

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

На правах рукописи



Бардин Алексей Алексеевич

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕДЛЕННО МЕНЯЮЩЕЙСЯ
НАМАГНИЧЕННОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ,
НАХОДЯЩИХСЯ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ, ХОЛЛОВСКИМ
МАГНИТОМЕТРОМ

Специальность: 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ВОЛГОГРАД – 2021

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ИГНАТЬЕВ – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный университет», кафедра радиофизики.
Вячеслав Константинович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПАНИНА – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра технологии материалов электроники.
Лариса Владимировна

КАРПЕНКОВ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физический факультет, отделение физики твердого тела, кафедра магнетизма.
Дмитрий Юрьевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: – Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», г. Санкт – Петербург.

Защита состоится «19» октября 2021 года в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и на сайте https://inp.nsk.su/images/Bardin_disser.pdf

Автореферат разослан «11» августа 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.



П.А. Багрянский

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы. Методы современной экспериментальной физики в области физики твёрдого тела, биофизики, акустооптики включают в себя вычисления намагниченности, основанные на покомпонентных измерениях магнитного поля. Оценивание 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]. Часто измерения намагниченности являются не целью эксперимента, а его вспомогательным параметром. Например, в исследованиях конструкционных сталей измерение остаточной намагниченности является важной задачей, так как от её величины зависит эксплуатационный ресурс изготовленных деталей. В оптике измерение намагниченности необходимо при исследовании процессов сверхбыстрой магнитной записи, возбуждения спиновой прецессии в гетероструктурах ферромагнетиков, управления поляризацией излучения. В биофизике измерение магнитного момента используется для определения остаточной намагниченности наноструктур, используемых для магнитной томографии. Актуальность изучения намагниченности тонких цилиндрических образцов подтверждается работами по анализу терромагнитных свойств аморфных микропроводов и построению сенсоров на их основе, а также исследованиями тонкопленочных многослойных систем и наноструктурированных ферромагнетиков. Примером практического применения могут послужить исследования стержней, канатов, трубопроводов на стадии производства для выявления напряжённо-деформированных участков. Из проведённого обзора можно сделать вывод, что заявленная тема диссертационного исследования является актуальной и требует дополнительного изучения.

Целью работы является разработка метода оценивания распределения медленно меняющейся намагниченности в цилиндрических ферромагнитных образцах, находящихся в слабых магнитных полях, по измеренному распределению нормальных компонент магнитного поля на их поверхности холловским магнитометром.

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

1. Разработать метод нахождения вектора усреднённой по сечению медленно меняющейся намагниченности протяжённого цилиндрического объекта, находящегося в слабом нестационарном неоднородном магнитном поле, на основе измерений, нормальных к его поверхности компонент магнитного поля.
2. Исследовать явления, определяющие точность и быстродействие измерений компонент вектора магнитного поля холловским магнитометром.

3. Разработать метод повышения точности и быстродействия измерений холловского магнитометра на основе проведённых исследований переходных процессов в преобразователях Холла.
4. Разработать методику проверки достоверности метода оценивания распределения медленно меняющейся намагниченности в цилиндрическом ферромагнетике, находящемся в слабом нестационарном неоднородном магнитном поле.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Разработан метод решения обратной задачи нахождения вектора усреднённой по сечению медленно меняющейся намагниченности цилиндрического образца длиной, как минимум в три раза превышающей ширину его системной функции намагниченности, по распределению нормальных к его поверхности компонент магнитного поля.
2. Переходные процессы в тонкоплёночных преобразователях Холла, возникающие в процессе измерения четырёхтактным алгоритмом, ограничивают быстродействие и точность. Они обусловлены разницей температур порядка $0,5\text{ }^{\circ}\text{K}$, возникающей между измерительными контактами ПХ, линейно зависящей от величины протекающего тока через датчик в диапазоне до 100 мА .
3. 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 $\pm 100\text{ мкТл}$ с погрешностью не более 10^{-2} при нелинейности вольт-амперной характеристики исследуемого ПХ серии ПХЭ602117А порядка $0,2\text{ мВ/мТл}$.
4. Разработан метод достижения порога чувствительности холловских магнитометров порядка 1 нТл , основанный на линейной добавке показаний температурного датчика к измеряемому в четырёхтактном алгоритме напряжению Холла. Он позволяет уменьшить температурную зависимость систематической составляющей температурной погрешности измерений напряжения Холла в диапазоне температур от $10 \dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до уровня $0,3\text{ мкВ/К}$.

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 и подготовке экспериментов принимали участие сотрудники научной лаборатории дистанционных методов зондирования и диагностики Волгоградского государственного университета.

Научная новизна результатов и выводов диссертационной работы:

1. Предложен и экспериментально исследован новый метод оценивания распределения медленно меняющейся намагниченности по распределению нормальных к поверхности исследуемого образца компонент магнитного поля.
2. Впервые исследовано влияние переходных процессов в тонкоплёночных гальваномагнитных элементах на точность и быстродействие измерений магнитного поля.
3. Впервые экспериментально проверены соотношения взаимности для нелинейного нестационарного гальваномагнитного элемента в неоднородном магнитном поле.
4. Предложен и экспериментально исследован новый метод обработки сигнала преобразователя Холла для повышения точности измерений магнитного поля.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработанный метод оценивания распределения медленно меняющейся намагниченности возможно применить для детектирования напряжённо-деформированных участков протяжённых цилиндрических ферромагнитных объектов без явных визуально фиксируемых признаков механического воздействия.
2. Разработанный метод повышения точности и быстродействия измерений холловского магнитометра может использоваться для измерений вектора магнитного поля в режиме реального времени.
3. Разработанная методика исследования магнитоупругих эффектов может применяться для измерения параметров магнитного поля в задачах магнитоструктурного анализа и магнитоакустики.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях: XIX Региональной конференции молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 2014 г.), SGEM (Болгария Варна, 2017 г.).

