

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

*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)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Муравьев Сергей Васильевич,

Томск – 2015

## Содержание

	Стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1. ДАТЧИКИ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ</b> .....	12
1.1 Датчики для измерения магнитных полей .....	12
1.2 Магниторезистивные датчики .....	15
1.2.1 Магниторезисторы на эффекте Гаусса .....	16
1.2.2 Анизотропные магниторезистивные датчики .....	17
1.2.3 Гигантские магниторезистивные датчики .....	19
1.2.4 Спин-туннельные магниторезистивные датчики .....	21
1.3 ЯМР датчики .....	22
1.3.1 Датчики с вынужденной ядерной прецессией .....	23
1.3.2 Датчики со свободной ядерной прецессией .....	24
1.3.3 Датчики с оптической накачкой .....	25
1.4 Сквиды .....	25
1.5 Феррозондовые преобразователи .....	29
1.6 Сравнительные характеристики датчиков магнитных полей .....	38
1.7 Выводы к главе 1 .....	40
<b>ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ФОРМЫ СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ</b> .....	42
2.1 Основные термины .....	42
2.2 Математическая модель феррозондового преобразователя .....	43
2.2.1 Одностержневой преобразователь .....	43
2.2.2 Дифференциальный преобразователь .....	46
2.3 Выбор формы сигнала возбуждения .....	50
2.4 Расчет выходной ЭДС феррозондового преобразователя .....	53
2.5 Выводы к главе 2 .....	54

<b>ГЛАВА 3. РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ КАТУШЕК ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....</b>	<b>55</b>
3.1 Средства калибровки феррозондовых датчиков.....	55
3.1.1 Создание магнитного поля с помощью соленоида.....	55
3.1.2 Создание магнитного поля с помощью аксиальной двухкатушечной системы .....	57
3.1.3 Создание магнитного поля с помощью аксиальной трехкатушечной системы .....	60
3.1.4 Создание магнитного поля с помощью аксиальной четырехкатушечной системы .....	65
3.2 Расчет многокатушечной системы .....	68
3.3 Моделирование калибровочной системы методом конечных элементов ...	72
3.4 Изготовление и апробация калибровочной системы катушек.....	82
3.5 Выводы к главе 3 .....	85
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВОГО МАГНИТОМЕТРА .....</b>	<b>86</b>
4.1 Исследование дифференциального феррозондового датчика .....	86
4.1.1 Определение частоты сигнала возбуждения.....	87
4.1.2 Исследование гармонического состава выходного сигнала при синусоидальном сигнале возбуждения .....	88
4.1.3 Исследование гармонического состава выходного сигнала при прямоугольном сигнале возбуждения.....	90
4.1.4 Проверка способа повышения чувствительности феррозондового датчика .....	93
4.2 Устройство кондиционирования данных с феррозондового датчика .....	98
4.3 Исследование метрологических характеристик магнитометра .....	109
4.3.1 Определение погрешности коэффициента передачи устройства кондиционирования .....	109
4.3.2 Определение погрешности измерения магнитной индукции .....	115
4.4 Выводы к главе 4 .....	116

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	118
<b>Список используемой литературы</b> .....	120
<b>Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационной работы</b> .....	134

## ВВЕДЕНИЕ

### 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 третьей 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 «Телекомму-

никационные 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 ИМЕКО, 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.

Диссертационная работа состоит из четырех глав.

В первой главе представлен аналитический обзор современных датчиков для измерения слабых постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей. Выделяются основные характеристики датчиков магнитного поля. Приводится описание магниторезистивных преобразователей, преобразователей на основе ядерно-магнитного резонанса и сквидов. Особое внимание уделено аналитическому обзору феррозондовым преобразователем.

Во второй главе рассматриваются вопросы повышения чувствительности феррозондовых преобразователей. Проводится математический анализ работы дифференциальных феррозондовых преобразователей с разомкнутым

сердечником в зависимости от формы сигнала возбуждения. Предлагается обобщенная математическая модель феррозондового преобразователя для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда и чувствительности на любой из гармоник независимо от формы сигнала возбуждения. Предлагается процедура обработки сигналов с феррозондового датчика для повышения чувствительности измерения магнитной индукции.

В третьей главе рассматриваются средства калибровки и градуировки датчиков слабых магнитных полей и магнитометров на их основе. Проводится анализ неоднородности магнитного поля создаваемого катушками Гельмгольца, трех- и четырехкатушечными системами. Приводится описание процедуры расчета, практическая реализация и экспериментальные исследования восьми-катушечной системы для калибровки датчиков слабого магнитного поля с повышенной однородностью магнитного поля на расстояние половины радиуса от центра системы.

В четвертой главе рассматриваются вопросы экспериментального исследования процедуры обработки сигналов с феррозондового датчика, предложенной во второй главе. Проводится исследование чувствительности типового дифференциального феррозондового датчика на второй, четвертой и шестой гармониках при возбуждении сигналами синусоидальной и прямоугольной форм. Приводится описание практической реализации устройства кондиционирования сигналов с феррозондового датчика и оценивается погрешность прототипа магнитометра.

## ГЛАВА 1

### ДАТЧИКИ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В этой главе 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 преобразователем.

#### 1.1 Датчики для измерения магнитных полей

Измерение магнитных полей является важнейшей задачей в области космических и геофизических исследований [1-4], функционирования систем навигации, ориентации и стабилизации [5-9], в системах экранирования квантовых компьютеров [10-12], магнитной томографии, отображений функций головного мозга, дефектоскопии и неразрушающего контроля изделий [13-16], а также в системах охраны периметра [17]. Средства измерений магнитного поля высокой точности используются при поиске и обнаружении магнитных аномалий, измерении токов, в сотовых телефонах, ноутбуках [18-19] и т.д.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции. А средство измерений модуля вектора магнитной индукции или его составляющих в соответствии ГОСТ 24284 называется *магнитометром* [20].

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) [21].

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). В таких сферах как микромагнитное сканирование или неразрушающий контроль, единственным критерием выбора зачастую является размер датчика. При поиске и обнаружении магнитных аномалий на больших расстояниях более важным параметром являются шум и разрешающая способность [22]. При решении задач навига-

ции, ориентации и стабилизации на первый план выходят линейность, температурные коэффициенты и чувствительность к поперечному полю [23]. При измерении магнитного поля квантового чипа особое значение приобретает тепловыделение и работоспособность датчика при сверхнизких температурах.

Таким образом, задача выбора подходящего датчика магнитного поля для магнитометра не является тривиальной.

Датчик магнитного поля является основным элементом любого магнитометра и предназначен для преобразования магнитной индукции  $B$  в электрический сигнал, чаще всего в напряжение  $U$ . При создании датчиков магнитного поля используются различные физические эффекты, например, Холла, Гаусса, Суля, и др. [24-27].

В качестве основных характеристик датчиков магнитного поля можно выделить следующие: [1]

- диапазон измерений;
- линейность;
- гистерезис;
- погрешность преобразования магнитной индукции (в том числе зависимость от температуры);
- смещение;
- долговременная стабильность;
- шум;
- диаграмма направленности;
- чувствительность к поперечному полю;
- частотный диапазон измерений;
- геометрические размеры датчика;
- потребляемая мощность;
- тепловыделение;
- диапазон рабочих температур.

В зависимости от используемого эффекта датчики магнитного поля подразделяются на следующие типы [1-2, 5, 28-30] в соответствии с рисунком 1.1.

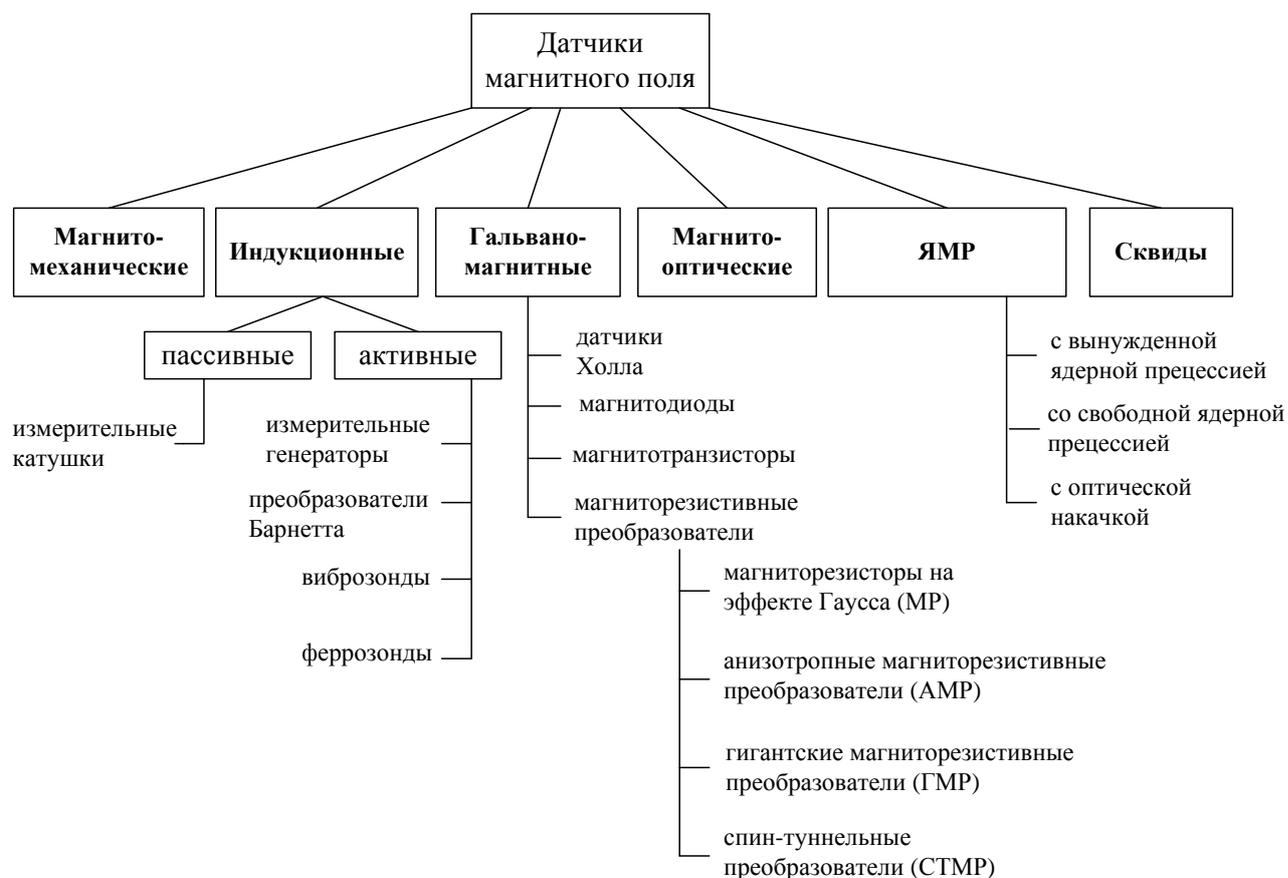


Рисунок 1.1 – Виды датчиков магнитного поля

На рисунке 1.2 показаны типичные диапазоны измерений для различных типов датчиков.

Из данных на рисунке 1.2 видно, что для измерения слабых полей могут применяться измерительные катушки, преобразователи Барнетта, вибронзонды, феррозондовые преобразователи, магниторезистивные преобразователи, ЯМР преобразователи и сквиды.

Измерительные катушки не позволяют проводить измерения постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей.

Преобразователи Барнетта и вибронзонды имеют в своем составе электромеханический привод, вращающиеся и колеблющиеся части соответственно, что увеличивает их размеры и усложняет конструкцию, поэтому в настоящее время они практически не применяются.



Температурный отклик магниторезисторов зависит от материала легирующих примесей. Как правило, с увеличением температуры сопротивление уменьшается, а после приложения магнитного поля уменьшение происходит быстрее. Магниторезисторы имеют низкие шумы, не подвержены воздействию поверхностных эффектов и характеризуется очень малым старением [31].

В зависимости от физического эффекта и материала различают следующие магниторезистивные датчики:

- магниторезисторы на эффекте Гаусса;
- анизотропные магниторезистивные датчики (АМР);
- гигантские магниторезистивные датчики (ГМР);
- спин-туннельные магниторезистивные датчики (СТМР).

### **1.2.1 Магниторезисторы на эффекте Гаусса**

Эффект Гаусса заключается в изменении электрического сопротивления магниточувствительного материала вследствие искривления траектории движения носителей заряда под действием внешнего магнитного поля [32-33]. При помещении магниточувствительного материала в магнитное поле его сопротивление возрастает.

Большинство магниторезисторов на эффекте Гаусса позволяют измерять постоянные и переменные магнитные поля до 1 МГц в диапазоне от 1 мТл до 1 Тл при рассеиваемой мощности до 1 Вт в диапазоне рабочих температур от минус 40 °С до 110 °С. Температурный коэффициент чувствительности типичного датчика на эффекте Гаусса варьируется от 2 %/°С до 0,02 %/°С [27].

Преимуществами магниторезисторов на эффекте Гаусса являются малые габариты и низкая стоимость.

К недостаткам магниторезисторов на эффекте Гаусса относятся низкая чувствительность, нелинейность характеристики преобразования, высокая зависимость от температуры, изменение чувствительности магниторезистивного эле-

мента при изменении угла между вектором магнитной индукции и плоскостью элемента, достаточно большая рассеиваемая мощность.

### 1.2.2 Анизотропные магниторезистивные датчики (АМР)

АМР датчики основаны на анизотропном магниторезистивном эффекте, который является прямым следствием спин-орбитального взаимодействия в ферромагнитных проводниках [34] и заключается в изменении электрического сопротивления ферромагнитного проводника в зависимости от изменения угла  $\alpha$  между протекающим током  $I$  и вектором намагниченности  $M$ . Принцип анизотропного магниторезистивного эффекта показан на рисунке 1.3.

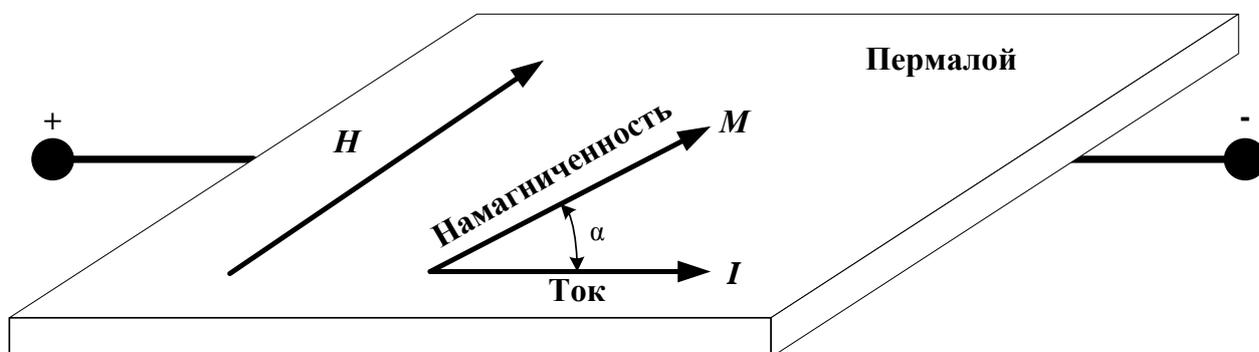


Рисунок 1.3 – Принцип анизотропного магниторезистивного эффекта

Внешнее магнитное поле  $H$  поворачивает вектор намагниченности  $M$  на угол  $\alpha$  и изменяет электрическое сопротивление в соответствии с выражением:

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2(\alpha), \quad (1.1)$$

где  $R_0$  – базовое сопротивление АМР датчика, Ом;

$\Delta R$  – максимальное изменение сопротивления, Ом.

Из формулы (1.1) следует, что углу  $\alpha = 90^\circ$  соответствует минимальное сопротивление, а углу  $\alpha = 0^\circ$  (в отсутствие магнитного поля) – максимальное значение сопротивления, равное базовому сопротивлению  $R_0$ , к которому прибавляется максимальное сопротивление  $\Delta R$ , составляющее от 2 % до 3 % от базового [35].

Из выражения (1.1) следует также, что зависимость сопротивления от величины измеряемого магнитного поля носит нелинейный характер. Для решения

данной проблемы в АМР датчиках используют структуру, в которой алюминиевые полосы напыляют на пермаллоевые под углом  $45^\circ$ , тем самым изменяя направление тока на  $45^\circ$  и делая функцию преобразования близкой к линейной.

