Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный университет»

На правах рукописи

Бардин Алексей Алексеевич

МЕТОД ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ХОЛЛОВСКИМ МАГНИТОМЕТРОМ

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: д.ф.-м.н., профессор
Игнатьев Вячеслав Константинович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор
Панина Лариса Владимировна

к.ф.-м.н.
Карпенков Дмитрий Юрьевич

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится «_» месяц 2020 года в время на заседании диссертационного совета Д 002.135.01 на базе Научно-технологического центра Уникального приборостроения РАН по адресу 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, в конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН и на сайте http://ntcup.ru/zashhita-dissertacij/

Автореферат разослан «_» месяц 2019 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.135.01,

к.ф.-м.н. _____ Д.Ю. Великовский

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы. Методы современной экспериментальной физики в области физики твердого тела, биофизики, геофизики включают в себя косвенные измерения намагниченности, основанные на покомпонентных измерениях магнитного поля. Контроль намагниченности в процессе эксперимента позволяет зарегистрировать изменение физических свойств исследуемого объекта [1], что является важной информацией для построения модели исследуемого процесса [2]. Так, по значению намагниченности можно определить, какому внешнему воздействию подвергался исследуемый объект [3]. В работе [4] измерения намагниченности используется при исследовании уровней Ландау и квантовых осцилляций в напряженных полуметаллах Вейля. Одним из контролируемых параметров в исследованиях конструкционных сталей является остаточная намагниченность [5]. Измерения этого параметра позволяют фиксировать изменения структуры исследуемого образца. Часто измерения намагниченности являются не целью эксперимента, а вспомогательным инструментом. Например, в работе [6] исследуются свойства феррита кобальта, контролируются изменения морфологии исследуемого образца под воздействием магнитного поля.

Методы измерения магнитного поля в физических экспериментах, включающих косвенное измерение намагниченности, варьируются по точности, скорости измерения и по принципу измерения. Так, в работе [7], посвящённой исследованию формирования доменных структур и изменениям магнитострикции насыщения магнитомягких сплавов на основе железа, находящихся под различным воздействием, для контроля магнитных свойств применяются метод порошковых фигур (магнитной суспензии) и магнитооптический метод с использованием продольного эффекта Керра. В работе [8], посвящённой исследованию магнитных свойств тонких пленок Ni80Fe20, легированных хромом, для измерения магнитного поля использовался индукционный метод. Контроль магнитных параметров применяется и в оптических исследованиях. В работе [9] описывается интерферометр с циркулярной решеткой Тальбота для измерения температурного профиля микропламени под действием градиента однородного магнитного поля. При изменении величины магнитного поля изменяются параметры пламени: температура, длина пламени, расход топлива, расход кислорода и др. В работе [10] применяется HTS-SQUID магнитометр, позволяющей фиксировать чрезвычайно малые магнитные отклики диамагнитных материалов, таких как вода и этанол для контроля их физических свойств. Описанные методы измерения магнитного поля для

оценивания намагниченности не являются высокоточными, но достаточны для применения в рассмотренных случаях.

На сегодняшний день известно большое количество методов, позволяющих вычислить среднюю по объему тела намагниченность [11 – 12]. Вычисление распределения намагниченности в твердом теле по значениям магнитного поля вне его является обратной задачей, в общем случае некорректной. Для ее решения используются методы регуляризации [13], предполагающие применение априорной информации и значительную избыточность данных. Существенной проблемой в измерениях магнитного поля является одновременное обеспечение точности, быстродействия и чувствительности. Этим требованиям удовлетворяют гальваномагнитные преобразователи, основанные на эффекте Холла.

Для выявления новых свойств в исследуемых явлениях необходимо проводить высокоточные измерения распределения намагниченности исследуемого объекта в реальном времени [14]. Примером таких экспериментов является исследование магнитоупругих эффектов, описанное в работе [15]. Расчёт распределения намагниченности в магнитоакустических экспериментах позволяет проводить анализ целостности ферромагнитных объектов, испытывающих внешнее воздействие [16]. Использование метода, основанного на явлении магнитоакустического резонанса (МАР) на низких частотах, позволяет детально исследовать структуру магнетиков.

Целью работы является увеличение точности измерения холловского магнитометра для оценки распределения намагниченности ферромагнитных объектов в слабых магнитных полях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Исследовать явления, определяющие точность и быстродействие измерений компонент магнитного поля холловским магнитометром.
2. Разработать метод оценки распределения намагниченности ферромагнитных объектов в слабых магнитных полях.
3. Апробировать разработанные методы на слабо-намагниченных напряженно-деформированных ферромагнитных объектах.

Предметом исследования являются переходные процессы и соотношения взаимности в гальваномагнитных элементах, определяющие точность, чувствительность и быстродействие магнитных измерений, методы обработки результатов магнитных измерений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Впервые исследовано влияние переходных процессов в тонкопленочных гальваномагнитных элементах на точность и быстродействие измерений магнитного поля.
2. Впервые экспериментально проверены соотношения взаимности для нелинейного нестационарного гальваномагнитного элемента в неоднородном магнитном поле.
3. Предложен и экспериментально исследован новый метод обработки сигнала преобразователя Холла для повышения точности измерений магнитного поля.
4. Предложен и экспериментально исследован новый метод оценки распределения намагниченности.

Научно-практическое значение работы характеризуется тем, что:

1. Оценка намагниченности в реальном времени позволят детектировать изменение физических свойств контролируемого объекта, подвергшегося внешнему воздействию.
2. Повышена точность, быстродействие и чувствительность холловских магнитометров.
3. Разработанная методика исследования магнитоупругих эффектов может применяться для магнитоструктурного анализа и магнитоакустических экспериментов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Переходные процессы в тонкоплёночных преобразователях Холла, ограничивающие их быстродействие при высокоточных измерениях, вызваны частью термо-ЭДС, возникающей между пленкой ПХ из антимонида индия и медным проводником, обусловленной теплом Пельтье, выделяющимся между индиевым контактом и пленкой ПХ из антимонида индия.
2. Соотношения взаимности для линейной части матрицы нелинейных сопротивлений нестационарного гальваномагнитного элемента выполняются при любых значениях тока в диапазоне до 100 мА и магнитного поля в диапазоне до ±100 мкТл с погрешностью не более 10^{-2}.
3. Метод достижения порога чувствительности холловских магнитометров 1нТл.
4. Метод оценки распределения намагниченности цилиндрических ферро-магнитных объектов, находящихся в слабых магнитных полях.

