

На правах рукописи



ТЕМНАЯ Ольга Станиславовна

**Управление затуханием волн и колебаний намагниченности
спиновым током в связанных ферромагнитных структурах**

Специальность **1.3.8** –
«Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Научный руководитель: **НИКИТОВ Сергей Аполлонович**
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН

Официальные оппоненты: **ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ Владимир Леонидович**
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «18» апреля 2025 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 (Д 002.231.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Temnaya/dissertation.pdf>.

Автореферат разослан “ ” _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.111.01 (Д002.231.01)
доктор физико-математических наук, доцент



Кузнецова
Ирен Евгеньевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время активно развиваются технологии, для которых требуются новые методы обработки и передачи информации с помощью наноразмерных устройств. Продолжающаяся миниатюризация компонентов традиционной полупроводниковой электроники подводит существующие технологии к своим физическим и технологическим пределам, в частности в вопросах энергоэффективности и теплоотдачи. Это создает запрос на поиск альтернативных технологий, которые могли бы позволить улучшать показатели производительности и энергоэффективности информационных систем, такие как скорость передачи информации, компактность и энергопотребление.

Одним из предлагаемых подходов является создание магنونных устройств, в которых используются спиновые волны для обработки и передачи информации [1]. Спиновые волны, или волны намагниченности, обладают рядом преимуществ по сравнению с электромагнитными, на основе которых функционируют элементы традиционной электроники, такие как направленные ответвители. В отличие от электрических токов, протекание которых связано с тепловыми потерями, спиновые токи могут распространяться без переноса заряда, тем самым значительно снижая потребление энергии. Кроме того, на одной и той же частоте спиновые волны имеют на 2-3 порядка более короткие длины волн, чем электромагнитные, что открывает возможности для дальнейшей миниатюризации устройств [2]. Таким образом, интегрирование магنونных устройств в микроволновую электронику может стать значительным шагом в ее развитии.

Важной задачей магноники является исследование эффективных методов управления собственным затуханием спиновых волн, которое возникает вследствие магнон-фононного взаимодействия, двухмагنونного рассеяния, спиновой накачки и т.д. [3]. В настоящий момент существует несколько методов управления собственным затуханием спиновых волн в магنونных структурах. К ним относятся контроль магнитной анизотропии с помощью

напряжения, параметрическая накачка, а также использование спинового эффекта Холла и эффекта переноса спинового момента [4-6]. Снижение собственного затухания позволяет увеличить скорость работы магнитных устройств и снизить их энергопотребление, что является ключевым фактором в современных технологиях.

Другим важным направлением современной магноники является изучение колебаний и волн в связанных магнетонных структурах [7]. Связь между структурами может приводить к гибридизации мод и переносу энергии между волноводами. Спектральные характеристики таких структур также могут быть существенно изменены под воздействием нелинейных эффектов, таких как нелинейный сдвиг частоты, нелинейное затухание, параметрическое усиление. Изучение этих эффектов и явлений имеет критическое значение, т.к. с их помощью можно создавать магнетонные устройства для информационных технологий, обладающие лучшими характеристиками, чем электронные – например, с помощью таких устройств можно одновременно проводить обработку сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне и управлять частотой сигналов.

Отдельное направление исследований, связанное с изучением спектральных характеристик связанных магнетонных структур, касается возникновения особых точек, появление которых требует точного баланса вносимых потерь для компенсации затухания волн намагниченности. Особые точки представляют собой точки в параметрическом пространстве, в которых происходит вырождение как собственных значений, так и собственных векторов. В колебательных и волновых системах это вырождение соответствует совпадению собственных частот и слиянию нормальных мод. Примерами пространства параметров, где могут возникать особые точки, являются «напряжение-частота», «затухание-частота», «затухание/усиление-показатель преломления» и другие. Изначально особые точки рассматривались лишь как математическая концепция, однако впоследствии их существование было теоретически предсказано и экспериментально подтверждено в различных физических системах, включая магнетонные [8]. Особые точки сопровождаются

изменением характеристик физических сред и появлением необычных явлений, таких как усиление чувствительности к внешним воздействиям и одномодовая генерация в докритическом режиме [9–10]. Основная трудность, связанная с реализацией особых точек, заключается в необходимости строгого равенства физических параметров двух связанных подсистем, а также в обеспечении симметричного усиления и компенсации собственного затухания. В случае связанных магнонных структур это требует точного баланса затухания спиновых волн. в системе, состоящей из двух идентичных связанных структур, особая точка, как правило, является единственной и зафиксированной. Поэтому актуальной задачей является поиск дополнительных управляющих параметров, позволяющих изменять условия возникновения особой точки и, соответственно, контролировать её положение в параметрическом пространстве системы.