Большинство АМР датчиков позволяют измерять постоянные и переменные магнитные поля до частот около 10 МГц в диапазоне от 10 нТл до 1 мТл, уровень собственных шумов на уровне  $10 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ , потребляемая мощность от 0,1 до 0,5 мВт, нелинейность функции преобразования на уровне 0,1 %. АМР могут работать в диапазоне температур от минус  $55^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$  [30].

Температурный коэффициент чувствительности типичного АМР датчика составляет от  $0,25 \text{ \%/}^\circ\text{C}$  до  $0,01 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ . Температурный коэффициент смещения составляет около  $10 \text{ нТл}/^\circ\text{C}$ , и варьируется даже между экземплярами датчиков одной партии [23].

Для повышения точности измерения магнитного поля АМР датчика включают по мостовой схеме [36] и применяют обратную связь для компенсации измеряемого магнитного поля. Для этого в АМР датчики встраивают плоскую катушку обратной связи. Такой подход позволяет повысить порог чувствительности и линейность, но при этом значительно сужается частотный диапазон.

Выходное напряжение  $U$  в АМР датчиках зависит не только от измеряемой компоненты вектора магнитной индукции  $B_x$ , но и от компоненты  $B_y$ , перпендикулярной направлению измерения. Для компенсации погрешности от поперечного поля применяют различные способы, например, магнитную обратную связь, одновременное измерение двух или трех компонент вектора магнитной индукции с последующей цифровой обработкой и др. Однако для реализации прецизионных способов компенсации необходимы сложные аналого-цифровые схемы, имеющие как высокое энергопотребление, так и тепловыделение. Простые схемные решения снижают чувствительность датчиков и увеличивает шум [23].

Развитию АМР датчиков способствовала необходимость заменить индуктивные головки считывания информации в жестких дисках. В этом качестве позднее они были заменены ГМР и СТМР датчиками, поскольку те обладают более высокой плотностью хранения информации благодаря меньшим размерам.

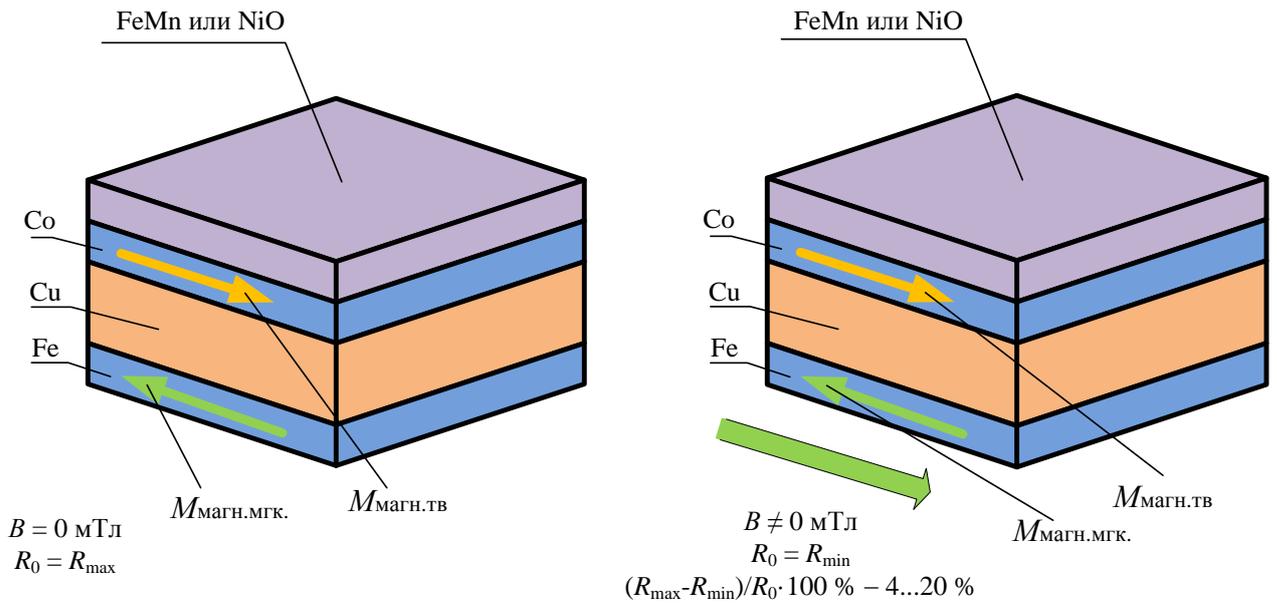
Достоинствами АМР датчиков являются наличие оси чувствительности, долгий срок службы и независимость от магнитного дрейфа [37]. Они обладают небольшими размерами, например датчик компании Honeywell HMC1021S имеет размеры 5×4×2 мм, могут работать в широком диапазоне температур, имеют низкое энергопотребление и относительно дешевы.

К недостаткам АМР датчиков следует отнести низкую пороговую чувствительность и высокий уровень шума. Кроме того, магниторезистивные датчики обладают большим тепловыделением, связанным с рассеиванием энергии в резистивном элементе.

### **1.2.3 Гигантские магниторезистивные датчики (ГМР)**

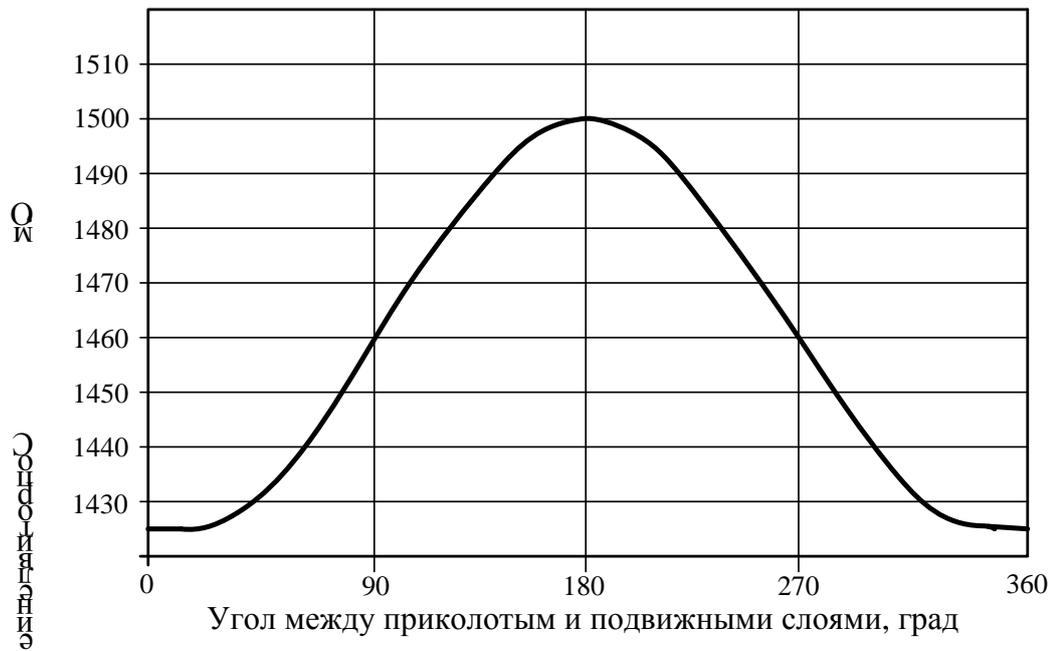
ГМР датчики основаны на гигантском магниторезистивном эффекте (квантовомеханический эффект), наблюдаемом в тонких металлических плёнках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоёв. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев, как показано на рисунке 1.4.

Основным механизмом возникновения ГМР эффекта является спин-зависимое рассеяние электронов проводимости. В ферромагнетике электроны с одним направлением спина рассеиваются гораздо сильнее, чем электроны с противоположным направлением (выделенное направление задает намагниченность образца). Выходя из одного ферромагнитного слоя, электроны попадают в другой, сохраняя свою поляризацию. Таким образом, в случае параллельной намагниченности слоев те из носителей, которые рассеиваются меньше, проходят всю структуру без рассеяния; а носители противоположной поляризации испытывают сильное рассеяние в каждом из магнитных слоев. В случае же антипараллельной намагниченности слоев, носители обеих поляризаций испытывают сильное рассеяние в одних слоях и слабое в других. Следовательно, при параллельной намагниченности слоев сопротивление, как правило, низкое, а при антипараллельном – высокое [38].



а)

б)



в)

- а) – антипараллельное направление векторов намагниченности приколотого и регулируемого слоев (угол  $\alpha \geq 180^\circ$ ) – состояние с максимальным сопротивлением;
- б) – параллельное состояние слоев (угол  $\alpha \geq 0^\circ$ ) – состояние с минимальным сопротивлением;
- в) – график зависимости сопротивления от направления приложенного поля (угла  $\alpha$  между подвижным и движущимся слоями).

Рисунок 1.4 – Принцип гигантского магниторезистивного эффекта

В качестве элемента на основе эффекта ГМР как правило используется структура, получившая название спиновый клапан (spinvalve). В ней один из магнитных слоев напылен на слой антиферромагнетика. Благодаря обменному взаимодействию между электронами ферромагнетика и антиферромагнетика спины в этих двух слоях становятся жестко связанными между собой [38].

ГМР датчики обладают малыми размерами и большим изменением сопротивления при воздействии магнитной индукции, чем АМР датчики. В то время как изменение сопротивления АМР датчика не превышает 3 %, ГМР-материалы обеспечивают изменение от 10 % до 20 % [39]. Помимо этого, ГМР датчики изготавливаются по технологии, разработанной для производства полупроводников, что уменьшает себестоимость датчиков. На сегодняшний день лучшие ГМР датчики способны измерять поля от 10 нТл до 0,1 Тл [30].

Фирма Hitachi разработала ГМР датчики с улучшенной температурной стабильностью. У этих датчиков в диапазоне температур от минус 40 °С до 120 °С чувствительность меняется всего 20 %, кроме того, они способны работать при температуре 250 °С в течение 30 минут [23].

Достоинствами ГМР [40] датчиков являются большая плотность интеграции, вследствие чего достигается высокая разрешающая способность при распознавании близко расположенных друг к другу магнитных микрообъектов (в частности, битов на магнитных носителях), высокое быстродействие и низкое энергопотребление.

К недостаткам можно отнести то, что диаграмма направленности имеет деформацию, при этом сильные магнитные поля, особенно при высоких температурах, способны разрушить спиновой клапан из-за изменений в намагниченности соединительного слоя. Такая опасность не грозит АМР датчикам [23].

#### **1.2.4 Спин-туннельные магниторезистивные датчики (СТМР)**

СТМР датчики основаны на спин-туннельном магниторезистивном эффекте, который аналогичен гигантскому магниторезистивному эффекту, только вместо

немагнитного металла ферромагнитные слои разделены слоем диэлектрика. Если слой диэлектрика достаточно тонкий, проявляется туннельный эффект. Вероятность туннелирования электрона через потенциальный барьер сильно зависит от взаимной ориентации намагниченностей слоев, поэтому в англоязычной литературе этот эффект называется «spin-dependent tunneling» (SDT).

Измеренное сопротивление обратно пропорционально вероятности туннелирования через тонкий изолирующий барьер [1]. Для аморфного изолирующего слоя  $Al_2O_3$  относительное изменение сопротивления достигает 70 % при комнатной температуре. Ещё более перспективным является барьер в виде монокристаллического слоя  $MgO$ , который позволяет достичь значений изменения сопротивления до 600 % при комнатной температуре [41]. Благодаря высокому сопротивлению СТМР датчики имеют меньшее энергопотребление, чем ГМР датчики [30]. Однако проблемой СТМР датчиков остается высокая коэрцитивная сила и нелинейность. Так цифровой магнитометр с СТМР датчиком, упоминающийся в работе [42], имеет разрешение 1 мкТл и линейный диапазон выше 1 мТл [23].

Достоинствами СТМР датчиков являются малые габариты и, следовательно, высокая пространственная разрешающая способность, низкое энергопотребление, возможность работы в широком диапазоне температур, долговечность, низкая стоимость [23].

К недостаткам СТМР датчиков относятся невысокая чувствительность, нелинейность в широком диапазоне измерений, высокий уровень шума и тепловыделение.

### 1.3 ЯМР датчики

Для поиска объектов из ферромагнетиков широкое распространение получили квантовые приборы, основанные на эффекте ядерного магнитного резонанса, эффекте Зеемана и Оверхаузера [43].

Ядерный магнитный резонанс возникает вследствие поглощения или излучения электромагнитной энергии веществом, помещенным во внешнее магнитное

поле и содержащим ядра с ненулевым спином, и обусловлено переориентацией магнитных моментов ядер относительно направления магнитной индукции.

Поскольку ориентации магнитных моментов ядер носит дискретный характер, то изменение ориентации, а следовательно, и изменение энергии происходит скачкообразно [44].

Для возникновения резонанса необходимо создать избыточное количество частиц на одном из энергетических уровней. Этого можно добиться или облучением вещества электромагнитным полем, светом резонансной частоты или наложением сильного магнитного поля [44].

Датчики магнитного поля, основанные на ядерном магнитном резонансе (ЯМР), подразделяются на:

- с вынужденной ядерной прецессией;
- со свободной ядерной прецессией;
- с оптической накачкой.

### **1.3.1 Датчики с вынужденной ядерной прецессией**

ЯМР датчики с вынужденной ядерной прецессией работают следующим образом [1]. Образец с резонирующими ядрами помещается внутри катушки, которая питается от внешнего генератора. Условие резонанса наступает при совпадении частоты внешнего возбуждающего генератора с частотой прецессии ядер в измеряемом магнитном поле. Поэтому частота генератора меняется до тех пор, пока не совпадет с частотой прецессии ядер. Высокочастотная энергия, развиваемая катушкой, переводит ядра в возбужденное состояние. Часть энергии катушки поглощается образцом, что приводит к возникновению напряжения на ее концах.

Магнитометры, основанные на вынужденной прецессии ядер, применяются обычно для измерения полей с индукцией 0,025 Тл и выше. При этом измеряемое поле служит одновременно и поляризующим, т. е. создает начальную намагниченность. Поэтому при измерениях в более слабых полях амплитуда сигнала становится недостаточной и для увеличения сигнала ядерной индукции применяют

предварительную поляризацию вещества сильным магнитным полем.

### 1.3.2 Датчики со свободной ядерной прецессией

В ЯМР датчиках со свободной ядерной прецессией рабочее вещество помещается в приемную катушку, которая включена в перестраиваемый по частоте колебательный контур. Вспомогательное постоянное магнитное поле, более сильное, чем измеряемое, поляризует рабочее вещество в перпендикулярном рабочему полю направлении. После быстрого отключения вспомогательного магнитного поля моменты атомных ядер свободно прецессируют относительно направления измеряемого поля с экспоненциально убывающей в течение 2-3 с амплитудой. При этом в приемной катушке наводится ЭДС с частотой прецессии (называемой частотой Лармора), которая измеряется частотомером. Чувствительность протонных ЯМР датчиков со свободной прецессией в слабых однородных полях достигает 1 нТл [43].

В современных ЯМР датчиках со свободной ядерной прецессией для создания ядерной намагниченности применяют динамическую поляризацию ядер (эффект Оверхаузера). В качестве образца используют вещества, содержащие частицы как с ядерным, так и с электронным магнитным моментом. Динамическая поляризация ядер приводит к намагниченности, приблизительно в 500 раз большей статической ядерной намагниченности, и достигается наложением на образец переменного поля с частотой прецессии электронов.

Датчики с динамической поляризацией имеют преимущество с точки зрения их быстродействия, так как они позволяют наблюдать прецессию ядер (протонов) одновременно с процессом поляризации. Это оказывается возможным вследствие независимости образования продольной составляющей ядерной намагниченности и прецессионного движения поперечной составляющей вокруг измеряемой магнитной индукции.

Датчики на эффекте Оверхаузера достигают чувствительности до 0,01 нТл [45].

Особенностью всех датчиков со свободной ядерной прецессией является

дискретный характер измерений. Наиболее быстродействующие приборы позволяют осуществлять одно измерение за 0,2 с.

### 1.3.3 Датчики с оптической накачкой

Квантовые датчики с оптической накачкой основаны на изменении оптических свойств веществ под действием магнитного поля. Луч света определенной поляризации и направления, проходя через пары щелочного металла (цезий, калий, рубидий), вызывает поляризацию. Рабочее вещество перестает поглощать свет и становится более прозрачным. После этого происходит процесс деполяризации, при этом частота деполяризующего поля прямо пропорциональна магнитному полю.

