

**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 16 июня 2023 г., № 7

**О присуждении Сафину Ансару Ризаевичу, гражданину России, ученой  
степени доктора физико-математических наук.**

Диссертация на тему: «**Нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники**» принята к защите 1 марта 2023, 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 Сафин Ансар Ризаевич, 1988 года рождения, в 2011 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)» по специальности «Радиотехника», специализация – «Радиофизика и электроника». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». В 2020 году ему было присвоено ученое звание доцента.

В настоящее время работает в лаб. № 191 «Исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) в должности научного сотрудника.

Работа выполнена в лаборатории №191 «Исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур» ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

**Научный консультант: Никитов Сергей Аполлонович**, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, руководитель лаборатории 191 «Исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур» (спец. 01.04.10 «Физика полупроводников и диэлектриков»).

**Официальные оппоненты:**

**Устинов Владимир Васильевич**, доктор физико-математических наук, академик РАН, научный руководитель ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН.

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

**Самардак Александр Сергеевич**, доктор физико-математических наук, проректор по науке ФГАОУ ВО «Дальневосточного федерального университета».

**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, доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры магнетизма Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, и утвержденном проректором Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, **указала**, что диссертация Сафина Ансара Ризаевича «Нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники» является завершенным научным трудом и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Сафин А.Р., **достоин** присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений». 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. Не сделаны оценки влияния диссипативных потерь на нелинейную динамику антиферромагнитных осциллятора и детектора.
2. Не приведены данные о температурной стабильности антиферромагнитных осцилляторов.
3. Для взаимосвязанных антиферромагнитных осцилляторов не проведена оценка влияния синхронизации на ширину спектральной линии суммарного колебания при сложении мощностей.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 36 работах, в том числе 22 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus и входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, и 4 патента на изобретение. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

[1] **Safin A.R.**, Nikitov S.A., Kirilyuk A.I., Tyberkevych V.S., Slavin A.N. Theory of Antiferromagnet-Based Detector of Terahertz Frequency Signals // Magnetochemistry. – 2022. - Vol. 8 (2). No. 26. - P. 1-11.

[2] Mitrofanova A., **Safin A.R.**, Kravchenko O., Nikitov S., and Kirilyuk A. Optically initialized and current-controlled logical element based on antiferromagnetic-heavy metal heterostructures for neuromorphic computing // Appl. Phys. Lett. – 2022. – Vol. 120. No. 072402.

[3] Kozlova E.E., **Safin A.R.**, Nikitov S.A. Ferrimagnet based spin Hall detector of subterahertz frequency signals // Appl. Phys. Lett. - 2022. - Vol. 121. № 192404.

[4] **Safin A.**, Puliafito V., Carpentieri M., Finocchio G., Nikitov S., Stremoukhov P., Kirilyuk A., Tyberkevych V., and Slavin A. Electrically tunable detector of THz-frequency signals based on an antiferromagnet // Applied Physics Letters. – 2020. – Vol. 117. – P. 222411.

[5] Popov P.A., **Safin A.R.**, Kirilyuk A., Nikitov S.A., Lisenkov I., Tyberkevich V., and Slavin A. Voltage-Controlled Anisotropy and Current-Induced Magnetization Dynamics in Antiferromagnetic-Piezoelectric Layered Heterostructures // Physical Review Applied. – 2020. – Vol. 13. – No. 044080.

[6] Stremoukhov P., **Safin A.**, Logunov M., Nikitov S., Kirilyuk A. Spintronic terahertz-frequency nonlinear emitter based on the canted antiferromagnet-platinum bilayers // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 125. – P. 223903.

[7] Osokin S.A., **Safin A.R.**, Nikitov S.A. Influence of Shape Effects on the Spectrum of Spin Waves in Finite Array of Ferromagnetic Pillars // JETP Letters. – 2019. – Vol.110, iss.9. – P.1-2.

[8] **Safin A.R.**, Udalov N.N., Kapranov M.V. Mutual phase locking of very nonidentical spintorque nanooscillators via spin-wave interaction // European Physics Journal – Applied Physics – 2014. – Vol. 67. – P. 20601.

[9] **Сафин А.Р.**, Козлова Е.Е., Калябин Д.В., Никитов С.А. Детектирование терагерцевых электромагнитных волн с помощью проводящих антиферромагнетиков // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47. Вып. 16. – С. 20-23.

[10] Никитов С.А., **Сафин А.Р.**, Калябин Д.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Логунов М.В., Морозова М.А., Одинцов С.А., Осокин С.А., Шараевская А.Ю., Шараевский Ю.П., Кирилюк А.И. Дизлектрическая магноника – от гигагерцев к терагерцам // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 10. – С. 1009-1040.