Существует несколько механизмов связи магнонных структур, такие как, связь посредством магнитного дипольного и обменного взаимодействий, а также электрическая связь. До недавнего времени для поиска особых точек в магнонных системах в основном изучались многослойные структуры, главным механизмом связи в которых служит обменное взаимодействие Рудермана-Киттеля-Касуя-Йосиды – косвенное взаимодействие между магнитными ионами кристаллической решетки через электроны проводимости [11-12]. При этом не рассматривались **планарные** дипольно связанные магнонные структуры, состоящие из ферромагнитного диэлектрика (ФМ) и тонкого слоя нормального металла (НМ) с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Топология планарных волноведущих структур широко используется при создании элементов функциональной микроэлектроники, таких как направленные ответвители. Недавно также были найдены условия существования особых точек в связанных спинтронных наноосцилляторах и показаны интересные особенности этой системы, такие как «амплитудная смерть» [13]. Тем не менее, остается неисследованным влияние **нелинейности** на динамику особых точек в пространствах параметров таких систем, что

представляется важным вследствие существенно нелинейной природы таких осцилляторов.

Цель работы – исследование влияния компенсации собственного затухания колебаний и волн намагниченности на параметры и характеристики магнонных структур, такие как дисперсионные характеристики, длина перекачки энергии, неизохронность и нелинейный сдвиг частоты, а также возникновение критических и особых точек.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной в работе цели:

1. Оценка влияния компенсации собственного затухания спиновых волн, распространяющихся в структуре ФМ-НМ, на ее магнитную восприимчивость.
2. Исследование влияния разных типов компенсации собственных потерь на характеристики системы из двух связанных структур ФМ-НМ – симметричной компенсации в обеих структурах и асимметричной, соответствующей случаю равноценного усиления спиновых волн в одной структуре и их затухания в другой. Поиск условия существования особой точки и анализ ее динамики при изменении расстояния между структурами.
3. Анализ влияния вносимого спинового тока на перекачку энергии между двумя структурами ФМ-НМ, связанными магнитным дипольным взаимодействием, а также рассогласования в собственных затуханиях и волновых числах спиновых волн на величину критического постоянного электрического тока, при котором в пространстве параметров «электрический ток-частота» возникает особая точка.
4. Исследование влияния нелинейности на положение особой точки в системе из двух связанных осцилляторов Дуффинга.
5. Исследование системы из двух дипольно связанных спин-трансферных наноосцилляторов (СТНО) с усилением и компенсацией затухания

магнитного момента в линейном и нелинейном случаях. Исследование динамики собственных частот единичного СТНО и динамики нормальных мод связанных осцилляторов.

6. Анализ влияния ориентации внешнего магнитного поля и угла поляризации электрического тока на параметры, при которых в пространстве параметров системы двух и трех связанных СТНО возникает особая точка.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Предложена и разработана математическая модель, описывающая влияние спинового тока на магнитную восприимчивость структуры «ферромагнетик-нормальный металл». Достоверность модели подтверждена экспериментальными данными.
2. Предложена и разработана математическая модель, описывающая распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в связанных магнитным дипольным взаимодействием магнетонных структурах ФМ-НМ, в которых с помощью спинового эффекта Холла компенсируется и усиливается собственное затухание. Найдены условия существования особой точки в этой системе, проанализирована ее динамика в зависимости от физических параметров структур.
3. Проведен анализ влияния спинового тока на длину перекачки спиновых волн в связанных структурах ФМ-НМ, а также рассогласования в собственных затуханиях и волновых числах спиновых волн на величину критического постоянного электрического тока, при котором в пространстве параметров «электрический ток-частота» возникает особая точка.
4. Проанализирована математическая модель связанных уравнений Дуффинга, найдено условие возникновения особой точки, проанализирована ее динамика.
5. Предложена и разработана математическая модель, описывающая зависимость характеристик дипольно связанных спин-трансферных

наноосцилляторов под внешним воздействием от угла внешнего магнитного поля. Проанализировано влияние угла внешнего поля на неизохронность системы, константу связи между структурами, смещение собственных частот и расталкивание нормальных мод.

6. Проведен анализ динамики особой точки в системе дипольно связанных СТНО путем изменения угла внешнего магнитного поля и угла спиновой поляризации.

Научная и практическая значимость работы

В работе представлены результаты теоретических и численных исследований связанных магнитным дипольным взаимодействием магнетонных структур с компенсацией собственного затухания. 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 магнетонных структур с особой точкой в пространстве параметров «электрический ток-частота». Показано, как положение особой точки зависит от расстояния между структурами. В работе исследованы различные нелинейные эффекты и явления в спинтронных осцилляторах, а именно влияние ориентации внешнего магнитного поля и угла поляризации спинового тока на неизохронность системы и расталкивание нормальных мод, а также на положение особой точки. Такие системы могут использоваться для создания элементов компонентной базы устройств обработки информации, узкополосных фильтров и сенсоров.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Нормальные моды спиновых волн, распространяющихся в двух связанных структурах «ферромагнетик-нормальный металл», расталкиваются, если векторы поляризации спинового тока, индуцируемого в металле и компенсирующего затухание спиновых волн, равны по модулю и сонаправлены. В случае, когда эти векторы направлены противоположно, возникает несимметричное воздействие: в одной структуре затухание волн

компенсируется, а в другой усиливается, что приводит к увеличению амплитуд нормальных мод вплоть до их вырождения в особой точке.

