

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

доктор физико-математических наук, профессор

Алексей Александрович Короновский



« 2 » _____ 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

по диссертации **Корнеева Ивана Александровича** «Колебания и бифуркации в системах с мемристивными элементами» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – 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 26 декабря 2017 года № 242–Д.

Соискатель **Корнеев Иван Александрович** с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в 2017 году по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика» с присвоением квалификации «Магистр».

Справка об обучении №55-2021 выдана 10 июня 2021 года Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»).

В период подготовки диссертации соискатель обучается в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Радиофизика», работал заведующим учебной лабораторией радиофизики на кафедре радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

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»; утверждена научным руководителем приказом ректора от 26 декабря 2017 года № 242–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. *Аникин Валерий Михайлович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
2. *Стрелкова Галина Ивановна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, заведующая кафедрой 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. *Хохлов Артур Вениаминович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
5. *Четвериков Александр Петрович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
6. *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»;
7. *Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
8. *Селезнёв Евгений Петрович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
9. *Круглов Вячеслав Павлович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), научный сотрудник лаборатории теоретической нелинейной динамики Саратовского филиала ФГБун «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН».
10. *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»;
11. *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»;
12. *Павлова Ольга Николаевна*, кандидат физико-математических наук (03.00.02), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
13. *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»;

14. *Шепелев Игорь Александрович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
15. *Бух Андрей Владимировича*, инженер учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
16. *Аринушкин Павел Алексеевич*, инженер учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
17. *Рыбалова Елена Владиславовна*, инженер учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
18. *Елизаров Евгений Михайлович*, инженер учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
19. *Рамазанов Ибадулла Рамзесович*, инженер учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
20. *Богащенко Татьяна Романовна*, инженер учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

Рецензенты диссертации:

Селезнев Евгений Петрович, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,

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»,

представили положительные отзывы.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Заключение

по диссертации **Корнеева Ивана Александровича** «Колебания и бифуркации в системах с мемристивными элементами» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Актуальность работы. В диссертационной работе Корнеева И.А. решены актуальные задачи радиофизики и нелинейной динамики, заключающиеся в анализе бифуркационных механизмов в системах с мемристивными элементами, выявлении особенностей синхронизации мемристивно-связанных автогенераторов и установлении влияния мемристивного характера связи в ансамблях осцилляторов различного типа на волновые структуры. Результаты работы носят фундаментальный характер, расширяют и дополняют имеющиеся представления о влиянии мемристивных элементов на динамику колебательных и волновых систем.

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. Все защищаемые результаты диссертации получены соискателем лично в ходе численных и натуральных экспериментов, а также аналитическими методами в квазигармоническом приближении. Соискателем разработаны программы, с помощью которых проводились численные расчеты и обработка экспериментальных 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) согласованием данных, полученных посредством компьютерного моделирования и в экспериментах с использованием средств аналогового моделирования, с результатами теоретического анализа; 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, связанных с анализом динамики мемристивных систем и систем с мемристивными элементами.

В диссертации впервые получены следующие научные результаты:

- Установлены детали бифуркационных механизмов возникновения колебаний в генераторе с мемристивной проводимостью при кусочно-гладкой и гладкой характеристиках мемристора. При этом впервые результаты численного моделирования подтверждены теоретическими результатами, полученными в рамках квазигармонического анализа, а также результатами аналогового моделирования.
- Методами численного моделирования и квазигармонического анализа показан эффект фазового захвата для мемристивных генераторов периодических колебаний и установлена зависимость границ частотно-фазовой синхронизации мемристивного генератора периодических сигналов от начальных условий, в частности, от начального состояния мемристора.
- Методами компьютерного эксперимента показано существование порога синфазной синхронизации двух взаимодействующих мемристивных генераторов периодических сигналов.
- На примере генераторов ван дер Поля численно и аналитически показано, что границы области частотно-фазовой синхронизации периодических генераторов с расстройкой частот, связанных через мемристор, зависят от начального состояния мемристора и непрерывным образом меняются с изменением начального значения переменной, задающей состояние мемристора связи.
- Численно и, частично, в аналоговом эксперименте, показано, что малое отклонение мемристивного элемента от идеального приводит к исчезновению большинства особенностей мемристивных систем, таких как существование линий равновесий и поверхностей замкнутых кривых, существование бифуркаций без параметра, зависимость границ синхронизации периодических колебаний от начальных условий.
- На примере идентичных хаотических генераторов Анищенко-Астахова, логистических отображений с мемристивной связью и двухслойной мультиплексной однородной сети

логистических отображений с нелокальной диссипативной внутрислойной связью и мемристивной связью между слоями установлено, что граница полной синхронизации сосредоточенных и распределенных систем со сложной динамикой при взаимодействии через неидеальные мемристоры сохраняет определенную зависимость от начального состояния мемристивных элементов связи, если они обладают достаточно длинной памятью.