Чувствительность квантовых датчиков тем выше, чем уже спектральная линия поглощения. Самую узкую спектральную линию поглощения (менее 1,0 нТл) имеют калиевые квантовые датчики. Коэффициент преобразования ларморовой частоты у датчиков данного типа составляет 7 Гц/нТл [46], а чувствительность достигает 10 фТл [30].

Главным достоинством ЯМР датчиков является высокая разрешающая способность, благодаря тому, что измерение магнитной индукции сводится к измерению одной из наиболее точно измеряемых физических величин .

К недостаткам магнитометров на основе ЯМР датчиков относятся большие размеры, высокая стоимость, чувствительность к механическим воздействиям, высокая потребляемая мощность. Кроме того ЯМР датчики имеют низкое быстродействие и ограниченный температурный диапазон.

Следует отметить, что ЯМР датчики не имеют оси чувствительности, поэтому не могут давать информацию о направлении магнитного поля.

## 1.4 Сквиды

Сквидом (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device) называется высокочувствительное устройство для преобразования магнитного потока в электрический сигнал постоянного или переменного тока, действие которого основано

на явлении квантования магнитного потока в сверхпроводящем кольце с включёнными в него контактами Джозефсона.

Существуют два типа сквидов: сквид на постоянном токе и высокочастотный сквид. Сквид, состоящий из двух джозефсоновских контактов, включенных параллельно в замкнутый сверхпроводящий контур и работающих при постоянном токе смещения, называется сквидом на постоянном токе. Высокочастотный сквид работает на переменном токе и имеет только один джозефсоновский контакт.

Внешний вид сквида на постоянном токе изображен на рисунке 1.5. Приложенный постоянный ток в сверхпроводящем кольце сквида разделяется на два равных по амплитуде тока, каждый из которых проходит через соответствующий джозефсоновский контакт, после чего токи суммируются. Если внешнее магнитное поле отсутствует, то оба тока будут равны. При наличии магнитного поля в контуре будет наводиться циркулирующий сверхпроводящий ток. Этот ток в одном из джозефсоновских контактов будет вычитаться из постоянного внешнего тока, а во втором суммироваться с ним. Таким образом, две ветви будут иметь разные токи, и между джозефсоновскими контактами возникнет разность фаз [14].

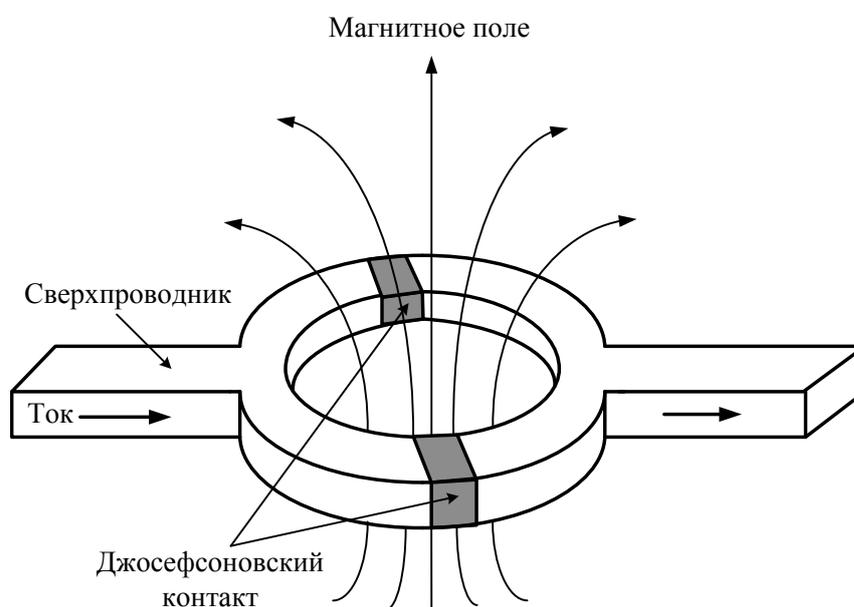


Рисунок 1.5 – Внешний вид сквида

Работа сквида на переменном токе основана на нестационарном эффекте Джозефсона и использует только один джозефсоновский контакт. Кольцо сквида

индуктивно связано с колебательным контуром, который запитан от внешнего генератора тока. При наличии магнитного поля в сквиде возникает экранирующий ток, который создает собственный магнитный поток, частично компенсирующий внешнее магнитное поле. Измеряется падение напряжения на колебательном контуре, которое прямо пропорционально изменению магнитного поля. [47].

Высокочастотный сквид менее чувствителен по сравнению со сквидом на постоянном токе, имеет более высокий уровень шума, но дешевле и проще в изготовлении [48].

Если подать на сквид постоянный ток смещения, то при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, напряжение на выходе сквида будет периодически изменяться, как показано на рисунке 1.6.

Период изменения напряжения равен кванту  $\Phi_0$  магнитного потока. Таким образом, сквиды измеряют только изменение поля, а не его абсолютное значение [23].

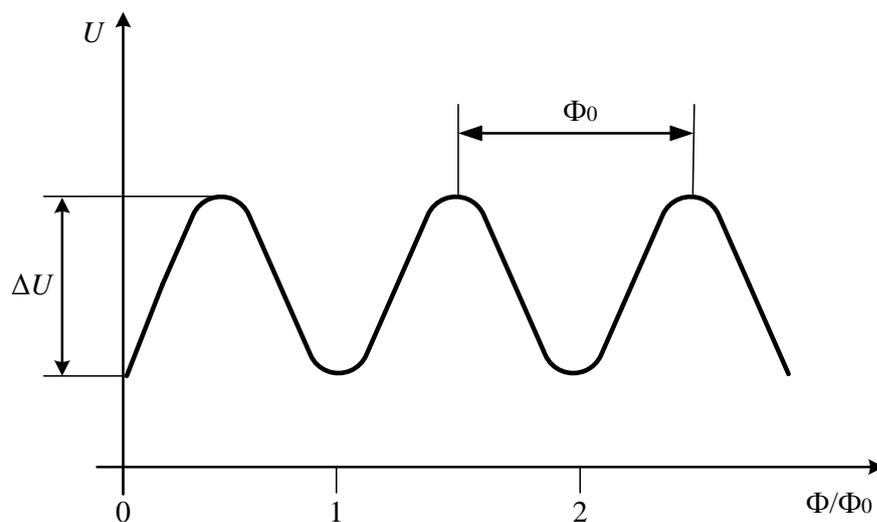


Рисунок 1.6 – Зависимость напряжения на контакте в зависимости от магнитного потока через контур.

Поскольку даже при небольшом изменении магнитного потока на выходе сквида возникает напряжение, основное использование сквида – измерение слабых магнитных полей. Чувствительность сквида достигает 1 фТл. Однако, при сильно или быстро изменяющемся магнитном поле рабочая точка сквида может

перескочить на соседнюю ветвь вольт-поточковой характеристики, вызывая сбой. При этом меняется постоянное смещение на выходе сквид-электроники и теряется информация о величине магнитного поля [49].

Так, как сверхпроводящие свойства сильно зависят от температуры, основные параметры сквида также являются температурозависимыми. При низких температурах снижается уровень шума сквида. Поскольку обычно для охлаждения сквида используется криогенная жидкость, внешнее давление и перепады давления могут изменить температуру криогена, а вместе с ней и параметры сквида. Например, при внешнем давлении в 760 мм рт.ст. изменение давления на 1 мм рт.ст. эквивалентно увеличению температуры жидкого гелия на 1,5 мК, а температуры жидкого азота на 11 мК [1].

Сверхпроводимость разрушается и в сильном магнитном поле, поэтому обычно сквиды работают в магнитном поле Земли или в полях меньше 60 мТл. В последние годы был достигнут значительный технологический прогресс в разработке сквидов на основе высокотемпературных сверхпроводников. В настоящее время лучшие образцы таких высокотемпературных сквидов по чувствительности ненамного уступают своим низкотемпературным аналогам [50].

Уровень шума низкотемпературных сквидов с концентраторами потока может быть ниже  $1 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ . А высокотемпературные сквиды могут иметь шум  $36 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$  [23].

Сам сквид может быть небольших размеров, но потребность в криогенной установке делает всю конструкцию магнитометра громоздкой и тяжелой. Потребляемая мощность сквида почти полностью обусловлена наличием электроники считывания измерительной информации и составляет несколько ватт [30].

Следовательно, достоинствами сквидов являются высокая чувствительность и низкий уровень шумов.

К недостаткам относится необходимость в специальном оборудовании, и дополнительном экранировании, ограниченные размеры измерительного объема, высокая стоимость.

## 1.5 Феррозондовые преобразователи

Феррозондовые преобразователи или феррозонды являются разновидностью ферроиндукционных преобразователей [51]. Чувствительным элементом в ферроиндукционных преобразователях является сердечник из ферромагнитного материала. Распространение получили три типа ферроиндукционных преобразователей отличающихся способом возбуждения (механическим, тепловым и магнитным) – рисунок 1.7.

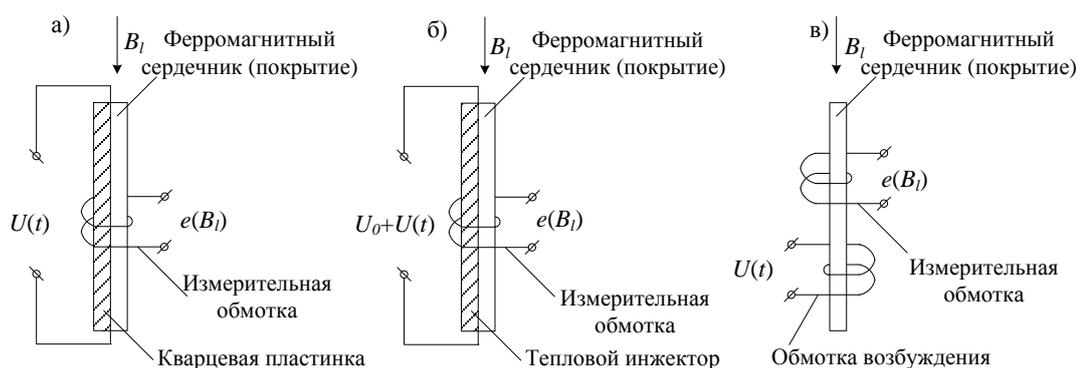


Рисунок 1.7 – Ферроиндукционные преобразователи с механическим (а), тепловым (б) и магнитным (в) возбуждением

Преобразователь с механическим возбуждением (рисунок 1.7-а) представляет собой кварцевую пластинку с ферромагнитным покрытием (например, в виде тонкой пермаллоевой пленки), на который надета измерительная катушка. Кварцевая пластинка при воздействии на нее электрического напряжения резонансной частоты периодически удлиняется, механически воздействуя на пленку. В результате магнитная проницаемость пленки изменяется во времени, что приводит к возникновению ЭДС в измерительной катушке. Эта ЭДС пропорциональна компоненте вектора магнитной индукции  $B$ , совпадающей с продольной осью пластинки и катушки.

Такой преобразователь имеет сравнительно низкую чувствительность из-за незначительного изменения магнитной проницаемости.

В преобразователе с тепловым возбуждением (рисунке 1.7-б) в измерительную катушку помещен малоинерционный тепловой инжектор,

находящийся в непосредственном контакте с тонкой ферромагнитной пластинкой или пленкой, выполненной из материала с низкой точкой Кюри. При подаче на инжектор постоянного тока, сердечник нагревается до температуры, близкой к точке Кюри. При этом его магнитная проницаемость резко возрастает в соответствии с эффектом Гопкинсона. После подачи на инжектор переменного тока магнитная проницаемость сердечника изменяется с удвоенной частотой, приводя к возникновению в измерительной катушке ЭДС, пропорциональной измеряемой компоненте вектора магнитной индукции  $B$ .

Такой преобразователь имеет достаточно высокую чувствительность, но требует наличия материала с малой тепловой инерционностью.

Преобразователь с магнитным возбуждением (рисунок 1.7-в) представляет собой так называемый *феррозонд* (fluxgate). Феррозонд – это устройство, чувствительное к внешним магнитным полям, главным образом постоянным и медленно изменяющимся, содержащее один или два ферромагнитных сердечника и обмотки, распределенные по их длине [52-53], следует отметить, что в настоящее время существуют феррозонды для измерения магнитной индукции высокой частоты [54].

Информационный сигнал феррозонда содержит данные об амплитуде, частоте и направлении действия вектора измеряемого магнитного поля [23].

Принцип действия феррозонда основан на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот [51]. Простейший феррозонд (см. рис 1.7-в) представляет собой ферромагнитный стержень с расположенными на нем катушкой возбуждения, питаемой переменным током, и измерительной катушкой. В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля, создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу (рисунок 1.8-а).

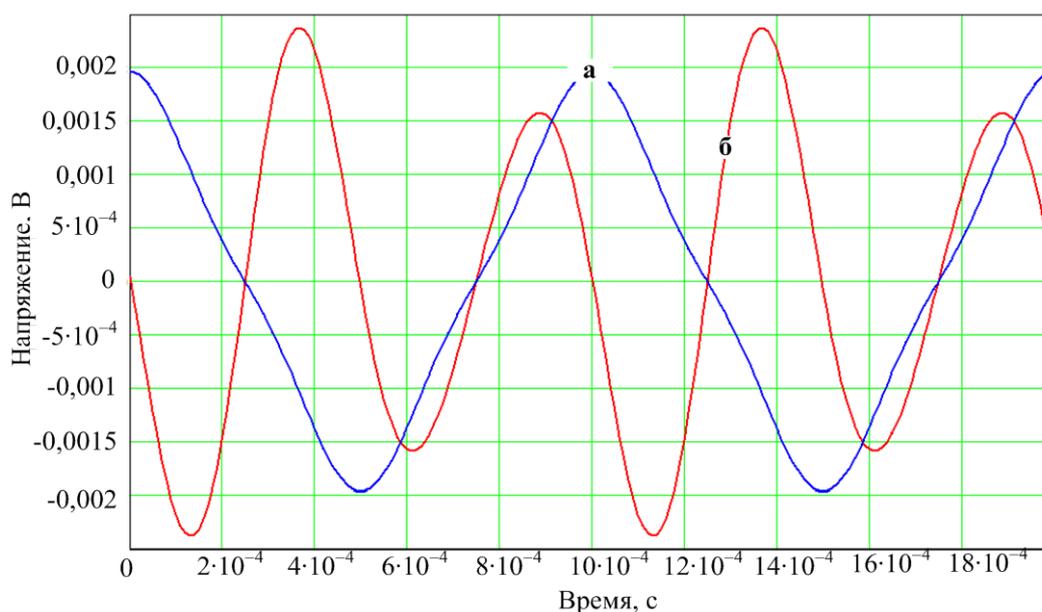


Рисунок 1.8 – Напряжения на обмотке возбуждения (а) и в измерительной обмотке феррозонда (б)

Изменение магнитного потока, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. При воздействии на сердечник измеряемого (постоянного или слабо меняющегося) магнитного поля кривая перемагничивания изменяет свои размеры и форму и становится несимметричной, что приводит к изменению величины и гармонического состава ЭДС в измерительной катушке (рисунок 1.8-б). В частности, появляются *четные гармонические составляющие ЭДС, величина которых прямо пропорциональна напряженности измеряемого поля* и которые отсутствуют при симметричном цикле перемагничивания.

По принципу работы феррозонд схож с принципом работы магнитного усилителя, но в отличие от последнего феррозонд содержит не управляемую электрическую цепь, а магнитную – в виде сердечника из ферромагнитного материала, намагничиваемого измеряемым полем. Напряженность магнитного поля является векторной величиной, причем намагниченность сердечников зависит не только от их ориентации, но и от соотношения продольных и поперечных размеров. Поэтому феррозонд характеризуется диаграммой

направленности, благодаря чему он может быть использован для измерения компонент вектора магнитной индукции и углов.

На рисунке 1.9 представлена типовая структурная схема магнитометра на основе феррозондового преобразователя [55].