2. При увеличении расстояния между дипольно связанными структурами «ферромагнетик-нормальный металл» магнитное взаимодействие между ними ослабевает. Это приводит к уменьшению электрического тока, приложенного к металлу, необходимого для вырождения нормальных мод распространяющихся в структурах спиновых волн в особой точке.
3. Рассогласование в величинах эффективного затухания спиновых волн, распространяющихся в связанных структурах «ферромагнетик-нормальный металл», уменьшает величину порогового тока в металле, при котором возникает особая точка. Собственное затухание спиновых волн при этом возрастает, что приводит к более быстрому ослаблению их амплитуд вдоль волноводов. Отсутствие синхронизма фазовых скоростей спиновых волн уменьшает действительную часть их волновых чисел, увеличивая длину перекачки энергии между структурами.
4. В системе дипольно связанных спин-трансферных наноосцилляторов, намагниченных внешним полем, направленным под углом к плоскости структур, близким к 90° , критический ток возникновения автоколебаний при поляризации спинового тока почти перпендикулярно поверхности структуры ($\sim 90^\circ$) примерно в два раза меньше, чем при угле поляризации $\sim 5^\circ$ (то есть в случае, когда поляризация спинового тока ориентирована почти вдоль поверхности структуры). В таких системах положение особой точки в параметрическом пространстве «частота-электрический ток» зависит от угла внешнего магнитного поля.

Методы исследования и достоверность полученных результатов

Для получения результатов диссертационной работы предложена математическая модель для описания динамики намагниченности в двух связанных магнитных волноводах в магнитостатическом приближении. Модель основана на уравнении Ландау-Лифшица-Гильберта, которая 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, основана на том же уравнении. В работе рассчитаны дисперсионные характеристики, зависимость электрического напряжения, при котором в пространстве параметров системы может возникнуть особая точка, от расстояния между структурами, зависимость коэффициента неизохронности от ориентации внешнего магнитного поля и всех остальных параметров исследуемых волноведущих и колебательных систем с помощью программ, созданных в пакетах прикладного программирования.

Личный вклад соискателя

Все работы по теме доклада были выполнены лично соискателем или при непосредственном его участии. Автор принимал участие в постановке задач, создании и применении теоретических методов. Также автор проводил обработку полученных результатов и численное моделирование.

Апробация работы и публикации

Автор диссертации выступала с результатами работы на следующих всероссийских и международных научных конференциях: International Conference «Functional Materials» (4-8 октября 2021, Алушта), 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ (21 ноября – 03 декабря 2021, Долгопрудный), EASTMAG VIII «Trends in MAGnetism» (20-22 августа 2022, Казань), 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (01 марта – 03 марта 2023, Долгопрудный).

Основные результаты по теме диссертации представлены в 10 публикациях, в том числе: в 6 статьях в журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, а также в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, в 4 тезисах докладов, опубликованных в материалах всероссийских и международных конференций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 85 наименований, приложения и 33 рисунков. Общий объём диссертации составляет 100 страниц.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность проведенного исследования, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов. Определены ключевые направления исследования, включающие управление собственным затуханием в планарных магнонных структурах, изучение влияния усиления спиновых волн на магнитную восприимчивость магнонных систем, исследование нормальных мод, а также выявление условий возникновения особых точек в параметрическом пространстве физических систем. В последующих разделах представлен обзор литературы по указанным направлениям в области магноники и спинтроники, описаны основные эффекты и явления, характерные для магнитных структур. Изложены методы теоретического анализа свойств спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках и подходы к управлению эффективным затуханием спиновых волн в различных магнонных структурах.

В **Главе 1** приведены основные определения и термины, используемые в диссертации. Описаны методы расчета характеристик магнитостатических спиновых волн: метод магнитостатического потенциала и метод спин-волновых мод [14-15]. Перечислены основные типы волн и приведены выражения для расчета их дисперсионных характеристик. Далее выполнен обзор методов компенсации собственного затухания в магнонных структурах, таких как управление магнитной анизотропией с помощью электрического напряжения, параметрическая накачка, перенос спинового момента и спиновый эффект Холла. В завершение приведено определение особых точек и описываются условия их возникновения в пространстве параметров системы [16].

Глава 2 посвящена исследованию компенсации собственного затухания поверхностных спиновых волн, распространяющихся в наноразмерной

магнетонной структуре типа «ферромагнетик-нормальный металл». Представлена математическая модель динамики намагниченности для структуры ФМ-НМ, учитывающая компенсацию затухания поверхностных спиновых волн в обменном приближении с помощью спинового тока. Оценено влияние компенсации затухания на величину магнитной восприимчивости. Приведены результаты численного моделирования усиления амплитуды спиновых волн, выполнено сравнение с экспериментальными данными в докритическом режиме.

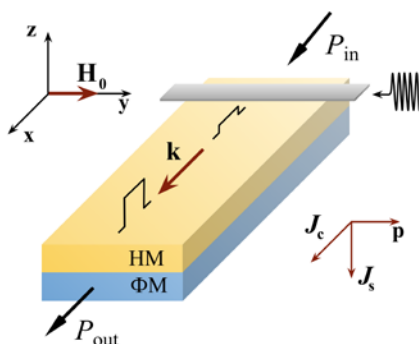


Рис.1. Изображение структуры «ферромагнетик-нормальный металл».