- На примере двух моделей (кольца генераторов ван дер Поля с квазигармоническим поведением и кольца осцилляторов ФитцХью-Нагумо в режиме сильно релаксационных автоколебаний) показано, что при связи через идеальные мемристоры форма бегущей волны зависит от начальных условий, в частности от начальных состояний мемристоров связи.
- На примере кольца осцилляторов ФитцХью-Нагумо в возбужденном режиме обнаружено, что не только форма профиля волны возбуждения, но и скорость распространения волны по кольцу (и, соответственно, период колебаний осцилляторов ансамбля) существенно зависят от начальных состояний мемристоров связи. Показано, что данная зависимость частично сохраняется при неидеальных мемристорах связи с очень длительной памятью (очень малым параметром забывания).

Положения, выносимые на защиту:

1. В генераторе с идеальным мемристором Чуа, проводимость которого принимает одно из двух постоянных значений в зависимости от значений управляющей переменной, при вариации параметра, контролирующего подкачку энергии в систему, могут наблюдаться как жесткая, так и мягкая бифуркации возникновения колебаний, в которых принимают участие непрерывные множества точек равновесия и замкнутых кривых. Жесткий бифуркационный сценарий имеет место в генераторе с постоянной отрицательной проводимостью и состоит в возникновении непрерывного множества замкнутых кривых конечного размера. Мягкий сценарий возникновения колебаний реализуется в случае кубической характеристики активного элемента и аналогичен суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа. В результате бифуркации в этом случае рождается непрерывное множество замкнутых кривых бесконечно малого радиуса.
2. В генераторе с постоянным отрицательным сопротивлением и идеальным мемристором, проводимость которого задается гладкой функцией управляющей переменной, при вариации параметра, контролирующего подкачку энергии в систему, происходит мягкая бифуркация возникновения колебаний. Эта бифуркация соответствует суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа и для различных точек на линии равновесия происходит не одновременно, а при различных значениях управляющего параметра.
3. Частота и фаза колебаний мемристивного генератора с идеальной мемристивной проводимостью могут быть захвачены при внешнем периодическом воздействии или вследствие взаимодействия с другим генератором. При этом граница области синхронизации зависит от начального состояния системы и, при фиксированных параметрах системы, может управляться с помощью начального значения переменной, задающей состояние мемристора.
4. Граница полной синхронизации систем со сложной динамикой, как сосредоточенных, так и распределенных, взаимодействующих через мемристивные элементы связи,

зависит от начального состояния этих элементов связи, причем эта зависимость сохраняется и в случае, когда мемристоры не являются строго идеальными, а характеризуются конечным, но достаточно длительным временем памяти.

5. В ансамбле возбудимых осцилляторов с мемристивными связями и периодическими граничными условиями можно управлять характеристиками бегущих волн возбуждения (формой импульсов и периодом колебаний осцилляторов), меняя начальные состояния мемристоров связи, причем влияние начальных состояний имеет место не только в случае идеальных мемристоров, но и в случае мемристоров с конечным, но достаточно длительным временем памяти.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертации расширяют представления современной теории нелинейных колебаний и волн, радиофизики и нелинейной динамики о бифуркационных механизмах и особенностях синхронизации мемристивных систем. В работе установлены основные бифуркационные сценарии возникновения периодических колебаний в генераторе с мемристивной проводимостью и показаны их особенности, связанные с мемристивным характером системы. Установлен эффект фазового захвата при вынужденной и взаимной синхронизации мемристивных систем. Установлена особая роль начальных условий при синхронизации мемристивных генераторов, а также при синхронизации «обычных» периодических и хаотических генераторов, взаимодействующих через мемристивные элементы связи. Показано, что в некоторых случаях с помощью выбора начального состояния мемристоров можно управлять эффектом синхронизации. Показана важность эффекта забывания мемристивных элементов, который всегда присутствует в реальных мемристивных устройствах и учет которого существенным образом влияет на динамику мемристивных систем. Установлена важная роль мемристивных связей в формировании бегущих волн в ансамблях автогенераторов и возбудимых осцилляторов с периодическими граничными условиями. Показано, что характеристики волновых процессов зависят от выбора начальных состояний мемристивных элементов связи. Особенно сильно эта зависимость проявляется в случае возбудимой динамики элементов ансамбля. Полученные результаты свидетельствуют о возможности управления волновыми процессами в возбудимых системах с помощью влияния на начальные состояния мемристивных связей.

Прикладное значение результатов исследования определяется перспективами применения мемристивных устройств в системах обработки информации, таких как адаптивные фильтры и нейронные сети, а также при создании новых видов запоминающих устройств. Большой интерес полученные результаты могут представлять для задач моделирования в нейродинамике и биофизике (например, при моделировании синапса нейрона).