Достоверность результатов:

Достоверность результатов подтверждается калибровкой измерителей, контрольными экспериментами и применением апробированных методов обработки результатов измерений.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, в части пунктов: 2. Разработка новых

принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений – соответствуют основным положениям и результатам в пунктах 1 – 3; 8. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов –соответствуют основным положениям и результатам в пунктах 3 – 4.

Личный вклад автора:

Все представленные в работе результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автором выполнены все численные расчёты по выносимым на защиту результатам, экспериментально проверены соотношения взаимности для матрицы нелинейных сопротивлений нестационарного гальваномагнитного элемента. Разработаны и созданы все экспериментальные установки. Все измерения проведены лично автором. В проведении экспериментов принимали участие сотрудники научной лаборатории «дистанционных методов зондирования и диагностики» Волгоградского государственного университета.

Публикации и апробация работы:

Результаты диссертационной работы опубликованы в 1 свидетельстве на программу ЭВМ, 1 патенте на полезную модель, 12 научных работах. Из них: две статьи опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 3 тезиса конференций, 6 статей опубликованы в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 2 из которых опубликованы в журналах Q1.

Структура и объём диссертационной работы:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и списка публикаций по теме диссертации. Объём диссертации 104 страницы, включая 50 рисунков. Список литературы состоит из 90 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализированы современные работы, подтверждающие актуальность проводимого диссертационного исследования. Целью рассмотренных работ является определение параметров физических процессов, обусловленных магнитными свойствами исследуемых объектов. Во всех работах исследования основываются на магнитных измерениях различного типа. Анализ работ позволил выделить ряд проблем в постановке физического эксперимента, таких как: точность проводимых магнитных измерений, скорость измерений, сложность применения современных методов обработки результатов. Исходя из выявленных проблем, обоснована актуальность диссертационного

исследования. Описана структура, краткое содержание глав и объем диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены методы измерения магнитного момента, магнитного поля и вычисления намагниченности, приведён обзор методов исследований физических процессов, основанных на магнитных измерениях, включая вычисление намагниченности. Для вычисления медленно меняющейся намагниченности цилиндрического образца используется методика, описанная в работе [16]. Уравнение магнитостатики:

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

рассматривается как обратная задача для нахождения распределения намагниченности. Пусть **M** – усредненная по сечению цилиндрического стержня длиной L намагниченность, которая меняется только вдоль продольной координаты z. Нормальная компонента магнитного поля в каждой точке на поверхности стержня радиусом R имеет вид:

$$B(\alpha, z) = \int_0^L M_z(z')S(z-z')dz' + \int_0^L \left[M_x(z')\cos(\alpha) + M_y(z')\sin(\alpha)\right]P(z-z')dz', \qquad (2)$$

здесь функции $K(z)$ и $P(z)$ – системные функции намагниченности:

$$K(z) = \frac{3\mu_0}{4\pi}\int_0^R\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\rho[h-\rho\cos(\psi)]z}{\left[z^2+h^2-2\rho h\cos(\psi)+\rho^2\right]^{5/2}}d\rho d\psi\,, \qquad (3)$$

$$P(z) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \frac{R[h-R\cos(\psi)]\cos(\psi)}{\left[z^2+h^2-2Rh\cos(\psi)+R^2\right]^{3/2}}d\psi\,. \qquad (4)$$

Для решения обратных задач вида (2) необходимы высокая точность измерений и избыточность данных [13]. Используемые в качестве первичных преобразователей ПХ обычно применяются в качестве индикаторов магнитного поля, так как высокочувствительный ПХ является существенно нелинейным и нестационарным. Применение специализированных алгоритмов обработки данных измерений, например, четырехтактный алгоритм, позволяют преодолеть это ограничение и использовать их в качестве измерителей [18]. Алгоритм является частным случаем применения соотношений взаимности, выполняющихся для линейного элемента. Однако высокочувствительный ПХ используется в существенно нелинейном режиме. Для улучшения компенсации погрешностей ПХ рассмотрены соотношения взаимности для нестационарного нелинейного многополюсника. Проверка соотношений основана на методике, ис-

пользуемой для стационарного случая [19]. В рассмотренной работе проверяются свойства симметрии матрицы $\widehat{\mathbf{R}}$ сопротивлений нелинейного нестационарного многополюсника, определяемой как:

$$\varphi_k = \sum_{m=1}^{M} R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t) I_m \tag{5}$$

где t– время, k иm – номера выводов многополюсника, M – их количество,φ_k – электрический потенциал k-го контакта многополюсника, I_m – ток через m-й контакт, $\mathbf{I}$ – вектор токов, составленный из компонент I_m, $\mathbf{B}_e$ – внешнее магнитное поле. Показано, что

$$R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t) = R_{mk}(-\mathbf{I}, -\mathbf{B}_e, t), \tag{6}$$

и матрицу сопротивлений $R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t)$ можно представить в виде суммы матриц

$$R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t) = R_{km}^{A}(t) + R_{km}^{H}(\mathbf{B}_e, t) + R_{km}^{NL}(\mathbf{I}, t), \tag{7}$$

где R_{km}^{A} – не зависящая от токов и внешнего магнитного поля матрица линейных сопротивлений, отвечающая за напряжение небаланса, $R_{km}^{H}(\mathbf{B}_e, t)$ – не зависящая от токов матрица, отвечающая за эффект Холла, $R_{km}^{NL}(\mathbf{I}, t)$ – не зависящая от внешнего магнитного поля матрица, отвечающая за нелинейные явления. Предполагается применение соотношений (6), что позволит повысить точность магнитных измерений с использованием ПХ. В завершении главы сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию явлений в ПХ, определяющих точность и быстродействие измерений намагниченности, и методу достижения порога чувствительности холловского магнитометра 1 нТл. Новизной предлагаемого метода является нелинейный режим ПХ и алгоритм обработки сигнала ПХ, исключающий систематическую составляющую температурной погрешности. В тонкоплёночных ПХ в четырехтактном режиме возникают переходные процессы, представленные на рис. 1, ограничивающие их быстродействие при высокоточных измерениях.