Динамика намагниченности \mathbf{M} с учетом затухания и эффекта переноса спинового момента из НМ в ФМ была описана уравнением Ландау–Лифшица–Гильберта–Слончевского (ЛЛГС):

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0\gamma\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha_G}{M_s}\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} + \frac{\sigma J_s}{M_s}\mathbf{M} \times \mathbf{M} \times \mathbf{p}, \quad (1)$$

где $\gamma_0 = |\gamma|\mu_0$, $|\gamma|$ – гиромагнитное отношение, \mathbf{H}_{eff} – эффективное магнитное поле, α – константа, зависящая от затухания Гильберта и затухания, обусловленного спиновой накачкой, $\sigma = C\gamma/L_1$, M_s – намагниченность насыщения, L_1 – толщина ферромагнетика, где происходит спиновый транспорт, C – феноменологическая константа, характеризующая эффективность переноса спинового момента из НМ в ФМ.

Проведено исследование уравнения (1) в случае малых колебаний намагниченности $\mathbf{m} = \mathbf{m}(\mathbf{k}, \omega)$ от положения равновесия \mathbf{M} , т.е. $|\mathbf{m}| \ll |\mathbf{M}_0|$. Найдены выражения для частоты спинового тока и тензора магнитной

восприимчивости. Показано, что пропускание постоянного электрического тока через слой нормального металла приводит к увеличению амплитуды спиновых волн вследствие возникновения спинового эффекта Холла (рис.2а). Под воздействием спинового тока происходит не только частичная компенсация потерь, но и смещение дисперсионной характеристики вверх, при этом ее общий вид сохраняется. Таким образом, с ростом постоянного тока уменьшается пространственное затухание спиновых волн (рис. 2а), а снижение эффективного затухания позволяет возбуждать спиновые волны с более высокими частотами при одной и той же длине волны (рис. 2б).

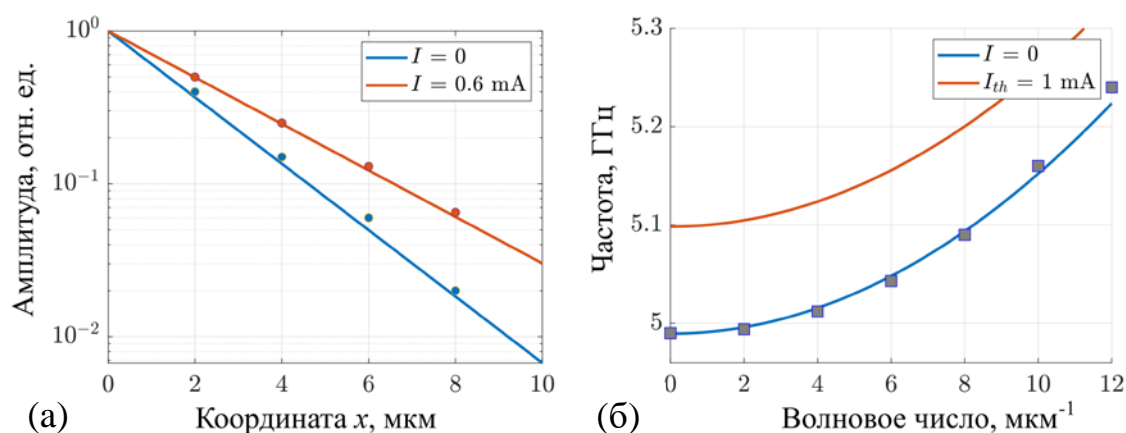


Рис.2. (а) Зависимости амплитуд спиновых волн от расстояния при разных величинах постоянного электрического тока I ; (б) дисперсионные характеристики спиновых волн, построенные в случае, когда на структуру действует электрический ток величиной $I = 0$ и $I_{th} = 1$ мА. Сплошные линии – результат численного моделирования, точки – экспериментальные данные [17].

Глава 3 посвящена исследованию условий возникновения особой точки и анализу изменений параметров, при которых она появляется в параметрическом пространстве системы двух связанных макроскопических структур типа ФМ–НМ (рис. 3а), в которых распространяются поверхностные магнитостатические спиновые волны (ПМСВ). Дисперсионная характеристика мод этих волн представлена на рис. 3б.

Задача решена для случая малых колебаний вектора намагниченности $\mathbf{m}_\nu(\mathbf{r}, t)$ вблизи \mathbf{M}_0 , $\nu = 1, 2$. Линеаризованная система уравнений ЛЛГС (1) представлена следующим образом (в Фурье-представлении по k):

$$\frac{d\mathbf{m}_v}{dt} = -\boldsymbol{\mu} \times \sum \hat{\Omega}_{vv'} \cdot \mathbf{m}_{v,v'} + \alpha_G \left(\boldsymbol{\mu} \times \frac{d\mathbf{m}_v}{dt} \right) + \sigma J_s \cdot \text{sgn}(-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{p}) \mathbf{m}_v, \quad (2)$$

$$\hat{\Omega}_{vv'} = \left(\omega_H + \omega_M \lambda^2 (k^2 + \kappa^2) \right) \delta_{vv'} \hat{\mathbf{I}} + \omega_M \hat{\mathbf{F}}_k(d_{vv'}).$$

