На правах рукописи

Орлов Андрей Андреевич

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ХОЛЛА

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Волгоград

2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный университет».

Научный руководитель: **Игнатьев Вячеслав Константинович**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальны оппоненты: **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.

Давыдов Вадим Владимирович, доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий.

Ведущая организация: Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова российской академии наук.

Защита состоится «25» октября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.034.01 на базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31 – 33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП РАН по тому же адресу и на сайте www.iairas.ru. Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 190103, г. Санкт-Петербург, Рижский пр., д. 26, Институт аналитического приборостроения РАН, а/я 207.

Автореферат разослан: «____» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 002.034.01,
доктор физико-математических наук: Буляница А. Л.

ОБЩАЯ ХАРАКЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

В связи с исследованиями квазидвумерных структур, созданием метаматериалов и устройств функциональной электроники малых размеров, становится актуальной задача измерения параметров этих объектов. Они рассматриваются как источники неоднородного магнитного поля, распределение которого определяется их особенностями структуры. Применимость параметрического описания к таким системам обусловлено большим количеством априорной информации об источниках поля.

Задача косвенного измерения распределения источников по создаваемому ими полю является обратной некорректной задачей. Предлагаемый параметрический подход является одним из наиболее эффективных для решения такой задачи. Измерение параметров требует значительной избыточности исходных данных.

Задачу усложняют нестационарные условия, изменяющие создаваемые поля или параметры преобразователя и требующие повышения быстродействия. Если развитие высокопроизводительных вычислительных систем потенциально позволяет существенно увеличить быстродействие измерений, то физические ограничения, связанные со способом измерения, требуют дополнительного исследования в каждом конкретном случае. Для преобразователя Холла фактором, ограничивающим быстродействие, является допустимая частота коммутации тока [1], для квантовых релаксационных магнитометров – длительность цикла поляризации, для феррозондов – частота зондирующего сигнала.

Показания холловских магнитометров, работающих в режиме коммутации токов, обладают дополнительной погрешностью, сравнимой с геомагнитным полем [2]. Это ограничивает использование таких магнитометров для получения данных при определении параметров источников магнитного поля. Используемые методы компенсации геомагнитного поля обычно не учитывают его изменение на коротких временных интервалах.

Априорная информация о модели связывает параметры источников и пространственное распределение измеряемого поля. И если для токовых распределений такой расчет сводится к элементарному интегрированию, то для ферромагнетиков требует введения модели среды и решения более сложной самосогласованной задачи магнитостатики.

Цифровая обработка сигналов и анализ физических моделей измерителей создают предпосылки для разработки методов увеличения быстродействия холловского магнитометра и точности оценивания параметров источников нестационарного и неоднородного магнитного поля, что является актуальной

задачей экспериментальной физики. Результат решения которой может быть использован для анализа качества микро- и нано- магнитных структур на пленках [3], проверке систем магнитного поля [4].

Цель: Разработка методов увеличения точности и быстродействия измерения параметров источников магнитного поля в нестационарных условиях.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

– Исследовать термоэлектрические и гальваномагнитные явления в преобразователях Холла, влияющие на точность и быстродействие измерений неоднородного магнитного поля.

– Разработать методы компенсации и учета эффектов, ограничивающих точность и быстродействие преобразователей Холла.

– Разработать параметрические модели намагниченного образца и токовых систем как источников магнитного поля.

Научная новизна диссертационной работы

1. Установлено, что переходные процессы в преобразователе Холла могут быть вызваны нестационарной неоднородностью температурного поля в магниточувствительной пленке.
2. Впервые получены соотношения взаимности для нелинейного многополюсника в неоднородном магнитом поле и в нестационарных условиях.
3. Разработан метод определения момента и положения магнитного диполя по результатам измерения распределения вектора магнитной индукции, достигающий предела Рао – Крамера.
4. Квантовая модель ферромагнетика дополнена слагаемыми, описывающими нелинейное изменение магнитных свойств ферромагнетика под действием деформации. Это позволило получить зависимость его коэрцитивной силы от величины деформации, которая соответствует экспериментальным данным.
5. Предложен новый метод анализа остаточной намагниченности образца, основанный на поочередной оценке медленно и быстро меняющихся составляющих намагниченности.

Практическая значимость работы

1. Результаты исследования соотношений взаимности в тонкопленочных преобразователях Холла могут быть использованы при проектировании устройств микроэлектроники для устранения систематических погрешностей измерений с использованием алгоритмов коммутации токов.
2. 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 др.

3. Разработанный метод коммутации тока позволяет уменьшить влияние температурного дрейфа показаний векторных магнитометров на погрешность измерений холловского магнитометра.

4. Методы обработки сигнала свободной индукции релаксационного магнитометра позволяют повысить точность измерения геомагнитного поля.

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

Основные положения, выносимые на защиту

1. Эффект Пельтье, возникающий под действием коммутируемого тока через преобразователь Холла, обуславливает его динамическую и дополнительную погрешности, не исключаемые четырехтактным алгоритмом в нестационарных условиях.

2. 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.

3. Системная функция тонкопленочного преобразователя Холла пропорциональна векторному произведению плотностей токов, пропущенных поочередно через одноименные пары контактов.

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

5. Разработанный метод обработки сигнала свободной прецессии релаксационного магнитометра позволяет измерять изменение индукции магнитного поля в одном релаксационном цикле.

6. Разработанный метод измерения параметров токового диполя в нестационарных условиях позволяет с расстояния не более 3 мм установить положение токового диполя с погрешностью не более 10 мкм и значения компонент вектора его магнитного момента с погрешность не более и 10^{-8} А·м^2.

7. Разработанные методы исследования микроструктуры образца позволяют выделить области резкого изменения намагниченности плоских ферромагнитных образцов, соответствующих областям необратимых деформаций.

Достоверность и апробация результатов:

Достоверность научных результатов обеспечивается многократным проведением экспериментов с воспроизводимыми результатами, применением

современных средств и методов измерений неоднородных полей, а также хорошим соответствием результатов численного моделирования и экспериментальных данных, полученных самостоятельно и в других лабораториях.

Основные результаты работы представлены на XII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, 2012 г), международной конференции SGEM (Болгария Варна, 2016 и 2017 гг.). По результатам работы получен один патент на изобретение и свидетельство регистрации программного обеспечения для ЭВМ.

Личный вклад:

Все эксперименты проводились лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в обсуждении гипотез и постановке задач. Численное моделирование и обработка экспериментальных результатов осуществлялись лично автором.