Публикации и апробация работы. Результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, 1 свидетельстве на программу ЭВМ, 1 патенте на полезную модель. Из них: три 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 – 112 страницы, включая 50 рисунков. Список литературы состоит из 93 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования. Указаны основные положения и результаты диссертационного исследования,

выносимые на защиту. Определена научная новизна результатов и выводов, их практическая значимость. Описана структура, краткое содержание глав и объём 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. Основным недостатком рассмотренных методов является измерение магнитного момента, а не распределения намагниченности в образце. Необходимость измерения распределения намагниченности обусловлена её высокой неоднородностью, возникающей на участках исследуемых образцов, подвергшихся внешнему воздействию, которое изменило их микроструктуру.

Вычисление распределения намагниченности в твёрдом теле по измеренному распределению магнитного поля вне его является обратной задачей, в общем случае некорректной. Для её решения используются методы регуляризации [4], предполагающие применение априорной информации и значительную избыточность данных. Существенной проблемой в измерениях распределения магнитного поля является одновременное обеспечение точности, быстродействия, чувствительности и высокой разрешающей способности преобразователя магнитного поля. Примерами датчиков, позволяющих производить такие измерения, являются феррозонды, магниторезисторы, преобразователи Холла (далее – ПХ). Наиболее подходящими датчиками являются ПХ, так как они обладают чувствительностью к проекции вектора индукции магнитного поля, не оказывают значительного воздействия друг на друга, обладают чувствительной зоной порядка 10^{-6} мм³, нелинейность по магнитному полю не превышает 0,2 мВ/мТл, обладают широким динамическим диапазоном измерения от 10^{-6} – 1 Тл. Такие характеристики позволяют разрабатывать векторные датчики магнитного поля, обеспечивающие высокое пространственное разрешение и компактность, что позволяет расширить спектр задач, в которых применение ПХ в качестве измерителя магнитных величин является единственно возможным.

Применение ПХ для измерения магнитных величин в стационарных условиях является относительно простой задачей, но в большинстве прикладных случаев условия измерения нестационарные. Этот факт приводит к необходимости получения максимально возможного объёма экспериментальных данных за ограниченный интервал времени. Примером области применения измерителей магнитных величин в нестационарных условиях является анализ напряжённо-деформированных участков стальных канатов, стержней, трубопроводов как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации.

Современные системы сбора данных позволяют производить обработку измеряемых сигналов с частотой порядка десятков ГГц. Особенности способа измерения магнитного поля ПХ накладывают на длительность одного цикла

измерения физические ограничения, связанные с частотой коммутации тока, протекающего через него [5]. В режиме коммутации тока измеренные значения магнитного поля обладают погрешностью, сопоставимой со значениями геомагнитного поля [6], что делает полученные измерения малоинформативными при анализе параметров магнитного поля. Однако современные исследования позволяют предположить, что применение методов параметрического анализа к способу измерения и обработки сигнала ПХ повысит скорость измерений и точность оценивания параметров нестационарного неоднородного магнитного поля, что является актуальной задачей экспериментальной физики.

Рассмотрен метод вычисления медленно меняющейся намагниченности цилиндрического образца, основанный на методике, описанной в работе [7]. Методика основана на решении уравнения магнитостатики:

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

которое рассматривается как обратная задача для нахождения распределения намагниченности. Здесь \mathbf{M} – усреднённая 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:

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

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

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

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

Основным критерием для решения обратных задач вида (2) является необходимость высокой точности измерений и избыточность данных [4]. В завершение главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе описан разработанный метод оценивания распределения медленно меняющейся намагниченности протяжённых цилиндрических ферромагнитных объектов по измеренному распределению нормальных компонент магнитного поля на их поверхности.

При разработке метода введены следующие ограничения применимости:

- метод основан на измерении нормальных к поверхности исследуемого образца компонент индукции магнитного поля;
- предельно достижимое пространственное разрешение оцениваемой намагниченности определяется радиусом исследуемого образца и

расстоянием чувствительной зоны датчиков до поверхности образца, которое не должно превышать половины его радиуса;

- количество измерителей должно быть не менее трёх;
- должны использоваться преобразователи с шириной аппаратной функции (активной зоны) не более 0,1 от ширины системных функций намагниченности образца $K(z)$, $P(z)$ и $W(z)$;
- длина образца должна как минимум в три раза превышать ширину системных функций намагниченности;
- исследуемый образец должен быть магнитомягким ферромагнетиком.

Особенностями разработанного метода являются:

- возможность измерять не полный магнитный момент образца, а оценивать распределение намагниченности без использования компенсационных соленоидов и внешних постоянных магнитов;
- отсутствие необходимости применения спектральных методов вычислений и решений больших систем уравнений;
- пассивность, так как метод не требует намагничивания образца.

Для пояснения метода рассмотрена цилиндрическая геометрия магнитостатической задачи, представленная на (рис. 1). Такое представление сформировано из ограничения класса анализируемых образцов разработанным методом.