Здесь $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{x}$, $\omega_M = \gamma \mu_0 M_s$, $\omega_H = \gamma \mu_0 H_0$, $\lambda = \sqrt{2A / (\mu_0 M_s^2)}$ – обменная длина, $\kappa = \pi / w_{\text{eff}}$ – эффективное волновое число, $d_{vv'}$ – расстояние между центрами волноводов, $\delta_{vv'}$ – символ Кронекера, $\hat{\mathbf{I}}$ – единичная матрица, $\hat{\mathbf{F}}_k(d_{vv'})$ представляет собой тензор размагничивающих коэффициентов, состоящий из собственного размагничивающего тензора и тензора магнитной дипольной связи. Система линеаризованных уравнений (2) сведена к уравнениям для комплексных амплитуд связанных волн. На основе этого получены выражения для собственных чисел и выведено условие возникновения особой точки:

$$\lambda_{1,2} = \omega_0 - i\Gamma_0 \pm \sqrt{\Omega_c^2 - \Gamma_1^2}. \quad (3)$$

где $\Gamma_1 = \sigma J_s \cdot \text{sgn}(-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{p})$ – вносимое затухание, Ω_c – константа связи, Γ_0 и ω_0 – собственное затухание и собственная частота спиновых волн, соответственно.

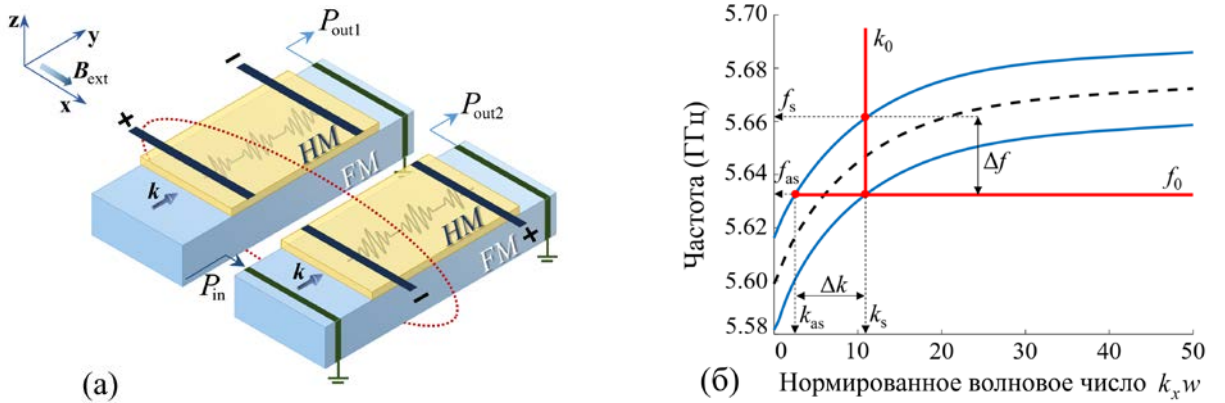


Рис.3. (а) Исследуемая система дипольно связанных структур ферромагнетик-нормальный металл. (б) Дисперсионная характеристика системы. Сплошными синими линиями обозначены «симметричная» и «асимметричная» моды системы, черной штриховой – нижняя мода изолированного волновода.

Получена зависимость напряжения V_{OT} , при котором возникает особая точка, от расстояния между структурами δ и от нормированного волнового числа (рис.4). Показано, что напряжение V_{OT} увеличивается с уменьшением δ .

Приведены выражения для амплитуд нормальных мод в резонансе. Эти амплитуды равны $(1 + (2D/\Gamma_0)^2)^{-0.5}$ слева, $(1 + (D/\Gamma_0)^2)^{-1}$ справа и $D = \sqrt{\Omega_c^2 - \Gamma_I^2}$ в особой точке. Ширина резонансной линии в особой точке составляет $\Delta\omega = 2\Gamma_0\sqrt{\sqrt{2} - 1} \approx 0.6\Delta\omega_0$, где $\Delta\omega_0$ – ширина резонансной линии одной структуры ФМ-НМ.

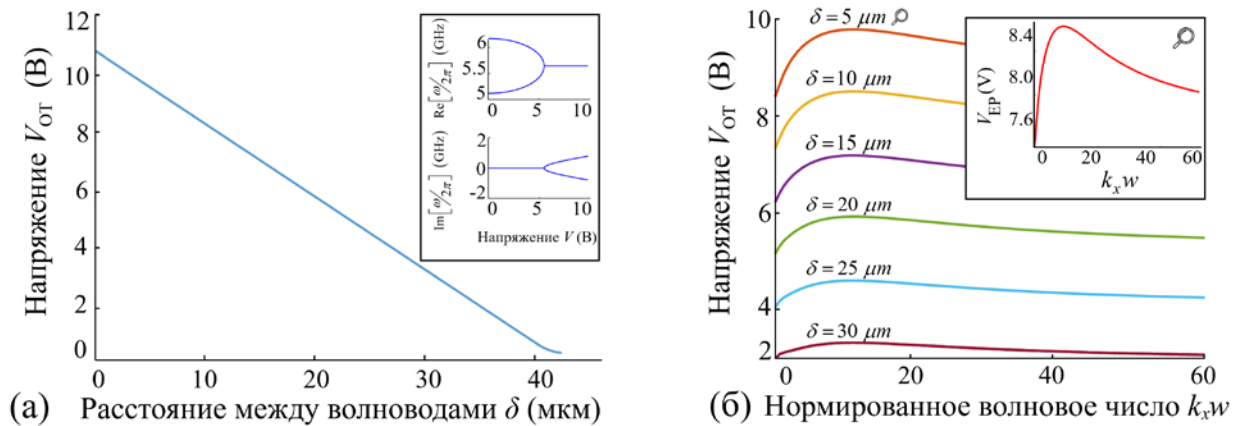


Рис. 4. Зависимость напряжения V_{OT} , при котором возникает особая точка, от (а) расстояния между структурами δ , (б) от нормированного волнового числа $k_x w$ при разных значениях расстояния между структурами δ .

