

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 002.034.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН), Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «25» октября 2019 г. № 15

о присуждении Орлову Андрею Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Измерение параметров источников неоднородного магнитного поля в нестационарных условиях преобразователями Холла» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 16.08.2019 г., протокол № 7-1 диссертационным советом Д002.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр. 26, приказ 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель, Орлов Андрей Андреевич, 1989 года рождения, закончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Волгоградский государственный университет» в 2013 году, работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении «Волгоградский государственный университет», где и была выполнена диссертация.

Научный руководитель: Игнатъев Вячеслав Константинович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01, профессор кафедры радиофизики ФГАОУ ВПО «Волгоградский государственный университет».

Официальные оппоненты:

1. Поляков Петр Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», профессор Физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова;
 2. Давыдов Вадим Владимирович, доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий
- дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация – Саратовский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, в своем **положительном заключении**, подписанном ведущим научным сотрудником лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Хивинцевым Юрием Владимировичем, кандидатом физико-математических наук и ведущим научным сотрудником лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Высоцким Сергеем Львовичем, кандидатом физико-математических наук, утвержденном директором Филимоновым Юрием Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором, указала на следующие замечания:

- 1). Встречаются опечатки и смысловые несогласованности, имеются «обрезанные» рисунки и рисунки с трудночитаемыми символами, что отчасти затрудняет чтение диссертации и понимание изложенного в ней материала;
- 2) Некоторые выводы, приводимые в диссертации, могли бы быть более наглядными при использовании дополнительных графических материалов. Например, в конце раздела 2.5.2 соискатель делает следующий вывод: «Амплитуда переходного процесса напряжения Холла зависит от тока через преобразователь Холла линейно с точностью не хуже 10%» и «Характерное время затухания и амплитуда процесса сильно зависят от того, как отводится тепло от преобразователя и от длительности такта», однако соответствующих зависимостей не приводит.

Соискатель имеет **36 (тридцать шесть)** научных публикаций, в том числе, **32 (тридцать две)** публикации по теме диссертации, из которых **20 (двадцать)** в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, в том числе **15 (пятнадцать)** в изданиях, индексируемых в Международных библиометрических базах WoS и Scopus. Имеется **1 (один)** патент на изобретение и **1 (одно)** свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также **6 (шесть)** тезисов докладов и материалов конференций. К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

1. Игнатьев В. К., Орлов А. А., Перченко С. В. Соотношения взаимности для нелинейной плазмподобной среды в магнитном поле // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 4. С. 74-81;
2. Игнатьев В. К., Орлов А. А., Перченко С. В., Станкевич Д. А. Холловский микроскоп для измерения магнитных свойств пленок // Письма в Журнал технической физики. 2017. Т. 43. № 15. С. 3-11;
3. Bardin, A., Ignatjev, V., Nevzorov A., **Orlov, A.**, Calibration algorithm of Hall magnetometer in visible coordinate system // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2019, Vol. 134, pp. 939-946;

4. Bardin, A., Ignatjev, V., **Orlov, A.**, Perchenko, S. Reciprocal relations for nonlinear multipole in inhomogeneous magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials vol. 441, 2017, pp. 276-282;
5. Ignatjev, V.K., **Orlov, A.A.**, Stankevich D.A. Method of current distribution parameters measuring with using reference magnetic field source. // Measurement vol. 125, 2018, pp. 109-113;
6. Ignatiev, V. K., Lebedev, N. G., **Orlov, A. A.** Quantum model of a hysteresis in a single-domain magnetically soft ferromagnetic // Journal of Magnetism and Magnetic Materials vol. 446, 2018, pp. 135-142;
7. Игнатьев В. К., Лебедев Н. Г., Никитин А. В., **Орлов А.А.** Макромагнитный расчет намагниченности деформированного ферромагнетика // Физика металлов и металловедение, 2019, том 120, № 3, С. 1–12;
8. Никитин А. В., Никитин А. О., **Орлов А. А.** Исследование оперативного метода измерения частоты и амплитуды сигналов с медленно меняющимися параметрами // Измерительная техника. 2016. № 5. С. 60-65.

Соискателем сформулированы задачи исследований, осуществлен обзор и анализ известных литературных данных и организовано проведение научных исследований в области развития магнитных измерений преобразователями Холла. Исследованы вопросы нелинейной взаимности и системной функции гальваномагнитного элемента, частным случаем которого является преобразователь Холла. Проведено исследование, позволяющее снизить погрешности измерений холловского магнитометра. Предложены методы анализа векторных распределений магнитного поля для оценивания параметров источников. Разработанные методы апробированы при исследовании ферромагнитных образцов.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От Полякова Петра Александровича, доктора физико-математических наук, профессора, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», профессор Физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.
Замечания:
 - 1). При доказательстве соотношений взаимности в качестве исходного уравнения использовалось уравнение для функции распределения импульса носителей заряда с релаксационным членом в правой части. Этот подход является достаточно общим и может быть распространен для различных систем, однако он не позволяет описать тепловые эффекты, которые обнаружил автор. Классическим в этом случае является гидродинамический подход к описанию проводимости, который, возможно, лучше позволит объяснить экспериментально проверенные соотношения.
 - 2). Измерение температурного градиента в пленке преобразователя Холла осуществлялось при помощи термопар, которые находятся в тепловом контакте с

исследуемой системой и имеют теплоемкость, сравнимую с теплоемкостью тонкой пленки. Проверялась ли степень влияния этих термопар на постоянную времени измеряемых переходных процессов? По моему мнению, пирометрический метод измерения температуры, мог бы дать больше информации о распределении температуры в исследуемой пленке.