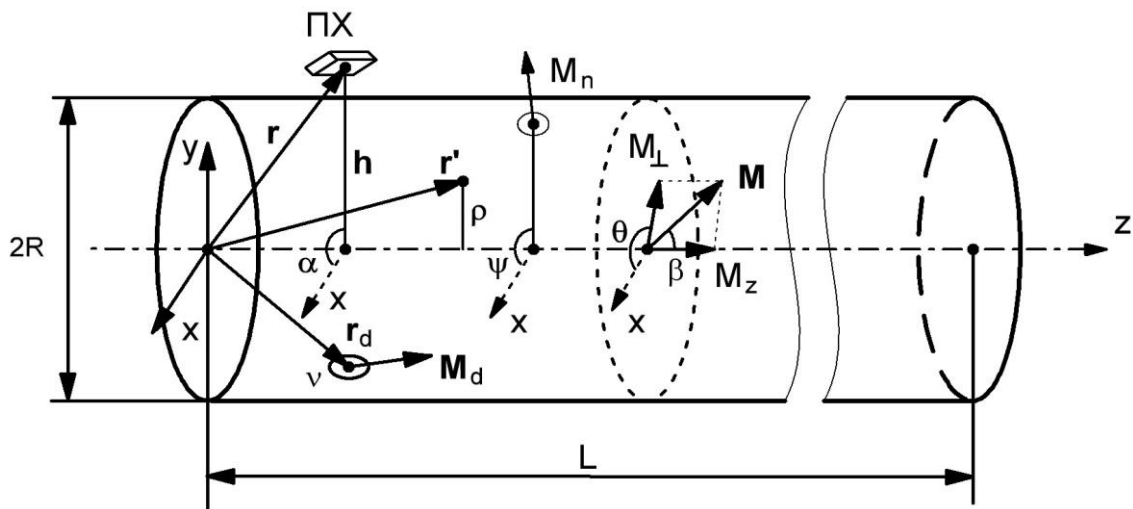


Рисунок 1 – Геометрия магнитостатической задачи

В однородном цилиндрическом стержне, намагниченность $M_0(z')$ которого постоянна по сечению и меняется только вдоль продольной координаты z , в точке \mathbf{r}_d имеется неоднородность материала, искажающая намагниченность в малой области v , ограниченной поверхностью s . Поле, создаваемое неоднородностью, – $\mathbf{M}_d(\mathbf{r}')$. Учтена и случайная составляющая намагниченности $\mathbf{M}_n(\mathbf{r}')$, создаваемая локализованными магнитными моментами. С учётом сделанных допущений можем предположить, что намагниченность имеет вид:

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}') = \mathbf{M}_0(z') + \mathbf{M}_d(\mathbf{r}') + \mathbf{M}_n(\mathbf{r}'), \quad (5)$$

причём как на поверхности s , так и всюду при $\mathbf{r}' \notin v$ $\mathbf{M}_d(\mathbf{r}') \equiv 0$. Тогда магнитный потенциал φ можно представить как сумму потенциалов φ_0 , φ_d и φ_n , создаваемых намагниченностями \mathbf{M}_0 , \mathbf{M}_d и \mathbf{M}_n , соответственно.

Здесь $M_z = M_0 \cos(\beta)$, $M_{\perp} = M_0 \sin(\beta)$, $M_x = M_{\perp} \cos(\theta)$, $M_y = M_{\perp} \sin(\theta)$. Точка \mathbf{r} , в которой производятся измерения поля, характеризуется цилиндрическими координатами (z, h, α) . Так как составляющие намагниченности формулы (5) дают независимый вклад в измеряемое поле, то решается прямая задача нахождения поля для каждой составляющей намагниченности отдельно.

Для нахождения магнитного поля, создаваемого намагниченностью \mathbf{M}_0 , используется представление магнитного поля через потенциал φ_0 :

$$\mathbf{H}_0(\mathbf{r}) = -\nabla \varphi_0(\mathbf{r}).$$

В ходе ряда преобразований получают выражения (1–4), описанные в работе [7]. Для получения информации из формулы (2) необходимо использовать измерители магнитного поля, расположенные максимально близко к поверхности образца и на фиксированном угле относительно оси симметрии исследуемого образца. Для этого можно использовать комбинации показаний нескольких измерителей. Пример схемы с тремя и четырьмя равномерно расположенными по радиусу исследуемого образца измерителями магнитного поля представлен на (рис. 2).

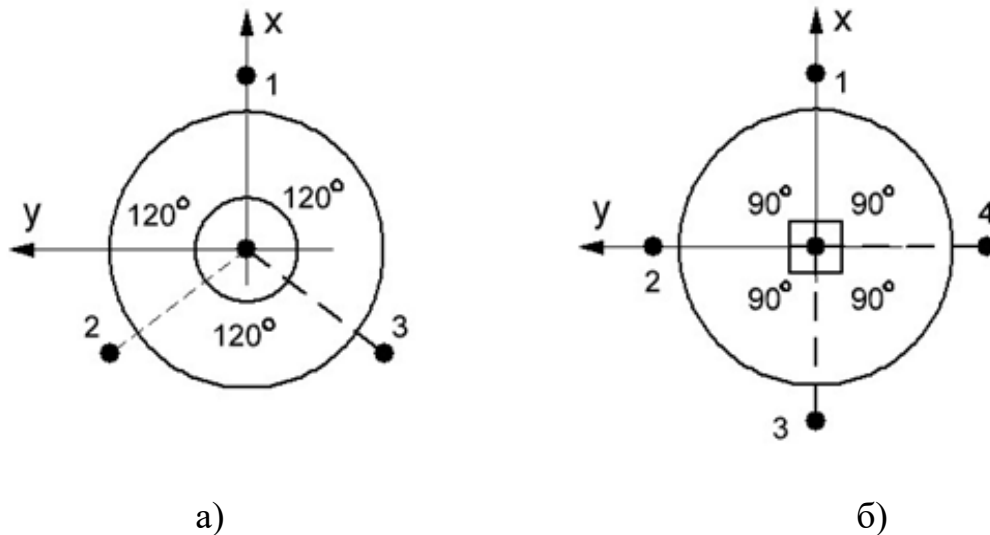


Рисунок 2 – Расположение измерителей магнитного поля:
а) схема для трёх датчиков; б) схема для четырёх датчиков