Рисунок 1.9 – Типовая структурная схема феррозондового магнитометра

Для возбуждения преобразователя сигнал синусоидальной формы подается с генератора тока на обмотку возбуждения феррозонда, с выхода измерительной обмотки феррозонда сигнал, содержащий информацию об измеряемом магнитном поле, усиливается усилителем и подается на избирательный усилитель или синхронный детектор, настроенный на частоту второй гармоники сигнала возбуждения. Выделенный сигнал фильтруется фильтром нижних частот и поступает на регистрирующий прибор, измеряющий постоянное напряжение и проградуированный в единицах измерения магнитной индукции.

Наличие естественной диаграммы направленности выгодно отличает феррозонды от ядерно-прецессионных и квантовых датчиков (см. п. 1.3), которые обеспечивают более высокую точность измерений, но непосредственно измеряют модуль вектора магнитной индукции. Они могут приобретать диаграмму направленности только за счет наложения вспомогательного поля заранее известного направления и величины, что приводит к дополнительным погрешностям, снижению надежности и увеличению габаритов.

В России значительный вклад в разработку и создание феррозондов внесли М.А. Розенблат, Ю.В. Афанасьев, Р.И. Янус, Ю.Ф. Понаморев и др. Среди зару-

бежных ученых следует отметить G. Goubau, H. Aschenbrener, F. Forster, P. Ripka и др.

Феррозондовые датчики используются для различных магнитных измерений с конца 30-х годов 20-ого столетия [56]. Первые датчики представляли собой громоздкие приборы, намотанные на сердечнике из отожженного железа [51]. По мере совершенствования феррозондов изменялись материалы сердечников и совершенствовались конструкции и схемы датчиков. На рисунке 1.10 типовые современные феррозондовые преобразователи FGM-3 компании Speake & Co [57], их размер составляет 62×16 мм. Данные преобразователи используются, например, в магнитометрах для поиска скрытых ферромагнитных объектов под землей [58]



Рисунок 1.10 – Феррозондовые преобразователи FGM-3

Современные феррозондовые преобразователи позволяют измерять магнитную индукцию в диапазоне от 100 пТл до 1 мТл на частотах до 20 МГц, имеют уровень собственных шумов до  $9 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$  и нелинейность функции преобразования на уровне до 0,001 %. Диапазон рабочих температур может достигать от минус 180 °С до 220 °С [59].

По сравнению с АМР датчиками к недостаткам феррозондов можно отнести большие габариты, большую потребляемую мощность и тепловыделение.

Для минимизации данных недостатков, всегда существовало стремление к миниатюризации феррозондового датчика. Для этого применяют следующие

технологии:

- 1) КМОП-датчики;
- 2) датчики с микросоленоидами;
- 3) устройства на печатной плате с катушками, изготовленными с помощью дорожек и межслойных отверстий (так называемые планарные феррозонды).

**КМОП-датчики.** КМОП-феррозонды изготавливаются по технологии интегральных схем. Такой подход ведет к снижению потребляемой мощности до уровня АМР датчиков и уменьшения стоимости датчика. Феррозонд, выполненный по интегральной технологии, показан на рисунке 1.11 [60-61].

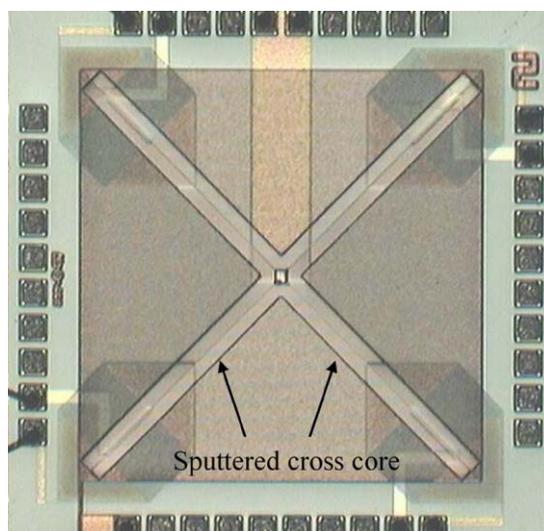


Рисунок 1.11 – КМОП-феррозонд

Использование интегральной технологии позволяет создавать феррозондовые датчики с цифровым выходом за счет замены аналогового синхронного детектора и фильтра нижних частот на их цифровые аналоги и использования аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Однако, при изготовлении феррозондовых датчиков по этой технологии требуется напыление ферромагнитного материала сердечника. Процесс создания ферромагнитных пленок высокого качества с высокой магнитной проницаемостью сложен и требует специального дорогостоящего оборудования. Материал сердечника должен располагаться в одном из внутренних слоев, что

снижает воспроизводимость и надежность подобных структур. Неоднородность структуры напыленного сердечника приводит к росту собственных шумов и ухудшению линейности преобразования.

В работе [62] приводится описание КМОП-феррозонда имеющего коэффициент преобразования 92 В/Тл, уровень собственных шумов 15 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и потребляемую мощность 10 мВт. В работе [63] приводится КМОП-феррозонд с коэффициентом преобразования 450 В/Тл, уровнем собственных шумов 7,4 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и нелинейностью преобразования 1,15 % в диапазоне  $\pm 50$  мкТл, потребляемая мощность 13,7 мВт.

Катушки в КМОП-феррозондах имеют принципиально большое сопротивление [23], сотни и тысячи Ом [60], и следовательно большое тепловыделение, такого недостатка лишены датчики с микросоленоидами.

*Датчики с микросоленоидами.* Датчики с микросоленоидами изготавливаются по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) с использованием ультрафиолетовой литографии для создания катушек и электроосаждения для создания сердечника [64]. На рисунке 1.12 представлен МЭМС-феррозонд описанный в работе [65].

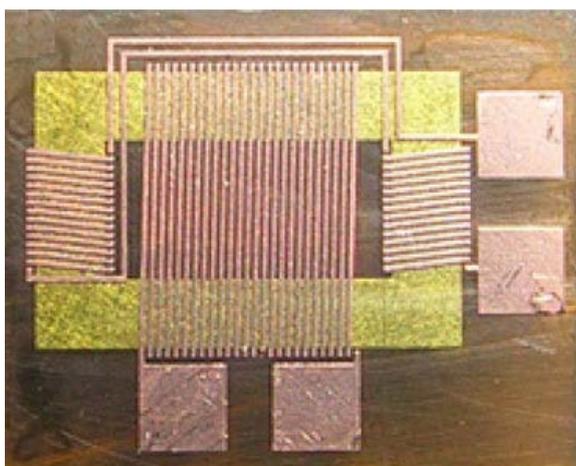


Рисунок 1.12 – МЭМС-феррозонд

В работе [66] приводятся характеристики созданного МЭМС-феррозонда: коэффициент преобразования 650 В/Тл, уровень собственных шумов 32 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ,

потребляемая мощность 14 мВт. Катушка возбуждения содержит 56 витков и имеет сопротивление 2 Ом, измерительная катушка состоит из 11 витков. Достигнута разрешающая способность 1 мкТл, что хуже лучших АМР датчиков.

Изготовление КМОП- и МЭМС-феррозондов требует наличие дорогостоящего специализированного оборудования и высокой квалификации специалистов. Другой перспективной технологией для производства феррозондовых датчиков является технология печатных плат, по ней изготавливают так называемые планарные феррозонды.

***Планарные феррозонды.*** Технология печатных плат давно используется для создания различных датчиков, например тензодатчиков, акселерометров и т.д. В 90-е годы появился первый опыт изготовления с помощью этого метода феррозондовых датчиков [67-68]. Для создания планарных феррозондов наиболее часто используется субтрактивная технология изготовления печатных плат. В этой технологии используются диэлектрические материалы, ламинированные медной фольгой с добавлением ферромагнитного материала, топология катушек возбуждения и измерительных катушек на печатных платах формируется с помощью фотолитографического процесса, затем с помощью химического травления окончательно создается сеть проводников. Обычно используются фольгированные с двух сторон материалы, многослойные платы получают путем склеивания двухслойных плат с прослойкой клеящегося диэлектрического материала – препрега. Для создания межслойных соединений между катушками в платах создаются металлизированные отверстия (vias).

Топология сердечника формируется аналогично топологии катушек с помощью фотолитографии и травления. Так как при таком подходе не происходит напыления, механической или термической обработки материала сердечника, он сохраняет свои характеристики.

Современная технология производства печатных плат позволяет изготавливать проводники шириной 25 мкм и с таким же расстоянием между

проводниками. Таким образом, современная технология позволяет создавать многослойные печатные платы с высокой плотностью проводников.

Планарные феррозонды характеризуются низким уровнем собственных шумов, высокой температурной стабильностью и достаточно высокой размещающей способностью [23, 69-70].

На рисунке 1.13 показан внешний вид прототипа планарного феррозонда [71]

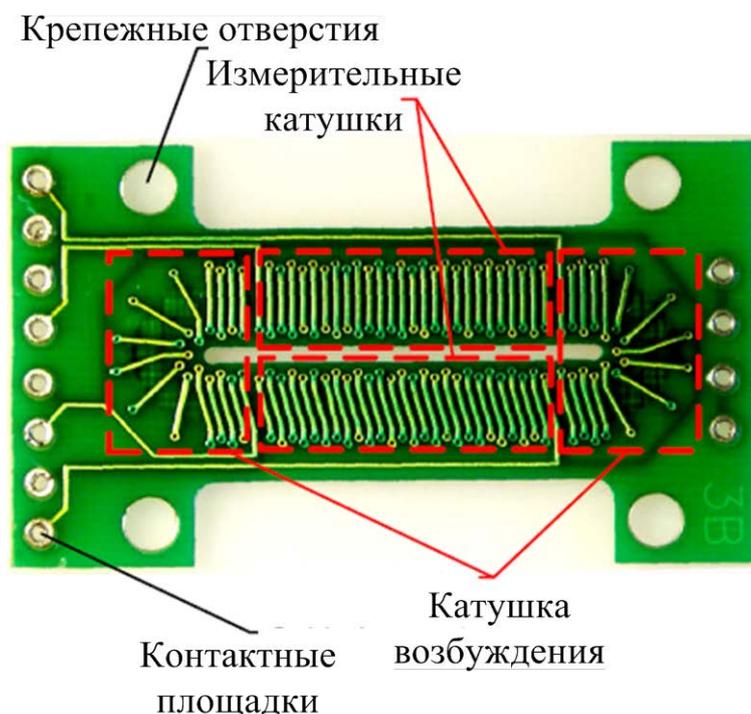


Рисунок 1.13 – Планарный феррозонд

Данный планарный феррозонд обладает следующими характеристиками: коэффициент преобразования  $241 \text{ В/Тл}$ , уровень собственных шумов  $0,71 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$  и нелинейностью преобразования  $0,17 \%$  в диапазоне  $\pm 100 \text{ мкТл}$ , потребляемая мощность менее  $5 \text{ мВт}$ . Катушка возбуждения содержит 30 витков и имеет сопротивление  $0,86 \text{ Ом}$ , измерительная катушка состоит из 54 витков и имеет сопротивление  $1,28 \text{ Ом}$ . Разрешающая способность около  $100 \text{ нТл}$ .

По сравнению с другими технологиями (намоточной, интегральных схем, и МЭМС) технология печатных плат позволяет создавать миниатюрные датчики нужной топологии высокого качества. На рисунке 1.14 показаны различные топологии планарных феррозондовых датчиков [72].

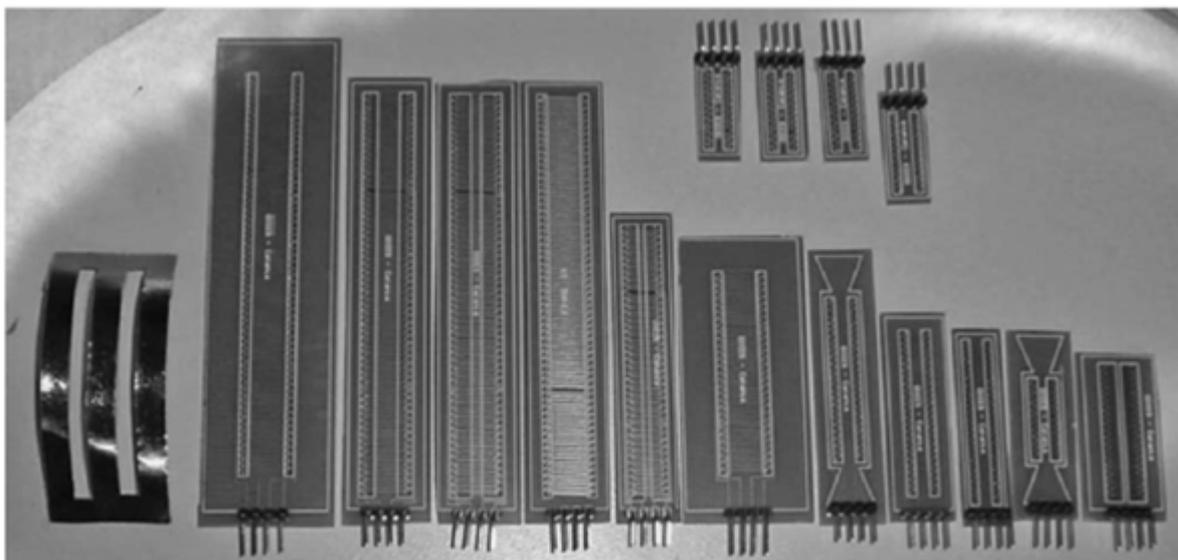


Рисунок 1.14 – Топологии планарных феррозондов

Планарные феррозонды имеют меньшую чувствительность по сравнению с традиционными намоточными феррозондовыми преобразователями, но обладают гораздо меньшими энергопотреблением и тепловыделением, являются миниатюрными, более технологичны и просты в изготовлении.

### 1.6 Сравнительные характеристики датчиков магнитных полей

Проведенный обзор современных датчиков для измерения слабых постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей показал, что для решения задач магнитометрии высокого разрешения в составе систем навигации, ориентации и стабилизации, в комплексах для поиска и отслеживания магнитных аномалий наиболее подходящими являются магниторезистивные АМР датчики и феррозондовые преобразователи. АМР датчики нечувствительны к направлению поля и имеют большие габариты.

Сквиды требуют дорогостоящего специального вспомогательного оборудования, экранирования и имеют высокую стоимость.

В таблице 1.1 приведены основные характеристики коммерчески доступных АМР датчиков и феррозондовых преобразователей для измерения слабых

магнитных полей, используемых в системах ориентации, стабилизации, навигации [73-76].

Таблица 1.1 – Характеристики АМР датчиков и феррозондовых преобразователей

Тип датчика, производитель	HMC1001, Honeywell	KMZ51, Philips Semiconductors	TFM100-G2, Billingsley Aerospace & Defense	Mag-01, Bartington Instruments
Диапазон измерений	$\pm 300$ мкТл	$\pm 300$ мкТл	$\pm 100$ мкТл	$\pm 200$ мкТл
Разрешающая способность	27 нТл	н/д	н/д	10 нТл
Линейность	1 %	0.004 %	0.002 %	0,01 %
Температурная погрешность	0.06 %/К	0.002 %/К	0.002 %/К	0.001 %/К
Смещение	$< 10$ мкТл	$< 1$ мкТл	$< 10$ нТл	$< 5$ нТл
Шум	10 нТл	10 нТл	$< 100$ пТл	$< 100$ пТл
Гистерезис	300 нТл	10 нТл	$< 1$ нТл	$< 1$ нТл
Рабочая полоса частот	100 кГц	100 Гц	3,5 кГц	10 Гц
Энергопотребление	30 мВт	100 мВт	350 мВт	16 мВт
Количество измерительных осей	1	1	3	1
Габаритные размеры, мм	12×10×1,3	5×4×1,3	82×35×32	62×8×8

Из данных таблицы 1.1 следует, что по совокупности рассматриваемых характеристик феррозондовые преобразователи являются наиболее оптимальными для создания магнитометров для измерения слабых постоянных магнитных полей при использования в составе систем ориентации, стабилизации, навигации, в комплексах для поиска ферромагнитных объектов и др.

Современный этап развития феррозондовых магнитометров характеризуется значительной интенсивностью исследований, направленных на дальнейшее повышение чувствительности феррозондов, снижение энергопотребления и тепловыделения, уменьшения габаритов, повышения рабочего диапазона температур, совершенствования технологий производства [68, 77-86].

Совершенствование феррозондовых магнитометров может осуществляться по трем основным направлениям:

- 1) оптимизация конструкции датчика, подбор формы сердечника и расположения обмоток;
- 2) тщательный подбор материала сердечника;
- 3) выбор оптимальных амплитуды, частоты, формы сигнала возбуждения и алгоритмов обработки измерительной информации с выхода датчика.