Результаты диссертации использовались при выполнении грантов РФФИ (проекты № 19-32-90030 и № 20-52-12004 «Исследование вынужденной синхронизации в мемристивном генераторе и синхронизации в мемристивно связанных автогенераторах с гладкой характеристикой мемристора»), РФФИ (проект № 20-12-00119 «Влияние мемристивного характера связи на волновые структуры в ансамблях с возбудимой и хаотической динамикой элементов»), Минобрнауки РФ в рамках базовой части Государственного задания и Немецкого Физического Общества (DFG) в рамках проекта SFB 910 (проект № 3.8616.2017 «Исследование мягкого и жесткого возникновения колебаний в мемристивном генераторе; синхронизация мемристивно связанных автогенераторов с кусочно-линейной характеристикой мемристора»).

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на всероссийских и международных конференциях, школах и семинарах: «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2014–2017); «Saratov Fall Meeting» (Саратов, 2016, 2018, 2020); «Dynamics, Bifurcations and Chaos» (Нижний Новгород, 2017, 2018); «Workshop on Control of Self-Organizing Nonlinear Systems» (Лютерштадт-Виттенберг, Германия, 2019); XIX научная школа «Нелинейные волны – 2020» (Нижний Новгород, 2020).

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 опубликовано 10 статей в центральных реферируемых научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ и рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Numerical and experimental studies of attractors in memristor-based Chua's oscillator with a line of equilibria. Noise-induced effects / Semenov V.V., **Korneev I.A.**, Arinushkin P.A., Strelkova G.I., Vadivasova T.E., Anishchenko V.S. // The European Physical Journal Special Topics. – 2015. – V. 224(8). – P. 1553–1561.
2. Hard and soft excitation of oscillations in memristor-based oscillators with a line of equilibria / **Korneev I.A.**, Vadivasova T.E., Semenov V.V. // Nonlinear Dynamics. – 2017. – V. 89(4). – P. 2829–2843.
3. Andronov-Hopf bifurcation with and without parameter in a cubic memristor oscillator with a line of equilibria / **Korneev I.A.**, Semenov V.V. // Chaos. – 2017. – V. 27(8). – P. 081104.
4. Синхронизация автогенераторов, взаимодействующих через мемристор / **Корнеев И.А.**, Шабалина О.Г., Семенов В.В., Вадивасова Т.Е. // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – V. 26(2). – P. 24–40.
5. Forced synchronization of an oscillator with a line of equilibria / **Korneev I.A.**, Slepnev A.V., Semenov V.V., Vadivasova T.E. // The European Physical Journal Special Topics. – 2020. – V. 229(12). – P. 2215–2224.
6. Synchronization of periodic self-oscillators interacting via memristor-based coupling / **Korneev I.A.**, Semenov V.V., Vadivasova T.E. // International journal of bifurcation and chaos. – 2020. – V. 30(7). – P. 2050096.
7. Взаимная синхронизация диссипативно связанных мемристивных генераторов / **Корнеев И.А.**, Слепнев А.В., Семенов В.В., Вадивасова Т.Е. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2020. – V. 20(3). – P. 210–221.
8. Волновые процессы в кольце мемристивно связанных автогенераторов / **Корнеев И.А.**, Слепнев А.В., Семенов В.В., Вадивасова Т.Е. // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – V. 28(3). – P. 324–340.
9. Complete synchronization of chaos in systems with nonlinear inertial coupling / **Korneev I.A.**, Semenov V.V., Slepnev A.V., Vadivasova T.E. // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – V. 142. – P. 110459.
10. The impact of memristive coupling initial states on travelling waves in an ensemble of the FitzHugh-Nagumo oscillators / **Korneev I.A.**, Semenov V.V., Slepnev A.V., Vadivasova T.E. // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – V. 147. – P. 110923.

Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Программа для численного исследования вынужденной синхронизации мемристивного автогенератора, **Корнеев И.А.**, Слепнев А.В., Вадивасова Т.Е. №2021619548, 2021.
2. Программа для численного анализа пространственно-временной динамики ансамбля нейронов ФитцХью – Нагумо с мемристивной связью, **Корнеев И.А.**, Слепнев А.В., Вадивасова Т.Е. № 2021619547, 2021.

Итоговое заключение. Диссертация «Колебания и бифуркации в системах с мемристивными элементами» Корнеева Ивана Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «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 8 докторов наук и 6 кандидатов наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» - 14 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет (протокол заседания кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 8 от 18 июня 2021 г.).

Председательствующий
доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной
динамики института физики

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
Институт физики,
Кафедра радиофизики и нелинейной динамики.
Тел.: +7 (8452) 21-07-10
E-mail: strelkovagi@sgu.ru

Стрелкова Галина Ивановна