Публикации:

Основные результаты изложены в 32 публикациях, из них 11 в научных журналах, рекомендованных ВАК, 18 в изданиях, индексируемых базами цитирования SCOPUS и(или) Web of Science, в том числе 4 публикации в первом квартиле, одном патенте на изобретение и одном свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 84 наименований, трех приложений. Работа содержит 38 рисунков и 1 таблицу, полный объем диссертации с приложениями – 148 страниц.

Соответствие направления диссертационного исследования специальности

В ходе диссертационной работы созданы новые методы измерения параметров источников неоднородного магнитного поля в нестационарных условиях и математической обработки результатов магнитных измерений холловского и ЯМ релаксационного магнитометра, что соответствует п.п. 2 и 8 направления исследований паспорта специальности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цели и задачи, определены научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор методов измерения магнитного поля, среди которых более подробно рассмотрены эффект Холла и ядерная-магнитная релаксация. Рассмотрены преимущества и недостатки феррозондовых, вибрационных, холловских и квантовых магнитометров. Приведены существующие способы измерения вектора индукции магнитного поля холловским магнитометром, включая методы калибровки, существующие алгоритмы уменьшения погрешности преобразователя Холла. Описаны соотношения взаимности Онзагера и их дополнения для систем в однородном постоянном магнитом поле, позволяющие обосновать применяемые методы уменьшения систематических погрешностей. Введено понятие системной функции преобразователя Холла. Приведены недостатки существующих методов магнитных измерений.

Рассмотрены существующие методы повышения точности и быстродействия магнитометров, основанных на преобразователях Холла. Приведены методы калибровки векторного магнитометра с использованием дополнительного квантового магнитометра для измерения модуля геомагнитного поля. Подробно описан один из типов квантовых магнитометров – релаксационным магнитометр и некоторые методы обработки его сигнала.

Описано решение прямой задачи магнитостатики в виде интегрального соотношения:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = -\frac{\mu_0}{4\pi}\int_V \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3}\operatorname{div}\mathbf{M}(\mathbf{r}')d^3r' + \frac{\mu_0}{4\pi}\oint_S \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3}M_n(\mathbf{r}')ds', \qquad (1)$$

где V – объем намагниченного образца, S – его поверхность, $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ – намагниченность, $M_n(\mathbf{r})$ – ее нормальная компонента, и сформулирована обратная задача измерения параметров источников магнитного поля в нестационарных условиях.

Результатом первой главы является обоснование актуальности темы работы, ее целей и задач и выбор метода исследований.

Вторая глава посвящена исследованию явлений, ограничивающих точность и быстродействие измерений холловского магнитометра. Проведено исследование нелинейного нестационарного гальваномагнитного элемента, частным случаем которого является преобразователь Холла. На основании уравнения Власова в релаксационном приближении показана симметрия матрицы нелинейной проводимости при инверсии векторов магнитного и

электрического полей $\sigma_{mk}(\mathbf{E},\mathbf{B})=\sigma_{km}(-\mathbf{E},-\mathbf{B})$, где $\sigma_{km} = j_m/E_k$ и j_m – компоненты вектора плотности тока, E_k – компоненты вектора напряженности электрического поля. Методом функции Грина получено приближенное решение уравнений для электрического потенциала внутри полупроводника в неоднородном магнитном поле с учетом тензорного характера проводимости. Путем анализа полученного решения получены свойства взаимности матрицы сопротивлений нелинейного многополюсника

$$\mathbf{R}_{mk}(\mathbf{I},t,\mathbf{B}(\mathbf{r}))=\mathbf{R}_{km}(-\mathbf{I},t,-\mathbf{B}(\mathbf{r})), \qquad (2)$$

вводимой следующим образом

$$\varphi_m=\sum_{k=1}^{M}\mathbf{R}_{mk}(\mathbf{I},t,\mathbf{B}(\mathbf{r}))\,i_k.$$

Здесь φ_m – потенциал m-ого контакта многополюсника, i_k – ток через k-ый контакт многополюсника, $\mathbf{I}$ – набор токов через контакты многополюсника.

Разработана установка для исследования нелинейного многополюсника в заданном неоднородном магнитном поле (Рисунок 1). Исследуемый преобразователь Холла (ПХ) помещался на систему проводников (СП), состоящую из 64 параллельно расположенных проволочек диаметром 90 мкм. При помощи блока коммутации тока (БКТ) ток источника тока (ИТ) пошагово пропускался через каждый проводник. Для каждого шага производились измерения напряжения Холла блоком цифрового холловского магнитометра (ЦХМ). Управление элементами схемы и проведение измерений осуществлялось по алгоритму заданному в интерфейсной программе персонального компьютера (ПК), связанного с основным микроконтроллером (МК) установки преобразователем интерфейсов (ПИ).

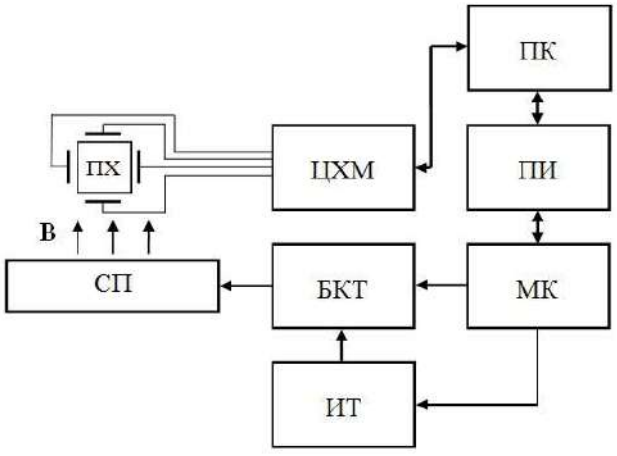


Рисунок 1 – Структурная схема установки для исследования преобразователя Холла в неоднородном магнитном поле

При помощи этой установки установлено, что соотношения взаимности для преобразователя Холла ПХЭ602117 выполняются в неоднородном магнитном поле с точностью не хуже 2 %.

В результате анализа полученного решения задачи для электрического потенциала многополюсника применительно к преобразователю Холла разработан новый способ вычисления его системной функции, который требует лишь решения задачи о распределении токов в отсутствие магнитного поля через одноименные пары контактов. Справедливость выражения для системной функции и способа ее упрощенного расчета установлены экспериментально на установке для исследования нелинейного многополюсника в неоднородном магнитном поле (Рисунок 1).