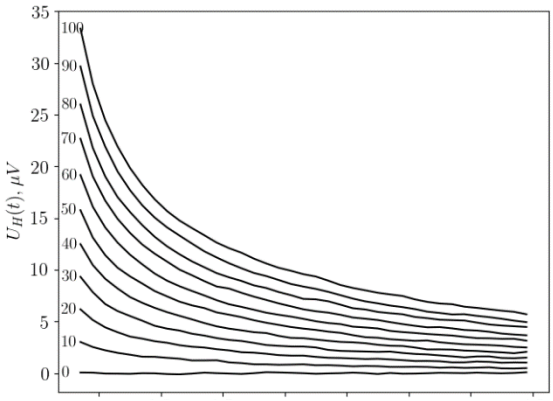
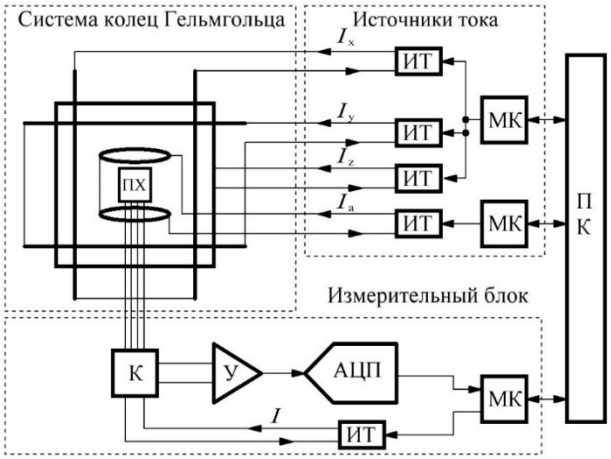
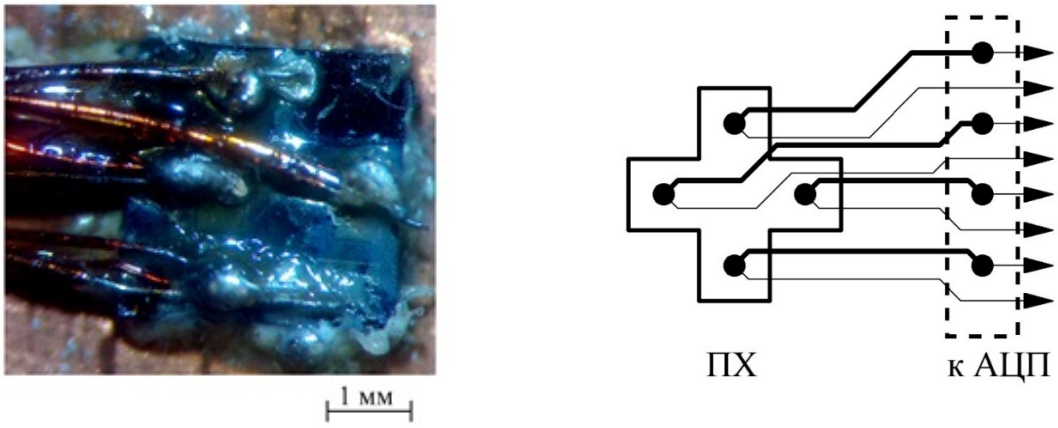


Рисунок 1 - Переходной процесс напряжения Холла. Цифрами около кривых показан ток в мА

Для исследования переходных процессов, проявляющихся в ПХ во время измерения, спроектирована и создана экспериментальная установка, позволяющая компенсировать магнитное поле Земли и устанавливать в области ПХ однородное магнитное поле заданной величины, коммутировать по заданному алгоритму контакты ПХ и производить необходимые измерения с последующей обработкой данных на персональном компьютере (ПК), показанная на рис. 2.



Для проведения экспериментов использовались ПХ серии ПХЭ602117А. Для проверки отсутствия коммутационных помех проводились испытания на резистивном эквиваленте ПХ. Переходные процессы не наблюдались, что позволяет судить о достоверной работе электроники. При проведении экспериментов необходимо контролировать изменение температуры контактов ПХ, поэтому они были модифицированы к каждой из четырех контактных площадок индием припаян спай одной из четырех медно-константановых термопар, второй спай термопар размещался на алюминиевой контактной панели через тонкий изолирующий слой, показано на рис. 3.



а) б)

Рисунок 3 – Модифицированный преобразователь Холла: а) фотография преобразователя с термопарами, б) – подключение термопар, толстая линия – константановый провод, тонкая линия – медный провод

Термо-ЭДС с двух термопар измерялась одновременно двумя синхронно работающими каналами АЦП. Для исследования переходных процессов ПХ помещался в

центр поворотной системы экспериментальной установки, в область, где компенсировалось магнитное поле Земли, и задавалось внешнее однородное магнитное поле. Для измерения использовался четырёхтактный алгоритм коммутации ПХ [18]. При его реализации анализировалась динамика измеренных напряжений и разности температур между контактами ПХ в разных режимах коммутации тока. Установлено, что напряжение между контактами ПХ и разность их температур коррелированы, поэтому сделан вывод, что переходный процесс в ПХ обусловлен термо-ЭДС, возникающей между пленкой ПХ из антимонида индия и медным проводником. Также наблюдалось различие между переходными процессами в ПХ после переключения тока в различных направлениях, это означает, что нагрев пленки ПХ определяется направлением тока и градиентом температуры пленки в направлении, параллельном направлению тока. Эта асимметрия обусловлена теплом Пельтье, выделяющимся между индиевым контактом и пленкой ПХ из антимонида индия. Следовательно, часть тепловыделения в контактах ПХ пропорциональна току, что согласуется с эффектом Пельтье. Эксперименты с изменением условий измерения подтвердили, что переходные процессы зависят от тока, протекающего через ПХ, и не зависят от других внешних условий, в том числе от изменения внешнего магнитного поля, частоты дискретизации АЦП и изменения температуры окружающей среды в диапазоне –10 ... +100°С. Таким образом, установлено, что переходные процессы в тонкоплёночных преобразователях Холла, ограничивающие их быстродействие при высокоточных измерениях, обусловлены термо-ЭДС, возникающей между пленкой ПХ из антимонида индия и медным проводником, обусловленной теплом Пельтье, выделяющимся между индиевым контактом и пленкой ПХ из антимонида индия.