Для решения обратной задачи нахождения намагниченности однородного цилиндрического образца по измеренным на его поверхности нормальным значениям магнитного поля в точках 1, 2, 3 и 4 получены уравнения типа свёртки (6–7) для трёх и четырёх измерителей соответственно. Уравнения свёртки для системы из трёх измерителей:

$$\begin{aligned}
H_1(z) + H_2(z) + H_3(z) &= 3 \int_0^L M_z(z') K(z - z') dz', \\
2H_1(z) - H_2(z) - H_3(z) &= 3 \int_0^L M_x(z') P(z - z') dz', \tag{6}
\end{aligned}$$

$$H_2(z) - H_3(z) = \sqrt{3} \int_0^L M_y(z') P(z - z') dz'.$$

Уравнения свёртки для системы из четырёх измерителей:

$$\begin{aligned}
H_1(z) + H_2(z) + H_3(z) + H_4(z) &= 4 \int_0^L M_z(z') K(z - z') dz', \\
H_1(z) - H_3(z) &= 2 \int_0^L M_x(z') P(z - z') dz', \tag{7} \\
H_2(z) - H_4(z) &= 2 \int_0^L M_y(z') P(z - z') dz'.
\end{aligned}$$

При сравнении уравнений (6) и (7) видно, что данные четвёртого измерителя являются избыточными для нахождения вектора намагниченности образца. Два измерителя магнитного поля не позволяют разделить намагниченности и получить решения (6) и (7). Таким образом, схема с тремя измерителями является оптимальной для вычисления медленно меняющейся намагниченности.

Переписав уравнения (6) для индукции магнитного поля \mathbf{B} , получим уравнения вида:

$$\begin{aligned}
B_1(z) + B_2(z) + B_3(z) &= 3 \int_0^L M_z(z') K(z - z') dz' = 3 \int_{-s}^s M_z(z - z') K(z') dz', \\
2B_1(z) - B_2(z) - B_3(z) &= 3 \int_0^L M_x(z') P(z - z') dz' = \int_{-p}^p M_x(z - z') P(z') dz', \tag{8} \\
B_2(z) - B_3(z) &= \sqrt{3} \int_0^L M_y(z') P(z - z') dz' = \sqrt{3} \int_{-p}^p M_y(z - z') P(z') dz'.
\end{aligned}$$

Здесь K, P – системные функции намагниченности (3) и (4), причём $K(|z| > k) \approx 0$, $P(|z| > p) \approx 0$. Анализируя выражения (8) покомпонентно, их решения могут быть получены с помощью преобразования Фурье и перехода от свёртки функций к произведению их спектров. В этом случае необходимо отсутствие нулей спектра у системных функций $K(z)$ и $P(z)$. В ходе анализа были вычислены функции $K(z)$ и $P(z)$ по формулам (3) и (4) соответственно для практически обоснованных параметров геометрии (рис. 3).

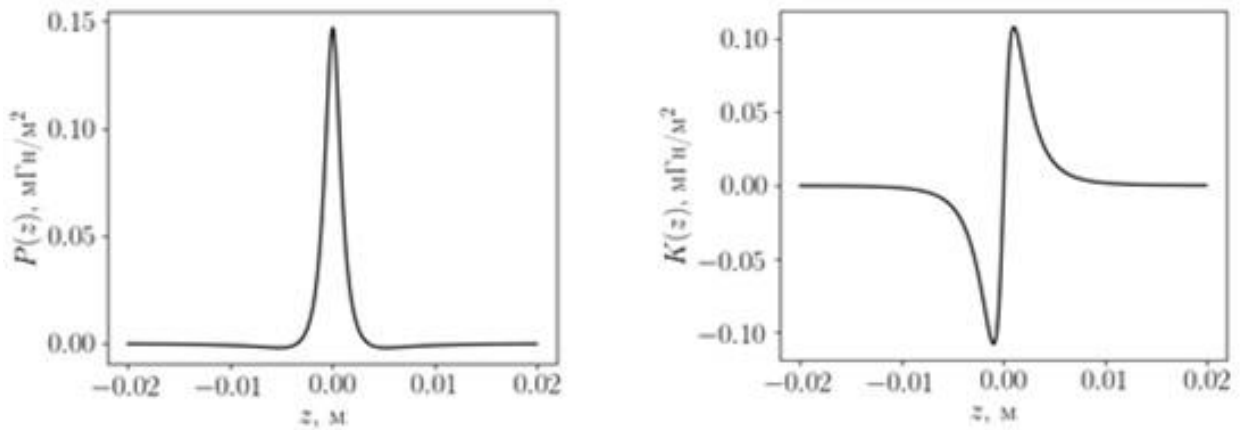


Рисунок 3 – Системные функции $P(z)$ и $K(z)$ для цилиндра с радиусом $R = 2$ мм и расстоянием от оси симметрии цилиндра до чувствительной зоны датчика $h = 3$ мм

Из рис. 3 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 вычисления медленно меняющейся намагниченности. Для её анализа определены условия:

$$\frac{dM_x}{dz} \ll \frac{M_x}{2p}, \quad \frac{dM_y}{dz} \ll \frac{M_x}{2p}, \quad \frac{dM_z}{dz} \ll \frac{M_x}{2k}. \quad (9)$$

При выполнении условия (9) в пределах $[-p, p]$ изменением намагниченности можно пренебречь, для второго и третьего уравнения системы (8) получим:

$$M_x(z) = \frac{2B_1(z) - B_2(z) - B_3(z)}{3 \int_{-p}^p P(z) dz}, \quad M_y(z) = \frac{B_2(z) - B_3(z)}{\sqrt{3} \int_{-p}^p P(z) dz}. \quad (10)$$

Так как задача решается для усреднённой по сечению намагниченности, удобно представить выражения (10) в следующем виде:

$$M_{\perp}(z) = \sqrt{M_x^2(z) + M_y^2(z)} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{(B_1(z) - B_2(z))^2 + (B_2(z) - B_3(z))^2 + (B_3(z) - B_1(z))^2}}{9 \int_{-p}^p P(z) dz} \quad (11)$$

Так же вычислялась компонента $M_z(z)$, но по результатам исследования был сделан вывод, что она менее информативна, чем $M_{\perp}(z)$. В завершение главы сформулированы результаты и выводы из проведённых исследований. **Третья глава** посвящена описанию метода, позволяющего преодолеть ограничения точности и быстродействия ПХ для последующего их применения в качестве измерителей компонент индукции магнитного поля с точностью и быстродействием, достаточным для решения обратной задачи

вычисления усреднённой по сечению медленно меняющейся намагниченности.