Проверка соотношений взаимности (2) в нестационарных условиях выполнена на экспериментальной установке, показанной на рисунке 2. В качестве гальваномагнитного элемента использовались преобразователи Холла марки ПХЭ602117А и ПХЭ606117А. Экспериментальная установка состоит из системы катушек Гельмгольца, подключенных к четырем источникам тока (I_x, I_y, I_z, I_a) с цифровым управлением, которые позволяют создать заданный вектор индукции магнитного поля в рабочей области. Три пары катушек (I_x, I_y, I_z) предназначены для компенсации внешнего магнитного поля, а четвертая (I_a) используется для создания дополнительного магнитного поля.

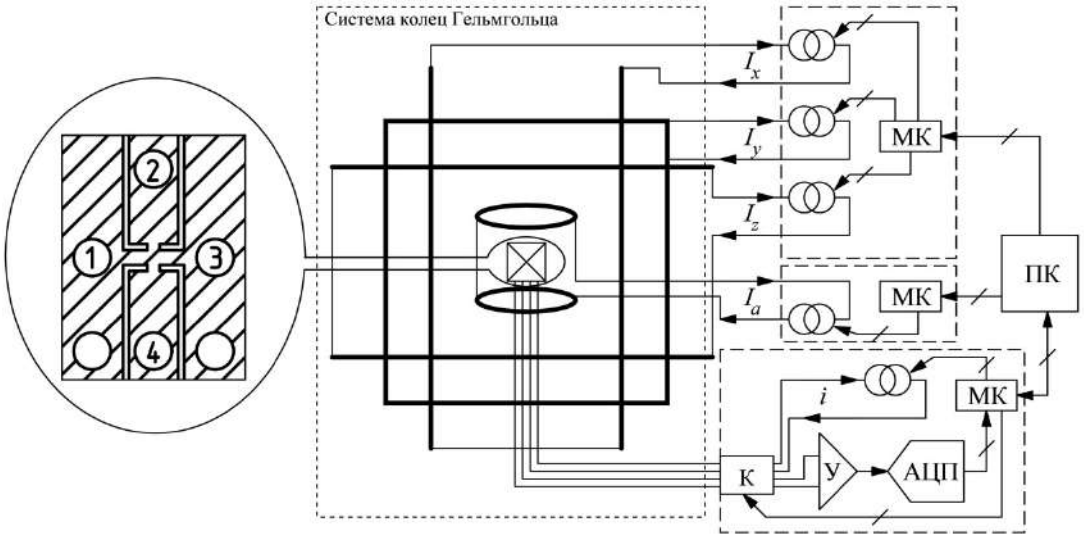


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки для проверки соотношения взаимности для гальваномагнитного четырёхполюсника в скомпенсированном магнитном поле

Преобразователь Холла помещается в рабочую область катушек Гельмгольца и подключается к коммутатору К, который позволяет подключать

к нему либо цифровой вольтметр, состоящий из дифференциального усилителя У и АЦП, либо источник тока *i*. Управление всеми источниками тока и цифровым вольтметром осуществляется из интерфейсной программы ПК через промежуточные микроконтроллеры МК.

При экспериментальной проверке соотношений взаимности измерялись недиагональные элементы матрицы сопротивлений в двух режимах при нескольких значениях тока i_k в различный момент времени τ от момента установки нового значения тока:

1. Контакты 1 и 3 подключены к источнику тока i_k, между контактами 2 и 4 измеряется напряжение $u_1 = \varphi_2^{(1)} - \varphi_4^{(1)}$, при этом $I_1 = i_k$, $I_3 = -i_k$, $I_2 = I_4 = 0$.

2. Контакты 2 и 4 подключены к источнику тока i_k, между контактами 1 и 3 измеряется напряжение $u_2 = \varphi_1^{(2)} - \varphi_3^{(2)}$, при этом $I_2 = i_k$, $I_4 = -i_k$, $I_1 = I_3 = 0$.

При каждом измерении преобразователь Холла отключался от источника тока, затем выдерживалась пауза 30 с, чтобы преобразователь вернулся в состояние равновесия. Затем устанавливалось необходимое значение тока через преобразователь, и производилось измерение 100 отсчетов напряжения в течение 0,5 с. Наиболее характерные полученные таким образом вольт-амперные характеристики (ВАХ) приведены на рисунке 3.

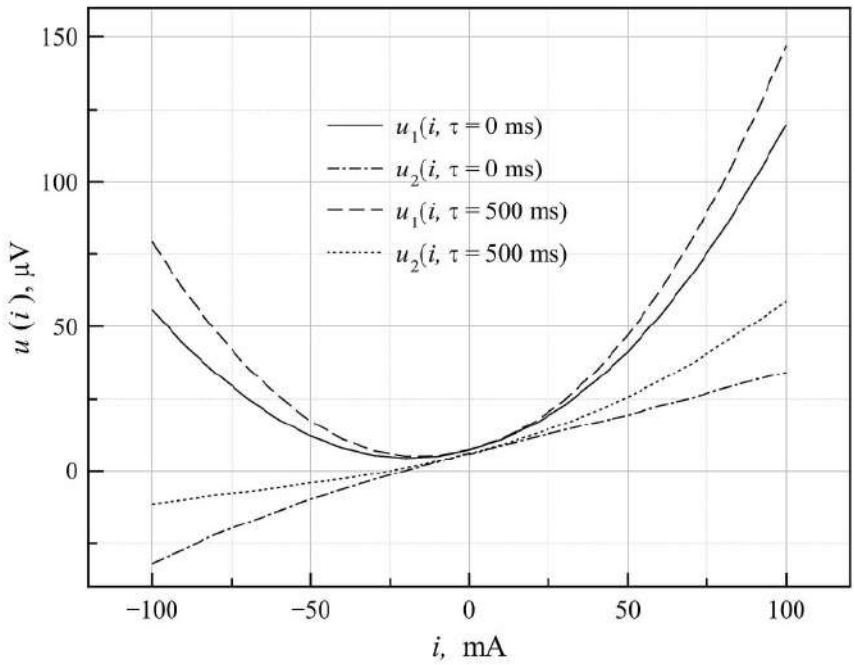


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика для различных значений τ

Максимальное значение СКО ошибки $\delta = \mathbf{R}_{mk}(t, \mathbf{B}(\mathbf{r})) - \mathbf{R}_{km}(t, -\mathbf{B}(\mathbf{r}))$ составило для преобразователей ПХЭ606117А и ПХЭ602117А 25 и 30 мкОм

соответственно, что соответствует 10^{-3} от усредненного значения самих элементов матрицы сопротивлений. Погрешность измерительной установки составила при этом не более 6 мкОм и была проверена на резистивном эквиваленте (рисунок 4а).

