На правах рукописи

# Баранова Виталия Евгеньевна

# ИЗМЕРЕНИЕ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ФЕРРОЗОНДОВОГО ДАТЧИКА

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения (измерение электрических и магнитных величин)

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	Муравьев Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор			
Официальные оппоненты:	Бирюков Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Ом ский государственный технический универ ситет, профессор кафедры физики			
	Майстренко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Томский государственный университет систем управ- ления и радиоэлектроники, доцент кафедры электронных устройств автоматизации и управления			
Ведущая организация:	ФГУП «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно- исследовательский институт метрологии», г. Новосибирск			

Защита состоится 12 января 2016 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: http://portal.tpu.ru/council/916/worklist.

Автореферат разослан \_\_\_ ноября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук

*Бив* Е.А. Васендина

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность темы

Измерение магнитной индукции как характеристики магнитного поля является одной из важнейших задач в области создания и обеспечения функционирования систем навигации, ориентации и стабилизации; экранирования квантовых компьютеров, магнитной томографии, дефектоскопии и неразрушающего контроля изделий, а также реализации систем безопасности и охраны различных объектов. Средства измерений магнитного поля высокой точности используются также при поиске и обнаружении магнитных аномалий в космосе, в воздушной, подводной, надводной и подземной средах, при геофизическом и геологическом мониторинге, измерении больших токов и т.д.

Магнитные поля обычно подразделяют на сверхсильные (свыше 100 Тл), сильные (от 4 до 100 Тл), средние (от 0,05 до 4 Тл), и слабые (менее 0,05 Тл). В зависимости от области применения магнитометра и величины измеряемого магнитного поля возникает проблема выбора того или иного первичного измерительного преобразователя магнитного поля (датчика магнитного поля).

Развитие современных мобильных робототехнических комплексов как наземного, так подводного и космического назначения требует опережающей разработки магнитометров высокого разрешения для измерения *слабых магнитных полей* и использования в составе систем навигации, ориентации и стабилизации. В связи с интенсивным освоением шельфа актуальной задачей является проблема измерения слабых магнитных полей при поиске и отслеживании магнитных аномалий, таких, как невзорвавшиеся авиабомбы и артиллерийские снаряды, мины, подводные нефте- и газопроводы, бронированные кабели и другие объекты. При этом поиск должен проходить в условиях воздействия, как нормального магнитного поля Земли, так и различного рода естественных магнитных аномалий.

Для измерения слабых постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей в настоящее время применяются магниторезистивные преобразователи, преобразователи на основе ядерно-магнитного резонанса, сквиды и феррозондовые преобразователи. Благодаря компактности, невысокой стоимости, широкому рабочему температурному диапазону, низкому уровню шумов, возможности измерения направления магнитного поля феррозондовые преобразователи и магнитометры на их основе являются наиболее предпочтительными.

Одно из основных направлений совершенствования феррозондовых магнитометров является повышение чувствительности, которое может осуществляться за счет выбора оптимальных амплитуды, частоты, формы сигнала возбуждения и алгоритма обработки выходного сигнала датчика.

Традиционная аналитическая модель феррозонда предназначена для описания его работы только при возбуждении током синусоидальной формы, при этом используется аппроксимация средней кривой намагничивания сердечника укороченным полиномом третей степени, а анализ чувствительности проводится для второй гармоники, содержащейся в выходном сигнале. Это затрудняет анализ чувствительности датчика на любой из гармоник.

Целью диссертационной работы является разработка, исследование, аппаратно-программная реализация и экспериментальная апробация магнитометра на основе феррозондового датчика с повышенной чувствительностью для измерения слабых магнитных полей.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи исследования:

- 1. Разработка аналитической модели дифференциального феррозондового преобразователя, учитывающей форму сигнала возбуждения и способ аппроксимации средней кривой намагничивания сердечника, обеспечивающей анализ чувствительности феррозонда на любой из гармоник.
- 2. Анализ работы феррозондовых преобразователей с учетом формы сигнала возбуждения и способа аппроксимации средней кривой намагничивания и поиск путей повышения чувствительности измерения магнитной индукции.
- 3. Разработка, изготовление и апробация магнитометра на основе феррозондового датчика для измерения слабых магнитных полей с повышенной чувствительностью.
- 4. Разработка и изготовление источника (меры) магнитной индукции постоянного поля для калибровки магнитометра на основе феррозондового датчика.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электромагнитного поля, теории погрешностей, дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования. При расчетах и моделировании использовались программные пакеты Mathcad, Multisim, Statistica, Comsol и LabVIEW.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной на практике точностью экспериментальных данных, полученных при апробации феррозондового магнитометра с применением эталонных средств измерений, с результатами моделирования и теоретических исследований. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием современных прецизионных средств измерений, прошедших периодическую поверку.