Ограничениями разработанного метода являются следующие факторы:

- собственные шумы предусилителя измерительного тракта не должны превышать $1,2 \text{ нВ} \sqrt{\text{Герц}}$ на частотах от 60 Гц до 100 кГц;
- частота измерения напряжения Холла должна быть не менее 10 кГц;
- скорость изменения поля не должна превышать 1 нТл/мин;
- скорость измерения температуры окружающей среды должна быть не быстрее $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$;
- систематическая составляющая температурной погрешности измерения напряжения Холла в диапазоне температур от 10 ... 100 $^\circ\text{C}$ не должна превышать уровня 0,3 мкВ/К.

Для проведения исследования использовался четырёхтактный алгоритм измерения ПХ [10], являющийся частным случаем применения соотношений взаимности, выполняющихся для линейного преобразователя. В ходе исследования в каждом такте измерения были обнаружены переходные процессы вида (рис. 4).

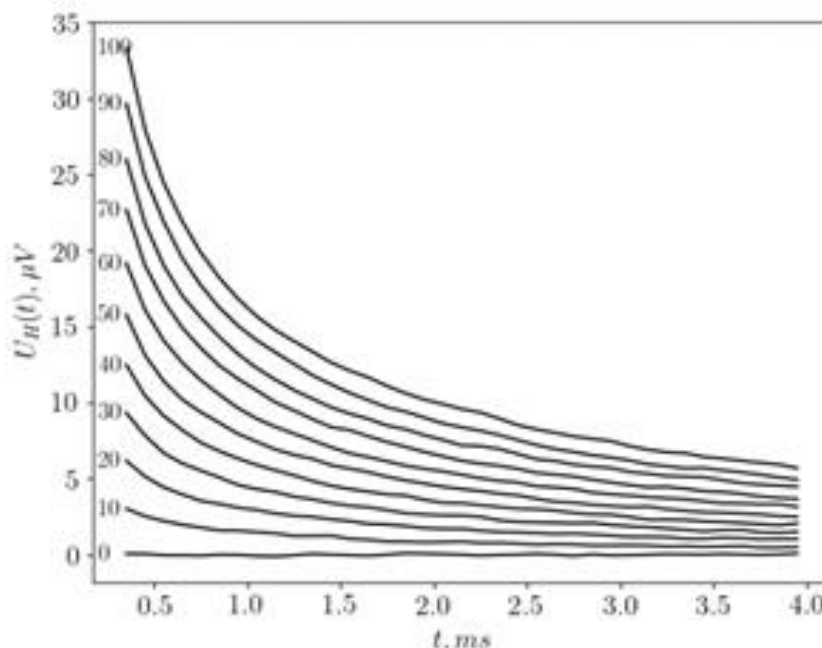


Рисунок 4 – Переходной процесс напряжения Холла. Цифрами около кривых показан ток в мА

На основе этого было предположено, что высокочувствительный ПХ используется в существенно нелинейном режиме. Для улучшения компенсации его погрешностей необходима проверка выполнения соотношений взаимности для нестационарного нелинейного многополюсника. Их проверка основана на методике, используемой для стационарного случая, описанной в работе [9]. В рассмотренной работе проверяются свойства симметрии матрицы $\hat{\mathbf{R}}$ сопротивлений нелинейного нестационарного многополюсника, определяемой как:

$$\varphi_k = \sum_{m=1}^M R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t) I_m, \quad (12)$$

где t – время, k и m – 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:

$$R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t) = R_{mk}(-\mathbf{I}, -\mathbf{B}_e, t), \quad (13)$$

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

$$R_{km}(\mathbf{I}, \mathbf{B}_e, t) = R_{km}^A(t) + R_{km}^H(\mathbf{B}_e, t) + R_{km}^{NL}(\mathbf{I}, t), \quad (14)$$

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.

Из соотношений (13) и (14) авторы получают экспериментально проверяемые соотношения взаимности:

$$R_{km}^A = R_{mk}^A, \quad R_{km}^H(\mathbf{B}_e, t) = R_{mk}^H(-\mathbf{B}_e, t) = -R_{mk}^H(\mathbf{B}_e, t). \quad (15)$$

В идеализированном случае в соотношениях (15) 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 отсчётов 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:

$$u_3(i, \mathbf{B}_e, \tau) = (u_1(i, \mathbf{B}_e, \tau) - u_1(-i, \mathbf{B}_e, \tau)) / 2, \quad (16)$$

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

Из формул (12) и (16) можно получить нелинейные функции с размерностью сопротивления:

$$R_1(i, \mathbf{B}_e, \tau) = \frac{u_3(i, \mathbf{B}_e, \tau)}{i} = R_{21}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{23}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{41}(i, \mathbf{B}_e, \tau) + R_{43}(i, \mathbf{B}_e, \tau), \quad (17)$$

$$R_2(i, \mathbf{B}_e, \tau) = \frac{u_4(i, \mathbf{B}_e, \tau)}{i} = R_{12}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{14}(i, \mathbf{B}_e, \tau) - R_{32}(i, \mathbf{B}_e, \tau) + R_{34}(i, \mathbf{B}_e, \tau).$$