Для улучшения компенсации погрешностей ПХ проверены соотношения взаимности для линейной части матрицы $R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t)$ сопротивлений нелинейного нестационарного многополюсника, описанные в работе [18]. Из соотношений (6) и (7), авторы получают экспериментально проверяемые соотношения взаимности:

$$R_{km}^{A} = R_{mk}^{A} \quad R_{km}^{H}(\mathbf{B}_e, t) = R_{mk}^{H}(-\mathbf{B}_e, t) = -R_{mk}^{H}(\mathbf{B}_e, t). \tag{8}$$

В идеализированном случае в соотношениях (8) все элементы матрицы сопротивлений должны измеряться одновременно. На практике, измерения производились поочередно в одинаковых условиях. Для этого в каждом измерительном режиме ПХ 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. Далее предполагается, что τ – время, отсчитываемое от момента установки нового значения тока i. Измеряемые напряжения $u_1(\tau)$ и $u_2(\tau)$ содержат погрешности, обусловленные термо-ЭДС контактов ПХ и дрейфом нуля измерительных приборов. Поэтому используются величины

$$u_3(i, \mathbf{B}_e, \tau) = (u_1(i, \mathbf{B}_e, \tau) - u_1(-i, \mathbf{B}_e, \tau)) / 2,$$
$$u_4(i, \mathbf{B}_e, \tau) = (u_2(i, \mathbf{B}_e, \tau) - u_2(-i, \mathbf{B}_e, \tau)) / 2. \quad (9)$$

Из формул (1) и (5) можно получить нелинейные функции с размерностью сопротивления

$$R_1(i, \mathbf{B}_e, \tau) = \frac{u_3(i, \mathbf{B}_e, \tau)}{i} = R_{21}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{23}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{41}(i, \mathbf{B}_e, \tau) + R_{43}(i, \mathbf{B}_e, \tau),$$
$$R_2(i, \mathbf{B}_e, \tau) = \frac{u_4(i, \mathbf{B}_e, \tau)}{i} = R_{12}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{14}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{32}(i, \mathbf{B}_e, \tau) + R_{34}(i, \mathbf{B}_e, \tau). \quad (10)$$

Линейные части нелинейных функций R_1 и R_2 могут быть получены полиномиальной аппроксимации функций u_3 (i) и u_4 (i) с параметрами τи$\mathbf{B}_e$.

$$\tilde{u}_3(i, \mathbf{B}_e, \tau) = a_0(\mathbf{B}_e, \tau) + a_1(\mathbf{B}_e, \tau) i + a_2(\mathbf{B}_e, \tau) i^2 + ...,$$
$$\tilde{u}_4(i, \mathbf{B}_e, \tau) = b_0(\mathbf{B}_e, \tau) + b_1(\mathbf{B}_e, \tau) i + b_2(\mathbf{B}_e, \tau) i^2 + ... \quad (11)$$

В этих выражениях коэффициенты $a_0(\mathbf{B}_e,\tau)$ и $b_0(\mathbf{B}_e,\tau)$ определяют остаточную систематическую погрешность измерений, которая обусловлена дрейфом смещения измерительных приборов. Коэффициенты $a_1(\mathbf{B}_e,\tau)$ и $b_1(\mathbf{B}_e,\tau)$ описывают сопротивление асимметрии четырехполюсника и эффект Холла. Проверяемые соотношения взаимности связаны с линейной частью многочлена (11) и имеют вид:

$$a_1(\mathbf{B}_e, \tau) = b_1(-\mathbf{B}_e, \tau). \quad (12)$$

Измерения осуществлялись на том же аппаратно-программном комплексе, что и измерения переходных процессов в ПХ. Проводились измерения напряжений $u_k(\tau)$, где k = 1, … , 4 , и вычислялись коэффициенты $a_1(\mathbf{B}_e,\tau)$ и $b_1(\mathbf{B}_e,\tau)$ из формулы (7), и находилась величина.

$$\Delta(\mathbf{B}_e, \tau) = a_1(\mathbf{B}_e, \tau) - b_1(-\mathbf{B}_e, \tau). \quad (13)$$

Если соотношения взаимности (3) справедливы, то $\Delta(\mathbf{B}_e,\tau)$ = 0 для всех значений внешнего магнитного поля $\mathbf{B}_e$ и всех τ. Полученные зависимости $\Delta(\mathbf{B}_e,\tau)$ являются

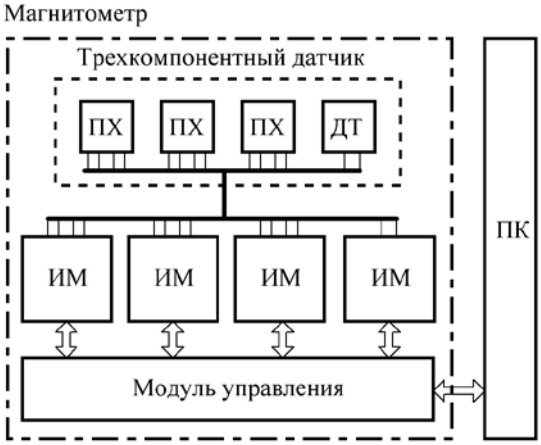
шумоподобными, поэтому целесообразно использовать усреднение по τ и нормирование значений. Относительное среднеквадратичное значение $\Delta(\mathbf{B}_e, \tau)$ вида (13) составило 10^{-2} во всем диапазоне магнитных полей ±100 мкТл. Это позволяет сделать вывод, что соотношения взаимности (7) действительны с точностью выполняемых электрических измерений в нестационарном режиме.