## Научная новизна работы

- 1. Получены универсальные выражения для расчета ЭДС, наводимой в измерительной обмотке феррозонда, и его чувствительности для любой из гармонических составляющих выходного сигнала при сигнале возбуждения произвольной формы.
- 2. На основе математического анализа и моделирования в системе COMSOL неоднородности магнитного поля, создаваемого 2-, 3- и 4-катушечными

системами известных типов, разработана и изготовлена 8-катушечная система радиусом R для калибровки и градуировки датчиков слабого магнитного поля, обеспечивающая неоднородность магнитного поля не более 0,1 % в цилиндрическом объеме в центре системы радиусом R/2.

3. Предложен и экспериментально проверен метод обработки выходного сигнала феррозондового датчика при возбуждении прямоугольным сигналом с синхронным детектированием выходной ЭДС на второй, четвертой и шестой гармониках и последующим суммированием результатов детектирования, обеспечивающий повышение чувствительности измерения магнитного поля на 40 %.

**Практическая ценность работы**. Разработанный в ходе диссертационных исследований магнитометр с повышенной чувствительностью может найти широкое применение для измерения слабых магнитных полей и использования в составе систем навигации, ориентации и стабилизации робототехнических комплексов как наземного, так подводного и космического назначения, в системах экранирования квантовых компьютеров, при поиске и обнаружении магнитных аномалий. Восьмикатушечная система может использоваться для калибровки и градуировки различных типов датчиков магнитного поля и магнитометров на их основе.

**Реализация и внедрение результатов работы**. Результаты исследований по теме диссертации использованы для выполнения при непосредственном участии автора следующих НИР:

- Грант ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на проведение исследований по теме «Система контроля магнитного окружения квантового процессора на основе феррозондового датчика сверхвысокого разрешения», 2010-2012 гг., госконтракт № 14.740.11.0950.
- Грант РФФИ по теме «Научные основы проектирования синхронных усилителей с дифференциальным входом для измерений малых отклонений физических величин на фоне большой синфазной помехи», 2015-2017 гг., госконтракт № 15-08-01007
- Совместный проект ВИУ ИК\_118, 2014 Томского политехнического университета и Института проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток по теме «Телекоммуникационные системы мониторинга и управления для автономных подводных роботов».

Результаты работы используются в Научно-исследовательском институте автоматики и электромеханики ТУСУРа г. Томск при проектировании систем управления движителями обитаемых и необитаемых подводных аппаратов. Акт внедрения приложен к диссертационной работе.

### Положения, выносимые на защиту

1. Предложенные на основе математического анализа дифференциальных феррозондовых преобразователей с разомкнутым сердечником при

аппроксимации средней кривой намагничивания нечетными степенными полиномами обобщенные выражения позволяют рассчитать амплитуду любой из гармоник выходного напряжения и чувствительность феррозонда независимо от формы сигнала возбуждения.

- 2. Разработанная 8-катушечная система для калибровки датчиков слабого магнитного поля позволяет создавать магнитное поле в диапазоне от 0 до 100 мкТл с неоднородностью 0,1 % при токе питания от 0 до 200 мА.
- 3. Метод обработки выходного сигнала феррозондового датчика реализован при изготовлении и экспериментальной апробации магнитометра с повышенной чувствительностью, позволяющего проводить измерения магнитной индукции в диапазоне от 10 нТл до 100 мкТл с разрешающей способностью 10 нТл и относительной погрешностью не более 2 %.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- III Университетская конференция студентов Элитного технического образования «Ресурсоэффективным технологиям энергию и энтузиазм молодых», г. Томск, 2012 г.;
- XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2012», г. Томск, 2012 г.;
- XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2013», г. Томск, 2013 г.;
- II Всероссийский форум школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Космическое приборостроение 2014» г. Томск, 2014 г.;
- Международная научно-техническая конференция Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (DYNAMICS-2014), г. Омск, 2014 г.;
- XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2015), г. Омск, 2015 г.;
- XVI Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, автоматизация ИКА 2015», г. Барнаул, 2015 г.;
- XXI Международный конгресс IMEKO, г. Прага, Чешская Республика Чехия, 2015 г.;

**Публикации** Основные результаты исследований отражены в 12 публикациях, включая три статьи в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, из них одна статья в зарубежном журнале, включенном в БД Scopus; девять статей в сборниках трудов международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 136 наименований и

приложений. Работа содержит 136 страниц основного текста, включая 65 рисунков и 25 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе «Датчики слабых магнитных полей» дан обзор современных датчиков для измерения слабых постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей. Выделены основные характеристики датчиков магнитного поля. Описаны магниторезистивные преобразователи, преобразователи на основе ядерно-магнитного резонанса и сквиды. Особое внимание уделено феррозондовым преобразователям.