Далее исследованы связанные структуры типа ФМ–НМ с симметричным и асимметричным способами компенсации затухания спиновых волн, при которых векторы поляризации спинового тока, равные по модулю, были соответственно сонаправлены или противоположно направлены. Показано, что при симметричной компенсации затухания нормальные моды системы испытывают расщепление. В случае асимметричной компенсации моды сближаются, их амплитуды возрастают, и при достижении особой точки собственные векторы становятся неортогональными. После пересечения этой точки спиновые волны распространяются преимущественно в одной из структур, тогда как во второй их затухание носит экспоненциальный характер.

Наконец, в главе рассмотрена математическая модель связанных волн с комплексными амплитудами $c_{1,2}(y)$, распространяющихся в магнонных структурах в случае, когда затухание компенсируется асимметрично.

Исследован процесс перекачки энергии между волноводами при различных соотношениях величин вносимого затухания и константы связи.

В **Главе 4** проведено исследование влияния нелинейности на нормальные моды и условия возникновения особой точки в системе двух связанных спин-трансферных наноосцилляторов. Решена задача определения параметров появления особой точки и анализе изменений её положения в параметрическом пространстве на основе модели связанных осцилляторов Дуффинга, представляющих собой математическое описание осцилляторов с кубичной нелинейностью (рис. 5), используемое для моделирования работы СТНО в нелинейном режиме. Показано, что увеличение коэффициента нелинейности приводит к снижению порогового значения вносимых потерь, необходимых для появления особой точки.

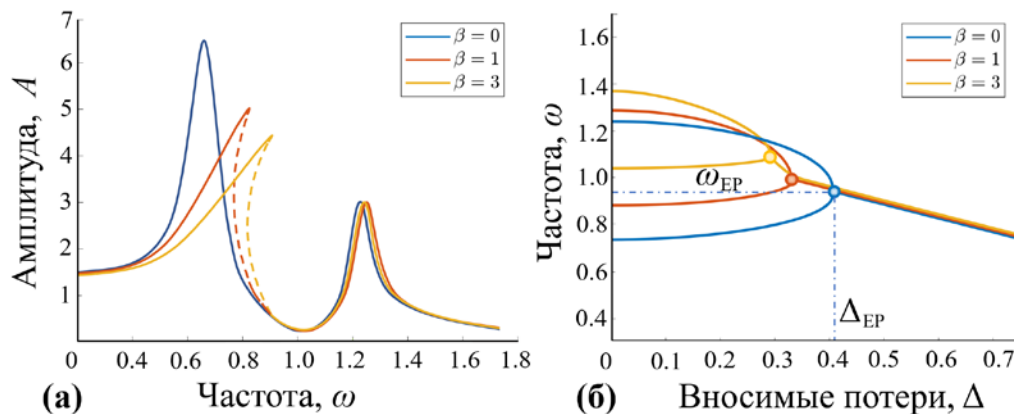


Рис. 5. Семейство резонансных характеристик двух связанных осцилляторов Дуффинга (а) и зависимости действительных частей нормальных частот от величины вносимого затухания (б) для трех значений коэффициента нелинейности: $\beta = 0, 1$ и 3 ; штрихпунктирной линией обозначены неустойчивые области резонансной кривой.

Далее исследованы нормальные моды и параметры возникновения особой точки в модели дипольно связанных спин-трансферных наноосцилляторов (рис.6).

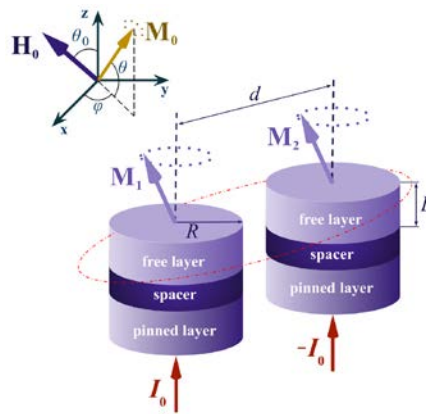


Рис. 6 – Исследуемая система из двух дипольно связанных СТНО.

Приведена система уравнений, описывающая динамику намагниченности системы двух связанных осцилляторов вблизи положения равновесия. Представлены результаты численного моделирования спектральных характеристик связанных СТНО в зависимости от угла внешнего магнитного поля и направления поляризации спинового тока. Показано (рис.7), что в случае, когда векторы поляризации спинового тока и внешнего магнитного поля ориентированы перпендикулярно плоскости образца ($\gamma_p = 90^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$), особая точка не наблюдается, так как система находится в автоколебательном режиме даже при отсутствии неизохронности.