### **1.7 Выводы к главе 1**

1. Проведенный обзор современных датчиков для измерения слабых постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей показывает, что по совокупности рассматриваемых характеристик феррозондовые преобразователи и магнитометры на их основе являются наиболее предпочтительными для измерения слабых постоянных магнитных полей и использования в составе систем ориентации, стабилизации, навигации, в комплексах для поиска ферромагнитных объектов.

2. В отечественных и зарубежных публикациях отсутствуют аналитические выражения, описывающие работу феррозондов независимо от формы сигнала возбуждения и способа аппроксимации средней кривой намагничивания сердечника для анализа чувствительности на любой из гармоник.

3. Одно из основных направлений совершенствования феррозондовых магнитометров является повышение чувствительности, которое может осуществляться за счет выбора оптимальных амплитуды, частоты, формы сигнала возбуждения и алгоритмов обработки измерительной информации с выхода датчика.

4. В ходе диссертационной работы должны быть проведены разработка, исследование, аппаратно-программная реализация и экспериментальная апробация магнитометра на основе феррозондового датчика с повышенной чувствительностью для измерения слабых магнитных полей. Для достижения этой цели будут решены следующие задачи:

- 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.
- Анализ работы феррозондовых преобразователей с учетом формы сигнала возбуждения и способа аппроксимации средней кривой намагничивания и поиск путей повышения чувствительности измерения магнитной индукции.
- Разработка, изготовление и апробация магнитометра на основе феррозондового датчика для измерения слабых магнитных полей с повышенной чувствительностью.
- Разработка и изготовление источника (меры) магнитной индукции постоянного поля для калибровки магнитометра на основе феррозондового датчика.

## ГЛАВА 2

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ФОРМЫ СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ

В данной главе рассмотрены вопросы повышения чувствительности феррозондовых преобразователей. Проведен математический анализ работы дифференциальных феррозондовых преобразователей с разомкнутым сердечником в зависимости от формы сигнала возбуждения. Предложена обобщенная математическая модель феррозондового преобразователя для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда и чувствительности на любой из гармоник независимо от формы сигнала возбуждения. Предложена процедура обработки сигналов с феррозондового датчика для повышения чувствительности измерения магнитной индукции.

#### 2.1 Основные термины

Рассматривая характеристики феррозондовых преобразователей, следует обратить внимание на различие терминов *чувствительность*, *разрешающая способность* и *точность*. Будем пользоваться терминологией, приведенной в стандарте РМГ 29-2013 [87], где даны следующие определения:

- *чувствительность* – отношение изменения показаний средства измерений (феррозондового магнитометра) к вызывающему его изменению величины (магнитной индукции);
- *разрешающая способность* – показывает, какое минимальное отклонение измеряемой величины (магнитной индукции) может быть зарегистрировано средством измерений (магнитометром);
- *точность* – близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины.

Как было показано в главе 1, работа феррозонда обусловлена наличием двух магнитных полей: постоянного или переменного измеряемого поля и вспомога-

тельного поля возбуждения созданного переменным током, протекающим по обмотке возбуждения.

Для совершенствования характеристик феррозондовых преобразователей необходимо провести математическое моделирование и получить аналитическое описание их работы.

## 2.2 Математическая модель феррозондового преобразователя

### 2.2.1 Одностержневой преобразователь

Рассмотрим работу простейшего одностержневого феррозонда для измерения постоянного магнитного поля, внешний вид которого приведен на рисунке 2.1.

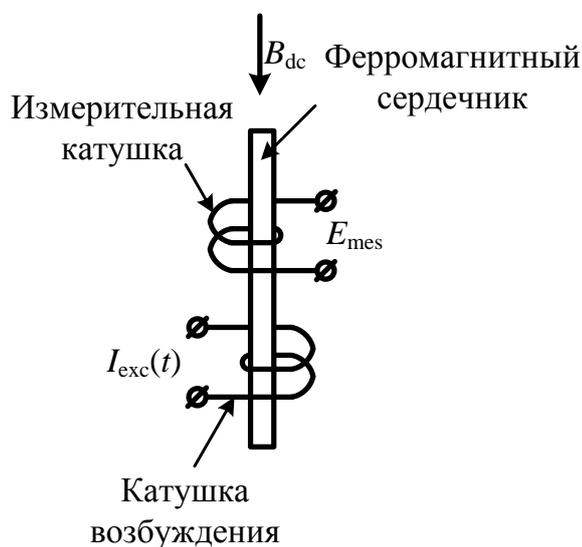


Рисунок 2.1 – Одностержневой феррозонд

При наличии переменного поля возбуждения  $H_{\text{exc}}(t)$ , охватывающего сердечник, и измеряемого постоянного поля  $H_{\text{dc}}$ , направленного вдоль сердечника, как показано на рисунке 2.1, в объеме сердечника действует суперпозиция напряженностей этих полей:

$$H_{\Sigma}(t) = H_{\text{dc}} + H_{\text{exc}}(t), \quad (2.1)$$

тогда индукция магнитного поля в сердечнике будет определяться в соответствии с выражением:

$$B(t) = f(H_{\Sigma}(t)) = f(H_{\text{dc}} + H_{\text{exc}}(t)). \quad (2.2)$$

ЭДС, индуцированная в измерительной (вторичной) обмотке феррозонда (см. рис. 2.1) определяется в соответствии с выражением:

$$E_{\text{мес}}(t) = -sw_2 \frac{d}{dt} B(t), \quad (2.3)$$

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

$w_2$  – число витков в измерительной обмотке феррозонда.

В первом приближении (без учета анизотропных и гистерезисных явлений в магнитном сердечнике) магнитную индукцию  $B(H)$ , действующую внутри однородно намагничиваемого сердечника, обычно рассчитывают с использованием функции намагничивания сердечника [88-90].

Для случая, когда сердечник подвергается периодическому перемагничиванию, хорошие результаты совпадения теории и эксперимента при анализе работы феррозондов получают, когда используют среднюю кривую намагничивания [44], которая рассчитывается по следующей формуле:

$$B(H) = (B \uparrow (H) + B \downarrow (H)) / 2. \quad (2.4)$$

В (2.4) стрелками обозначены значения индукции на восходящем и нисходящем участках гистерезисных петель.

Использование средней кривой намагничивания, а не основной, обусловлено тем, что оптимальным режимом работы феррозонда является перемагничивание сердечника по предельной петле гистерезиса, восходящая и нисходящая ветви которой незначительно отличаются от средней кривой.

При этом для анализа работы феррозонда используют два метода: графоаналитический и на основе аппроксимации средней кривой намагничивания сердечника степенным полиномом [91-93]. Графоаналитический метод позволяет только качественно проанализировать работу преобразователя, количественный анализ проводят с помощью второго метода.

Так как средняя кривая намагничивания является нечетной функцией, она может быть аппроксимирована полиномом нечетных степеней:

$$B = \sum_{i=1}^j a_{2i-1} H^{2i-1}, \quad (2.5)$$

где  $a_i$  –  $i$ -ый коэффициент аппроксимации.

Традиционно при анализе работы феррозонда зависимость  $B$  от  $H$  аппроксимируется полиномом третьего порядка [89, 94]:

$$B = a_1 H + a_3 H^3. \quad (2.6)$$

Тогда на основе выражения (2.2) с учетом (2.6) получим зависимость индукции магнитного поля в сердечнике:

$$B(t) = a_1 H_{dc} + a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 + 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) + a_3 H_{exc}^3(t). \quad (2.7)$$

Если феррозонд возбуждается переменным током синусоидальной формы  $I_{exc}(t) = I_{exc.m} \sin(\omega t)$ , то выражение для напряженности поля возбуждения можно записать как:

$$H_{exc}(t) = H_{exc.m} \sin(\omega t) = \frac{w_1}{l} I_{exc.m} \sin(\omega t), \quad (2.8)$$

где  $I_{exc.m}$  – амплитуда тока возбуждения, А;

$w_1$  – число витков в обмотке возбуждения феррозонда;

$l$  – длина намотки обмотки возбуждения феррозонда, м;

$\omega$  – частота тока возбуждения, рад/с.

Подставляя выражение (2.7) в (2.3) с учетом (2.8) получим выражение для ЭДС в измерительной обмотке одностержневого феррозонда:

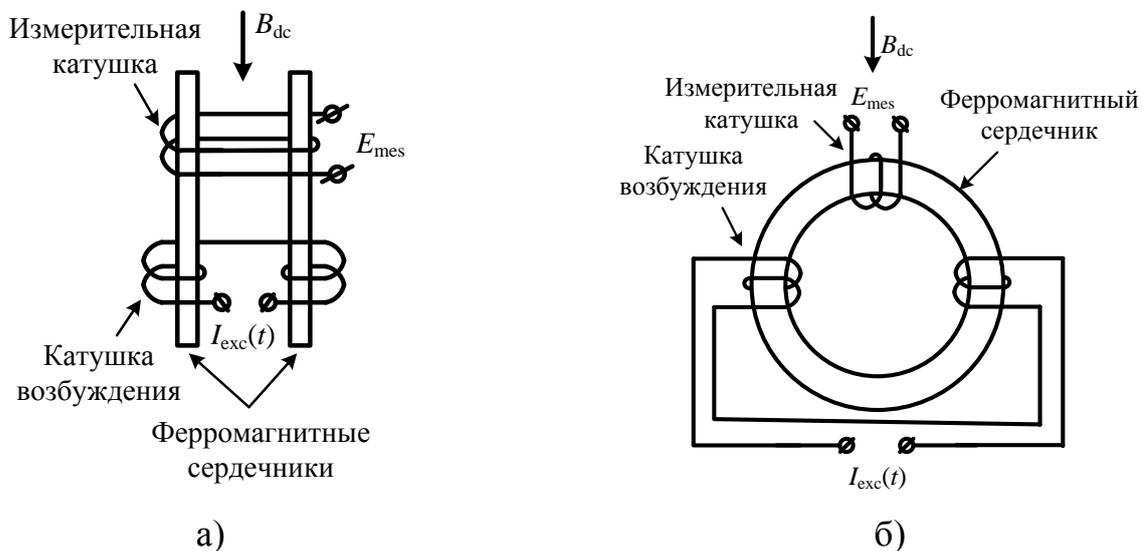
$$E_{mes}(t) = \left[ \left( a_1 + 3a_3 H_{dc}^2 + \frac{3a_3 H_{exc.m}^2}{4} \right) \omega H_{exc.m} \cos(\omega t) + \right. \\ \left. + 3a_3 \omega H_{dc} H_{exc.m}^2 \sin(2\omega t) + \frac{3a_3 \omega H_{exc.m}^3 \cos(3\omega t)}{4} \right] s w_2. \quad (2.9)$$

Из выражения (2.9) видно, что полезная составляющая пропорциональная измеряемой индукции постоянного магнитного поля содержится на частоте возбуждения  $\omega$  и на удвоенной частоте возбуждения  $2\omega$ . При этом на частоте  $3\omega$  в выходном сигнале содержится помеха. Таким образом, для выделения в выходном сигнале одностержневого феррозонда полезной составляющей, пропорциональ-

ной измеряемой индукции постоянного магнитного поля, необходима сложная схема на основе полосовых фильтров или синхронных детекторов (СД). Например, при применении методов синхронного детектирования для обеспечения максимальной чувствительности такого феррозонда необходимо использовать схему с четырьмя СД. Первые два СД детектирует синфазную и квадратурную составляющие в выходном сигнале на частоте возбуждения  $\omega$ , а вторые два СД на удвоенной частоте возбуждения  $2\omega$ .

### 2.2.2 Дифференциальный преобразователь

Вследствие выше перечисленных причин на практике одностержневые феррозонды практически не применяются. Широкое распространение получил дифференциальный феррозонд как с разомкнутым сердечником (двухстержневой), так и с замкнутым (тороидальным) сердечником. Внешний вид дифференциальных феррозондов приведен на рисунке 2.2 [52, 67, 95-97].



а) – с разомкнутым сердечником; б) – с замкнутым сердечником.

Рисунок 2.2 – Дифференциальные феррозонды

Рассмотрим работу дифференциального феррозонда с разомкнутым сердечником при измерении постоянного магнитного поля. Такой феррозонд содержит две обмотки возбуждения, включенные встречно. Таким образом, протекающий по ним ток возбуждения  $I_{exc}(t)$  создает в объеме каждого сердечника напряжен-

ность магнитного поля (поля возбуждения)  $H_{exc}(t)$ . Эти поля характеризуются одинаковой амплитудой, но действуют в противофазе. При наличии измеряемого постоянного поля  $H_{dc}$  направленного вдоль сердечника (см. рисунок 2.2) в объеме сердечников действуют суперпозиции напряженностей этих полей:

$$\begin{aligned} H_{\Sigma 1}(t) &= H_{dc} + H_{exc}(t); \\ H_{\Sigma 2}(t) &= H_{dc} - H_{exc}(t), \end{aligned} \quad (2.10)$$

Если принять сердечники идентичными, тогда индукции магнитного поля в сердечниках без учета явления гистерезиса и анизотропии будут определяться в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} B_1(t) &= f(H_{\Sigma 1}(t)) = f(H_{dc} + H_{exc}(t)); \\ B_2(t) &= f(H_{\Sigma 2}(t)) = f(H_{dc} - H_{exc}(t)). \end{aligned} \quad (2.11)$$

ЭДС, индуцированная в измерительной (вторичной) обмотке феррозонда, которая охватывает оба сердечника (см. рис. 2.2), определяется в соответствии с выражением:

$$E_{mes}(t) = -sw_2 \left( \frac{d}{dt} (B_1(t) + B_2(t)) \right), \quad (2.12)$$

Тогда на основе (2.10) с учетом (2.6) получим зависимость индукции магнитного поля в сердечниках:

$$\begin{aligned} B_1(t) &= a_1 H_{dc} + a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 + 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) + a_3 H_{exc}^3(t); \\ B_2(t) &= a_1 H_{dc} - a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 - 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) - a_3 H_{exc}^3(t). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Если феррозонд возбуждается переменным током синусоидальной формы, то, подставляя (2.13) в (2.12) с учетом (2.8) получим выражение для ЭДС в измерительной обмотке феррозонда:

$$E_{mes}(t) = 6sw_2 a_3 \omega H_{dc} H_{exc.m}^2 \sin(2\omega t). \quad (2.14)$$

Таким образом, выходной сигнал дифференциального феррозонда, в отличие от однострежневого, содержит полезную составляющую, пропорциональную измеряемой индукции постоянного магнитного поля только на удвоенной частоте возбуждения  $2\omega$ .

Заметим, что традиционный анализ работы феррозондов с использованием полинома третьего порядка (см. выражение 2.6) является весьма упрощенным и позволяет проводить (как и графоаналитический метод) только качественный анализ. Для количественного анализа работы феррозонда воспользуемся аппроксимацией зависимости  $B$  от  $H$  полиномами более высокого порядка.

Проведем анализ работы дифференциального феррозонда, используя аппроксимационную зависимость  $B$  от  $H$  пятого порядка:

$$B = a_1 H + a_3 H^3 + a_5 H^5, \quad (2.15)$$

При возбуждении током синусоидальной формы, подставляя (2.15) в (2.12) с учетом (2.11) и (2.8) получим выражение для ЭДС в измерительной обмотке феррозонда:

$$E_{\text{mes}}(t) = sw_2 \omega \left[ -2H_{\text{dc}} H_{\text{exc.m}}^2 (3a_3 + 10a_5 H_{\text{dc}}^2 + 5a_5 H_{\text{exc.m}}^2) \sin(2\omega t) + 5a_5 H_{\text{dc}} H_{\text{exc.m}}^4 \sin(4\omega t) \right] \quad (2.16)$$

Аналогично, при использовании аппроксимационной зависимости  $B$  от  $H$  седьмого порядка (см. выражение 2.17):

$$B = a_1 H + a_3 H^3 + a_5 H^5 + a_7 H^7, \quad (2.17)$$

получим выражение для ЭДС в измерительной обмотке феррозонда (2.18):

$$E_{\text{mes}}(t) = sw_2 \omega \left[ -\frac{1}{8} H_{\text{dc}} H_{\text{exc.m}}^2 (48a_3 + 160a_5 H_{\text{dc}}^2 + 80a_5 H_{\text{exc.m}}^2 + 336a_7 H_{\text{dc}}^4 + 105a_7 H_{\text{exc.m}}^4 + 560a_7 H_{\text{dc}}^2 H_{\text{exc.m}}^2) \sin(2\omega t) + \frac{1}{2} H_{\text{dc}} H_{\text{exc.m}}^4 (10a_5 + 70a_7 H_{\text{dc}}^2 + 21a_7 H_{\text{exc.m}}^2) \sin(4\omega t) + \frac{-21}{8} a_7 H_{\text{dc}} H_{\text{exc.m}}^6 \sin(6\omega t) \right] \quad (2.18)$$

Из выражений (2.16 и 2.18) видно, что полезная составляющая, пропорциональная измеряемому постоянному магнитному полю, содержится в выходном сигнале не только на удвоенной частоте возбуждения  $2\omega$ , но и на частотах  $4\omega$  и  $6\omega$ .