Проведенный обзор датчиков слабых магнитных полей показал, что по совокупности таких характеристик как: диапазон измерений, разрешающая способность, линейность, чувствительность, температурная погрешность, смещение, шум, гистерезис, чувствительность к направлению поля, энергопотребление, габаритные размеры – феррозондовые преобразователи являются наиболее предпочтительными для создания магнитометров для измерения слабых постоянных магнитных полей.

Феррозонд позволяет получать данные об амплитуде, частоте И направлении действия вектора измеряемого магнитного поля. Принцип его действия основан на явлении изменения магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот. Простейший феррозонд представляет собой ферромагнитный стержень с расположенными на нем катушкой возбуждения, питаемой переменным током, и измерительной В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под катушкой. действием переменного магнитного поля, создаваемого током в катушке возбуждения. перемагничивается ПО симметричному циклу. Изменение перемагничиванием магнитного потока, вызванное сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. При воздействии на сердечник измеряемого магнитного поля кривая перемагничивания изменяет свои размеры и форму и становится несимметричной, ЧТО приводит К изменению значения И гармонического состава ЭДС в измерительной катушке. В частности, в выходном сигнале датчика появляются четные гармонические составляющие ЭДС, амплитуды которых прямо пропорциональны индукции измеряемого магнитного поля. Традиционно в выходном сигнале феррозонда выделяется вторая гармоника, по амплитуде которой судят о значении измеряемой магнитной индукции

Современный этап развития феррозондовых магнитометров характеризуется исследованиями, направленными на дальнейшее повышение чувствительности феррозондов.

Во второй главе «Аналитическое описание феррозондовых преобразователей с учетом формы сигнала возбуждения» рассмотрены вопросы построения математической модели, позволяющей получить выражение для чувствительности этого типа магнитных датчиков.

Для измерения слабых магнитных полей широкое распространение получил дифференциальный феррозонд с разомкнутым сердечником (рисунок 1).



Рисунок 1 – Дифференциальный феррозонд с разомкнутым сердечником

Такой феррозонд содержит две возбуждения, обмотки включенные встречно. Протекающий по ним ток возбуждения  $I_{exc}(t)$  создает в объеме каждого сердечника напряженность магнитного поля (поля возбуждения)  $H_{\rm exc}(t)$ . Эти поля характеризуются одинаковой амплитудой, но действуют в противофазе. При наличии измеряемого постоянного поля *H*<sub>dc</sub>, направленного вдоль сердечника (см. рисунок 1), в объемах сердечников действуют суперпозиции напряженностей этих полей. Если принять сердечники идентичными, тогда индукции магнитного поля в сердечниках без учета гистерезиса и явления анизотропии

будут определяться выражениями:

$$B_{1}(t) = f(H_{\Sigma 1}(t)) = f(H_{dc} + H_{exc}(t));$$
  

$$B_{2}(t) = f(H_{\Sigma 2}(t)) = f(H_{dc} - H_{exc}(t)).$$
(1)

Для анализа работы феррозонда используют среднюю кривую намагничивания, которую аппроксимируют полиномом нечетных степеней:

$$B = \sum_{i=1}^{j} a_{2i-1} H^{2i-1},$$
(2)

где *a<sub>i</sub>* – *i*-ый коэффициент аппроксимации.

ЭДС, индуцированная в измерительной (вторичной) обмотке феррозонда, которая охватывает оба сердечника (см. рисунок 1), определяется в соответствии с выражением:

$$E_{\rm mes}(t) = -sw_2 \left[ \frac{d}{dt} (B_1(t) + B_2(t)) \right], \tag{3}$$

где *s* – площадь поперечного сечения сердечников, мм<sup>2</sup>;

*w*<sub>2</sub> – число витков в измерительной обмотке феррозонда.

Выходной сигнал дифференциального феррозонда содержит полезную составляющую, пропорциональную измеряемой индукции постоянного магнитного поля, на удвоенной частоте возбуждения 2ω.

На практике в магнитометрах на основе феррозондовых преобразователей в качестве сигнала возбуждения используется не только сигнал синусоидальной

формы, но также прямоугольной и треугольной. Возбуждение сигналом прямоугольной формы является наиболее предпочтительным, благодаря простоте генерации и большей амплитуды нечетных гармоник.