[11] **Сафин А.Р.**, Никитов С.А., Кирилюк А.И., Калябин Д.В., Садовников А.В., Стремоухов П.А., Логунов М.В., Попов П.А. Возбуждение терагерцевых магнов в антиферромагнитных наноструктурах: теория и эксперимент // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 158, Вып.1. – С. 85-99.

[12] **Сафин А.Р.**, Попов П.А., Калябин Д.В., Никитов С.А. Синтезатор дискретной сетки частот на основе антиферромагнитного спинтронного осциллятора // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, Вып. 20. – С. 23-26.

[13] **Сафин А.Р.**, Логунов М.В., Никитов С.А. Возбуждение нелинейных спиновых колебаний в антиферромагнетике под действием терагерцевых импульсов накачки // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т.44, Вып. 24. – С. 103-111.

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

На автореферат диссертации поступили отзывы из:

- Из Саратовского филиала ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН от д.ф.-м.н., профессора, директора филиала Филимонова Юрия Александровича и д.ф.-м.н., доцента, заведующего лабораторией нелинейной динамики Купцова Павла Владимировича. Отзыв положительный (без замечаний).
- Из Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина) от д.ф.-м.н., профессора кафедры физической электроники и технологии Устинова Алексея Борисовича. Отзыв положительный (без замечаний).
- Из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» от доктора химических наук, профессора кафедры неорганической химии Кауля Андрея Рафаиловича. Отзыв положительный. (замечание: «Не ясны границы применимости метода медленно меняющихся амплитуд для моделирования ансамблей локально связанных спинтронных осцилляторов. Отсутствует описание реализации методов численных расчетов и оценки вносимой ими погрешности, вследствие чего сложно судить о точности приведенных в работе результатов»).
- Из Института космических исследований РАН от д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Маловой Хельми Витальевны. Отзыв положительный (без замечаний).
- Из Института теоретической и прикладной электродинамики РАН от д.ф.-м.н., заместителя директора по научной работе Мерзликина Александра Михайловича. Отзыв положительный (без замечаний).
- Из ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологий университет» от д.ф.-м.н., профессора кафедры нанoeлектроники Фетисова Леонида Юрьевича. Отзыв положительный. (замечание: «В качестве замечания по автореферату следует отметить весьма сжатое изложение полученных в главах 7 и 8 результатов исследования динамики ансамблей спинтронных осцилляторов, в частности, результатов о возможных колебательных режимах и особенностях их бифуркаций»).
- Из ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский Технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» от д.т.н., профессора кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники Евдокимова Юрия Кирилловича и к.т.н., доцента кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной Денисова Евгения Сергеевича. Отзыв положительный. (замечание: «1) В описании рис.4б сказано «величина выпрямленного напряжения прямо пропорциональна величине внешнего постоянного магнитного поля и равна нулю при нулевом магнитном поле». Однако зависимость выпрямленного напряжения (рис.4б) имеет ярко выраженный экстремум, а не прямо пропорциональный характер. Кроме того, кривые, представленные на рис.4б не стремятся к нулю при нулевом магнитном поле. 2) Хотелось бы видеть оценки неустойчивости

частоты генерации предложенных осцилляторов на основе антиферро-, ферри- и слабых ферромагнетиков. 3) На рис.10 представлена зависимость времени установления синхронного режима от коэффициента сцепления. Хотелось бы видеть масштаб времени установления синхронного режима.»)

**Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации:**

**Устинов Владимир Васильевич**, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика конденсированных состояний), академик РАН, научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук является крупным специалистом в области физики магнитных явлений и спинтроники.

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

**Самардак Александр Сергеевич**, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика конденсированных состояний), проректор по науке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточного федерального университета» является крупным специалистом в области спинтроники и магноники.

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 имени 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:** В диссертационной работе построены и исследованы математические модели перестраиваемых по частоте антиферромагнитных и ферромагнитных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств на их основе: синтезаторов, спектроанализаторов и нейтропроцессоров. Найдены условия безгистерезисной генерации автоколебаний намагниченности при возбуждении гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл» спин-поляризованным током.