Для исследования причины изменения ВАХ ПХ ПХЭ602117А модифицирован – к каждой из четырех контактных площадок (рисунок 4б, в) припаян спай одной из четырех медно-константановых термопар. Второй спай термопар размещался на алюминиевой контактной панели (пунктирный прямоугольник на рисунке 4в) через тонкий изолирующий слой. Термоэдс двух термопар измеряется одновременно двумя синхронно работающими каналами АЦП, разность измеренных напряжений пропорциональна разности температур соответствующих контактных площадок. Аддитивная температурная погрешность усилителей при этом была менее 0,1 мкВ/К.

На рисунке 5 приведены графики динамики напряжения и разности температур между контактами ПХ в разных режимах коммутации тока. Переходный процесс обусловлен термоэдс, возникающей между пленкой ПХ из антимонида индия и медным проводником. Коэффициент Зеебека для такой пары составляет около 200 мкВ/К.

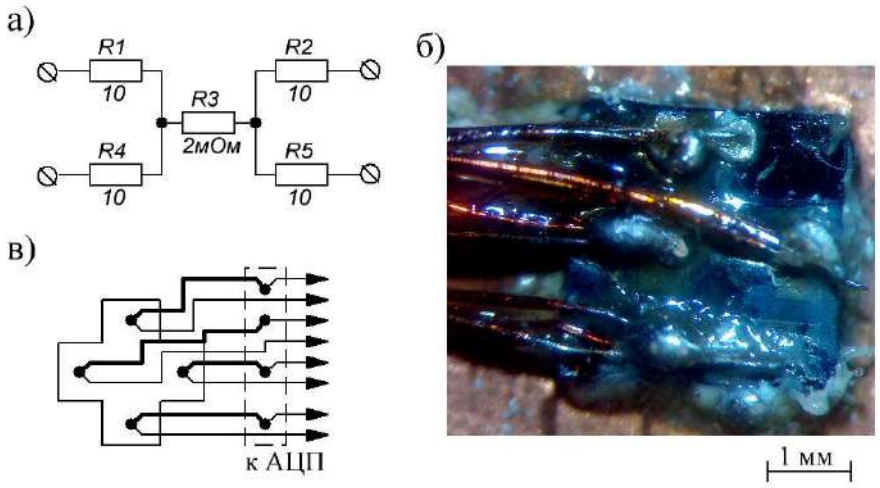


Рисунок 4 – Модифицированный преобразователь Холла: а) резистивный эквивалент, б) фотография преобразователя, в) подключение термопар, толстая линия – константановый провод, тонкая линия – медный провод

На рисунке 5 видно различие между переходными процессами в ПХ после переключения тока в различных направлениях (синие и красные линии) в случае измерения напряжения на тех же контактах, через которые протекал ток (a и b). При измерении переходного процесса на другой паре контактов (c и d)

зависимость от направления тока не наблюдается. Это свидетельствует о том, что нагрев пленки ПХ определяется направлением тока. Эта асимметрия может быть обусловлена теплом Пельтье, выделяющимся между индиевым контактом и пленкой ПХ из антимонида индия. Обнаружено, что разности $U_a - U_b$ и $\Delta T_a - \Delta T_b$ пропорциональны току через ПХ. Это согласуется с объяснением этого явления эффектом Пельтье.

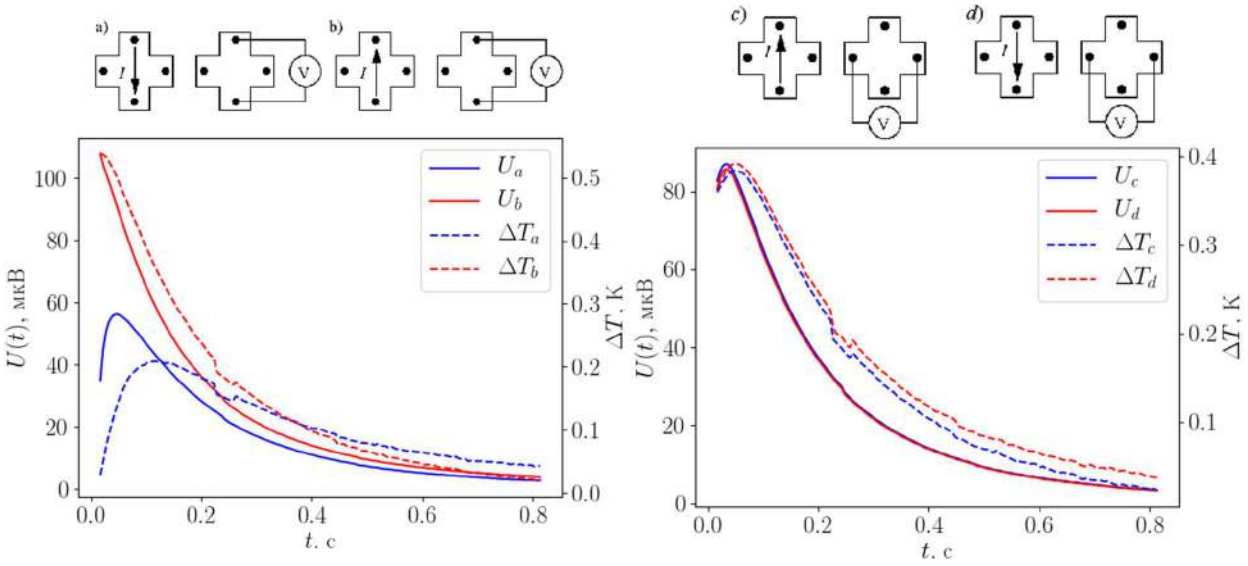


Рисунок 5 – Переходные процессы для напряжения и разности температур на контактах преобразователя Холла для различных последовательностей переключения тока

Теоретически доказаны и экспериментально проверены соотношения взаимности для нелинейного нестационарного элемента – преобразователя Холла. Они обосновывают возможность применения методов измерения напряжения Холла при различных способах коммутации токов в неоднородном магнитном поле в нестационарных условиях. Применимость этих соотношений ограничивается величиной внешнего магнитного поля и квазистационарностью процессов в гальваномагнитной среде.

Показано, что возникающая дополнительная погрешность измерения магнитного поля может достигать 30 мкТл, не компенсируется четырёхтактным алгоритмом коммутации токов и обусловлена действиями эффектов Пельтье и Зеебека в условиях нестационарности и неоднородности температурного поля преобразователя. Этот результат может являться основой для разработки метода компенсации этой дополнительной погрешности.