При исследовании переходных процессов в ПХ, выявлена сильная зависимость измеряемых в нестационарном режиме напряжений от температуры окружающей среды вида

$$U_i\ (T) = A_{im}(T)B_m + U_{0i}(T),$$

Здесь $A_{im}(T)$– мультипликативная, а $U_{0i}(T)$ – аддитивная составляющие температурной погрешности ПХ, B_m – параллельная чувствительной оси ПХ компонента измеряемой магнитной индукции. Исследование температурных погрешностей ПХ в постоянных магнитных полях различной величины и температуре в пределах –10 ... +100°С показали, что мультипликативная температурная погрешность ПХ пренебрежимо мала, а линейно зависящая от температуры аддитивная погрешность может быть эффективно скомпенсирована при использовании датчика температуры, размещённого вблизи ПХ. Используемый метод температурной компенсации уменьшает температурный дрейф выходного напряжения ПХ в 25 раз.

На основании полученных результатов исследования переходных процессов и температурных зависимостей ПХ разработан и создан многокомпонентный холловский магнитометр. Конструктивно он выполнен в виде модульной системы и состоит из четырех измерительных модулей, модуля управления и ПК, представлено на рис. 4. Три измерительных модуля используются для измерения магнитного поля, четвёртый для измерения температуры датчика магнитометра в области, где закреплены ПХ. Модуль управления производит обмен данными с ПК и управляет процессом измерения по заданному через ПК алгоритму.



Особенностью разработанного измерительного модуля является его быстродействие и низкий уровень собственного шума используемой элементной базы.

Рисунок 3 – Структурная схема трехкомпонентного магнитометра: ПХ – преобразователь Холла; ИМ – измерительный модуль; ПК – персональный компьютер

Используемые дифференциальные усилители AD8429 имеют приведенный ко входу уровень шума не более 1,2 нВ в полосе 1 герц на частотах от 60 Гц до 100 кГц. При этом возможная полоса частоты дискретизации АЦП составляет от 1 Гц до 256 кГц. Такие характеристики используемых микросхем позволяют исследовать сигналы малых уровней – порядка десятков мкВ, внося минимальные дополнительные погрешности.

Предполагаемый порог чувствительности магнитометра значительно ниже, чем нестабильность магнитного поля Земли. Поскольку магнитное поле Земли однородно в пространстве вдали от ферромагнитных объектов, для определения порога чувствительности магнитометра использовался дифференциальный датчик, состоящий из двух параллельно закреплённых ПХ серии ПХЭ602117А. Вплотную к торцу одного из преобразователей Холла был прикреплен термодатчик для компенсации аддитивной погрешности. Для контроля абсолютного значения магнитного поля использовался ЯМР магнитометр [20]. Порог чувствительности преобразователей оценивался по дисперсии Аллана, нормированной разности показаний двух ПХ в геомагнитном поле. Построенная по этим данным зависимость дисперсии Аллана показаний магнитометра от времени показывает, что при времени измерения 5 секунд порог чувствительности одного датчика составляет порядка 1 нТл, зависимость приведена на рис. 5.

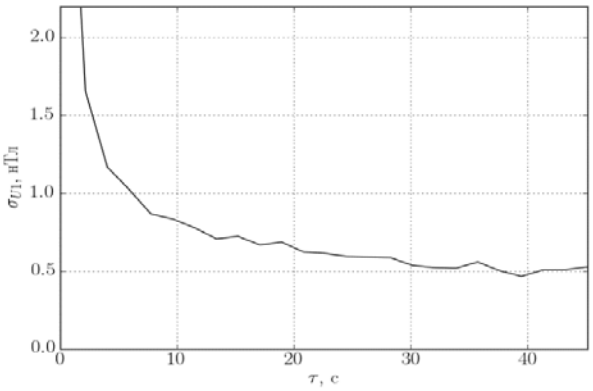


Рисунок 4 – Дисперсия Аллана для показаний одного преобразователя Холла

При калибровке разработанного магнитометра необходимо компенсировать не ортогональность расположения ПХ в трехкомпонентном датчике. Это связано с тем, что фиксация преобразователей в датчике магнитометра имеет погрешности порядка нескольких градусов, что приводит к погрешности измерения порядка 5%. Для устранения этой погрешности разработан алгоритм определения компонент вектора магнитного поля в геоцентрической системе координат (ГЦСК), который использует данные трехкомпонентного акселерометра, жестко закрепленного относительно трехкомпонентного магнитного датчика. Алгоритм состоит из калибровки в видимой системе координат (ВСК) и метода преобразования показаний магнитометра в ГЦСК из ВСК. Калибровка в ВСК состоит из трех этапов. На первом выбирается система координат, связанная с акселерометрами (СКА), и в ней калибруются акселерометры. На втором этапе показания магнитных датчиков переводятся в СКА. На третьем этапе данные измерений преобразуются из СКА в ВСК, образованную

направляющими, являющимися частью конструкции магнитометра. Калибровка позволяет достичь точности измерения компонент вектора геомагнитного поля в ГЦСК с точностью 0,2% в диапазоне ±50 мкТл. Измерения абсолютного значения геомагнитного поля производилось ЯМР магнитометром [20].

В завершении главы сформулированы выводы из проведённых исследований и кратко описаны их результаты. Разработанный метод повышения чуствительности холловского магнитометра применим для измерений в малых магнитных полях ±100 мкТл. Его преимущество – возможность компенсировать погрешности, не устраняемые четырехтактным алгоритмом.

Третья глава посвящена методу оценки распределения намагниченности цилиндрических ферромагнитных объектов, находящихся в слабых магнитных полях. Новизной метода является нахождение распределения усредненной по сечению намагниченности по значениям нормальных компонент магнитного поля рассеяния на поверхности исследуемого цилиндрического образца и аналитически рассчитанных системных функций без решения больших систем уравнений и применения неустойчивых спектральных методов.