В работе получено общее выражение для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда и его чувствительности на любой из гармоник независимо от формы сигнала возбуждения:

$$E_{\rm mes}(t) = -sw_2H_q(t)\sum_{i=1}^{J}a_{2i-1}(2i-1)\Big[(H_{\rm dc} + H_{\rm exc}(t))^{2i-2} - (H_{\rm dc} - H_{\rm exc}(t))^{2i-2}\Big];$$
(4)  
$$H_q(t) = \frac{dH_{\rm exc}(t)}{dt} = \omega H_{\rm exc.m}\sum_{g=1}^{m} \Big(b_g\cos(g\omega t + \pi/2) + c_g\sin(g\omega t + \pi/2)\Big)g$$

где *g* – номер гармоники в сигнале возбуждения;

*b*<sub>g</sub>, *c*<sub>g</sub> – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

На основе (4) получено выражение, которое позволяет аналитически рассчитать *чувствительность* дифференциального феррозонда на *любой* из гармоник независимо от спектрального состава сигнала возбуждения при заданной степени аппроксимации зависимости B = f(H):

$$S_{g} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{ET} \int_{0}^{1} -sw_{2}H_{q}(t) \sum_{i=1}^{j} a_{2i-1}(2i-1)(2i-2) \times \left[ (H_{dc} + H_{exc}(t))^{2i-3} - (H_{dc} - H_{exc}(t))^{2i-3} \right] \sin(g\omega t) dt.$$
(5)

Оценим возможность повышения чувствительности феррозонда путем учета не только второй гармоники, но и четных гармоник более высокого порядка при возбуждении прямоугольным сигналом.

Выражение для напряженности поля возбуждения в тригонометрической форме ряда Фурье при возбуждении сигналом прямоугольной формы имеет вид:

$$H_{\text{exc.s}}(t) = \frac{4}{\pi} H_{\text{exc.m}} \sum_{g=0}^{m} \frac{(-1)^g}{(2g+1)^2} \sin(\omega t (2g+1)).$$
(6)

Для качественного анализа чувствительности будем использовать укороченный полином третьей степени.

Подставляя выражение (6) в (5), получим значения чувствительности на второй, четвертой и шестой гармониках при возбуждении сигналом прямоугольной формы:

$$|S_{2}| \approx 12 \cdot sw_{2}a_{3}\omega H_{\text{exc.m}}^{2}; |S_{4}| \approx 6 \cdot sw_{2}a_{3}\omega H_{\text{exc.m}}^{2}; |S_{6}| \approx 4 \cdot sw_{2}a_{3}\omega H_{\text{exc.m}}^{2};$$

$$S_{\Sigma} \approx \sum_{g=1}^{3} |S_{2g}| \approx 22 \cdot sw_{2}a_{3}\omega H_{\text{exc.m}}^{2}$$
(7)

Из выражения (7) следует, что при суммировании результатов синхронного детектирования второй, четвертой и шестой гармоник можно повысить чувствительность феррозонда в  $\approx 1,8$  раза по сравнению с чувствительностью при возбуждении сигналом прямоугольной формы и детектированием только на второй гармонике. Отметим, что магнитная проницаемость сердечников феррозондов является частотозависимой и начинает уменьшаться после частоты среза, индивидуальной для каждого материала. При измерении магнитной индукции только на второй гармонике выходной ЭДС данной зависимостью можно пренебречь. Однако при расчете чувствительности на высших гармониках в результирующем выражении для выходной ЭДС (4) следует учитывать частотную зависимость магнитной проницаемости сердечника с помощью введения коэффициента

$$\dot{K}_{\mu}(\omega) = (1 + j\omega\tau_1)/(1 + j\omega\tau_2).$$
 (8)

где  $\tau_1, \tau_2$  – постоянные времени спада магнитной проницаемости, с.

**В третьей главе** «Расчет и изготовление системы катушек для калибровки датчика магнитного поля» рассмотрены вопросы разработки и изготовления источника (меры) магнитной индукции постоянного поля с высокой степенью однородности для калибровки магнитометра на основе феррозондового датчика.

В качестве такого источника применяют одно-, двух- или трехкомпонентные катушки и источник силы постоянного тока. Погрешность источника магнитного поля должна быть по крайней мере в три-пять раз меньше, чем погрешность калибруемого средства измерения. В частности, для калибруемого датчика с погрешностью менее 1 % неоднородность поля, воспроизводимого мерой не должна превышать 0,1-0,3 % в объеме, вмещающем габариты датчика. Типичные размеры современных феррозондов составляют в среднем 100×10×10 мм.

