

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.01,
созданного на базе **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук,** по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 18 апреля 2025 г., №2

О присуждении Темной Ольге Станиславовне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация на тему: «**Управление затуханием волн и колебаний намагниченности спиновым током в связанных ферромагнитных структурах**» принята к защите 14 февраля 2025, протокол № 3, диссертационным советом 24.1.111.01, созданным на базе **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) (125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп.7)** (приказ Рособнадзора о создании совета № 2397-1776 от 07.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 75/нк от 15.02.2013 г.)

Соискатель Темная Ольга Станиславовна, 1994 года рождения, в 2018 г. окончила **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»** с отличием с присвоением квалификации Магистр по специальности 12.04.04 «**Биотехнические системы и технологии**».

С сентября 2019 г. по март 2021 г. Темная О.С. обучалась в аспирантуре **Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»** на кафедре теоретической физики и квантовых технологий, специальность 01.04.07 – «**Физика конденсированного состояния**».

С марта 2021 г. по сентябрь 2023 г. Темная О.С. обучалась в очной аспирантуре **ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН** по специальности 1.3.8 – «**Физика конденсированного состояния**». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2025 г. Отделом аспирантуры, докторантуры и стажировки **ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН**.

В настоящее время Темная О.С. работает в лаборатории №230 «**Магنونная спинтроника**» **ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН** в должности младшего научного сотрудника.

Работа выполнена в лабораториях №191 «**Исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур**» и №230 «**Магنونная спинтроника**».

Научный руководитель: Никитов Сергей Аполлонович, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 «**Физика полупроводников и диэлектриков**»), профессор, академик РАН, директор **ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,** руководитель лаборатории №191 «**Исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур**».

Официальные оппоненты:

Преображенский Владимир Леонидович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН;

Чубчев Евгений Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-теоретического отдела 0070 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра магнетизма, **в своем положительном отзыве**, подписанном Перовым Николаем Сергеевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой магнетизма и Грановским Александром Борисовичем, профессором, профессором кафедры магнетизма физического факультета МГУ и утвержденном Федяниным Андреем Анатольевичем, доктором физико-математических наук, проректором МГУ, **указала**, что диссертация Темной Ольги Станиславовны «Управление затуханием волн и колебаний намагниченности спиновым током в связанных ферромагнитных структурах» является завершенным научным трудом и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Темная О.С., **достойна** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния». В отзыве отмечено, что поставленные задачи решены на высоком теоретическом уровне, цель диссертационного исследования достигнута. Основные положения работы и выводы сформулированы ясно и аргументированно. Полученные результаты обладают несомненной научной значимостью и новизной.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В первой главе подробно обсуждаются особые точки в магнетонных структурах и перспективы создания высокочувствительных сенсоров, при этом нигде далее нет теоретического анализа чувствительности подобного сенсора.
2. Во второй и третьей главах рассматриваются возбуждения поверхностных спиновых волн. Известно, что в магнетонных структурах также могут существовать прямые и обратные объемные волны. В тексте никак не приведено объяснение выбора частного случая выбора только одного типа волн.
3. Автор не всегда четко оговаривает ограничения рассматриваемых моделей и обосновывает выбор параметров для расчета. Например, в главе 2 принимается концепция макроспина однородности инжектированного спинового тока, хотя ясно, что ситуация более сложная, не говоря уже об отражении магнетонных мод от границ и поверхности образца. Значение феноменологического параметра C вообще не указано при сравнении результатами работы [69].

4. В работе указывается, что усиление амплитуд спиновых волн может происходить при больших плотностях постоянного электрического тока. На практике такие плотности тока могут приводить тому, что структуры физически разрушаются. В тексте диссертации отсутствует обсуждение этого вопроса.
5. В работе встречаются неточности формулировках, опечатки в формулах. Например, вместо "эластичных и неэластичных" процессов рассеяния (стр.23) следует говорить об упругих и неупругих процессах; в формулах 1.27 на стр.28 пропущен штрих у ϵ в последнем члене, (после нее идет почему-то формула 1.24), и она же на стр.37 пишется в других обозначениях, причем под номером 1.26, который ранее был присвоен уравнению Ландау-Лифшица.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 10 работах, в том числе 6 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus и входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, и 4 тезиса докладов в трудах международных и российских конференций. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Temnaya O.S., Safin A.R., Kalyabin D.V., and Nikitov S.A. ParityTime Symmetry in Planar Coupled Magnonic Heterostructures // *Physical Review Applied*. – 2022. Vol. 18. No. 014003.
2. Темная О.С., Сафин А.Р., Кравченко Д.В., Никитов С.А. Влияние нелинейности на особую точку в системе связанных осцилляторов Дуффинга // *Радиотехника и электроника*. – 2023. Т. 68. № 9. С. 893-896
3. O. Temnaya, S. Nikitov. Non-Isochronous Exceptional Point Shift in Coupled Spin-Torque Nano-Oscillators // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2024. V. 598, 171999.
4. Темная О.С., Никитов С.А. Влияние спинового эффекта Холла на резонансную частоту и магнитную восприимчивость магنونного нановолновода // *Письма в журнал экспериментальной и технической физики*. 2024. – Т. 120, вып. 10, с. 781-784.
5. Темная О.С., Никитов С.А. Перекачка энергии между связанными планарными магنونными волноводами вблизи особой точки // *Письма в журнал экспериментальной и технической физики*. 2024. – Т. 120, вып. 2, с. 125-129.
6. Темная О.С., Никитов С.А. РТ-симметричные планарные связанные гетероструктуры ферромагнетик/нормальный металл // *Нелинейный мир*. – 2022. Т.20. №2. С. 43-47.