Анализ выражений (2.16) и (2.18) позволяет предложить процедуру обработки сигналов с феррозондового датчика для повышения чувствительности феррозондов за счет измерения сигнала не только на удвоенной частоте возбуждения, но и на других четных частотах с последующим суммированием результатов измерений.

Следует отметить, что из анализа выражений (2.16) и (2.18) также видно, что возбуждение феррозонда синусоидальным сигналом и измерение выходного сигнала не только на удвоенной частоте возбуждения, но и на частотах  $4\omega$  и  $6\omega$  с последующим суммированием результатов измерений не принесет значительного эффекта из-за малости выходного сигнала на этих частотах.

На практике в магнитометрах на основе феррозондовых преобразователей в качестве сигнала возбуждения используется не только сигнал синусоидальной формы, но также прямоугольной и треугольной [78, 98-101].

Поэтому целесообразно получить общее выражение для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда независимо от формы сигнала возбуждения [102]. Для этого запишем выражение для напряженности поля возбуждения в тригонометрической форме ряда Фурье без постоянной составляющей:

$$H_{\text{exc}}(t) = H_{\text{exc.m}} \sum_{g=1}^m (b_g \cos(g\omega t) + c_g \sin(g\omega t)), \quad (2.19)$$

где  $g$  – номер гармоники в сигнале возбуждения;

$b_g, c_g$  – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

Подставляя (2.5) в (2.12) с учетом (2.11) и (2.19) получим результирующее выражение для выходной ЭДС:

$$E_{\text{mes}}(t) = -sw_2 H_q(t) \sum_{i=1}^j a_{2i-1} (2i-1) \left[ \left( H_{\text{dc}} + H_{\text{exc}}(t) \right)^{2i-2} - \left( H_{\text{dc}} - H_{\text{exc}}(t) \right)^{2i-2} \right]; \quad (2.20)$$

$$H_q(t) = \frac{dH_{\text{exc}}(t)}{dt} = \omega H_{\text{exc.m}} \sum_{g=1}^m (b_g \cos(g\omega t + \pi/2) + c_g \sin(g\omega t + \pi/2))g$$

На основе (2.20) получим выражение для чувствительности дифференциального феррозонда на *любой* из гармоник:

$$\begin{aligned}
 S_g &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{ET} \int_0^T \frac{dE_{\text{mes}}(t)}{dH_{\text{dc}}} \sin(g\omega t) dt = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{ET} \int_0^T -sw_2 H_q(t) \sum_{i=1}^j a_{2i-1} (2i-1)(2i-2) \left[ \left( H_{\text{dc}} + H_{\text{exc}}(t) \right)^{2i-3} - \right. \\
 &\quad \left. - \left( H_{\text{dc}} - H_{\text{exc}}(t) \right)^{2i-3} \right] \sin(g\omega t) dt.
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Выражение (2.21) позволяет аналитически рассчитать чувствительность дифференциального феррозонда на любой из гармоник независимо от спектрального состава сигнала возбуждения при заданной степени аппроксимации зависимости  $B = f(H)$ .

### 2.3 Выбор формы сигнала возбуждения

Сравним чувствительность дифференциального феррозондового преобразователя на второй, четвертой и шестой гармониках при возбуждении сигналами синусоидальной, прямоугольной и треугольной форм.

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

$$H_{\text{exc.s}}(t) = k_s H_{\text{exc.m}} \sum_{g=0}^m \frac{(-1)^g}{(2g+1)^2} \sin(\omega t(2g+1)), \tag{2.22}$$

где  $k_s$  – коэффициент равный  $4/\pi$ .

Аналогичное выражение при возбуждении сигналом формы имеет вид:

$$H_{\text{exc.t}}(t) = k_t H_{\text{exc.m}} \sum_{g=0}^m \frac{1}{(2g+1)^3} \sin(\omega t(2g+1)), \tag{2.23}$$

где  $k_t$  – коэффициент равный  $8/\pi^2$ .

Для качественного анализа чувствительности будем использовать укороченный полином третьей степени (2.6). При таком подходе чувствительность ферро-

зонда при возбуждении сигналом синусоидальной формы на второй гармонике равна:

$$|S_2| \approx 6sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2. \quad (2.27)$$

На четвертой и шестой гармониках чувствительности  $S_4 = S_6 = 0$ .

Подставляя выражение (2.23) в (2.21) с учетом (2.6), получим значения чувствительности на второй, четвертой и шестой гармониках при возбуждении сигналом треугольной формы:

$$\begin{aligned} |S_{2t}| &\approx 3,64 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \\ |S_{4t}| &\approx 0,46 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \\ |S_{6t}| &\approx 0,14 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \\ S_{\Sigma t} &\approx \sum_{g=1}^3 |S_{(2g)t}| \approx 4,24 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Анализ чувствительности феррозонда при возбуждении сигналом треугольной формы показывает, что на второй гармонике чувствительность меньше, чем чувствительность при возбуждении сигналом синусоидальной формы, а детектирование четвертой и шестой гармоник с последующим суммированием результатов не позволяет повысить чувствительность.

Подставляя выражения (2.22) в (2.21) с учетом (2.6) получим значения чувствительности на второй, четвертой и шестой гармониках при возбуждении сигналом прямоугольной формы:

$$\begin{aligned} |S_{2s}| &\approx 12 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \\ |S_{4s}| &\approx 6 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \\ |S_{6s}| &\approx 4 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \\ S_{\Sigma s} &\approx \sum_{g=1}^3 |S_{(2g)s}| \approx 22 \cdot sw_2a_3\omega H_{\text{exc.m}}^2 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Анализ чувствительности феррозонда при возбуждении сигналом прямоугольной формы показывает, что на второй гармонике чувствительность больше чем чувствительность при возбуждении сигналом синусоидальной формы в 2 раза.

Синхронное детектирование второй, четвертой и шестой гармоник с последующим суммированием результатов позволяет повысить чувствительность приблизительно в 3,6 раза, по сравнению с чувствительностью при возбуждении сигналом синусоидальной формы и в 1,8 раза по сравнению с чувствительностью при возбуждении сигналом прямоугольной формы и декретирование только на второй гармонике.

Таким образом, проведенный анализ показал, что для возбуждения феррозондового преобразователя целесообразно использовать сигнал прямоугольной формы с синхронным детектирование второй, четвертой и шестой гармоник и последующим суммированием результатов.

Следует заметить, что магнитная проницаемость сердечников феррозондов является частотозависимой [103] и начинает уменьшаться после частоты среза  $f_{ср}$ , индивидуальной для каждого материала. При традиционном подходе к анализу работы феррозонда при измерении магнитной индукции только на второй гармонике выходной ЭДС данной зависимостью можно пренебречь. Однако при расчете чувствительности на высших гармониках целесообразно результирующее выражение для выходной ЭДС (2.20) домножить на коэффициент спада  $\dot{K}_\mu(\omega)$  и записать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{mes}(\omega, t) = -sw_2 \dot{K}_\mu(\omega) H_q(t) \sum_{i=1}^j a_{2i-1} (2i-1) \left[ \left( H_{dc} + H_{exc}(t) \right)^{2i-2} - \right. \\ \left. - \left( H_{dc} - H_{exc}(t) \right)^{2i-2} \right]; \end{aligned} \quad (2.30)$$

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

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

Из-за разброса характеристик сердечников при изготовлении коэффициент спада  $\dot{K}_\mu(\omega)$  целесообразно определять экспериментально для каждого сердечника.

## 2.4 Расчет выходной ЭДС феррозондового преобразователя

Проведем расчет выходной ЭДС на второй, четвертой и шестой гармониках дифференциального феррозондового преобразователя с разомкнутым сердечником при возбуждении сигналом прямоугольной формы. Пусть в качестве материала сердечников используется сплав с высокой магнитной проницаемостью в слабых полях 80НХС толщиной 0,1 мм [104]. Данный сплав широко применялся для создания феррозондов [51]. Магнитная проницаемость сплава 80НХС начинает уменьшаться после частоты среза  $f_{cp} \approx 1$  кГц. Примем параметры, приведенные в таблице 2.1 для расчета выходной ЭДС феррозонда.

Таблица 2.1 – Параметры для расчета ЭДС феррозонда

Размеры одного сердечника	$80 \times 1,5 \times 0,1$ мм
Площадь поперечного сечения двух сердечников	$S = 3 \cdot 10^{-7}$ м <sup>2</sup>
Число витков в обмотке возбуждения	$w_1 = 200$
Число витков в измерительной обмотке	$w_2 = 2000$
Ток возбуждения	$I_{exc.m} = 50 \cdot 10^{-3}$ А
Длина намотки обмотки возбуждения	$l = 70 \cdot 10^{-3}$ м
Частота тока возбуждения	$\omega = 2\pi \cdot 1000$ Гц
Коэффициент аппроксимации	$a_3 = 1 \cdot 10^{-3}$
Измеряемая магнитная индукция	$B_{dc} = 50 \cdot 10^{-6}$ мкТл

Подставляя численные значения, приведенные в таблице 2.1 в выражение (2.20) с учетом выражения (2.22) при  $m = 50$  получим значения напряжений на второй  $U_2$ , четвертой  $U_4$  и шестой  $U_6$  гармониках в спектре выходной ЭДС феррозондового преобразователя:  $U_2 \approx 0,045$  В;  $U_4 \approx 0,021$  В;  $U_6 \approx 0,012$  В.

Таким образом, полученные универсальные выражения для расчета ЭДС в измерительной обмотке дифференциальных феррозондовых преобразователей с разомкнутым сердечником позволяют теоретически рассчитать значения напряжений для каждой гармоники выходном сигнале.

## 2.5 Выводы к главе 2

1. Проведен математический анализ работы дифференциальных феррозондовых преобразователей с разомкнутым сердечником при аппроксимации средней кривой намагничивания нечетными полиномами пятого и седьмого порядков.

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

3. Показано, что возбуждение феррозондового преобразователя сигналом прямоугольной формы с синхронным детектированием выходной ЭДС на второй, четвертой и шестой гармониках и последующим суммированием результатов теоретически позволяет повысить чувствительность в 3,6 раза, по сравнению с возбуждением сигналом синусоидальной формы и в 1,8 раза по сравнению с чувствительностью при возбуждении сигналом прямоугольной формы и декретирование только на второй гармонике.

## ГЛАВА 3

### РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ КАТУШЕК ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В этой главе рассмотрены средства калибровки и градуировки датчиков слабых магнитных полей и магнитометров на их основе. Проведен анализ неоднородности магнитного поля создаваемого катушками Гельмгольца, трех- и четырехкатушечными системами. Описана процедура расчета, практическая реализация и экспериментальные исследования восьмикатушечной системы для калибровки датчиков слабого магнитного поля с повышенной однородностью магнитного поля на расстояние половины радиуса от центра системы.

#### 3.1 Средства калибровки феррозондовых датчиков

Для калибровки и градуировки датчиков слабых магнитных полей и магнитометров на их основе [105-106] необходима источник (мера) магнитной индукции постоянного поля. В качестве такого источника применяют одно-, двух- или трехкомпонентные катушки и источник силы постоянного тока [107]. Погрешность источника магнитного поля должна быть по крайней мере в три раза меньше, чем погрешность калибруемого средства измерения [108]. 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  $100 \times 10 \times 10$  мм.

Наиболее часто для создания однородного магнитного поля в качестве катушек с током используют соленоид [109] или катушки Гельмгольца [110-112].

##### 3.1.1 Создание магнитного поля с помощью соленоида

Соленоид представляет собой катушку с обмоткой, длина которой много больше ее диаметра, как изображено на рисунке 3.1.

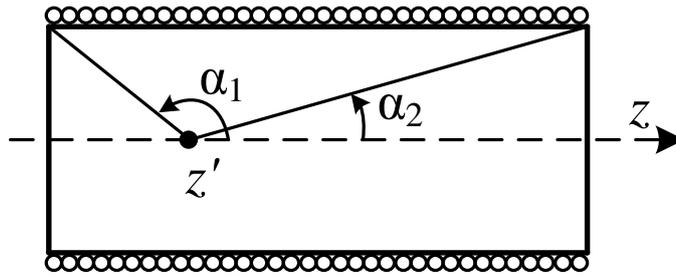


Рисунок 3.1 – Соленоид

На основании закона Био-Савара-Лапласа [113] индукция магнитного поля на оси соленоида рассчитывается по формуле:

$$B(z) = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1); \quad (3.1)$$

$$\alpha_2 < \alpha_1,$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;

$n$  – число витков катушки на единицу длины соленоида;

$I$  – ток через катушку, А;

$\alpha_1, \alpha_2$  – углы между радиус-векторами из точки  $z'$  к крайним виткам соленоида, рад;

$z'$  – координата точки, в которой рассчитывается индукция магнитного поля, м.

Однако главным недостатком соленоида являются большие габариты. Для расширения области однородного поля приходится существенно увеличивать длину соленоида, а, следовательно, и количество витков, что влечет за собой увеличение индуктивности [114] и повышает требования к источнику тока. Калибруемый датчик магнитного поля необходимо разместить в центре соленоида, но поскольку длина соленоида как минимум в десять раз больше его радиуса, сделать это достаточно сложно.

Поэтому широкое распространение для создания одной компоненты магнитного поля получила аксиальная двухкатушечная система, называемая также катушками Гельмгольца.

### 3.1.2 Создание магнитного поля с помощью аксиальной двухкатушечной системы

Катушки Гельмгольца представляют собой два соосных кольца радиуса  $R$ , расположенных на расстоянии  $R$  друг от друга, как показано на рисунке 3.2. Для создания однородного поля катушки соединяются последовательно с источником тока.

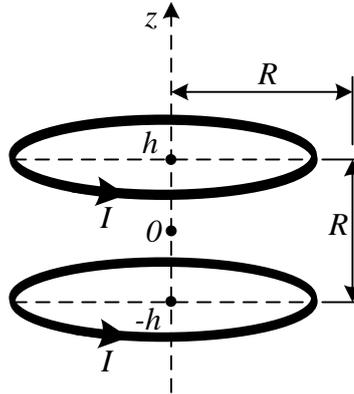


Рисунок 3.2 – Катушки Гельмгольца

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа осевое поле одной катушки в произвольной точке  $z$  можно рассчитать по формуле:

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I R^2}{2(R^2 + (z - h)^2)^{3/2}}, \quad (3.2)$$

где  $N$  – число витков катушки;

$R$  – радиус катушек, м;

$h$  – расстояние центра катушки от начала координат, м.

Согласно принципу суперпозиции, результирующее поле, создаваемое двумя катушками, равно векторной сумме полей, создаваемых каждой катушкой в отдельности. Если направление тока в обеих катушках совпадает, то осевое поле двух катушек может быть рассчитано по формуле:

$$B(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[ R^2 + (z + h)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + (z - h)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (3.3)$$

Поскольку для катушек Гельмгольца  $h = R/2$ , то выражение (3.3) принимает следующий вид:

$$B(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[ R^2 + (z + R/2)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + (z - R/2)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (3.4)$$

Чтобы оценить степень однородности поля в центре системы катушек, рассмотрим, чему равны последовательные производные от  $B(z)$  по  $z$ . Более высокий порядок первой ненулевой производной в данной точке обеспечивает более высокую однородность поля в ее окрестности.

