

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НИР

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Алексей Александрович Короновский

«24» сентября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

по диссертации **Адиловой Асель Булатовны** «Влияние запаздывания в канале связи на синхронизацию связанных автогенераторов с предельным циклом» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — «Радиофизика», выполненной на кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 02.03.2020 №33-Д.

Адилова Асель Булатовна окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в 2015 г. по направлению «Радиофизика» с присвоением квалификации «Магистр».

Диплом об окончании аспирантуры по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» выдан в 2019 г. ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

В настоящее время Адилова А.Б. работает ассистентом на кафедре нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель — Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора СГУ от 02.03.2020 №33-Д, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других образовательных учреждений высшего образования и научных организаций.

На заседании присутствовали:

1. *Бегинин Евгений Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики СГУ.
2. *Рыскин Никита Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН факультета нелинейных процессов СГУ.
3. *Шараевский Юрий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нелинейной физики СГУ.
4. *Савин Алексей Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нелинейной физики СГУ.
5. *Каретникова Татьяна Андреевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нелинейной физики СГУ.
6. *Рожнев Андрей Георгиевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, доцент кафедры нелинейной физики СГУ.
7. *Мельникова Мария Михайловна*, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры нелинейной физики СГУ.
8. *Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики открытых систем СГУ.
9. *Вадивасова Татьяна Евгеньевна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики физического факультета СГУ.
10. *Шабунин Алексей Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики физического факультета СГУ.
11. *Пономаренко Владимир Иванович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ.

12. *Астахов Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ.
13. *Караваев Анатолий Сергеевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ.
14. *Слепченков Михаил Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики физического факультета СГУ.
15. *Гришин Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ.
16. *Тюрюкина Людмила Владимировна*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, доцент кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН факультета нелинейных процессов СГУ.
17. *Савин Дмитрий Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
18. *Титов Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
19. *Садовников Александр Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
20. *Шешукова Светлана Евгеньевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
21. *Балакин Максим Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникации Института электронной техники и приборостроения СГТУ.
22. *Матвеев Олег Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы» СГУ.

Рецензенты диссертации:

Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представил положительный отзыв.

Тюрюкина Людмила Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, доцент кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН факультета нелинейных процессов СГУ представила положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

В диссертации Адиловой А.Б. проведен бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух автоколебательных осцилляторов, связанных с задержкой, в случаях мягкого и жесткого самовозбуждения. Разработана модифицированная квазилинейная модель системы двух связанных гиротронов, на основе которой проведен бифуркационный анализ процессов синхронизации. Также проведено численное моделирование режимов синхронизации на основе нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля.

Научная новизна результатов работы.

1. Построена детальная картина синхронизации в системе двух автоколебательных осцилляторов с кубичной нелинейностью, связанных с задержкой. Подробно исследовано влияние таких параметров как частотная расстройка, набег фазы в канале связи, параметр неизохронности.

2. Проведен бифуркационный анализ режимов синхронизации в системе двух генераторов с жестким возбуждением, связанных с задержкой. Исследованы механизмы формирования и исчезновения мультистабильности синхронных режимов.

3. Предложена модифицированная квазилинейная модель системы гиротронов, связанных с задержкой, в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Результаты моделирования, полученные на ее основе, количественно хорошо согласуются с расчетами по теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля. Проведен бифуркационный анализ режимов синхронизации, результаты которого качественно согласуются с результатами, полученными для моделей с полиномиальными нелинейностями.

4. Предложен физически обоснованный способ управляемых переключений между синфазной и противофазной модами в системе двух связанных гиротронов,

который основан на кратковременном уменьшении мощности генерации одного из гиротронов.

Научно-практическая значимость результатов диссертации связана с тем, что на их основе могут быть предложены способы обеспечения когерентных режимов работы в ансамблях мощных генераторов (гиротронов, магнетронов и т.д.), широко применяющихся для получения микроволнового излучения высокой мощности. Выявленные режимы быстрого переключения между синфазной и противофазной модами также могут найти применение для ряда приложений СВЧ-электроники, например, для подавления плазменных неустойчивостей в процессе СВЧ-нагрева.