Результаты этой главы опубликованы в работах 1, 13, 16 – 19, 27, 29, 32 из списка публикации по теме диссертационного исследования.

В третьей главе описаны методы увеличения точности и быстродействия магнитных измерений преобразователями Холла.

Найденная дополнительная погрешность опасна тем, что ее величина зависит от температуры. Использование термодатчика, размещенного вблизи преобразователя, не позволяет уменьшить эту погрешность, поскольку температура активной зоны преобразователя может сильно отличаться от температуры подложки. Проведенное исследование показало, что напряжение на контактах преобразователя Холла при нулевом токе через него равно термоэдс. На основе этого четырёхтактный алгоритм модифицирован таким образом, чтобы исключить влияние эффекта Пельтье.

Новый алгоритм измерений напряжения Холла включает в себя 4 группы по 5 тактов. Каждая группа содержит 4 такта, в которых через преобразователь пропускается ток, и один без тока. Комбинация всех двадцати измеренных напряжений позволяет получить величину, пропорциональную внешнему магнитному полю. Такой метод позволяет снизить температурную зависимость смещения показаний для преобразователя ПХЭ602117А с уровня 33 нВ/К до 1 нВ/К по сравнению с четырехтактным алгоритмом.

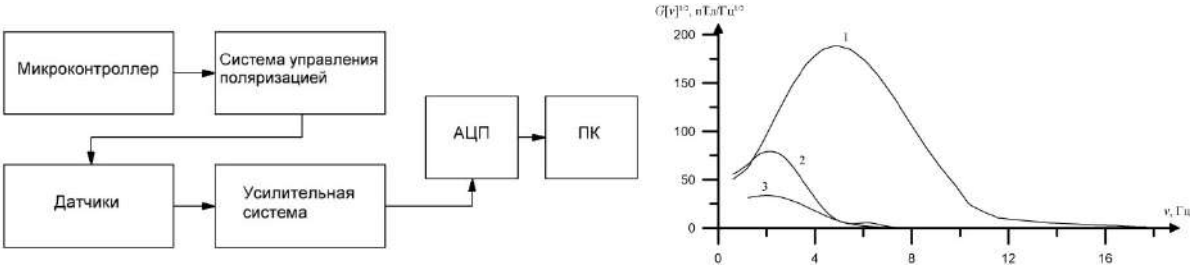
В процессе калибровки требуется измерить абсолютное значения модуля геомагнитного поля. Оно может быть измерено релаксационным магнитометром, выходное напряжение которого является квазигармоническим сигналом медленно меняющейся амплитуды и частоты. Для таких сигналов применимы параметрические методы оценивания значения мгновенной частоты сигнала. Такой подход к обработке сигнала релаксации позволил получить (Рисунок 6а) порог чувствительности по среднему значению модуля геомагнитного поля порядка 20 пТл и возможность анализировать изменение значения геомагнитного поля в пределах одного релаксационного цикла (Рисунок 6б).

Обработка дискретизированных с частотой 10 МГц сигналов осуществлялась на ПК методами цифровой фильтрации и параметрического анализа. Оценивание мгновенной частоты осуществлялось по дискретными выборкам сигнала магнитометра $x[n]$:

$$d[n]=x^2[n-2Q]-x[n-4Q]x[n],\quad c[n]=x^2[n-2Q]-x[n-3Q]x[n-Q],n=4Q,\ldots,N-1.$$

$$f[m-\frac{L-1}{2}]\approx\frac{1}{2\pi Q\Delta t}\arccos\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\sum_{n=m-L+1}^{m}d[n]c[n]/\sum_{n=m-L+1}^{m}c^2[n]}\right\},\quad m=L-1,\ldots,N-1.$$

Здесь L – длина окна оценки, N – полная длина выборки сигнала, Q – параметр прореживания, Δt – время дискретизации.



а) б)

Рисунок 6 – Блок-схема релаксационного магнитометра (а) и СПМ оценки мгновенной частоты при различной ширине полосы пропускания цифрового фильтра(1 – 8 Гц, 2 – 4 Гц, 3 – 2 Гц)

Результаты главы опубликованы в работах 2, 3, 8, 9, 11,16, 20 – 25, 30 из списка публикации по теме диссертационного исследования.

Четвертая глава посвящена методам обработки измерений распределений вектора магнитного поля различных источников с целью определения их параметров. Для исследования различных источников магнитного поля разработан магнитный микроскоп. Он представляет собой векторный холловский магнитометр с трехкоординатной системой перемещения датчика (Рисунок 7).

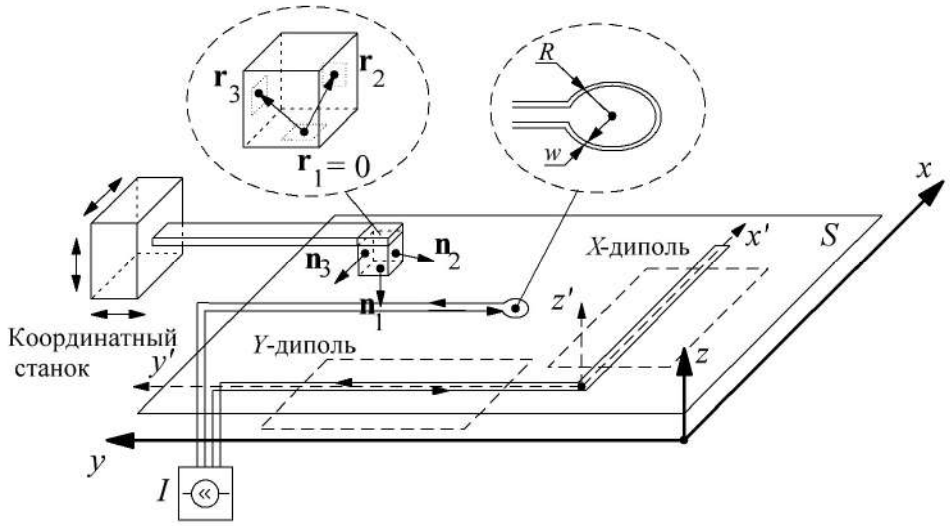


Рисунок 7 – Схематическое изображение магнитного микроскопа

Управление магнитометром и системой перемещения осуществляется одной интерфейсной программой, которая позволяет в автоматическом режиме измерять распределение вектора магнитного поля в заданной равномерной прямоугольной сетке. Максимальная область сканирования составляет (200×

300×20) мм с точностью позиционирования не хуже 10 мкм по каждой из координатных осей при скорости перемещения не более 30 мм/с.