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

$$\tilde{y}_3(i, \mathbf{V}_e, \tau) = a_0(\mathbf{V}_e, \tau) + a_1(\mathbf{V}_e, \tau)i + a_2(\mathbf{V}_e, \tau)i^2 + \dots, \quad (18)$$

$$\tilde{y}_4(i, \mathbf{V}_e, \tau) = b_0(\mathbf{V}_e, \tau) + b_1(\mathbf{V}_e, \tau)i + b_2(\mathbf{V}_e, \tau)i^2 + \dots$$

В этих выражениях коэффициенты $a_0(\mathbf{V}_e, \tau)$ и $b_0(\mathbf{V}_e, \tau)$ определяют остаточную систематическую погрешность измерений, которая обусловлена дрейфом смещения измерительных приборов. Коэффициенты $a_1(\mathbf{V}_e, \tau)$ и $b_1(\mathbf{V}_e, \tau)$ описывают сопротивление асимметрии четырёхполюсника и эффект Холла. Проверяемые соотношения взаимности связаны с линейной частью многочлена (18) и имеют вид:

$$a_1(\mathbf{V}_e, \tau) = b_1(-\mathbf{V}_e, \tau). \quad (19)$$

Эксперименты осуществлялись на аппаратно-программном комплексе для измерения переходных процессов в ПХ. Проводились измерения напряжений $u_k(\tau)$, где $k = 1, \dots, 4$, вычислялись коэффициенты $a_1(\mathbf{V}_e, \tau)$ и $b_1(\mathbf{V}_e, \tau)$ из формулы (22) и находилась величина:

$$\Delta(\mathbf{V}_e, \tau) = a_1(\mathbf{V}_e, \tau) - b_1(-\mathbf{V}_e, \tau). \quad (20)$$

Если соотношения взаимности (19) справедливы, то $\Delta(\mathbf{V}_e, \tau) = 0$ для всех значений внешнего магнитного поля \mathbf{V}_e и всех τ . Полученные зависимости $\Delta(\mathbf{V}_e, \tau)$ являются шумоподобными, поэтому использовалось усреднение по τ и нормирование значений. Относительное среднеквадратичное значение $\Delta(\mathbf{V}_e, \tau)$ вида (20) составило 1% во всем диапазоне магнитных полей ± 100 мкТл. Это позволяет сделать вывод, что соотношения взаимности (15) действительны с точностью выполняемых электрических измерений в нестационарном режиме.

Далее исследовались причины ограничения порога чувствительности ПХ и разрабатывался метод его увеличения до 1 нТл. Новизной предлагаемого метода является использование ПХ в нелинейном режиме с применением алгоритмов обработки его сигнала, исключая систематическую составляющую температурной погрешности.

Для исследования переходных процессов, проявляющихся в ПХ во время измерения, спроектирована и создана экспериментальная установка, позволяющая компенсировать магнитное поле Земли, устанавливая в области размещения ПХ однородное магнитное поле заданной величины, коммутировать по заданному алгоритму контакты ПХ и производить необходимые измерения с последующей обработкой данных на персональном компьютере (ПК) показана на (рис. 5).

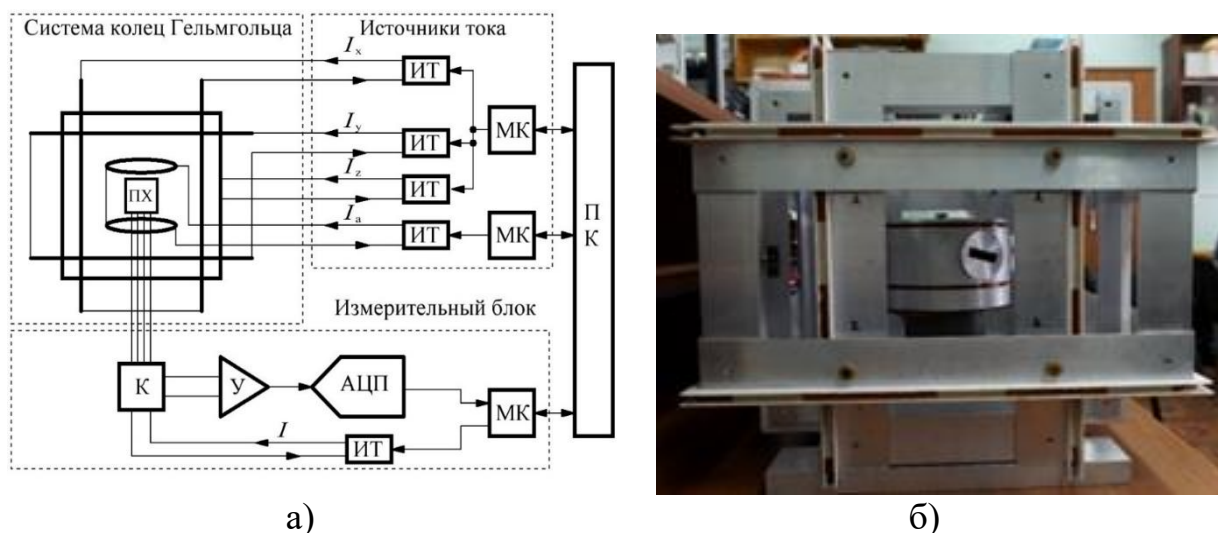


Рисунок 5 – Установка для исследования магнитоактивных четырёхполюсников в заданном магнитном поле: а) схема установки; б) фото компенсационных и задающих катушек

Для проведения экспериментов использовались ПХ серии ПХЭ602117А. Для проверки отсутствия коммутационных помех установки проводились испытания на резистивном эквиваленте ПХ. Результаты испытаний показали, что переходные процессы отсутствуют, и это позволяет судить о достоверной работе электроники.

Для проведения экспериментов было необходимо контролировать изменение температуры контактов ПХ, поэтому они были модифицированы. Каждая из четырёх контактных площадок была оснащена медно-константановой термопарой, второй спай которой размещался на алюминиевой контактной панели через тонкий изолирующий слой (рис. 6).