Ценность научных работ соискателя определяется тем, что результаты диссертации развивают теорию взаимной синхронизации двух автоколебательных систем, связанных с задержкой. В результате проведенного подробного бифуркационного анализа установлены принципиальные отличия от известной картины взаимной синхронизации двух связанных автогенераторов с одной степенью свободы, обусловленные влиянием запаздывания сигнала в канале связи. Они выражаются в наличии мультистабильности синхронных режимов и в особенностях устройства областей синхронизации на плоскости параметров «частотная расстройка – коэффициент связи».

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях:

- The 20th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019), Busan, Korea, 2019;
- 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019), Paris, France, 2019;
- 3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018), Нижний Новгород, 2018;
- 10th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Нижний Новгород – Москва, 2017;
- Международный симпозиум “Saratov Fall Meeting”, Саратов, 2016, 2017 гг.;
- Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП). Саратов, 2016, 2018, 2020 гг.;

- XVII Зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике, Саратов, 2018;
- Международные школы–конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС). Саратов, 2016, 2019 гг.;
- VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2017;
- III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы СВЧ электроники им. В.А. Солнцева 2017», Москва, 2017;
- Всероссийские научные школы «Нелинейные волны». Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2018, 2020 гг.;
- Всероссийские конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 2016-2020.

Результаты диссертации также докладывались на научных семинарах факультета нелинейных процессов СГУ, отдела электронных приборов ИПФ РАН и на заседаниях Саратовского отделения IEEE.

Личный вклад. Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Соискателем выполнен бифуркационный анализ режимов синхронизации в рассматриваемых системах, разработаны используемые программы компьютерного моделирования, проведены численные эксперименты. Постановка задачи, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, а также с соавторами опубликованных работ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, соответствием результатов бифуркационного анализа и численного моделирования, качественным соответствием результатов, полученных для различных моделей связанных систем, воспроизведением в качестве тестовых расчетов достоверных общепризнанных результатов, известных из литературы, а также широкой апробацией результатов работы, обсуждением результатов работы на многочисленных международных и всероссийских конференциях.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 25 работ, из них 4 статьи в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в между-

народных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 9 работ в трудах конференций, индексируемых в базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, а также 12 работ в сборниках трудов всероссийских конференций.

1. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух генераторов с запаздыванием в цепи связи // *Нелинейная динамика*. 2017. Т. 13, № 1. С. 3-12.
2. **Адилова А.Б.**, Рыскин Н.М. Исследование синхронизации в системе двух гиротронов с запаздыванием в канале связи на основе модифицированной квазилинейной модели // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2018. Т. 26, № 6. С. 68-81.
3. **Адилова А.Б.**, Преображенская Н.В., Рыскин Н.М. К теории синхронизации двухмодового электронного мазера с жестким возбуждением // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Физика*. 2019. Т. 19, № 1. С. 19-27.
4. **Adilova A.B.**, Gerasimova S.A., Melnikova M.M., Tyshkun A.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Using phase locking for improving frequency stability and tunability of THz-band gyrotrons // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10717. Art. no. 107170A.
5. **Adilova A.B.**, Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Synchronization of delay-coupled gyrotron oscillators // *European Phys. J. Web of Conferences*. 2017. Vol. 149. 04029.
6. **Adilova A.B.**, Ryskin N.M. Study of mutual phase locking of two gyrotrons coupled with delay // *European Phys. J. Web of Conferences*. 2018. Vol. 195. No. 6. 01001.
7. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Взаимная синхронизация двух гиротронов, связанных с задержкой // *Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы научно-технической конференции*. Саратов: СГТУ, 2016. Т. 1. С. 5-8.
8. **Адилова А.Б.**, Мельникова М.М., Преображенская Н.В., Рыскин Н.М. Влияние конкуренции мод на процессы синхронизации в гиротроне // *Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции*. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 201-205.
9. **Adilova A.B.**, Ryskin N.M. Study of synchronization of delay-coupled oscillators with hard excitation // *Proceedings of the 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia. 2020. P. 20-23.