2. От Давыдова Вадима Владимировича, доктора физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцента Высшей школы прикладной физики и космических технологий. Замечания:

1) Совершенно не ясно, из каких соображений в введении диссертации (стр. 10) автор написал следующее: «Наиболее точные квантовые магнитометры не могут обеспечить необходимую чувствительность в широком диапазоне значений магнитной индукции и большом градиенте измеряемого поля [13]. Кроме того, измерение компонент вектора магнитного поля требует существенного усложнения схемы измерений и обычно не применяется. Поэтому далее рассмотрены только те методы, которые используются в условиях неоднородного поля и позволяют измерить компоненты вектора индукции магнитного поля.». Возникает вопрос, почему на мировом рынке успешно работает компания GEM Systems, выпускающая трехкомпонентные магнитометры с чувствительностью 2.5 пТл при частоте регистрации 1 Гц и т.д. Данные приборы успешно работают как в поле Земли, так в более сложных условиях.

Ссылка на работу 2007 года не является основанием для данного утверждения.

2). Крайне неудачно представлено содержание параграфа диссертации 1.1.3 из представленного в нем материала следует, что квантовые магнитометры не могут работать в неоднородных магнитных полях. Причем не указаны в каких именно полях по индукции и неоднородности. Ссылки даны на работы или 30-ти летней давности или мало относящиеся к квантовым магнитометрам. На работы академика РАН Б.Е. Александрова ссылок нет. И параграф заканчивается недостатками рассмотренных методов обработки сигналов, которые в магнитометрах с оптической накачкой и ЯМР магнитометрах в настоящее время не применяются. Какой смысл заложил автор в этот параграф и какой вывод он хотел сделать, остается не ясным?

3). Совершенно неправильно вставлять в диссертацию плохо отсканированные рисунки 2.6 и 2.7 (стр. 56 и 57). Если внимательно посмотреть на графики и подписи к ним, можно предположить, что автор перепутал рисунки местами. По-другому сложно объяснить увиденное.

4). Необходимо, чтобы в диссертации и автореферате на ряде рисунков присутствовала погрешность измерений, а в большинстве случаев она отсутствует. При этом, в тексте обсуждаются погрешности измерения и повышение точности.

5). Еще одно замечание, скорее всего можно отнести к стилю представления автором материала. Ряд предложений и терминов, используемых в диссертации и автореферате вызывает дополнительные вопросы. Например, третий пункт практической значимости

работы: Разработанный метод коммутации тока позволяет уменьшить влияние температурного дрейфа показаний векторных магнитометров на погрешность измерений холловского магнитометра. Возникает вопрос какой тип векторного магнитометра здесь имеется в виду? В заключении 7 пункт, предложение: «Это позволяет существенно снизить вычислительные затраты при моделировании макроскопических образцов.». Какие вычислительные затраты и нужно ли это писать в диссертации?

3. От Гринева Сергея Николаевича, кандидата физико-математических наук, заместителя директора филиала – главного инженера проекта ООО «Системы управления производственными рисками». Замечание:

Автор в работе ограничился проверкой соотношений взаимности только для преобразователя Холла серии ПХЭ.

4. От Ескина Андрея Евгеньевича, начальника лаборатории 123, ФГУП «ВНИИФТРИ». Замечания:

1) В тексте автореферата не указаны диапазоны измерений и пределы погрешности разработанных холловского и ЯМ-релаксационного магнитометров;

2) Явно не указана длительность измерительного цикла ЯМ-релаксационного магнитометра.

5. От Краснополина Игоря Яковлевича, кандидата физико-математических наук. Без замечаний.

6. От Павлова Алексея Николаевича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры открытых систем «Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского». Без замечаний.

7. От Юшанова Сергея Владимировича, кандидата физико-математических наук, начальника исследовательского отдела НПК «Новые технологии». Замечания и вопросы:

1) Сколько преобразователей Холла было исследовано при установлении точности выполнения соотношений взаимности?

2) При экспериментальной проверке соотношений взаимности измерялись элементы матрицы сопротивлений и оценивалось максимальное СКО ошибки измерений при инверсии магнитного поля. Не указаны полученные доверительные интервалы, наличие (отсутствие) смещения ошибки.

3) Чем обусловлен выбор метода оценивания мгновенной частоты сигнала ядерной магнитной релаксации?