Наиболее часто для создания однородного магнитного поля в качестве катушек с током используют катушки Гельмгольца. Расчеты показали: для катушек Гельмгольца радиусом R = 50 мм однородность поля  $\leq 0,1$  % будет достигаться только на расстояниях до  $\approx 8,6$  мм от их центра в аксиальном направление и до  $\approx 6$  мм в радиальном, что в большинстве случаев меньше габаритов калибруемого датчика магнитного поля. Следовательно, область однородности магнитного поля необходимо увеличивать. Для этой цели чаще всего увеличивают размеры катушек, что делает систему менее мобильной и сложной в изготовлении. Однако в работе показано, что большего эффекта можно добиться путем увеличения числа катушек в системе.

Из анализа 3- и 4-катушечных систем следует, что ни одна из этих систем не обладает однородностью поля  $\leq 0,1$  % на расстоянии, равном половине радиуса катушек; при этом наибольшую однородность, имеют катушки одинакового радиуса. С целью проверки возможности дальнейшего повышения однородности был проведен расчет многокатушечной системы. Магнитное поле вдоль оси *z* для многокатушечной системы одинакового радиуса, можно вычислить с помощью выражения:

$$B(z) = \frac{1}{2}\mu_0 NIR^2 \left\{ (R^2 + z^2)^{-3/2} + \sum_{i=1}^n k_i \left\{ \left[ R^2 + (z + h_i)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + (z - h_i)^2 \right]^{-3/2} \right\} \right\}$$
(9)

где  $k_i$  – коэффициент, определяющий число витков в *i*-ой паре катушек; *n* – число катушек;  $h_i$  – расстояние до геометрического центра до *i*-ой пары катушек.

Первый член в выражении (9) соответствует катушке с координатой z = 0, остальные – парам катушек, расположенных на одинаковом расстоянии от центра координат и имеющих одинаковое число витков. Для системы катушек с четным числом катушек первый член уравнения (9) равен нулю. При расчете такой системы из *n* катушек нужно найти *n*/2 неизвестных расстояний *h* до центра катушек и (n - 2)/2 неизвестных коэффициентов *k*, определяющих число витков в соответствующих парах катушек как *kN*. Для нахождения неизвестных параметров необходимо составить и решить систему нелинейных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$B^{(2)}(0) = 0; B^{(4)}(0) = 0; \dots B^{(2(n-1))}(0) = 0.$$
<sup>(10)</sup>

Для создания магнитного поля с неоднородностью менее 0,1 % на расстояниях  $\pm R/2$  от геометрического центра система уравнений (10) была численно решена с использованием среды Mathcad. Исходя из требований к размеру области однородного аксиального поля и приемлемой сложности изготовления системы катушек, число катушек *n* было выбрано равным 8, радиус катушек был принят равным 55·10<sup>-3</sup> мм. Точное решение получилось в виде вещественных чисел с большим числом значащих цифр для числа витков и расстояний между ними.

Практическая реализация системы возможна при целом числе витков и расстояниями между центрами катушек, кратными 0,5 мм. Поэтому для нахождения целочисленного количества витков и дискретных расстояний использовался итерационный метод. Результаты вычислений сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты итерационных вычислений параметров аксиальной 8-катушечной системы для создания однородного магнитного поля

Номер	Число	Расстояние от центра системы катушек
катушки	витков	до начала координат, мм
1; 5	10	13,5; -13,5
2; 6	12	42,5; -42,5
3; 7	17	80,5; -80,5
4; 8	34	144,5; -144,5

Были проведены расчеты относительной неоднородности δ<sub>z</sub> магнитного поля катушек Гельмгольца, 3-катушечной системы, 4-катушечной системы Бэйкера и предложенной 8-катушечной системы по формуле

$$\delta_z = \frac{B(z) - B(0)}{B(0)}.$$
 (11)

На рисунке 2 представлены соответствующие графики, где значения координаты z приведены к радиусу катушки R. Из рисунка 2 видно, что относительная неоднородность магнитного поля 8-катушечной системы на расстоянии  $\pm$ R/2 от центра не превышает 0,015 %. Проведенные расчеты в среде Mathcad не учитывают габаритные размеры катушек, в связи с чем более точные расчеты были реализованы в среде конечно-элементного моделирования Comsol.



Рисунок 2 – Неоднородность магнитного поля, созданного катушками Гельмгольца (а), 3-катушечной системой (б), 4-катушечной системой Бэйкера (в), 8-катушечной системой (г).

На рисунке 3 представлено распределение магнитного поля, создаваемого восьмикатушечной системой в аксиальном направлении, полученное в результате моделирования в среде Comsol. Моделирование показало, что максимальная неоднородность вдоль оси z на расстояние  $\pm R/2$  составляет 0,065 %.