10. **Adilova A.B.**, Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Study of interaction of two gyrotrons with time-delay coupling // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). London, United Kingdom, 24-26 April 2017. P. 8289706.
11. **Adilova A.B.**, Ryskin N.M. Multistability of phase-locked modes in a system of two delay-coupled gyrotron oscillators // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Busan, South Korea, 2019. P. 8744700.
12. Melnikova M.M., **Adilova A.B.**, Ryskin N.M. Using reflections for suppressing parasitic oscillation in a multimode gyrotron // 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 1-6 Sept. 2019, Paris, France. P. 8874071.
13. **Adilova A.B.**, Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Mutual phase locking of two gyrotrons coupled with delay // 41st Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Copenhagen, Denmark, 2016. P. 7758516
14. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Взаимная синхронизация двух гиротронов, связанных с задержкой // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сб. статей VI Всероссийской конференции. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. С. 223-226.
15. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Исследование взаимной синхронизации связанных гиротронов в режиме жесткого возбуждения // Проблемы СВЧ электроники. Сб. трудов III Всероссийской конференции им. В.А. Солнцева. М.: ИД Медиа Пабlishер, 2017. С. 20-21.
16. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Взаимная синхронизация двух гиротронов, связанных с задержкой // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов XI Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2016. С. 7-8.
17. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Влияние неизохронности на синхронизацию двух генераторов, связанных с задержкой // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 6-7.
18. **Адилова А.Б.**, Рыскин Н.М. Изучение динамики двухмодовых гиротронов в режиме жесткого возбуждения с запаздыванием в цепи связи // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2018. С. 8-9.
19. Преображенская Н.В., **Адилова А.Б.**, Рыскин Н.М. Синхронизация внешним сигналом двухмодовой автоколебательной системы с жестким возбуждением

// «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2018. С. 230-231.

20. **Адилова А.Б.**, Рыскин Н.М. Исследование влияния неизохронности на режимы взаимной синхронизации двух генераторов, связанных с задержкой // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 8-9.
21. **Адилова А.Б.**, Рыскин Н.М. Мультистабильность режимов взаимной синхронизации двух гиротронов, связанных с задержкой // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XIV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2020. С. 6-7.
22. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Синхронизация двух гиротронов, связанных с задержкой // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ, 5-10 февраля 2018 г., Саратов: ООО «Издательский центр «Наука». С. 60.
23. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Балакин М.И., Рыскин Н.М. Синхронизация генераторов, связанных с задержкой // Материалы XII Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2019). 2019. С. 34-35.
24. **Адилова А.Б.**, Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Исследование взаимной синхронизации связанных гиротронов в режиме жесткого возбуждения // «Нелинейные волны–2018». XVIII научная школа. Тезисы докладов молодых ученых. Ниж. Новгород: ИПФ РАН. 2018. С. 5-6.
25. **Адилова А.Б.**, Балакин М.И., Рыскин Н.М. Влияние запаздывания на взаимную синхронизацию двух автоколебательных систем // Нелинейные волны–2020. XIX научная школа. 29 февраля – 6 марта 2020 года, Нижний Новгород. Тезисы докладов. Ниж. Новгород: ИПФ РАН. С. 33.

Общая оценка диссертации. Диссертационная работа «Влияние запаздывания в канале связи на синхронизацию связанных автогенераторов с предельным циклом» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи радиофизики, заключающейся в выявлении основных механизмов и закономерностей процессов синхронизации в системах двух автогенераторов, связанных с задержкой, и в применении полученных результатов для анализа взаимной синхронизации двух связанных гиротронов. Диссертация вы-

полнена на высоком уровне с применением современных методов теоретического анализа и компьютерного моделирования. Основные положения и результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных статьях и материалах конференций. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.04.03—«Радиофизика», удовлетворяя пп. 1,4 паспорта данной специальности. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Влияние запаздывания в канале связи на синхронизацию связанных автогенераторов с предельным циклом» Адиловой Асель Булатовны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». На заседании присутствовало 22 человека, из них 8 докторов наук и 14 кандидатов наук по профилю диссертации. Результаты голосования: «за» – 22 чел., «против» – нет, воздержались – нет (протокол № 2 от 22 сентября 2020 г).

Заведующий кафедрой нелинейной физики
факультета нелинейных процессов
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,
к.ф.-м.н., доцент


410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел.: 8(8452)516947
e-mail: egbegin@gmail.com

Бегинин Евгений Николаевич