Для нахождения намагниченности исследуемого цилиндрического образца решалась обратная задача (2), которая сформулирована в виде уравнений свертки:

$$\begin{gathered}
B_1(z)+B_2(z)+B_3(z)=3\int_0^L M_z(z')K(z-z')dz'=3\int_{-s}^{s} M_z(z-z')K(z')dz',\\
2B_1(z)-B_2(z)-B_3(z)=3\int_0^L M_x(z')P(z-z')dz'=\int_{-p}^{p} M_x(z-z')P(z')dz',\\
B_2(z)-B_3(z)=\sqrt{3}\int_0^L M_y(z')P(z-z')dz'=\sqrt{3}\int_{-p}^{p} M_y(z-z')P(z')dz'.
\end{gathered} \tag{14}$$

Здесь K, P – системные функции намагниченности (3) и (4), причем $K(|z|>k)\approx 0$, $P(|z|>p)\approx 0$. Для определения намагниченности по формулам (14) необходимо использовать комбинации показаний нескольких измерителей. Оптимально-минимальное количество первичных измерителей магнитного поля для исследования цилиндрического образца диаметром, до 4 мм – три. Для этого преобразователи располагаются вокруг исследуемого образца так, чтобы ось чувствительности каждого из них располагалась перпендикулярно оси исследуемого цилиндрического образца.

В ходе анализа были вычислены функции $K(z)$ и $P(z)$ по формулам (3) и (4), полученные графики приведены на рис. 6.

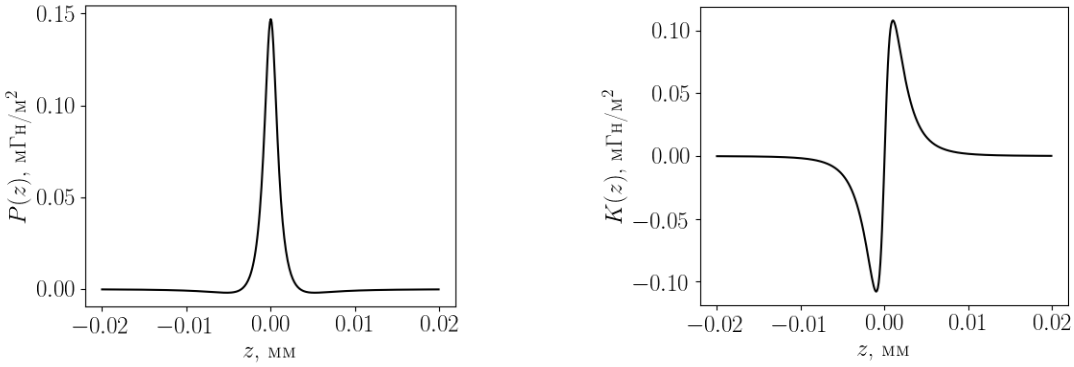


Рисунок 6 – Системные функции $P(z)$ и $K(z)$ (R = 2 мм, h = 3 мм)

Из рис. 6 видно, что системные функции быстро убывают с ростом аргумента, что позволяет полагать их равными нулю, начиная с некоторого значения аргумента. Это позволяет снизить вычислительные затраты при решении обратной задачи восстановления медленно меняющейся намагниченности. Для анализа медленно меняющейся намагниченности, определены условия:

$$\frac{dM_x}{dz} << \frac{M_x}{2p}, \quad \frac{dM_y}{dz} << \frac{M_x}{2p}, \quad \frac{dM_z}{dz} << \frac{M_x}{2k}, \tag{15}$$

При выполнении условия (15) в пределах [$-p$, p] изменением намагниченности можно пренебречь, для второго и третьего уравнения системы (14) получим:

$$M_x(z) = \frac{2B_1(z) - B_2(z) - B_3(z)}{3\int_{-p}^{p} P(z)dz}, \quad M_y(z) = \frac{B_2(z) - B_3(z)}{\sqrt{3}\int_{-p}^{p} P(z)dz}. \tag{16}$$

Так как задача решается для усредненной по сечению намагниченности, удобно представить выражения (16) в следующем виде:

$$M_\perp(z) = \sqrt{M_x^2(z) + M_y^2(z)} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{(B_1(z) - B_2(z))^2 + (B_2(z) - B_3(z))^2 + (B_3(z) - B_1(z))^2}}{9\int_{-p}^{p} P(z)dz} \tag{17}$$

Для первого уравнения системы (14) такой метод не применим, так как функция $K(z)$ является знакопеременной (рис. 6) и $\int_{-k}^{k} S(z)dz = 0$. Поэтому для вычисления компоненты M_z воспользуемся специальным методом и обозначим

$$K(z) = \frac{dW(z)}{dz}, \tag{18}$$

где $W(z)$ – некоторая новая системная функция. Интегрируя первое уравнение системы (14) по частям, получаем:

$$B_1(z) + B_2(z) + B_3(z) = 3\int_{-k}^{k} \frac{dM_z(z-z')}{dz} W(z')dz'. \tag{19}$$

На основании формулы (18) выражение для системной функции $W(z)$ получается подобно соотношениям (3) и (4):

$$W(z) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_0^R \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\rho[\rho\cos(\psi) - h]}{\left[z^2 + h^2 - 2\rho h\cos(\psi) + \rho^2\right]^{3/2}} d\rho d\psi . \tag{20}$$

Функция (20) является четной, интеграл по симметричной области не равен нулю, значит можно применить такой же подход, что и для Мх и M_y. Вид функции $W(z)$ представлен на рис. 7. Считая производную M_z постоянной в пределах $[-k, k]$, получаем:

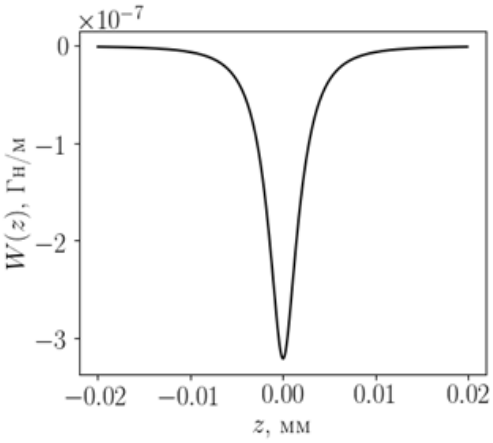


Рисунок 7 – График системной функции $W(z)$ (R = 2 мм, h = 3 мм)

$$\frac{dM_z}{dz} = \frac{B_1(z) + B_2(z) + B_3(z)}{3\int_{-k}^{k} W(z)dz},$$

$$M_z(z) = \frac{\int_0^z \left(B_1(z') + B_2(z') + B_3(z')\right)dz'}{3\int_{-k}^{k} W(z')dz'} + M_{z0}. \tag{21}$$

