе связи и тем при меньших временах запаздывания возникают синхронные режимы. Показано, что порог колебательного режима относительно времени запаздывания не зависит от параметра диссипации и для возбуждения синфазных колебаний он больше, чем для противофазных.
- Выявлено, что при определенном значении силы притягивающей межслойной связи реализуется эффект полной синфазной синхронизации бегущих волн в двухслойной сети

связанных осцилляторов ФитцХью-Нагумо, в то время как при отталкивающей межслойной связи можно достичь только эффективной (с конечной точностью) противофазной синхронизации.

Научная и практическая значимость. Полученные научные результаты вносят определенный новый вклад в радиофизику, современную теорию колебаний, теорию бифуркаций и теорию динамических систем, развивают и расширяют понимание бифуркационных механизмов возникновения мультистабильности в системах двух связанных нелинейных осцилляторов в присутствии запаздывания. Систематическое сравнение динамики двух генераторов Ван дер Поля при непосредственном запаздывании и при распределённой связи через цепочки пассивных контуров открывает новый взгляд на моделирование распределённой связи и запаздывания, что важно для выбора адекватных приближений в радиофизике. Анализ влияния степени диссипации на порог возникновения индуцированных запаздыванием синхронных синфазных и противофазных колебаний имеет важное фундаментальное значение как для радиофизических систем, так и для процессов, изучаемых в нейродинамике.

Практическая значимость обусловлена применением полученных знаний в радиофизике и технике связи, при анализе работы систем передачи информации, инфокоммуникационных и телерадиовещательных комплексов, энергетических систем, при моделировании биологических и нейронных сетей, при управлении спайковой активностью нейронных сетей. Полученные результаты о влиянии запаздывания и топологии связи на синхронизацию и гашение колебаний могут быть использованы при проектировании связанных радиофизических генераторов, в том числе работающих в микроволновом диапазоне, где конечная скорость распространения сигнала играет критическую роль.

Показанная возможность управления режимами синхронизации и гашения колебаний в системах с распределённой связью (через цепочки контуров) путём изменения количества контуров, их добротности и силы связи открывает путь для создания перестраиваемых устройств на связанных автогенераторах. Понимание того, как временные задержки (обусловленные конечной скоростью распространения потенциала действия и синаптической передачей) влияют на возбудимость и синхронизацию нейронов, имеет прямое значение для нейрофизиологии и разработки нейроморфных систем.

При выполнении диссертационной работы было создано 2 программы, на которые получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Данные программы были использованы при выполнении ряда НИР, а также в учебном процессе при постановке курсовых и выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению «Радиофизика» в институте физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского».

Апробация работы. Результаты диссертации Е.М. Елизарова прошли достойную апробацию на международных и всероссийских конференциях и школах: Международная конференция «Saratov Fall Meeting» (Саратов, 2022, 2023), Научная школа «Актуальные проблемы механики» (СПбПУ, С.-Петербург, 2022), Международная научная конференция «Динамические системы. Теория и приложения» (г. Нижний Новгород, ННГУ, 2022), Международная конференция «XX научная школа "Нелинейные волны – 2022"» (ИПФ РАН, Бор, 2022).

Полнота изложения материалов диссертации в работах. Результаты диссертационного исследования отражены в публикациях автора в полной мере. По теме диссертационной работы опубликовано 4 статьи в центральных реферируемых научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus и РИНЦ:

1. S. V. Astakhov, **E. M. Elizarov**, G. I. Strelkova, V. V. Astakov. Bifurcation analysis of delay-coupling induced bistability in coupled van der Pol oscillators. Chaos, 2025. Vol. 35, iss. 10. P. 103102.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования, проверке и визуализации полученных результатов.

2. С. В. Астахов, О. В. Астахов, **Е. М. Елизаров**, Г. И. Стрелкова, В. В. Астахов. Влияние ангармоничности на мультистабильность в автоколебательной системе с двумя степенями свободы. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика, 2024. Т. 24, вып. 1. С. 4-18.

Личный вклад автора состоит в проверке и визуализации.