Рисунок 3 – Распределение магнитного поля, созданного восьмикатушечной системой в аксиальном направлении

Проведенные расчеты послужили основой для разработки и изготовления аксиальной 8-катушечной системы на цилиндрической основе в виде ПХВ трубы диаметром 110 мм и длиной 300 мм. Провод в катушке (секции) наматывался виток к витку в одинаковом направлении во всех секциях. Было обеспечено совпадение центров катушек с размерами, указанными в таблице 1. Общее число витков – 146. Марка использованного для изготовления обмоток провода – ПЭВШО 0,2.

Экспериментальные исследования изготовленной системы с помощью магнитометра Mag-01 Bartington Instruments показали, что она обеспечивает создание магнитного поля в диапазоне от 0 до 100 мкТл с неоднородностью не более 0,1 % при токе питания от 0 до 200 мА.

**В четвертой главе** «Разработка и исследование феррозондового магнитометра» проведено экспериментальное исследование метода обработки сигналов с феррозондового датчика. Приведено описание практической реализации феррозондового магнитометра и оценена его погрешность.

экспериментальной Для проверки сделанного BO второй главе теоретического предположения, что при суммировании результатов синхронного детектирования второй, четвертой и шестой гармоник можно феррозонда, был повысить чувствительность использован типовой дифференциальный феррозондовый датчик Mag Probe F фирмы Bartington Instruments. При этом исследуемый феррозондовый датчик помещался в центр разработанной 8-катушечной калибровочный системы, в качестве источника питания которой использовался калибратор универсальный Fluke 5520A. Для сигналом возбуждения датчика прямоугольным с частотой 25 кГп использовался Г3-112. Напряжение генератора генератор на выходе устанавливалось таким образом, чтобы через феррозонд протекал ток 1,5 мА среднеквадратического Значение контролировалось значения. тока ПО прецизионному цифровому мультиметру Agilent 3458A (см. рисунок 4).



С помощью калибратора Fluke 5520A задавали значения тока через систему катушек в диапазоне от 10 до 80 мА с дискретностью 10 мА. Таким образом, индукция магнитного поля в центре системы изменялась от 4,52 до

36,16 мкТл с дискретностью 4,52 мкТл. При этом калибратор Fluke 5520A был подключен так, чтобы создаваемое 8-катушечной системой магнитное поле вычиталось из нормального поля Земли.

Все измерения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник на выходе феррозондового датчика проводились с усреднением. Для этого при заданном значении тока с калибратора с помощью платформы PXI-1042Q с модулем NI PXI-5124 в автоматическом режиме проводилось по 100 измерений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник, после чего вычислялись средние значения амплитуд гармоник.

Результаты измерения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник в выходном сигнале феррозондового датчика от изменения магнитной индукции приведены в таблице 2.

Номер	Параметры ге	Іараметры генерируемого магнитного поля		Амплитуды гармоник. В			Изменение амплитуд гармоник В		
измерения <i>k</i> Т	Ток питания, мА	Магнитная индукция, мкТл	$\overline{U}_2$	$\overline{U}_4$	$\overline{U}_6$	$\Delta_2$	$\Delta_4$	$\Delta_6$	
1	0	_	2,23	0,85	0,23	_	_	_	
2	10	4,52	1,97	0,75	0,22	0,26	0,1	0,01	
3	20	9,04	1,73	0,67	0,19	0,24	0,08	0,03	
4	30	13,56	1,48	0,59	0,16	0,25	0,08	0,03	
5	40	18,08	1,24	0,49	0,15	0,24	0,1	0,01	
6	50	22,6	0,98	0,4	0,13	0,26	0,09	0,02	
7	60	27,12	0,73	0,3	0,1	0,25	0,1	0,03	
8	70	31,64	0,49	0,22	0,09	0,24	0,08	0,01	
9	80	36,16	0,23	0,13	0,07	0,26	0,09	0,02	

Таблица 2 – Амплитуды второй, четвертой и шестой гармоник в напряжении с выхода датчика при изменении магнитной индукции

На основе полученных результатов измерений были рассчитаны изменения  $\Delta_{gk} = \overline{U}_{gk} - \overline{U}_{gk-1}$  значений амплитуд гармоник g = 2, 4, 6. Результаты расчетов приведены в таблице 2. Были рассчитаны также средние значения  $\overline{\Delta}_g = (1/8) \sum_{k=2}^{9} \Delta_{gk}$ , на основании которых можно утверждать, что при изменении магнитной индукции внешнего поля на 4,52 мкТл значение амплитуды второй гармоники изменяется на  $\overline{\Delta}_2 = 0,25$  В, четвертой гармоники – на  $\overline{\Delta}_4 = 0,09$  В, шестой гармоники – на  $\overline{\Delta}_6 = 0,02$  В.