Калибровка магнитного микроскопа производится по заданным токовым распределениям и учитывает, что преобразователи расположены в разных точках, неортогональность их чувствительных осей, непараллельность плоскости перемещения датчика (Oxy) и предметной плоскости (O′x′y′), на которой находится измеряемый образец. Калибровочными параметрами являются: $\mathbf{r}_p$ – координата каждого преобразователя относительно положения преобразователя Холла для вертикальной компоненты; $\mathbf{n}_p$ – направление чувствительных осей преобразователей; K_p – крутизна преобразователей; u_{0p} – смещение показаний преобразователей, коэффициенты уравнения

$$z_0(x, y) = a_{11}x^2 + a_{12}xy + a_{22}y^2 + a_1x + a_2y + a_0,$$

описывающего неровности плоскости, в которой располагается токовый диполь; параметры k_1, b_1, k_2, b_2 уравнений Y-диполя $y_{01}(x) = k_1x + b_1$ и X-диполя $x_{02}(y) = k_2y + b_2$, задающие начало координат и поворот системы координат исследуемого образца.

Для определения метрологических характеристик микроскопа с учетом описанной калибровки измерены параметры токового диполя, представляющего собой кольцо с током 100 мА диаметром 1 мм, расположенное в предметной плоскости.

Параметрическая модель поля кольца составлена на основе вычисления по закону Био – Савара распределения магнитного поля, создаваемого током I, протекающим по кольцу с центром x_c, y_c и радиусом R, Ошибка определения параметров x_c, y_c составила 5 мкм, R – порядка 1 мкм, а тока – 1 мА. Для условий проведенного эксперимента рассчитаны пределы Рао – Крамера погрешности определения параметров токового кольца. Они составили для 0,17 мкм для x_c, y_c, 0,41 мкм для R и 0,1 мА для I.

Другим типом исследованных источников магнитного поля являются ферромагнитные плоские образцы из различных сталей. Для определения создаваемого деформированным ферромагнетиком магнитного поля разработана и реализована численно квантовая модель однодоменного ферромагнетика, использованная далее для качественного анализа.

Для описания деформаций в модель введена тетрагональная поправка искажения кубической симметрии кристаллического поля железа и произведено усреднение молекулярных магнитных моментов по физически малому объему. На основании этой модели производилось численное моделирование свойств ферромагнетика в деформированном состоянии. На рисунке 8 показан результаты моделирования процесса перемагничивания стальных образцов с учетом тетрагонального поля и без него в сравнении с экспериментальными данными. Для каждого уровня механического напряжения рассчитывалась

коэрцитивная сила. Хорошо заметно, что в области растяжения модель с учетом тетрагонального поля и без него хорошо аппроксимируют экспериментальные результаты [5]. При этом в области растяжения согласованный с экспериментом результат дает только модель с тетрагональным полем.

На основании моделирования деформированного состояния ферромагнетика удалось выявить, что области резкого изменения намагниченности совпадают с зонами локальной деформации. Разработан метод определения таких областей. На первом этапе он позволяет определить медленно меняющуюся намагниченность образцов в форме параллелепипеда. Медленно меняющаяся намагниченность ищется для задачи (1) в виде разложения

$$M_l(\mathbf{r}) = M_{0l} + a_{lj} r_j. \qquad (3)$$

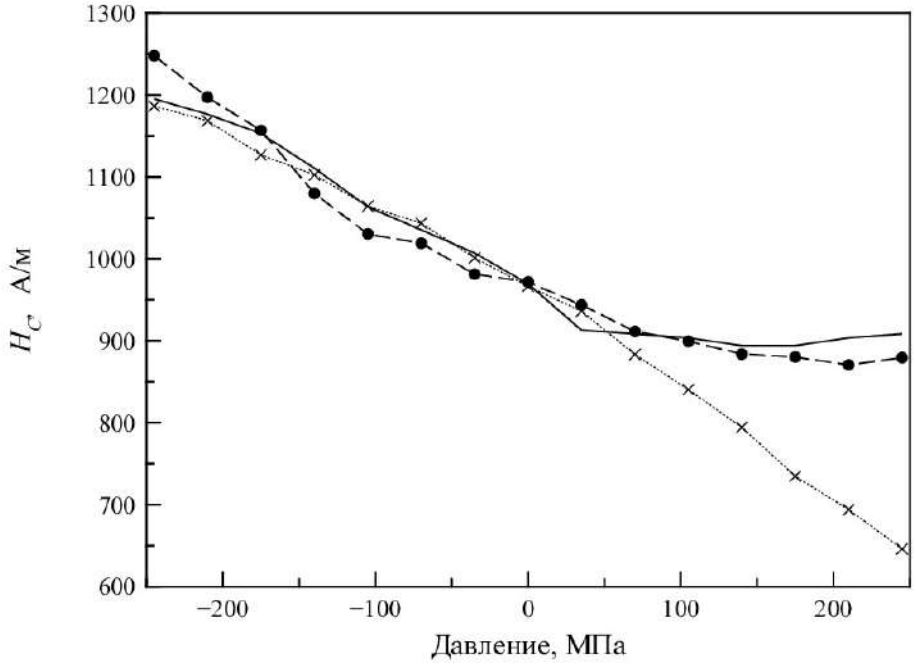


Рисунок 8 – График зависимости коэрцитивной силы H_C от значения приложенного давления (сплошной линией показаны экспериментальные данные из работы [5], пунктирная линия с круглыми маркерами – результаты моделирования без учета тетрагонального поля, линия с х-маркерами – с учетом тетрагонального поля).