Здесь $M_{z0} = M_z(0)$ – начальное значение намагниченности, которое определяется отдельно. Уравнение (21) нельзя использовать вблизи края исследуемого объекта, где

намагниченность заведомо терпит разрыв и не выполняется условие медленности изменения намагниченности (15). Для обнаружения края образца разработан алгоритм, позволяющий определить его приблизительное месторасположение. Он основан на том, что до края образца отсутствуют источники магнитного поля. Следовательно, первый максимум должен соответствовать торцу образца.

Разработанный метод применим для вычисления медленно меняющейся внутри образца усредненной по сечению намагниченности, в отличии от методов, основанных на интегральном вычислении намагниченности всего образца в целом. Преимущество по сравнению с маятниковыми методами [11]– возможность измерять не полный магнитный момент образца, а оценивать распределение намагниченности без использования компенсационных соленоидов и внешних постоянных магнитов, которые могут перемагнитить исследуемый образец. В сравнении с индукционными методами [12], разработанный метод позволяет оценивать стационарную намагниченность исследуемого образца. Также разработанный метод не требует применения спектральных методов вычислений, что позволяет избежать необходимости решения больших систем уравнений [21].

Четвертая глава посвящена апробации разработанных методов измерений и оценки на реальных образцах. Описан разработанный метод исследования магнитоупругих эффектов в цилиндрических образцах. Новизна разработанного метода заключается в использовании распределения модуля поперечной компоненты намагниченности, усредненной по сечению исследуемого образца, для эффективной локализации области концентрации напряжений в малых магнитных полях.

Экспериментальная проверка разработанного метода оценки распределения намагниченности была проведена на ферромагнитных стержнях, представляющих собой сварочные электроды из стали марок СВ08Г2С и ER-308LSi диаметром 4 мм. Исследуемые стержни были предварительно разрезаны ножовкой по металлу на образцы длинной 20 ... 22 см для удобства монтирования на предметном столе. Для снятия механических напряжений все исследуемые образцы подвергались отжигу в муфельной печи при температуре 900 °C в течение 30 мин. с последующим медленным остыванием до комнатной температуры. Затем измерялись контрольные магнитограммы исследуемых образцов. Перед регистрацией распределения магнитного поля рассеяния образцов проводилось измерение фоновой магнитограммы, получаемой на алюминиевом образце, которая в дальнейшем вычиталась из обрабатываемых магнитограмм. Исследуемые образцы подвергались различному внешнему воздействию: удары керна, растяжение в нагрузочной машине «Метротест РЭЛ-50-1», кручение. После воздействия измерялась

магнитограмма образца, и из полученных данных находилось распределение модуля поперечной компоненты намагниченности, усредненной по сечению, по формуле (17).

Результаты экспериментов анализировались путём сравнения контрольных магнитограмм и магнитограмм, измеренных после воздействия. Из полученных результатов сделан вывод, что внешнее воздействие на исследуемый образец приводит к изменению распределения его намагниченности, при этом в зонах критического воздействия изменения намагниченности проявляются в виде резких всплесков, что соответствует проявлениям магнитоупругих эффектов Виллари и магнитострикции. Поэтому можно сделать вывод о состоятельности метода оценки распределения намагниченности.

Применимость разработанного метода исследования магнитоупругих эффектов определяется границами применимости используемых методов измерения и оценки. Отличительной особенностью методов является их применение в слабых магнитных полях порядка ±100 мкТл, которые не приводят к намагничиванию исследуемого образца до насыщения. Этот подход позволяет фиксировать зоны напряженно-деформированного состояния исследуемого образца, вызванные неоднородностью его структуры.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования, сделаны выводы по результатам проведённых экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Экспериментально доказано, что переходные процессы в тонкоплёночных ПХ, ограничивающие их быстродействие при высокоточных измерениях, вызваны частью термо-ЭДС, возникающей между пленкой ПХ из антимонида индия и медным проводником, обусловленной теплом Пельтье, выделяющимся между индиевым контактом и пленкой ПХ из антимонида индия.

2. Экспериментально проверены соотношения взаимности для линейной части матрицы нелинейных сопротивлений нестационарного гальваномагнитного элемента, на примере ПХ. Доказано, что они выполняются при любых значениях тока в диапазоне до 100 мА и магнитного поля в диапазоне до ±100 мкТл с погрешностью не более 10–2.

3. Предложен и экспериментально проверен метод достижения порога чувствительности холловских магнитометров 1нТл.

4. Предложен и экспериментально проверен метод оценки распределения намагниченности для цилиндрических ферромагнитных стержней, находящихся в слабом магнитном поле.

Работа выполнялась в рамках гранта РНФ № 15-14-02297 «Разработка методики магнитного структурного анализа и гибридной экспертной системы оперативной технической диагностики металлических изделий в геомагнитном поле» и госзадания Министерства образования и науки РФ №2.852.2017/4.6 «Создание программного обеспечения для моделирования физических сред и природных явлений».