3. A. V. Bukh, I. A. Shepelev, **E. M. Elizarov**, S. S. Muni, E. Scholl, G.I. Strelkova. Role of coupling delay in oscillatory activity in autonomous networks of excitable neurons with dissipation. Chaos, 2023. Vol. 33, iss. 7. P. 073114.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи, проведении исследования, проверке и визуализации, а также написании и редактировании текста.

4. A. V. Bukh, N. N. Nikishina, **E. M. Elizarov**, G. I. Strelkova. Interaction of travelling waves in multilayer networks. Cybernetics and Physics, 2024. Vol. 13, no. 3. P. 197-205.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования и создании визуализации.

в том числе 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

С. В. Астахов, О. В. Астахов, **Е. М. Елизаров**, Г. И. Стрелкова, В. В. Астахов. Влияние ангармоничности на мультистабильность в автоколебательной системе с двумя степенями свободы. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика, 2024. Т. 24, вып. 1. С. 4 - 18.

Личный вклад автора состоит в проверке и визуализации.

Также опубликовано 5 статей в сборниках материалов научных конференций, входящих в систему цитирования РИНЦ:

1. **Е. М. Елизаров**, A. V. Bukh, I. A. Shepelev, S. S. Muni, E. Schöll, G. I. Strelkova. Dissipation in the network of coupled neuron models. Saratov Fall Meeting — Saratov, Russia (Saratov State University) — September 25 — September 29 — 2023.
2. A. V. Bukh, **E. M. Elizarov**, I. A. Shepelev, G. I. Strelkova. Oscillations excited in interacting FitzHugh-Nagumo neurons due to the delay in the coupling. Advanced Problems in Mechanics — St. Petersburg, Russia (Polytech) — June 20 — June 24 — 2022.
3. A. V. Bukh, **E. M. Elizarov**, I. A. Shepelev, G.I. Strelkova. Impact of the time delay on behaviour of coupled FitzHugh-Nagumo neurons. Dynamical Systems. Theory and Applications — Nizhny Novgorod, Russia (ННГУ) — June 26 — June 29 — 2022.
4. A. V. Bukh, **E. M. Elizarov**, I. A. Shepelev, G. I. Strelkova. The impact of the delay in coupling on the behaviour of dynamical systems. Saratov Fall Meeting — Saratov, Russia (Saratov State University) — September 26 — September 30 — 2022.
5. **Е. М. Елизаров**, А. В. Бух, И. А. Шепелев, Г. И. Стрелкова. Влияние запаздывающей связи на поведение динамических систем. Нелинейные волны — Нижний Новгород, Россия (ИПФ РАН) — 7 ноября — 13 ноября — 2022.

Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2022661085 Российская Федерация. Программа расчета спектра показателей Ляпунова для сложных динамических сетей с задержкой в связи : No 2022619619 : заявл. 26.05.2022 : опубл. 15.06.2022 / Г. И. Стрелкова, А. В. Бух, Е. М. Елизаров.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2022660795 Российская Федерация. Программа для моделирования сложных динамических сетей с задержкой в связи : No 2022619505 : заявл. 26.05.2022 : опубл. 09.06.2022 / Г. И. Стрелкова, А. В. Бух, Е. М. Елизаров.

Ценность научных работ соискателя учёной степени состоит в решении ряда задач, связанных с фундаментальными принципами взаимодействия осцилляторов в малых ансамблях с запаздывающей связью, механизмами возникновения и гашения колебаний, эффектами синхронизации и мультистабильности, с влиянием топологии связи на динамику пространственно-временных и волновых структур в сетях связанных нелинейных осцилляторов. Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности «1.3.4. – Радиофизика» (п. 4 «Исследование нелинейной динамики, пространственно-временного хаоса и самоорганизации в неравновесных физических, биологических, химических и экономических системах.»).

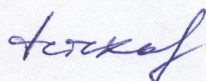
Итоговое заключение. Диссертация «Влияние запаздывания и топологии связи на динамику сложных систем» Елизарова Евгения Михайловича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика» как удовлетворяющая критериям, установленным 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 7 докторов наук и 9 кандидатов наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» – 16 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет (протокол заседания кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 11 от 15 июня 2026 г.).

Председательствующий

профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики,
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»



Астахов Владимир Владимирович

Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
Институт физики, кафедра радиофизики и нелинейной динамики
Тел.: +7 (8452) 21-07-33, e-mail: astakhovvv@icloud.com