Для получения единственного решения на коэффициенты накладываются дополнительные условия. Используется предположение, что по образцу не протекал электрический ток. В этом случае ротор медленно меняющейся намагниченности внутри образца равен нулю. Отсюда получаются условия на коэффициенты уравнения (3):

$$a_{\ln} = a_{nl}.$$

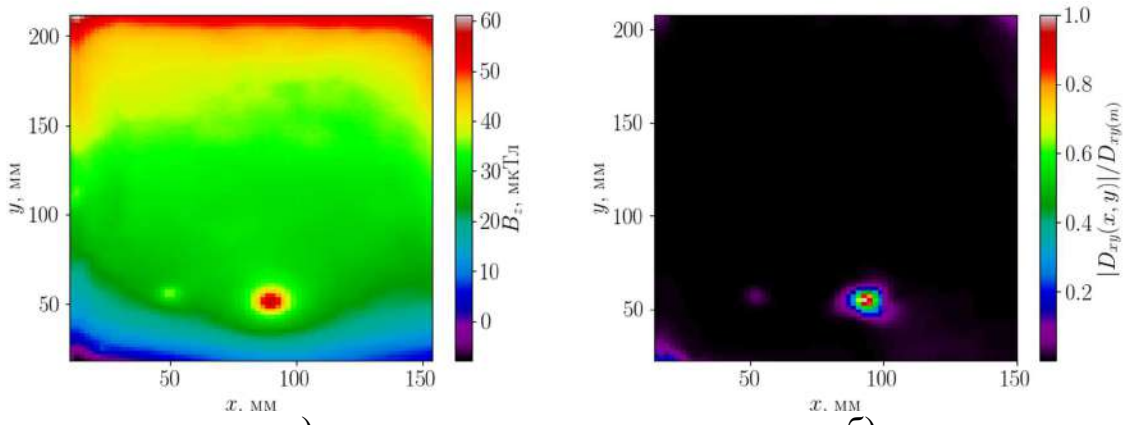
Поиск коэффициентов осуществляется минимизацией функционала ошибки суммарного СКО модельного распределения магнитного поля от измеренного. Для ускорения счета некоторые интегралы рассчитаны аналитически. В процессе применения метода выявлено, что значительное влияние на точность метода оказывает погрешность определения положения краев образца. Для определения их положения разработан детектор резкого изменения намагниченности. Этот детектор представляют собой комбинации усредненных по окну произведений производных компонент индукции магнитного поля:

$$D_{xy}(x,y) = \iint_S \frac{\partial B_z}{\partial x}(x'-x, y'-y) B_x(x'-x, y'-y)dx'dy' \times$$
$$\times \iint_S \frac{\partial B_z}{\partial y}(x'-x, y'-y) B_y(x'-x, y'-y)dx'dy'. \quad (4)$$

На втором этапе этот же детектор (4) применяется для обработки распределения вектора индукции магнитного поля за вычетом распределения, создаваемого медленно меняющейся намагниченностью. Большие значения детектора (4) соответствуют областям с большим изменением намагниченности, которые соответствуют зонам деформаций.

Верификация метода осуществлялась на пластинах из стали марки ст3 размерами 150×200×8 мм. Она была подвергнута ударам керна в двух точках. Результаты обработки приведены на рисунке 9. Он показывает, что максимум детектора (4) соответствует области необратимой деформации образца. На рисунке заметно, что детектор (4) показывает резкое изменение намагниченности вблизи углов образца, где модель (3) несправедлива, поскольку условие на медленность изменения намагниченности вблизи краев выполняется хуже чем в толще образца.

Метод численного моделирования ферромагнитных свойств позволяет достичь удовлетворительного описания изменения магнитных свойств под действием деформаций и объясняет индуцирование областей резкого изменения намагниченности ферромагнетиков локальной деформацией. Поскольку в основу метода положена квантовая модель кристаллического α-Fe, то для ферромагнетиков с отличными от этого материала свойствами она может быть неприменима. Однако варьирование параметров модели позволяет достичь удовлетворительных предсказаний и для некоторых сплавов со сложным химическим составом.



а) б)

Рисунок 9 – Пример работы метода предварительного определения локальных магнитных неоднородностей: а) исходное распределение с обрезанными краями; б) распределение нормированного модуля детектора (4) увеличивает контрастность изображения мест локальной неоднородности намагниченности, созданной ударной нагрузкой.

Результаты главы опубликованы в работах 4, 5, 7, 10, 12 – 14, 26, 28, 31, 32 из списка публикации по теме диссертационного исследования.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Соотношения взаимности для нелинейного нестационарного многополюсника в неоднородном внешнем магнитном поле. Для матрицы его сопротивлений в полях порядка 100 мкТл экспериментально проверено выполнение соотношения взаимности с относительной точностью порядка 10^{-3} на преобразователе Холла ПХЭ602117А.

2. Метод расчета системной функции тонкопленочного преобразователя Холла как векторного произведения полей тока при пропускании его через одноименные пары контактов. Произведено сравнение с экспериментальными данными, полученными при исследованиях преобразователей Холла в магнитном поле с неоднородностью не менее 10% на размере активной зоны.

3. Методы исследования нестационарных процессов в преобразователях Холла в контролируемом магнитном поле.

4. Новый алгоритм коммутации тока для холловского тонкопленочного преобразователя ПХЭ602117А, позволяющий снизить зависимость смещения показаний от температуры с уровня 33 нТл/К до 1 нТл/К при частоте получения отсчетов магнитометра 125 отсчетов/с и порогом

чувствительности к магнитному полю не хуже 2 нТл при времени накопления 5 с.

5. Метод обработки сигнала свободной прецессии релаксационного магнитометра, который позволяет исследовать динамику модуля индукции магнитного поля в одном релаксационном цикле и достичь порога чувствительности к индукции магнитного поля не хуже 20 пТл за измерительный цикл.

6. Метод определения параметров токового диполя, позволяющий при помощи магнитного микроскопа с расстояния не более 3 мм найти положение токового диполя с погрешностью не более 10 мкм и значения компонент вектора его магнитного момента с погрешность не более и 10^{-8} А·м^2

7. Метод моделирования процесса намагничивания ферромагнетика. Особенностью метода является применения аналитического усреднения по физически малому объему образца. Это позволяет существенно снизить вычислительные затраты при моделировании макроскопических образцов. Метод позволяет получить априорную информацию о распределении магнитного поля образца.

Список использованных источников

1. Madec, M. Compact modeling of vertical hall-effect devices: Electrical behavior / M. Madec, J.-B. Schell, J.-B. Kammer et. al. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2012. – vol. 77
2. Jiang, J. A Continuous-time ripple reduction technique for spinning-current hall sensors / J. Jiang, W. J. Kindt, K. A. A. Makinwa // IEEE Journal of solid-state circuits. – 2014. – vol. 49. – N7.
3. Никитов С. А. Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники / С. А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков и др. // УФН. – 2015. – Т. 185. – №10. – С. 1099 – 1128.
4. Arpaia, P. Measuring the magnetic axis alignment during solenoids working / P. Arpaia, B. Celano, De Vito et. al. // Scientific Reports. – 2018. – vol. 8.
5. Stevens, K. J. Stress dependence of ferromagnetic hysteresis loops for two grades of steel / K. J. Stevens // NDT&E International. – 2000. – vol. 33. – pp. 111 – 121.

Публикациию по теме диссертационного исследования

Публикации в журналах, включенных в перечень ВАК РФ.