Результаты диссертации опубликованы в следующих трудах международных и всероссийских конференций:

7. Temnaya O.S., Kalyabin D.V., Nikitov S.A. Dynamics of an exceptional point in a system of two coupled magnetic waveguides // *International Conference "Functional Materials": Book of Abstracts, October 4-8, 2021. Alushta, Crimea*. P. 110.

8. Temnaya O.S., Safin A.R., Kalyabin D.V., and Nikitov S.A. Nonlinear limitation of resonance frequency growth of spin waves in exceptional points // VIII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Book of Abstracts, 22-26 August 2022. Kazan, Russia. P 214.
9. Темная О.С., Калябин Д.В., Никитов С.А. Управление динамикой особой точки в структуре ферромагнитный диэлектрик/нормальный металл // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 29 ноября – 3 декабря, 2023. Долгопрудный, Россия. С. 205-206.
10. Темная О.С., Никитов С.А. Влияние спинового эффекта Холла на резонансную частоту и магнитную восприимчивость магнетонного нановолновода // Тезисы научной школы "Нелинейные волны-2024", 5-11 ноября 2024. Нижний Новгород, Россия. С. 259-260.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На автореферат диссертации поступили отзывы:

- Из ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» от доктора химических наук, профессора кафедры неорганической химии химического факультета Кауля Андрея Рафаиловича. Отзыв положительный. Замечаний по автореферату нет.
- Из Института физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук от доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Глазкова Василия Николаевича. Отзыв положительный. (Замечания: 1. Результаты моделирования параметров спин-волновых линий в работе имеют очевидные приложения к проводящимся или планируемым экспериментальным исследованиям. Считаю, что работу бы украсило описание «принципа работы» какого-то спин-волнового прибора, использующего возможность управления особой точкой связанных спин-волновых систем при помощи спиновых токов. 2. В автореферате автор злоупотребляет использованием аббревиатур, не всегда широко распространенных (например, СТНО). В работе есть необходимые расшифровки, однако экономия букв на аббревиатурах идет во вред восприятию текста работы).
- Из ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» от доктора физико-математических наук, профессора кафедры физической электроники и технологии Устинова Алексея Борисовича. Отзыв положительный. (Замечание: нет аналитического вывода формулы для особой точки в связанных спинтронных осцилляторах в нелинейном случае, что существенно обогатило бы работу).
- Из ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук» от кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией физики ферроиков, ведущего научного сотрудника Калашниковой Александры Михайловны. Отзыв положительный. (Замечания: 1. В автореферате не хватает обсуждения физической природы наблюдаемых эффектов. Например, непонятно, как именно нелинейность влияет на положение особых точек. 2. При описании задачи и результатов Главы 2 следовало бы более четко описать параметры рассматриваемой системы. Например, не вполне ясно, что означают импульсы, изображенные на Рис.1, если результаты получены для постоянного тока? Также следовало бы уточнить, за счет какого эффекта происходит сдвиг дисперсионной кривой, показанный на Рис.2б. 3. Хотя аналитические и численные результаты, представленные в работе, являются общими и могут быть применены для анализа и предсказания поведения систем из различных ферромагнетиков и немагнитных металлов и с различными геометрическими параметрами, следовало указать, являются ли диапазоны некоторых параметров достижимыми в реальных системах. Это касается, например, параметра нелинейности $\beta \approx 0.79$ для системы из наноосцилляторов, рассмотренной в главе 4. 4. В качестве технического замечания следует указать, что в пояснениях к Ур.(1) указан параметр γ_0 , который в уравнении не используется).

- Из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» от доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой теоретической физики и квантовых технологий Мухина Сергея Ивановича. Отзыв положительный. (Замечания: 1. Из автореферата не совсем понятно, была ли произведена оценка энергетических (джоулевых) потерь на протекание постоянного электрического тока в нормальном металле управляющего спектром магнонов в ферромагнетике, что важно для оценки энергетической выгоды, по сравнению с электронными схемами, предлагаемой магнонной структуры в устройствах обработки информации. 2. Уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта являются уравнениями классической динамики намагниченности. Было бы интересно оценить вклад квантовых возбуждений в виде спиновых волн и создаваемые в системе шумы, которые могут затруднять считывание и обработку полезной информации в устройствах магноники).

Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации:

Преображенский Владимир Леонидович, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 – «Физика полупроводников и диэлектриков»), главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук – является крупным специалистом в области физики магнитных явлений, теории колебаний и волн.

Чубчев Евгений Дмитриевич, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 – «Радиофизика»), старший научный сотрудник научно-теоретического отдела 0070 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» – является высококвалифицированным специалистом в области физики наноразмерных структур, теории колебаний и волн.

Официальные оппоненты широко известны своими достижениями в данных отраслях науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (физический факультет, кафедра магнетизма) известно своими разработками и исследованиями в области физики магнитных явлений, спинтроники и нелинейной теории колебаний и волн. Многочисленные работы его сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: проведен анализ влияния компенсации собственного затухания колебаний и волн намагниченности на различные параметры и характеристики магнитных структур. Показано, что в пространствах параметров таких систем могут возникать особые точки, где вырождаются собственные частоты системы и собственные моды. Предложена и обоснована методика расчета характеристик связанных магнитных структур с особой точкой в пространстве параметров «электрический ток-частота». Показано, как величина напряжения, при котором в системе возникает особая точка, зависит от расстояния между структурами. В системе связанных спинтронных осцилляторов исследованы нелинейные эффекты, такие как изменение коэффициента неизохронности, параметра связи осцилляторов и величины постоянного электрического тока, при котором в системе возникает особая точка, при изменении ориентации внешнего магнитного поля и угла поляризации спинового тока.

Теоретическая значимость исследования: предложена и разработана математическая модель, описывающая распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в дипольно связанных структурах «ферромагнетик-нормальный металл», в которых с помощью спинового эффекта Холла компенсируется и усиливается собственное затухание спиновых волн. Найдены условия существования особой точки в пространстве параметров системы «электрический ток-частота». Проведен анализ влияния спинового тока на длину перекачки спиновых волн в связанных структурах «ферромагнетик-нормальный металл», а также влияния рассогласования в собственных затуханиях и волновых числах спиновых волн на величину постоянного электрического тока, при котором в системе возникает особая точка. В системе связанных спин-трансферных наноосцилляторов, находящихся во внешнем

магнитном поле, проанализировано влияние угла поля относительно плоскости структур на неизохронность осцилляторов, константу связи между структурами, смещение собственных частот и расталкивание нормальных мод. Проведен анализ влияния нелинейности системы связанных спин-трансферных наноосцилляторов на величину постоянного электрического тока, при котором возникает особая точка. Полученные в работе результаты, несомненно, уточняют и углубляют фундаментальные знания о спектральных особенностях связанных магнетонных и спинтронных структур.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: представленные в диссертации новые сведения о спектральных характеристиках связанных магнетонных и спинтронных структур с компенсацией затухания волн и колебаний намагниченности могут быть использованы при проектировании новых элементов функциональной электроники, таких как направленные ответвители и сенсоры магнитных полей. Обнаруженные особенности поведения нормальных частот связанных магнетонных волноводов можно использовать для создания невзаимных устройств.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: для получения результатов диссертационной работы предложена математическая модель для описания динамики намагниченности в двух связанных магнетонных волноводах в магнитостатическом приближении. Модель основана на решении уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, она учитывает дополнительное затухание, вносимое с помощью спинового эффекта Холла на границе раздела ферромагнетик-нормальный металл. Вторая модель, описывающая динамику намагниченности в двух дипольно связанных спин-трансферных наноосцилляторах, также получена решением этого уравнения.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается их воспроизводимостью, согласованностью с результатами других авторов, использованием стандартных математических методов обработки данных.

Основные результаты диссертационного исследования были опубликованы в ведущих международных и российских журналах, а также апробированы на специализированных международных и отечественных конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в том, что все материалы и результаты, вошедшие в данную диссертационную работу, подготовлены лично автором или при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. На все заданные в ходе заседания вопросы Темная О.С. дала аргументированные ответы.

На заседании 18 апреля 2025 г. диссертационный совет принял решение за работу, развивающую представления о спектральных особенностях дипольно связанных магнетонных и спинтронных структур с компенсацией затухания волн и колебаний намагниченности, имеющую значение для углубления фундаментальных знаний в области физики магнитных микро- и наноструктур, присудить Темной О.С. ученую степень кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 14 человек, из которых 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

И.о. заместителя председателя диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор
Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-
математических наук



С.В. Зайцев-Зотов

И.Е. Кузнецова

«18» апреля 2025 г.