4) При каких параметрах деформированного ферромагнетика можно считать, что намагниченность резко изменяется? Как на практике определить применимость разработанного метода для определения зон локальной деформации?

Все отзывы положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается большим опытом работы в областях, относящихся к проблематике диссертационной работы, таких как: методы экспериментальной физики, магнитные измерения, магнитоэлектроника, исследование магнитных материалов, решение обратной магнитоэлектронической задачи.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

показано, что эффект Пельтье, возникающий под действием коммутируемого тока через преобразователь Холла, обуславливает его погрешности, не исключаемые четырехтактным алгоритмом в нестационарных условиях;

экспериментально **проверено**, что элементы матрицы сопротивлений нелинейного нестационарного гальваномагнитного многополюсника в неоднородном магнитном поле инвариантны к одновременной перестановке индексов и изменению знаков всех токов и направления вектора магнитной индукции;

доказано, что аппаратная функция тонкопленочного преобразователя Холла пропорциональна векторному произведению плотностей токов, пропущенных поочередно через одноименные пары контактов;

создан новый алгоритм коммутации тока для холловского тонкопленочного преобразователя, основанный на полученных соотношениях взаимности, который позволяет снизить температурный дрейф показаний (для преобразователя ПХЭ602117А с уровня 33 нТл/К до 1 нТл/К);

предложен метод обработки сигнала свободной прецессии релаксационного магнитометра, который позволяет измерять изменение индукции магнитного поля в одном релаксационном цикле;

разработан метод измерения параметров токового диполя в нестационарных условиях, позволяющий с расстояния не более 3 мм установить положение токового диполя с погрешностью не хуже 10 мкм и значения компонент вектора его магнитного момента с погрешностью не хуже 10^{-8} А·м²;

обоснованы и апробированы методы исследования микроструктуры образца, позволяющие выделить области резкого изменения намагниченности субмикронных размеров плоских ферромагнитных образцов, соответствующих областям необратимых деформаций.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: применительно к проблематике диссертации **результативно, с получением обладающих новизной результатов:**

установлено, что нестационарная неоднородность температурного поля в магниточувствительной пленке влияет на характеристики переходных процессов в преобразователе Холла;

впервые получены соотношения взаимности для нелинейного многополосника в неоднородном магнитном поле и в нестационарных условиях;

разработан метод определения момента и положения магнитного диполя по результатам измерения распределения вектора магнитной индукции, достигающий предела Рао – Крамера;

квантовая модель ферромагнетика дополнена слагаемыми, описывающими нелинейное изменение магнитных свойств ферромагнетика под действием деформации, что позволило получить зависимость его коэрцитивной силы от величины деформации;

предложен новый метод оценивания остаточной намагниченности образца, позволяющий отделить медленно и быстро меняющиеся компоненты намагниченности.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

результаты исследования соотношений взаимности в тонкопленочных преобразователях Холла могут быть использованы при проектировании устройств микроэлектроники и электрофизической аппаратуры для устранения систематических погрешностей измерений с использованием алгоритмов коммутации токов;

разработанный метод расчета системной функции тонкопленочного преобразователя Холла может быть использован для проектирования элементов функциональной электроники, таких как приборы на магнитостатических волнах, усилители и преобразователи на эффекте Холла и ряд других;

предложенный метод коммутации тока позволяет уменьшить влияние температурного дрейфа показаний векторных магнитометров на погрешность измерений холловского магнитометра;

разработанные методы обработки сигнала свободной индукции релаксационного магнитометра позволяют повысить точность измерения геомагнитного поля;

предложенный метод обработки измерений топографии компонент вектора магнитного поля позволяет увеличить информативность микроструктурного анализа слабо намагниченных образцов.

Оценка достоверности выявила, что результаты проведенных исследований были подтверждены соответствием экспериментальных данных с аналитическими расчетными оценками, контролем условий экспериментов, воспроизводимостью результатов, корректной физической интерпретацией полученных результатов и согласованностью их с литературными данными. Рассчитанные аппаратная функция и отклик преобразователя Холла в неоднородном магнитном поле соответствуют экспериментально полученным результатам.

Результаты численного моделирования процесса перемагничивания деформированного ферромагнетика находятся в качественном соответствии с результатами проведенных экспериментов и в количественном с результатами, полученными в других лабораториях.

Личный вклад соискателя заключается в проведении научных исследований; выявлении на основе проведенного анализа литературных данных методов увеличения точности и быстродействия измерения параметров источников неоднородного магнитного поля в нестационарных условиях; исследовании преобразователя Холла и разработке на основе этого исследования методов увеличения точности и быстродействия; разработке методов обработки данных магнитных измерений, моделированию ферромагнетиков, как источников магнитного поля.

На заседании 25.10.2019 г. Диссертационный совет принял решение присудить Орлову Андрею Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 16 докторов наук, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель Диссертационного совета,
д.т.н., проф.

В.Е. Курочкин

Ученый секретарь Диссертационного совета,
д.ф.-м.н.

А.Л. Буляница