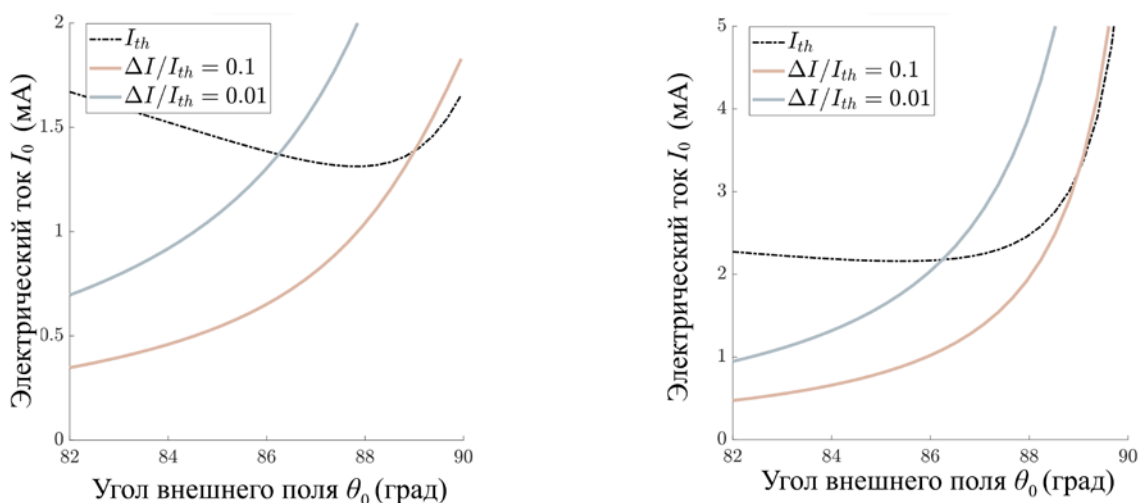


Рис. 7. Зависимости критических токов потери устойчивости I_{th} и появления особой точки I_{OT} в системе двух дипольно связанных СТНО от угла внешнего магнитного поля θ_0 при поляризации спинового тока перпендикулярно (слева, $\gamma_p = 90^\circ$) и почти параллельно (справа, $\gamma_p \rightarrow 0$) плоскости образца для двух амплитуд внешнего воздействия.

Увеличение амплитуды внешнего возбуждения приводит к уменьшению порогового угла $\theta_0 = \theta_{th}$, при котором $I_{OT}(\theta_0) = I_{th}(\theta_0)$. В случае, когда поляризация спинового тока ориентирована почти вдоль поверхности структуры образца ($\gamma_p \rightarrow 0$) при $\theta_0 \rightarrow 90^\circ$, критический ток возникновения автоколебаний заметно больше (примерно в 2 раза), чем для $\gamma_p = 90^\circ$. В таких системах положение особой точки в параметрическом пространстве «частота-электрический ток» зависит от угла внешнего магнитного поля.

В Заключение сформулированы основные результаты работы:

1. Проведено исследование влияния усиления спиновых волн, распространяющихся в магнитной структуре «ферромагнетик-нормальный металл», с помощью спинового тока на магнитную восприимчивость структуры.
2. При симметричной компенсации затухания спиновых волн в связанных структурах ФМ-НМ в обеих структурах нормальные моды расталкиваются, при асимметричной компенсации амплитуды нормальных мод растут вплоть до их вырождения в особой точке, где собственные векторы системы становятся неортогональными.
3. Предложена система дипольно связанных волноведущих структур ферромагнетик-нормальный металл, в которой при определенных условиях возникает особая точка. Найдены условия возникновения особой точки в системе и зависимость постоянного напряжения особой точки от расстояния между структурами.
4. Исследована математическая модель двух связанных волноводов с вносимыми потерями и с учетом разного значения параметра собственного затухания. Показано, что для наблюдения особых точек лучше выбирать менее добротные системы, так как в них особая точка находится дальше от границы потери устойчивости.
5. С помощью численного моделирования продемонстрировано влияние нелинейности на положение особой точки на плоскости параметров в системе двух консервативно связанных осцилляторов Дуффинга при

- изменении коэффициентов связи и вносимых потерь. Показано, что увеличение коэффициента нелинейности приводит к уменьшению порогового значения вносимых потерь, необходимых для образования особой точки.
6. Продемонстрировано, что неизохронность, обусловленная изменением ориентации и величины внешнего магнитного поля, играет существенную роль в системе связанных СТНО. Изменением амплитуды внешнего воздействия и угла спинового тока можно менять ток возникновения особой точки, что означает возможность менять ее положение в пространстве параметров системы, чего нельзя достичь в линейной системе.
 7. Уменьшение эффективного затухания делает возможным возбуждение спиновых волн с более высокими частотами волн на одной и той же длине волны. В связанных структурах ФМ-НМ увеличение электрического тока от $I = 0$ до $I_{th} = 1$ мА (ток возникновения автоколебаний) приводит к росту частоты возбуждаемых спиновых волн приблизительно на 2%.
 8. При значении угла внешнего поля θ_0 в системе дипольно связанных спин-трансферных наноосцилляторов происходит нелинейный сдвиг резонансной частоты и увеличение расстояния между нормальными модами, причем при $\theta_0 = \pi/2$ в случае, когда $\Delta I_1 / I_{th} = 0.01$, где I_{th} – критический ток, расталкивание нормальных мод втрое меньше, чем в случае $\Delta I_2 / I_{th} = 0.1$.