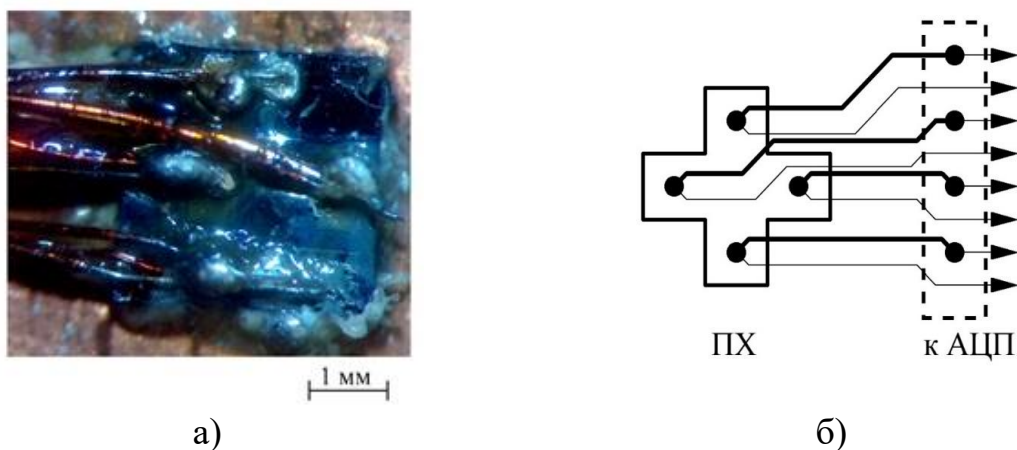


Рисунок 6 – Модифицированный преобразователь Холла: а) фотография преобразователя с термопарами, б) подключение термопар, толстая линия – константановый провод, тонкая линия – медный провод

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 [10]. При его реализации анализировалась динамика измеренных напряжений и разность 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. Сделано предположение, что 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 тонкопленочных преобразователях Холла, ограничивающие их быстродействие при высокоточных измерениях, обусловлены термо-ЭДС, возникающей между пленкой ПХ из антимонида индия и медным проводником и обусловленной теплом Пельтье, выделяющимся между индиевым контактом и пленкой ПХ из антимонида индия.

В ходе исследования переходных процессов в ПХ выявлена сильная зависимость измеряемых в нестационарном режиме напряжений от температуры окружающей среды вида:

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

где $A_{im}(T)$ – 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 при 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. Особенностью его измерительного модуля является быстродействие и низкий уровень

собственного шума используемой элементной базы. Используемые дифференциальные усилители AD8429 имеют приведённый ко входу уровень шума не более $1,2 \text{ нВ } \sqrt{\text{Герц}}$ 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.

Для подтверждения порога чувствительности 1 нТл использовался дифференциальный датчик, расположенный для измерения в однородном магнитном поле Земли на значительном удалении от ферромагнитных объектов и линий электропередачи. Датчик состоит из двух параллельно закреплённых на дюралюминиевой основе, являющейся теплоотводом, ПХ серии ПХЭ602117А. Вплотную к торцу подложки одного из ПХ закреплён термодатчик для измерения изменений температуры, на основе которых будет проведена компенсация аддитивной погрешности ПХ. Для контроля абсолютного значения магнитного поля использовался ЯМР-магнитометр [11]. 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. 7).

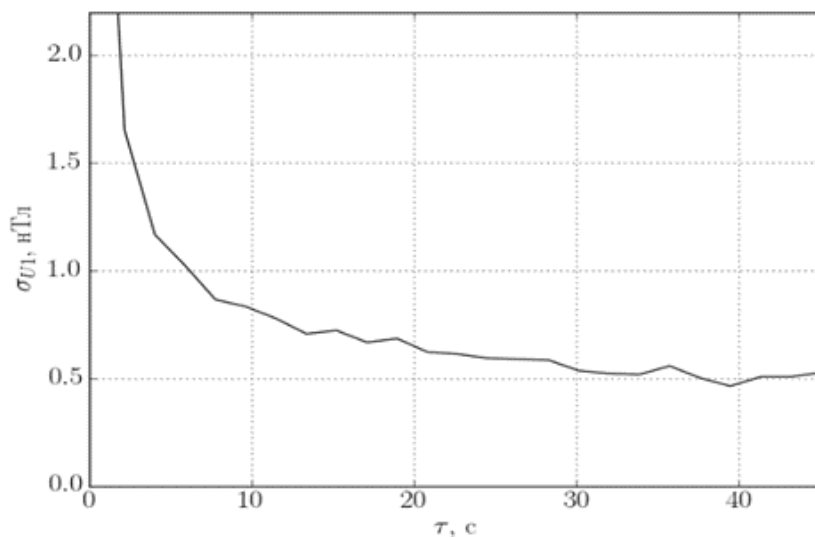


Рисунок 7 – Дисперсия Аллана для показаний дифференциального датчика магнитометра

В завершение главы сформулированы результаты и выводы по проведённым исследованиям.

Четвёртая глава посвящена описанию методики использования разработанных методов измерения на реальных образцах и проверки их достоверности. Метод оценивания распределения намагниченности

протяжённых цилиндрических ферромагнитных объектов проверялся с помощью эффекта Виллари.

В качестве исследуемых образцов использовались ферромагнитные стержни, представляющие собой сварочные электроды из стали марок СВ08Г2С и ER-308LSi диаметром 4 мм. Предварительно они были разрезаны на образцы длиной 20 ... 22 см для удобства монтирования на предметном столе экспериментальной установки, структурная схема которой представлена на (рис. 8).