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang, Y., Zhang Y., Ma N., Du P. Control of the nanostructure in percolative multiferroic composites on the dielectric loss and magnetism threshold // Journal of Materials Chemistry C. Volume 3, Issue 35, 31 July 2015, Pages 9076-9088.
2. Van Tol R.T., Zhao L., Sietsma J. Kinetics of austenite decomposition in manganese-based steel // ActaMaterialia. Volume 64, February 2014, Pages 33-40.
3. Foerster M., Macià F. et al. Direct imaging of delayed magneto-dynamic modes induced by surface acoustic waves // Nature Communications. Volume 8, Issue 1, 1 December 2017, Article number 407.
4. Alisultanov Z. Z. Pseudo Landau levels and quantum oscillations in strained Weyl semimetals // Annals of Physics. Volume 392, May 2018, Pages 196-205.
5. Sandim M. J. R. et al. Magnetic characterization of ODS-Eurofer steel: Remanent magnetization and magnetostriction behavior // Fusion Engineering and Design. Volume 126, January 2018, Pages 5-9.
6. Dun, C. et al. Influence of Er^{3+} substitution on the structural, magnetic, and magnetostrictive properties of cobalt ferrite synthesized from spent Li-ion batteries // Ceramics International. Volume 44, Issue 8, 1 June 2018, Pages 9276-9282.
7. Губернаторов В. В., Драгошанский Ю. Н., Сычева Т. С., Ольков С. А. Влияние механических и термических воздействий на доменную структуру и магнитострикцию магнитомягких сплавов на основе железа // Физика металлов и металловедение. 2012. Т. 113. № 9.888-893с.
8 .Devonport, A. et al. Magnetic properties of chromium-doped $Ni_{80}Fe_{20}$ thin films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 460, 15 August 2018, Pages 193-202.
9. Agarwal S., Shakher C. Effect of magnetic field on temperature profile and flame flow characteristics of micro flame using Talbot interferometer // Optik. Volume 168, September 2018, Pages 817-826.
10. Nakamura, Y. et al. Sensitivity improvement of sample rotation measurement method in HTS-SQUID magnetometer for diamagnetic materials // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Volume 28, Issue 4, June 2018.
11. Lu, Y., Li, L., Hu, N., Pan, Y., Ren, C. Measurement method of magnetic field for the wire suspended Micro-Pendulum accelerometer // Sensors (Switzerland). Volume 15, Issue 4, 13 April 2015, Pages 8527-8539.
12. Stashkov, A.N., Kuleev, V.G., Shchapova, E.A., Nichipuruk, A.P. Studying Field Dependence of Reversible Magnetic Permeability in Plastically Deformed Low-Carbon Steels // Russian Journal of Nondestructive Testing. Volume 54, Issue 12, 1 December 2018, Pages 855-860.
13.ТихоновА.Н., ГончарскийА.В., СтепановВ.В., ЯголаА.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 232 с.
14. Zheng J. et al. Magnetic and levitation characteristics of bulk high-temperature superconducting magnets above a permanent magnet guideway // Superconductor Science and Technology. Volume 29, Issue 9, 22 July 2016, Article number 095009.
15. Żuberek R., et al. Magnetocaloric effect and magnetoelastic properties of NiMnGa and NiMnSnHeusler alloy thin films // Journal of Alloys and Compounds. Volume 748, 5 June 2018, Pages 1-5.
16. Skalskyi V., Stankevych O., Dubytskyi O. Estimation of effect of hydrogen on the parameters of magnetoacoustic emission signals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 454, 15 May 2018, Pages 375-385.
17.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.
18. Игнатьев В.К. Способ уменьшения погрешностей холловского магнитометра. Патент РФ №2311655. 2007. 5 с.

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, 75-80.
20.Nevsorov, A., Orlov, A. Geomagnetic field fast-change measurements by proton precession magnetometer // 16 International multidisciplinary scientific geoconference, Volume 3, Pages 499-504, Doi: 10.5593/SGEM2016/B13/S05.063
21. Печенков А.Н., Щербинин В.Е. Некоторые прямые и обратные задачи технической магнитостатики // Екатеринбург: УрО РАН, 2004. ISBN 5 – 7691 – 1470 – 3.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, включенных в перечень ВАК РФ.

1. **Бардин А. А.**, Перченко С. В. Холловский градиометр // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс] 2014. режим доступа: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2693.
2. **Бардин А. А.**, Игнатьев В. К., Орлов А. А., Перченко С. В., Станкевич Д. А. Магнитная экспресс диагностика микроструктуры инженерных конструкций // Технологии техносферной безопасности - 2015. С.1-8.

Публикации включенных в базы цитирования SCOPUS и Web of Science

3. **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, C. 276-282 (Q1), Doi:10.1016/j.jmmm.2017.05.079.
4. **Bardin, A**., Ignatjev, V., Orlov, A., Perchenko, S. Verifying of reciprocal relations for nonlinear quadripole in unsteady mode // Results in Physics vol. 7, 2017, C. 665-666, Doi:10.1016/j.rinp.2017.01.029.
5. **Bardin, A.,** Ignatjev, V., Orlov, A., Perchenko, S. Voltage transients in thin-film InSb Hall sensor // Results in Physics vol. 7, 2017, C. 3344-3345, Doi:10.1016/j.rinp.2017.08.050.
6. Nevzorov A.A., OrlovA.A., IgnatjevV.K., **Bardin A.A.** Calibration algorithm of Hall magnetometer in visible coordinate system // Measurement, 2018, (Q1), DOI:10.1016/j.measurement.2018.11.065.

Свидетельства о регистрации интеллектуальной собственности

7. Бардин А. А., Игнатьев В. К. Устройство для калибровки трёхкомпонентного магнитометра. Патент РФ№ 138023, 2013 г.
8. Бардин А. А., Орлов А. А. Программа для определения калибровочных коэффициентов первичных преобразователей многокомпонентного мобильного магнитного сканера. Свидетельство на программу ЭВМ № 2016660782. 2016.

Материалы конференций

9. **Бардин А. А.** Холловский градиометр // XIX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. 2014 г, Волгоград: Изд-во ВолГТУ. С. 222-223.
10. **Бардин А. А.**, Игнатьев В. К. Алгоритм ориентации по физическим полям Земли // Фундаментальные и прикладные науки сегодня. Материалы VI международной научно-практической конференции. North Charleston. USA - 2015 г. С. 219-221
11. **Bardin A. A.**, Igntjev V. K., Orlov A. A. Hall magnetic scanner // 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM vol. 17(14), C. 165-172, Doi:10.5593/sgem2017/14.
12. **Bardin A. A.**, Igntjev V. K., Nevsorov A. A., Orlov A. A. Maping of geomagnetic vector to global coordinate system // 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM vol. 17(14), C. 237-243, Doi:10.5593/sgem2017/14.