Для оценки эффективности суммирования результатов измерений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник с целью повышения чувствительности измерения магнитной индукции феррозондовым датчиком были вычислены средние  $\overline{\Delta}_{2,4,6}$  изменения их суммарных значений. Выигрыш от суммирования результатов измерений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon_{2,4,6} = \frac{\left|\overline{\Delta}_2 - \overline{\Delta}_{2,4,6}\right|}{\overline{\Delta}_2} \cdot 100, \%.$$
(12)

Расчеты по формуле (12) показали, что суммирование амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник обеспечило повышение чувствительности на 40 %. Итоговая чувствительность  $S_{2,4,6}$  используемого в экспериментах датчика Mag Probe F составила 0,08 В/мкТл.

возбуждения Для феррозондового датчика, считывания него с измерительной информации с учетом предложенного способа повышения чувствительности и создания магнитометра на его основе было спроектировано устройство кондиционирования сигналов, структурная схема которого представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Структурная схема возбуждения и кондиционирования сигналов феррозонда

В состав разработанной схемы входят: источники опорного напряжения (ИОН 1 и ИОН 2), ИОН 1 используются для формирования опорного напряжения для задающего цифро-аналового преобразователя (ЗЦАП), ИОН 2 используется для формирования опорного напряжения для аналого-цифрового преобразователя (АЦП); ЗЦАП формирует из опорного напряжения сигнал для возбуждения феррозонда заданной частоты и формы; преобразователь напряжение-ток (ПНТ) предназначен для преобразования напряжения с выхода ЗЦАП в ток и возбуждения феррозонда током; блок операционных усилителей (БОУ) предназначен для усиления сигнала с выхода феррозонда; синхронный детектор (СД) используется для детектирования измерительной информации на заданной частоте; фильтр нижних частот (ФНЧ) предназначен для выделения постоянной составляющей; АЦП используется для оцифровки измерительной информации; аппаратно-программная платформа NI myRIO 1900 выполняет функции программной и аппаратной логики.

Возбуждение феррозондового датчика током заданной частоты и формы осуществляется с помощью задающего ЦАП через преобразователь напряжение в ток. Сигнал с измерительной обмотки феррозонда усиливается с помощью

двух операционных усилителей с программируемым коэффициентом усиления включенных последовательно и поступает на вход синхронного детектора, на второй вход которого поступает сигнал с цифрового выхода NI myRIO 1900 с частотой 2*f*. В результате на выходе синхронного детектора выделяется сигнал, пропорциональный амплитуде второй гармоники. Выделенный сигнал фильтруется фильтром ФНЧ с целью выделения постоянной составляющей и оцифровывается с помощью АЦП и запоминается в памяти NI myRIO 1900.

Затем на второй вход СД поступает сигнал с цифрового выхода NI myRIO 1900 с частотой 4*f*, в результате на выходе синхронного детектора выделяется сигнал, пропорциональный амплитуде четвертой гармоники. Выделенный сигнал после фильтрации также оцифровывается и запоминается в памяти. После этого на второй вход СД поступает сигнал с цифрового выхода NI myRIO 1900 с частотой 6*f*, и в результате на выходе синхронного детектора выделяется сигнал, пропорциональный амплитуде шестой гармоники, операции оцифровывания и фильтрации повторяются.

Измеренные значения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник складываются в микроконтроллере, результат суммирования переводится в значение магнитной индукции посредством деления на коэффициент преобразования  $\overline{K}_{\Pi}$  измерительного канала устройства кондиционирования и значения чувствительности  $S_{2.4.6}$ , после чего выводится на индикатор.

Апробация магнитометра проведена следующим образом: с помощью калибратора Fluke 5520A и калибровочной 8-катушечной системы создавалось магнитное поле  $B_3$  от 9 нТл до 90 мкТл. Для минимизации магнитного поля Земли восьмикатушечная система помещалась в магнитный экран из материала MS-FR Finemet. С помощью устройства кондиционирования измерялось напряжение на выходе феррозонда на второй, четвертой и шестой гармониках с последующим суммированием. Погрешность измерения магнитной индукции рассчитывалась по формуле:

$$\delta_{B_{\rm dc}} = \frac{\left| B_{\rm p} - U_{\rm M3M} / \bar{K}_{\rm m} \cdot S_{2,4,6} \right|}{B_{\rm p}} \cdot 100, \%.$$
(13)

Результаты практической апробации показали, что созданный магнитометр с повышенной чувствительностью позволяет проводить измерения магнитной индукции в диапазоне от 10 нТл до 100 мкТл с разрешающей способностью 10 нТл и относительной погрешностью не более 2 %.