Формулу (3.4) разложим в ряд Тейлора по переменной  $z$  в окрестности нуля:

$$B(z) = B(0) + \frac{1}{2} B^{(2)}(0) z^2 + \frac{1}{24} B^{(4)}(0) z^4 + \frac{1}{720} B^{(6)}(0) z^6 + \dots \quad (3.5)$$

Функция (3.4) является четной, следовательно, в геометрическом центре пары катушек все нечетные производные от  $B(z)$  по  $z$  обращаются в ноль. Производные по  $z$  четного порядка являются четными функциями и, следовательно, присутствуют в разложении. Поскольку катушки Гельмгольца расположены на расстоянии радиуса друг от друга, вторая производная в центре системы обращается в ноль, т.е.  $B^{(2)}(0) = 0$ .

Таким образом, изменение поля  $\Delta B = B(z) - B(0)$  имеет четвертый порядок малости и определяется выражением:

$$\Delta B(z) = \frac{1}{24} B^{(4)}(0) z^4 + \frac{1}{720} B^{(6)}(0) z^6 + \dots \quad (3.6)$$

Магнитное поле в геометрическом центре катушек Гельмгольца ( $z = 0$ ) определяется из выражения:

$$B(0) = \frac{16}{5\sqrt{5}} \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N I}{R}. \quad (3.7)$$

Из выражений (3.4) и (3.7) следует формула для относительной неоднородности магнитного поля вдоль оси  $z$ :

$$\delta_z = \frac{B(z) - B(0)}{B(0)} = \frac{5\sqrt{5}}{16} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{1}{2} + \frac{z}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[ 1 + \left( \frac{1}{2} - \frac{z}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} - 1. \quad (3.8)$$

На рисунке 3.3 представлен построенный по формуле (3.8) график относительной неоднородности магнитного поля  $\delta_z$ , где значения координаты по оси  $z$  приведены к радиусу катушки  $R$ .

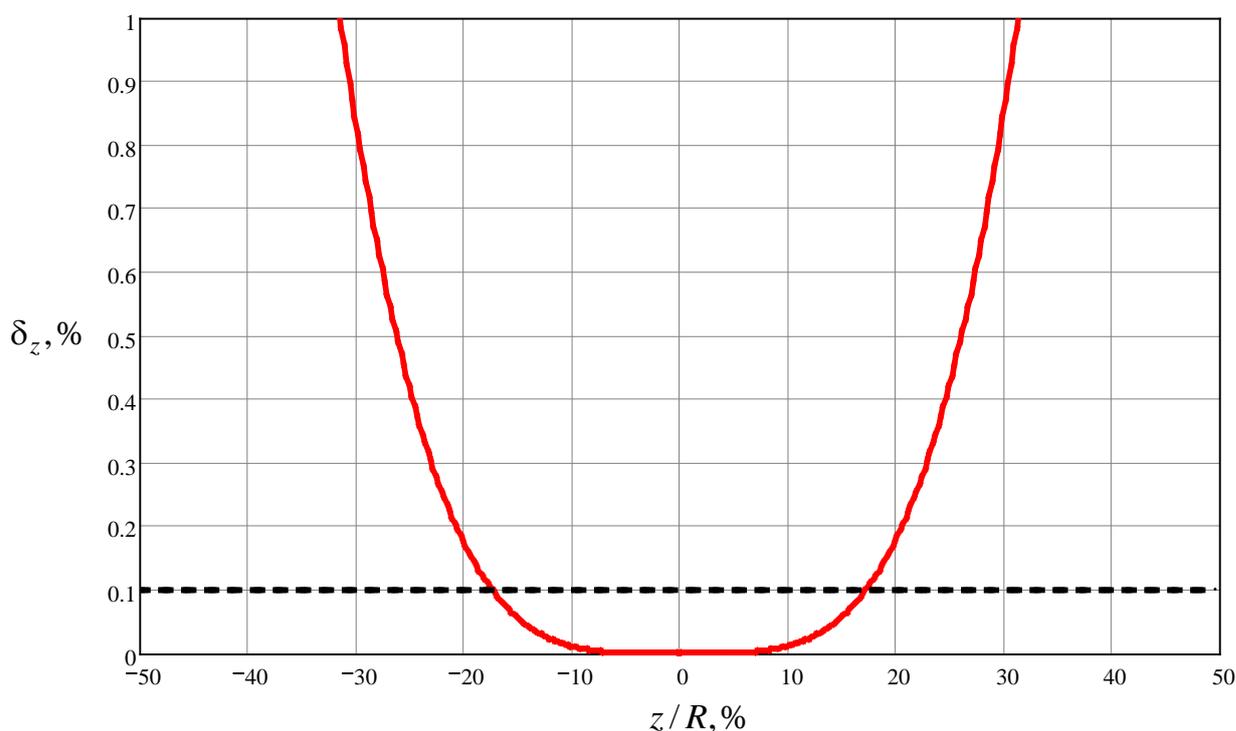


Рисунок 3.3 – Неоднородность  $\delta_z(z/R)$  магнитного поля, созданного катушками Гельмгольца

Из рисунка 3.3 видно, что неоднородность магнитного поля  $\delta_z \leq 1 \%$  может быть получена на относительном расстоянии от геометрического центра  $z/R < 31,4 \%$ .

По аналогии с расчетом магнитного поля вдоль оси  $z$  получаем выражение в цилиндрической системе координат для аксиальной компоненты  $B_z(z, r)$  вектора магнитной индукции в любой точке пространства внутри катушек Гельмгольца:

$$B_z(z, r) = \frac{\mu_0 NI}{2\pi} \left[ \int_0^\pi \frac{R(R - r \cos \alpha)}{[R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha + (z - R/2)^2]^{3/2}} d\alpha + \int_0^\pi \frac{R(R - r \cos \alpha)}{[R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha + (z + R/2)^2]^{3/2}} d\alpha \right]. \quad (3.9)$$

Тогда относительная неоднородность аксиальной компоненты вектора магнитной индукции в любой точке пространства внутри катушек Гельмгольца рассчитывается по формуле:

$$\delta_z(z, r) = \frac{B_z(z, r) - B(0)}{B(0)}. \quad (3.10)$$

Расчет по формуле (3.10) в программной среде Mathcad 13 показал, что неоднородность магнитного поля  $\delta_z(z, r) \leq 0,1 \%$  может быть получена на относительном расстоянии от геометрического центра  $z/R$  меньше 17,3 % и  $r/R$  меньше 15 %.

Расчеты показали, что область однородности магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца, ограничена достаточно небольшим объемом в центре системы катушек. Например, для катушек с радиусом 50 мм однородность поля  $\leq 0,1 \%$  будет достигаться только на расстояниях до  $\approx 8,6$  мм от их центра по оси  $z$  и до  $\approx 6$  мм по координате  $r$ , 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 такого же эффекта можно добиться, если увеличить число катушек в системе [115-118].

### 3.1.3 Создание магнитного поля с помощью аксиальной трехкатушечной системы

В работе [115] описана система катушек Максвелла, состоящая из трех катушек разного радиуса с определенным соотношением числа витков в катушках, расположенных на поверхности общей сферы, в соответствии с рисунком 3.4. Такая система имеет большую однородность поля по сравнению с катушками

Гельмгольца. Соотношение числа витков в центральной катушке к каждой из крайних катушек равно 64/49. Радиус внешних катушек и их расстояние до центральной катушки соответственно равны:

$$R = R_0\sqrt{4/7}; \quad h = R_0\sqrt{3/7}, \quad (3.11)$$

где  $R_0$  – радиус центральной катушки, м.

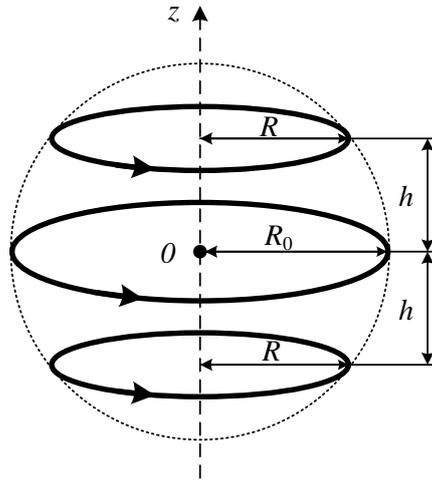


Рисунок 3.4 – Катушки Максвелла

Магнитное поле, создаваемое катушками Максвелла вдоль оси  $z$ , описывается выражением:

$$B_z(z) = \frac{1}{2}\mu_0 N I R^2 \left\{ 64 [R_0^2 + z^2]^{-3/2} + \right. \\ \left. + 28 \left[ \frac{4}{7} R_0^2 + \left( z + \sqrt{\frac{3}{7}} R_0 \right)^2 \right]^{-3/2} + 28 \left[ \frac{4}{7} R_0^2 + \left( z - \sqrt{\frac{3}{7}} R_0 \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (3.12)$$

Аксиальная  $B_z(z, r)$  компонента вектора магнитной индукции в любой точке пространства внутри катушек Максвелла вычисляется по формуле:

$$B_z(z, r) = \frac{\mu_0 N I}{2\pi} \left[ \int_0^\pi \frac{R_0 (R_0 - r \cos \alpha)}{[R_0^2 + r^2 - 2R_0 r \cos \alpha + z^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\pi \frac{R (R - r \cos \alpha)}{[R^2 + r^2 - 2R r \cos \alpha + (z - h)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha + \int_0^\pi \frac{R (R - r \cos \alpha)}{[R^2 + r^2 - 2R r \cos \alpha + (z + h)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha \right] \quad (3.13)$$

Разложение формулы (3.12) в ряд Тейлора по переменной  $z$  в окрестности нуля показывает, что изменение поля  $\Delta B = B(z) - B(0)$  имеет шестой порядок малости и определяется выражением:

$$\Delta B(z) = \frac{1}{720} B^{(6)}(0) z^6 + \frac{1}{40320} B^{(8)}(0) z^8 + \dots \quad (3.14)$$

Магнитное поле в геометрическом центре катушек Максвелла ( $z = 0$ ) определяется из выражения:

$$B(0) = 60 \frac{\mu_0 NI}{R}. \quad (3.15)$$

На основании (3.12) и (3.15) получаем выражение для относительной неоднородности магнитного поля вдоль оси  $z$ :

$$\begin{aligned} \delta_z &= \frac{B(z) - B(0)}{B(0)} = \\ &= \frac{1}{30} \left\{ 16 \left( 1 + \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right)^{-3/2} + 7 \left[ \frac{4}{7} + \left( \frac{z}{R} + \sqrt{\frac{3}{7}} \right)^2 \right]^{-3/2} + \right. \\ &\quad \left. + 7 \left[ \frac{4}{7} + \left( \frac{z}{R} - \sqrt{\frac{3}{7}} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} - 1. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Из-за наличия катушек разного радиуса катушки Максвелла трудны в изготовлении. В работе [119] предложена более простая система, состоящая из трех катушек одинакового радиуса, как изображено на рисунке 3.5, в которой по аналогии с катушками Максвелла реализовано выполнение условий:

$$\begin{aligned} B^{(2)}(0) &= 0; \\ B^{(4)}(0) &= 0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Магнитное поле, создаваемое такими катушками вдоль оси  $z$ , определяется в соответствии с выражением [120]:

$$B(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ k \left[ R^2 + z^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + (z+h)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + (z-h)^2 \right]^{-3/2} \right\}, \quad (3.18)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий число витков в центральной катушке.

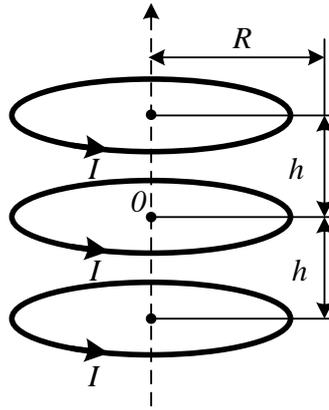


Рисунок 3.5 – Система из трех катушек одинакового радиуса

При этом аксиальная  $B_z(z, r)$  компонента вектора магнитной индукции в любой точке пространства внутри системы вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
 B_z(z, r) = \frac{\mu_0 NI}{2\pi} & \left[ k \int_0^\pi \frac{R(R - r \cos \alpha)}{(R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha + z^2)^{3/2}} d\alpha + \right. \\
 & + \int_0^\pi \frac{R(R - r \cos \alpha)}{[R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha + (z - h)^2]^{3/2}} d\alpha + \\
 & \left. + \int_0^\pi \frac{R(R - r \cos \alpha)}{[R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha + (z + h)^2]^{3/2}} d\alpha \right]. \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

В такой системе  $k \approx 0,5315$  и  $h \approx 0,7601R$ . В этом случае относительная неоднородность магнитного поля вдоль оси  $z$  определяется в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned}
 \delta_z = \frac{B(z) - B(0)}{B(0)} = 0,649 & \left\{ 0,5315 \left[ 1 + \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} + \right. \\
 & + \left[ 1 + \left( 0,7601 + \frac{z}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left. \left[ 1 + \left( 0,7601 - \frac{z}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} - 1 \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

На рисунке 3.6 представлены построенные по формулам (3.16) и (3.20) графики относительной неоднородности магнитного поля  $\delta_z$ , где значения координаты по оси  $z$  приведены к радиусу катушки  $R$ .