Исследована взаимосвязь между направлениями осей анизотропии магнетика, направлением внешнего постоянного магнитного поля и поляризацией источника возбуждения для реализации регенеративного, резонансного детектирования ГГц и ТГц колебаний на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследована структура детектора в виде гребенчатой структуры АФМ, позволившей увеличить уровень выпрямленного выходного напряжения. Предложены различные способы перестройки резонансной частоты спинтронных детекторов и критического тока рождения автоколебаний в осцилляторах с помощью внешнего магнитного поля, электрического тока, магнитострикции, температуры. Исследовано влияние снижения порогового тока рождения автоколебаний на амплитуду терагерцевого сигнала, генерируемого в автоколебательном режиме. Проведено исследование влияния инерционных слагаемых в уравнениях, описывающих как внешнюю синхронизацию единичного спинтронного осциллятора, так и взаимную синхронизацию массивов. Найдены условия возникновения бистабильного режима на границе зоны синхронизма путем исследования приближенных уравнений типа Курамото с инерцией, описывающих динамику спинтронных осцилляторов в режиме автоколебаний. Проведен анализ нормальных мод массивов взаимосвязанных осцилляторов с различной топологией связей: линейка, кольцо, решетка, дерево, «малый мир», иерархическая и случайная сеть. Предложены варианты организации топологии сетей взаимосвязанных осцилляторов, позволяющих решить проблему многомодовости в сетях. Описано нейроморфное поведение спинтронных осцилляторов, возбуждаемых импульсами оптического излучения, а также предложены варианты реализации на их основе простейших логических операций.

**Теоретическая значимость исследования:** Разработана теория, позволяющая исследовать нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах спинтроники, содержащих антиферро- и ферримагнетики: осцилляторах и детекторах терагерцевых сигналов, характеристиками которых можно управлять посредством внешних воздействий (магнитных и электрических полей, спин-поляризованного тока, температуры), а также разработка сетевого подхода при объединении базовых элементов в большие ансамбли, позволяющего решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений. В перспективе теоретические результаты, полученные в диссертационной работе, позволят на практике разработать различные устройства терагерцевой электроники: генераторы, детекторы, преобразователи и нелинейные смесители, синтезаторы, спектроанализаторы, квантовые вычислители и нейропроцессоры.

Полученные в работе результаты, несомненно, уточняют и углубляют фундаментальные знания о нелинейных явлениях в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:** Предложена и обоснована методика расчета, способы оптимизации параметров и перестройки спинтронных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств ГГц и ТГц частотных диапазонов на их основе. Полученные результаты могут быть использованы при

разработке функциональных устройств формирования, приема и обработки сигналов диапазона ГГц и ТГц. Продемонстрирована возможность разработки нового класса процессоров для задач нейросетевой обработки информации на основе массивов перестраиваемых по частоте спин-поляризованным током антиферромагнитных наноосцилляторов. Исследованы различные нелинейные явления в спинтронных осцилляторах, в частности, гистерезисный эффект при возникновении автоколебаний и бистабильность при переходе осцилляторов из режима синхронизации в асинхронный режим, наличие которых является паразитным эффектом для задачи возбуждения стабильных колебаний. Проведенные исследования позволили сформулировать критерии уменьшения паразитных эффектов путем уменьшения эффективной анизотропии магнетика внешним воздействием: магнитострикцией, постоянным магнитным полем, температурой.

Данная диссертационная работа представляет собой многолетнее исследование, расширяющее и углубляющее научные представления на стыке радиофизики, физики нелинейных процессов и спинтроники. Полученные в диссертации новые научные результаты в совокупности можно охарактеризовать как важное научное достижение, которое может привести к реализации в ближайшем будущем миниатюрных устройств функциональной электроники ТГц диапазона частот, работающих при комнатных температурах.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:** Основные теоретические результаты по исследованию элементов спинтроники были получены автором с использованием аналитических и численных методов решения дифференциальных уравнений, а также методов теории колебаний и волн. Численные расчеты массивов связанных спинтронных осцилляторов проводились с использованием метода Рунге-Кутты 4-5 порядков с адаптивным выбором шага. Выводы аналитических исследований были проверены и развиты при помощи численного моделирования, выполненного на высокопроизводительных вычислительных комплексах. Результаты работы по детектированию ТГц колебаний за счет обратного спинового эффекта Холла были экспериментально проверены в лаборатории сильных магнитных полей Университета Неймеген (Нидерланды).

Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных методов компьютерного моделирования, сравнением с полученными аналитически результатами и сопоставлением с экспериментами.

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.** Экспериментальные результаты получены при непосредственной работе с соавторами, а их интерпретация и сопоставление с теоретическими результатами была проведена автором диссертации. Ряд статей автора написан в соавторстве со студентами и аспирантами, работавшими под его научным руководством

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. На все заданные в ходе заседания вопросы Сафин А.Р. дал аргументированные ответы.

На заседании 16 июня 2023 г. диссертационный совет принял решение за решение научной проблемы по разработке теории, позволяющей исследовать нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники: осцилляторах и детекторах терагерцевых сигналов и их ансамблях, а также устройств на их основе, **присудить** Сафину А.Р. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 18 человек, из которых 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Исполняющий обязанности председателя  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



А.С. Дмитриев

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор  
физико-математических наук

И.Е. Кузнецова

«16» июня 2023 г.