1. * Игнатьев В. К., **Орлов А. А.**, Перченко С. В. Соотношения взаимности для нелинейной плазмоподобной среды в магнитном поле // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 4. С. 74-81.

2. * 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.
3. * Игнатьев В. К., **Орлов А. А.**, Станкевич Д. А. Фазовый метод компарирования мгновенных значений частот квазигармонических сигналов // Измерительная техника. 2016. № 7. С. 48-53.
4. * 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.
5. * Игнатьев В. К., Лебедев Н. Г., **Орлов А. А.** Квантовая модель гистерезиса в однодоменном магнитомягком ферромагнетике // Физика металлов и металловедение, 2018, Т. 119, № 5, С. 477–486
6. * 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
7. Игнатьев В. К., Козин Д. А., **Орлов А. А.**, Станкевич Д. А., Микромагнитный метод микроструктурного анализа ферромагнитных цилиндрических образцов // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1. № 4 (5). С. 44 - 57.
8. Игнатьев В. К., Невзоров А. А., **Орлов А. А.** Цифровой протонный магнитометр для измерения геомагнитного поля // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 24. № 1 (24). С. 92.
9. Невзоров А. А., **Орлов А. А.** Применение параметрических методов оценивания частоты сигнала свободной спиновой прецессии для определения неоднородного магнитного поля // Ползуновский вестник. 2014. № 2. С. 27-34.
10. Бардин А. А., Игнатьев В. К., **Орлов А. А.**, Станкевич Д. А., Перченко С. В. Магнитная экспресс-диагностика микроструктуры инженерных конструкций // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 371-378.
11. Игнатьев В. К., **Орлов А. А.,** Перченко С. В. Компенсация аддитивной температурной погрешности преобразователя Холла // Инженерный вестник Дона №2 (2019), электронный ресурс: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5760.

    Публикации в иностранных журналах, включенных в базы цитирования SCOPUS и Web of Science
12. ** Ignatiev, V.K., Lebedev, N.G., **Orlov, A.A**., Perchenko, S.V. Quantum model for studyingmagneto-mechanical properties of a magnetically soft ferromagnet // Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2019). #165658. Электронный ресурс – режим доступа: http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165658

13. ** Bardin, A., Ignatjev, V., Nevsorov 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
14. ** 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
15. ** 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
16. ** 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
17. ** Bardin, A., Ignatjev, V., **Orlov, A.**, Perchenko, S. Verifying of reciprocal relations for nonlinear quadripole in unsteady mode // Results in Physics vol. 7, 2017, pp. 665-666
18. ** Bardin, A., Ignatjev, V., **Orlov, A.**, Perchenko, S. Voltage transients in thin-film InSb Hall sensor // Results in Physics vol. 7, 2017, pp. 3344-3345
19. ** Ignatjev, V., **Orlov, A.**, Perchenko, S. The research of reciprocal relations for nonlinear quadripole in the magnetic field // Progress in Electromagnetics Research Letters vol. 59, 2016, pp. 71-75
20. ** Ignatjev, V., **Orlov, A.**, Perchenko, S. Reciprocity relations for nonlinear galvanomagnetic transducer // Progress in Electromagnetics Research Letters vol. 56, 2016, pp. 75-80

Свидетельства о регистрации интеллектуальной собственности

21. Игнатьев В. К., **Орлов А. А.** Способ измерения сдвига фаз // патент РФ № 2541373 МПК G01R25/00, заявл. 04.10.2013; опубл. 10.02.2015
22. Бардин А. А., **Орлов А. А.** Программа для определения калибровочных коэффициентов механически связанных первичных преобразователей гравитационного и магнитного полей // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660782 от 20.10.2016 г

Материалы международных конференций

23. ** Bardin A. A., Igntjev V. K., **Orlov A. A.** Hall magnetic scanner // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM vol. 17(14), pp. 165-172
24. ** Bardin A. A., Igntjev V. K., Nevsorov A. A., **Orlov A. A.** Maping of geomagnetic vector to global coordinate system // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM vol. 17(14), pp. 237-244

25. Nevsorov A., **Orlov A.** Geomagnetic fast-change measurements by proton precession magnetometer // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference vol.3 , SGEM 2016, pp. 499-504

Другие публикации

26. ** Ignatjev V. K., **Orlov A. A.** and Stankevich D. A. Magnetostatics of Cylindrical Ferromagnetic Samples // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications. Ed.: Ivan A. Parinov and Shun-Hsyung Chang, New York, NOVA Science Publishers – 2013, chapter 7, pp. 73-90
27. ** Ignatjev V. K., **Orlov A. A.** Hall Effect in Inhomogeneous Magnetic Field // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Ed.: Ivan A. Parinov and Shun-Hsyung, New York, NOVA Science Publishers – 2013, chapter 5, pp. 49 – 64.
28. Игнатьев В. К., **Орлов А. А.** Обратная магнитостатическая задача для ферромагнетика // Электронный научно-технический журнал – Научное издание МГТУ им. Баумана, № 1, 2014 г. - Электронный ресурс – режим доступа: http://dx.doi.org/10.7463/0114.0695966
29. Игнатьев В. К., **Орлов А. А.** Системная функция магнитоактивного элемента в неоднородном магнитном поле // Электронный научно-технический журнал – Научное издание МГТУ им. Баумана, № 10, октябрь 2012 г. - Электронный ресурс – режим доступа: http://dx.doi.org/10.7463/1012.0462881
30. Игнатьев В. К., Никитин А. В., Бернардо-Сапрыкин В. Х., **Орлов А. А.** Измерение разности фаз квазигармонических сигналов в реальном времени // Электронный научно-технический журнал – Научное издание МГТУ им. Баумана, № 8, август 2013 г. - Электронный ресурс, http://dx.doi.org/10.7463/0713.0588392
31. **Орлов А. А.** Система поиска микродефектов в ферромагнитных материалах // Микроэлектронные управляющие системы и комплексы: сборник тезисов и статей Всероссийской научной школы, г. Новочеркасск, 5-7 сентября 2011 г. / Юж. Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЛИК, 2011. -192 с.
32. **Орлов А. А.** Автоматизированная система дефектоскопии ферромагнитных изделий. // XII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Электронный ресурс, режим доступа открытый: http://www.ict.nsc.ru/userfiles/file/ym2011_program_theses.pdf

* Статья имеет переводную версию, включённую в базу цитирования SCOPUS и(или) Web of Science

** Публикация включена в базу цитирования SCOPUS и(или) Web of Science