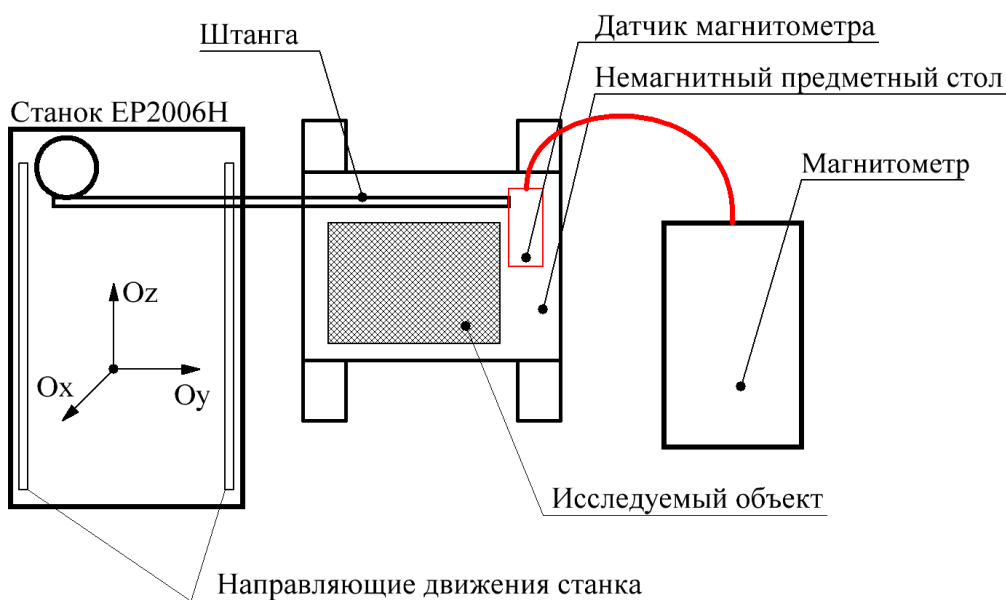


Рисунок 8 – Установка для исследования распределения магнитного поля

Для снятия механических напряжений все исследуемые образцы подвергались отжигу в муфельной печи при температуре 900 °С 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 без образца, которая в дальнейшем вычиталась из обрабатываемых магнитограмм. Исследуемые образцы подвергались различному внешнему воздействию для проявления модельного эффекта Виллари: ударам керна, растяжению в нагрузочной машине «Метротест РЭЛ-50-1», кручению. После воздействия измерялась магнитограмма образца, и из полученных данных находилось распределение модуля поперечной компоненты намагниченности, усреднённой по сечению, по формуле (11).

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 изменения микроструктуры

намагниченность проявляется в виде резких всплесков, что соответствует проявлениям магнитоупругого эффекта Виллари. Поэтому можно сделать вывод о состоятельности метода оценивания распределения намагниченности.

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

Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ № 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 percolativemultiferroic 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. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 232с.
5. Madec M. et al. // *Analog Integr Circ Sig Process* vol. 73, 2012, p. 719.
6. J. Jiang et al. // *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 49, no. 7, 2014.
7. Игнатъев 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. Игнатъев В.К. Способ уменьшения погрешностей холловского магнитометра. Патент РФ №2311655. 2007, 5 с.
9. 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.
10. Игнатъев В.К. Способ уменьшения погрешностей холловского магнитометра. Патент РФ №2311655. 2007. 5 с.
11. 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Бардин А. А.**, Перченко С. В. Холловский градиометр // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс] Режим доступа: [URL:http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2693](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2693).(01.12.2019 г)
2. **Бардин А. А.**, Игнатъев В. К., Орлов А. А., Перченко С. В., Станкевич Д. А. Магнитная экспресс диагностика микроструктуры инженерных конструкций // Технологии техносферной безопасности - 2015. С.1-8.
3. **Бардин А.А.**, Орлов А.А., Перченко С.В. Метод экспресс-диагностики напряженно-деформированного состояния слабо намагниченных ферромагнитных стержней // Математическая физика и компьютерное моделирование. Том 23 № 1 2020, с. 44-79.
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, С. 276-282 (Q1), Doi:10.1016/j.jmmm.2017.05.079.
5. **Bardin, A.**, Ignatjev, V., Orlov, A., Perchenko, S. Verifying of reciprocal relations for nonlinear quadrupole in unsteady mode // Results in Physics vol. 7, 2017, С. 665-666, Doi:10.1016/j.rinp.2017.01.029.
6. **Bardin, A.**, Ignatjev, V., Orlov, A., Perchenko, S. Voltage transients in thin-film InSb Hall sensor // Results in Physics vol. 7, 2017, С. 3344-3345, Doi:10.1016/j.rinp.2017.08.050.
7. 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.
8. Бардин А. А., Игнатъев В. К. Устройство для калибровки трёхкомпонентного магнитометра. Патент РФ№ 138023, 2013 г.
9. Бардин А. А., Орлов А. А. Программа для определения калибровочных коэффициентов первичных преобразователей многокомпонентного мобильного магнитного сканера. Свидетельство на программу ЭВМ № 2016660782. 2016.
10. **Бардин А. А.** Холловский градиометр // XIX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. 2014 г, Волгоград: Изд-во ВолГТУ. С. 222-223.
11. **Бардин А. А.**, Игнатъев 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
12. **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), С. 165-172, Doi:10.5593/sgem2017/14.
13. **Bardin A. A.**, Igntjev V. K., Nevzorov A. A., Orlov A. A. Mapping of geomagnetic vector to global coordinate system // 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM vol. 17(14), С. 237-243, Doi:10.5593/sgem2017/14.

БАРДИН Алексей Алексеевич

**Метод оценивания распределения медленно меняющейся
намагниченности в цилиндрических ферромагнетиках, находящихся
в слабых магнитных полях, холловским магнитометром**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 01.07.2021 г.

Подписано в печать 02.07.2021 г.

Формат бумаги 60x90 1/6 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

Обработано на РС и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11