Список публикаций

Результаты по теме диссертации опубликованы в следующих отечественных и международных рецензируемых изданиях:

[A1] **Темная О.С.**, Safin A.R., Kalyabin D.V., and Nikitov S.A. Parity-Time Symmetry in Planar Coupled Magnonic Heterostructures // **Physical Review Applied**. – 2022. Vol. 18. No. 014003.

[A2] **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.

[A3] **О. Темная**, S. Nikitov. Non-Isochronous Exceptional Point Shift in Coupled Spin-Torque Nano-Oscillators // **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. – 2024. V. 598, 171999.

[A4] **Темная О.С.**, Никитов С.А. Влияние спинового эффекта Холла на резонансную частоту и магнитную восприимчивость магнетонного нановолновода // **Письма в Журнал Экспериментальной и Технической Физики**. 2024. – Т. 120, вып. 10, с. 781-784.

[A5] **Темная О.С.**, Никитов С.А. Перекачка энергии между связанными планарными магнетонными волноводами вблизи особой точки // **Письма в Журнал Экспериментальной и Технической Физики**. 2024. – Т. 120, вып. 2, с. 125-129.

[A6] **Темная О.С.**, Никитов С.А. РТ-симметричные планарные связанные гетероструктуры ферромагнетик/нормальный металл // **Нелинейный мир**. – 2022. Т.20. №2. С. 43-47.

Список тезисов докладов автора, опубликованных в материалах конференций:

[A7] **Темная О.С.**, 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. – 2021. P. 110.

[A8] **Темная О.С.**, 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. – 2022. P 214.

[A9] **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. – 2023. С. 205-206.

[A10] **Темная О.С.**, Никитов С.А. Влияние спинового эффекта Холла на резонансную частоту и магнитную восприимчивость магнетонного нановолновода // Тезисы научной школы «Нелинейные волны-2024». – 2024. стр. 259-260.

Список литературы

1. B. Flebus, D. Grundler, B. Rana et al. The 2024 magnonics roadmap // *J. Phys. Cond. Mat.* 2024. Vol. 36. No. 363501.
2. С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин и др. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // *УФН.* 2020. Вып. 190. С. 1009–1040.
3. S.M. Rezende, *Fundamentals of Magnonics.* – Switzerland: Springer, 2020. – 358 p.
4. Y.-J. Chen, H.K. Lee, R. Verba et al. Parametric Resonance of Magnetization Excited by Electric Field // *NanoLetters.* 2017. Vol. 17. P. 572-577.
5. R. Verba, M. Carpentieri, G. Finocchio et al. Excitation of propagating spin waves in ferromagnetic nanowires by microwave voltage-controlled magnetic anisotropy // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. No. 25018.
6. Y.K. Kato, R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom. Observation of the spin Hall effect in semiconductors // *Science.* 2004. Vol. 306. No. 5703. P. 1910-1913.
7. Q. Wang, P. Pirro, R. Verba et al. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler // *Sci. Adv.* 2018. Vol. 4, No. 1.
8. T. Yu, J. Zou, B. Zeng et al. Non-Hermitian topological magnonics // *Phys. Rep.* 2024. Vol. 1062. P. 1-86.
9. H. Hodaei, A.U. Hassan, S. Wittek et al. Enhanced sensitivity at higher-order exceptional points // *Nature.* 2017. Vol. 548. P. 187-191.
10. A.A. Zyablovsky, I.V. Dronin, E.S. Andrianov et al. Exceptional points as lasing prethresholds // *Laser and Phot. Rev.* 2021. Vol. 15. No. 2000450.
11. X. Wang, G. Guo, J Berakdar et al. Steering magnonic dynamics and permeability at exceptional points in a parity–time symmetric waveguide // *Nat. Comm.* – 2020. Vol. 11. No. 5663.
12. X. Wang, G. Guo, J Berakdar et al. Enhanced sensitivity at magnetic high-order exceptional points and topological energy transfer in magnonic planar waveguides // *Phys. Rev. Appl.* – 2021. Vol. 15. No. 034050.

13. S. Wittrock, S. Perfna, R. Lebrun et al. Non-hermiticity in spintronics: oscillation death in coupled spintronic nano-oscillators through emerging exceptional points // Nat. Comm. 2024. Vol. 15. No. 971.
14. A. Prabhakar and D. Stancil D. Spin Waves, Theory and applications // Springer, Boston, MA. – 2009. 348 p.
15. B.A. Kalinikos, A.N. Slavin. Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions // J. Phys. C: Sol. St. Phys. – 1986. Vol. 19, No. 7013.
16. T. Kato. A Short Introduction to Perturbation Theory for Linear Operators // Springer New York, NY, first edition. – 2011.
17. H. Merbouche, B. Divinsky, D. Gouéré et al. True amplification of spin waves in magnonic nano-waveguides // Nat. Comm. – 2024. Vol. 15, No. 1560.