В приложениях диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны универсальные выражения для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда и чувствительности на любой из гармоник независимо от формы сигнала возбуждения.

- 2. Разработана, изготовлена и экспериментально апробирована калибровочная 8-катушечная система для создания магнитного поля с неоднородностью не хуже 0,1 % на расстоянии половины радиуса от геометрического центра системы при токе питания от 0 до 200 мА.
- 3. Предложен и экспериментально проверен метод обработки сигналов с феррозондового датчика за счет измерения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник с последующим суммированием результатов измерений, обеспечивающая повышение чувствительности измерения магнитного поля на 40 %.
- 4. Разработан, изготовлен и апробирован магнитометр на основе феррозондового датчика для измерения слабых магнитных полей с повышенной чувствительностью, позволяющий проводить измерения магнитной индукции в диапазоне от 10 нТл до 100 мкТл с разрешающей способностью 10 нТл и относительной погрешностью не более 2 %.
- 5. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР, финансируемых в рамках ФЦП и РФФИ.
- 6. Разработанный магнитометр и калибровочная восьмикатушечная система используются в рамках научно-технического сотрудничества Научноисследовательского института автоматики и электромеханики ТУСУРа г. Томск и Томского политехнического университета при проектировании систем управления движителями обитаемых и необитаемых подводных аппаратов и в учебном процессе на кафедре компьютерных измерительных систем и метрологии Томского политехнического университета, что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы.

# ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

- 1. Баранова В.Е. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров / Баранова В.Е., Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Учайкин С.В. // Измерительная техника, 2015. № 5. С. 52-56.
- Ogay (Baranova) V. Modelling coils system for generating homogeneous magnetic field / Ogay (Baranova) V., Baranov P., Stepankova A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 66, 2014, 012009 (Web of Science, Scopus).
- 3. Огай (Баранова) В.Е. Феррозондовый магнитометр для измерения магнитной индукции до 1 нТл / Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Огай (Баранова) В.Е., Учайкин С.В. // Известия Томского политехнического университета, том 320, № 4, 2012, С. 89-92.

## Статьи в других изданиях

4. Baranova V.E. Fluxgate magnetometer for measuring ultra low magnetic induction / Baranova V.E., Baranov P.F., Muravyov S.V., Uchaikin S.V. // Proceeding of XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry", August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic. (Scopus).

- 5. **Baranova V.E.** Instrument for measurement of transfer function voltage dividers /Baranov P.F., Tsimbalist E.I., Baranova V.E. // SIBCON-2015: Proceedings of International Siberian Conference Omsk, May 23-25 2015. p.1-4. (Scopus).
- Баранова В.Е. Пути повышения чувствительности феррозондовых преобразователей / Баранова В.Е., Баранов П.Ф. // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVI международной научно-технической конференции. Том 1. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 57-60.
- 7. **Baranova V.** The Helmholtz coils simulating and improved in COMSOL / Baranova V., Baranov P. // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2014 pp.1-4. (Scopus).
- 8. Огай (Баранова) В.Е. Моделирование катушек Гельмгольца в среде COMSOL // Космическое приборостроение: сборник научных трудов форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Томск, 10-12 Апреля 2014. Томск: ТПУ, 2014. С. 192-195.
- Огай (Баранова) В.Е. Разработка системы магнитного вакуума / Огай (Баранова) В.Е., Баранов П.Ф. // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-19 апреля 2013 г., Томск: изд-во ТПУ. 2013. Т.1. С. 180-181.
- 10. Ogay (Baranova) V.E The calculation of temperature field of fluxgate sensor controls the magnetic environment of the quantum computer / Khusnulina A.L. Ogay (Baranova) V.E, Chudinova A.L. // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – Т.1. – С. 227-228.
- 11. Огай (Баранова) В.Е. Разработка однокомпонентного феррозондового магнитометра / Огай (Баранова) В.Е., Баранов П.Ф. // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научнопрактической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Апреля 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – Т.1. – С. 227-228.
- 12. Огай (Баранова) В.Е. Моделирование теплофизических свойств феррозондового датчика при сверхнизких температурах / Хуснулина А.Л., Огай (Баранова) В.Е. // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых: сборник докладов III Университетской конференции студентов Элитного технического образования, Томск, 16-17 Апреля 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 149-151.