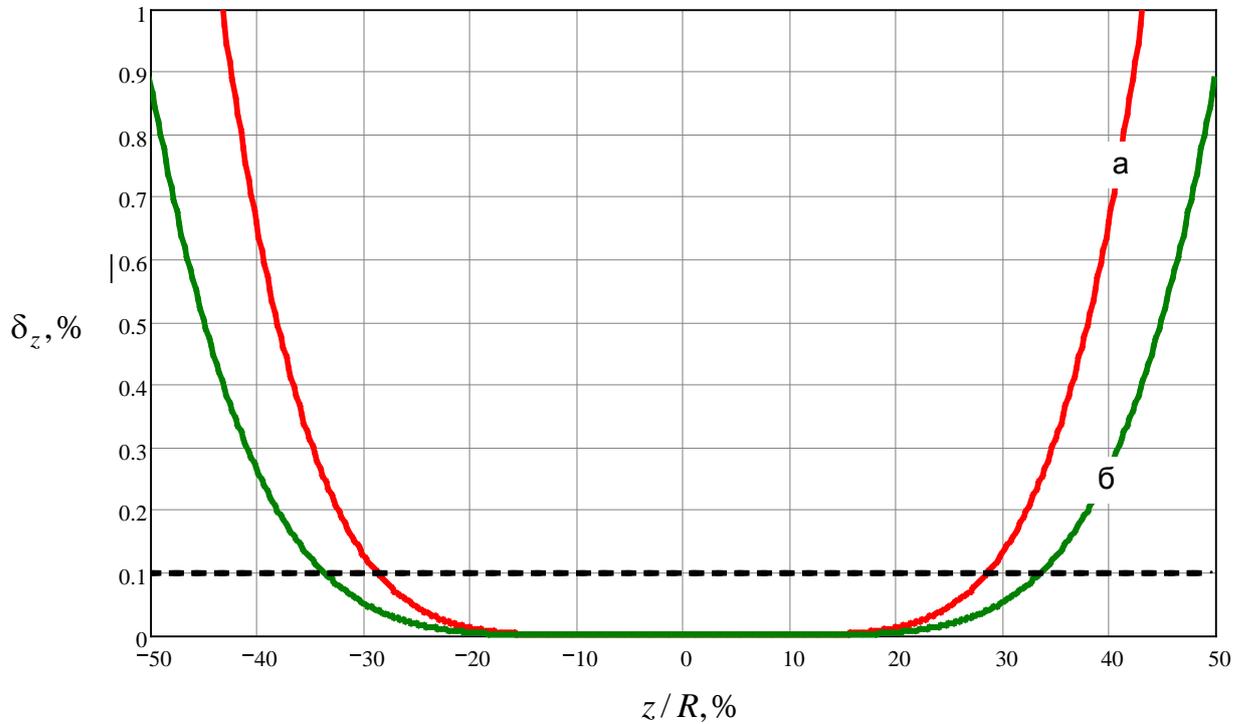


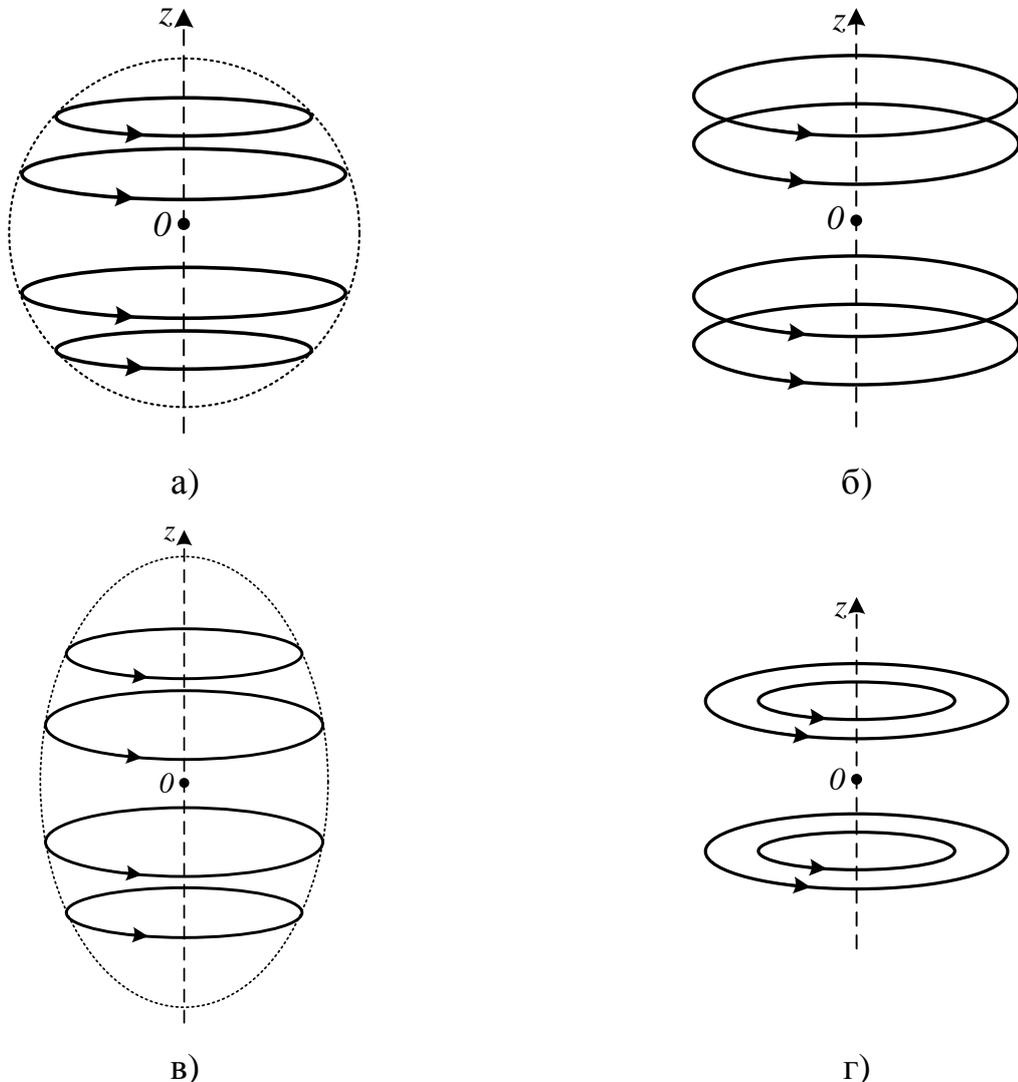
Рисунок 3.6 – Неоднородности  $\delta_z(z/R)$  магнитного поля, созданного катушками Максвелла (а) и трехкатушечной системой (б)

Из рисунка 3.6 видно, что неоднородность магнитного поля  $\delta_z \leq 1 \%$  в катушках Максвелла может быть получена на расстоянии от геометрического центра  $z/R < 43,2 \%$ , а в трехкатушечной системе – на расстоянии  $z/R < 50 \%$ . Если требуется неоднородность  $\delta_z \leq 0,1 \%$  (показана прерывистой линией на рисунке 3.6), то расстояние  $z/R$  должно быть меньше 28,6 % в катушках Максвелла и меньше 33 % в трехкатушечной системе.

Дальнейшее повышение однородности магнитного поля введет к проектированию аксиальных четырехкатушечных систем, например, катушек Бэйкера, Браунбека, Гарретта и др. [121].

### 3.1.4 Создание магнитного поля с помощью аксиальной четырехкатушечной системы

На рисунке 3.7 представлены различные конструкции аксиальных четырехкатушечных систем.



а) – катушки Максвелла;

в) – катушки Браунбека;

б) – катушки Бэйкера;

г) – катушки Гарретта.

Рисунок 3.7 – Четырехкатушечные системы для создания однородного магнитного поля

Четырехкатушечная система Максвелла, изображенная на рисунке 3.7-а, как и ее трехкатушечный аналог, характеризуется расположением катушек на поверхности общей сферы.

Радиус внешних катушек определяется как [2]:

$$R_{\text{вш}} = 0,6719R_{\text{вн}}, \quad (3.21)$$

где  $R_{\text{вш}}$  – радиус внешних катушек, м;

$R_{\text{вн}}$  – радиус внутренних катушек, м.

Расстояние  $h_1$  первой пары катушек до центра системы равно  $\pm 0,2976 \cdot R_{\text{вн}}$ , расстояние  $h_2$  второй пары катушек до центра системы равно  $\pm 1,188 \cdot R_{\text{вш}}$ . Соотношение числа витков внешних катушек определяется как:

$$N_{\text{вш}} = 0,6821N_{\text{вн}}, \quad (3.22)$$

где  $N_{\text{вш}}$  – количество витков внешних катушек;

$N_{\text{вн}}$  – количество витков внутренних катушек.

Катушки Бэйкера, изображенные на рисунке 3.7-б, состоят из четырех катушек одинакового радиуса, при этом число витков во внешних катушках больше, чем во внутренних в 2,26044 раза. Расстояние  $h_1$  первой пары катушек до центра системы равно  $\pm 0,243186R$ , расстояние  $h_2$  второй пары катушек до центра системы равно  $\pm 0,940733R$ .

Система катушек Браунбека, изображенная на рисунке 3.7-в, состоит из двух пар катушек разного радиуса, причем внешние катушки имеют меньший радиус, чем внутренние. Количество витков во всех катушках одинаковое.

Радиус внешних катушек определяется как:

$$R_{\text{вш}} = 0,763899R_{\text{вн}}. \quad (3.23)$$

Расстояние  $h_1$  первой пары катушек до центра системы равно  $\pm 0,278028 \cdot R_{\text{вн}}$ , расстояние  $h_2$  второй пары катушек до центра системы равно  $\pm 1,070 \cdot R_{\text{вш}}$ .

Катушки Гарретта, изображенные на рисунке 3.7-г, отличаются бипланарной конструкцией. Радиус внутренних катушек определяется как:

$$R_{\text{вн}} = 0,265226 \cdot R_{\text{вш}}. \quad (3.24)$$

Соотношение числа витков внутренних катушек определяется как:

$$N_{\text{вн}} = 0,024533 \cdot N_{\text{вш}}, \quad (3.25)$$

Расстояние  $h$  пар катушек до центра системы равно  $\pm 0,4347R_{\text{вш}}$ .

Независимо от конструкции системы четырех катушек аксиальную  $B_z(z,r)$  компоненту вектора магнитной индукции в любой точке пространства внутри катушек можно вычислить с помощью выражения:

$$\begin{aligned}
 B_z(z,r) = & \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \int_0^\pi \frac{N_1 R_1 (R_1 - r \cos \alpha)}{\left[ R_1^2 + r^2 - 2R_1 r \cos \alpha + (z + h_1)^2 \right]^{3/2}} d\alpha + \right. \\
 & + \int_0^\pi \frac{N_1 R_1 (R_1 - r \cos \alpha)}{\left[ R_1^2 + r^2 - 2R_1 r \cos \alpha + (z - h_1)^2 \right]^{3/2}} d\alpha + \\
 & + \int_0^\pi \frac{N_2 R_2 (R_2 - r \cos \alpha)}{\left[ R_2^2 + r^2 - 2R_2 r \cos \alpha + (z + h_2)^2 \right]^{3/2}} d\alpha + \\
 & \left. + \int_0^\pi \frac{N_2 R_2 (R_2 - r \cos \alpha)}{\left[ R_2^2 + r^2 - 2R_2 r \cos \alpha + (z - h_2)^2 \right]^{3/2}} d\alpha \right], \quad (3.26)
 \end{aligned}$$

где  $R_1$  – радиус первой пары катушек, м;

$R_2$  – радиус второй пары катушек, м;

$N_1$  – количество витков первой пары катушек;

$N_2$  – количество витков второй пары катушек.

$h_1$  – расстояние до первой пары катушек, м;

$h_2$  – расстояние до второй пары катушек, м.

Принимая расстояние  $r$  от оси системы в радиальном направлении равным нулю, оценим неоднородность магнитного поля  $\delta_z$  по формуле (3.10) для четырехкатушечных систем, представленных на рисунке 3.7. Результаты расчета неоднородности показаны на рисунке 3.8, значения координаты  $z$  приведены к радиусу внешних катушек  $R_{вш}$ .

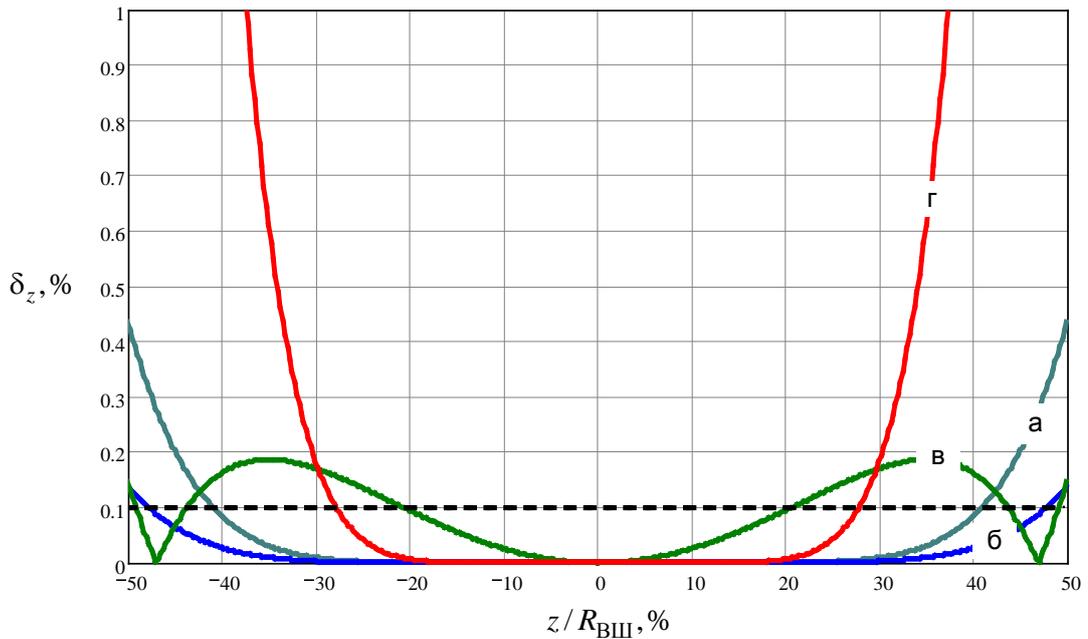


Рисунок 3.8 – Неоднородности  $\delta_z(z/R)$  магнитного поля, созданного катушками Максвелла (а), Бэйкера (б), Браунбека (в) и Гарретта (г)

Из рисунке 3.8 видно, что неоднородность магнитного поля  $\delta_z \leq 0,1\%$  в катушках Максвелла может быть получена на расстоянии от геометрического центра  $z/R < 40,9\%$ , в катушках Бэйкера на расстоянии  $z/R < 47,7\%$ , в катушках Браунбека на расстоянии  $z/R < 20,7\%$ , в катушках Гарретта на расстоянии  $z/R < 27,8\%$ .

Анализ четырехкатушечный систем показал, что наибольшую однородность, как и в случае трехкатушечных систем имеют катушки одинакового радиуса.

Для создания магнитного поля с неоднородностью менее  $0,1\%$  на расстояниях  $\pm R/2$  от геометрического центра необходимо дальнейшее увеличение числа катушек с одинаковым радиусом [122].

### 3.2 Расчет многокатушечной системы

Магнитное поле вдоль оси  $z$  для многокатушечной системы одинакового радиуса, представленной на рисунке 3.9, можно вычислить с помощью выражения:

$$\begin{aligned}
 B(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[ R^2 + z^2 \right]^{-3/2} + k_1 \left[ R^2 + (z + h_1)^2 \right]^{-3/2} + k_1 \left[ R^2 + (z - h_1)^2 \right]^{-3/2} + \right. \\
 + k_2 \left[ R^2 + (z + h_2)^2 \right]^{-3/2} + k_2 \left[ R^2 + (z - h_2)^2 \right]^{-3/2} + \dots \\
 \left. \dots + k_n \left[ R^2 + (z + h_n)^2 \right]^{-3/2} + k_n \left[ R^2 + (z - h_n)^2 \right]^{-3/2} \right\}, \quad (3.27)
 \end{aligned}$$

где  $k_i$  – коэффициент, определяющий число витков в  $i$ -ой паре катушек;  
 $n$  – число катушек.

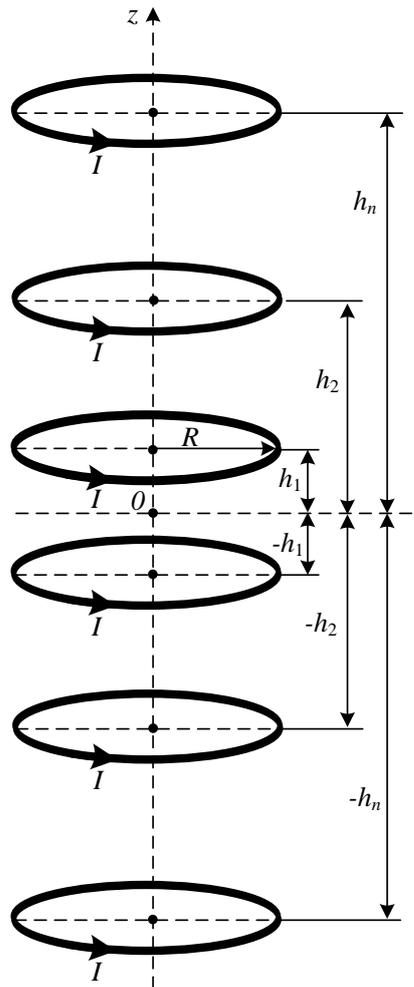


Рисунок 3.9 – Многокатушечная система для создания однородного магнитного поля

Первый член в выражении (3.27) 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 (3.27) 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:

$$\begin{cases} B^{(2)}(0) = 0 \\ B^{(4)}(0) = 0 \\ \dots \\ B^{(2(n-1))}(0) = 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

Для создания магнитного поля с неоднородностью менее 0,1 % на расстояниях  $\pm R/2$  от геометрического центра система уравнений (3.28) была численно решена с использованием среды PTC Mathcad Prime 3.0. 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  $55 \cdot 10^{-3}$  мм. Точное решение получилось в виде вещественных чисел с большим числом значащих цифр для числа витков и расстояний между ними. Результаты расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета вещественных значений параметров аксиальной восьмикатушечной системы для создания однородного магнитного поля

Номер катушки	Число витков	Расстояние от центра системы катушек до начала координат, мм
1	10	9,54
2	20,69572	30,27
3	31,89726	76,46
4	40,95742	122,71
5	10	– 6,12
6	20,69572	– 30,27
7	31,89726	– 76,46
8	40,95742	– 122,71

Однако, 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 [122]. Суть метода заключается в следующем: после нахождения вещественных параметров всех катушек параметры первой пары катушек  $k_1$  и  $h_1$  округлялись; вычисления повторялись для меньшего на 1 числа пар катушек; параметры второй пары катушек  $k_2$  и  $h_2$  округлялись; процесс повторялся до получения параметров всех  $n/2$  пар катушек.

Результаты итерационных вычислений сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты итерационных вычислений параметров аксиальной восьмикатушечной системы для создания однородного магнитного поля

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

На рисунке 3.10 представлен график относительной неоднородности магнитного поля  $\delta_z$  аксиальной восьмикатушечной системы, где значения координаты  $z$  приведены к радиусу катушки  $R$ .

Из рисунка 3.10 видно, что относительная неоднородность магнитного поля восьмикатушечной системы на расстояниях  $\pm R/2$  от центра не превышает 0,015 %. Расчетное значение магнитной индукции в центре такой системы катушек при токе 1 мА и параметрах, приведенных в таблице 3.2, составляет 448,9 нТл.

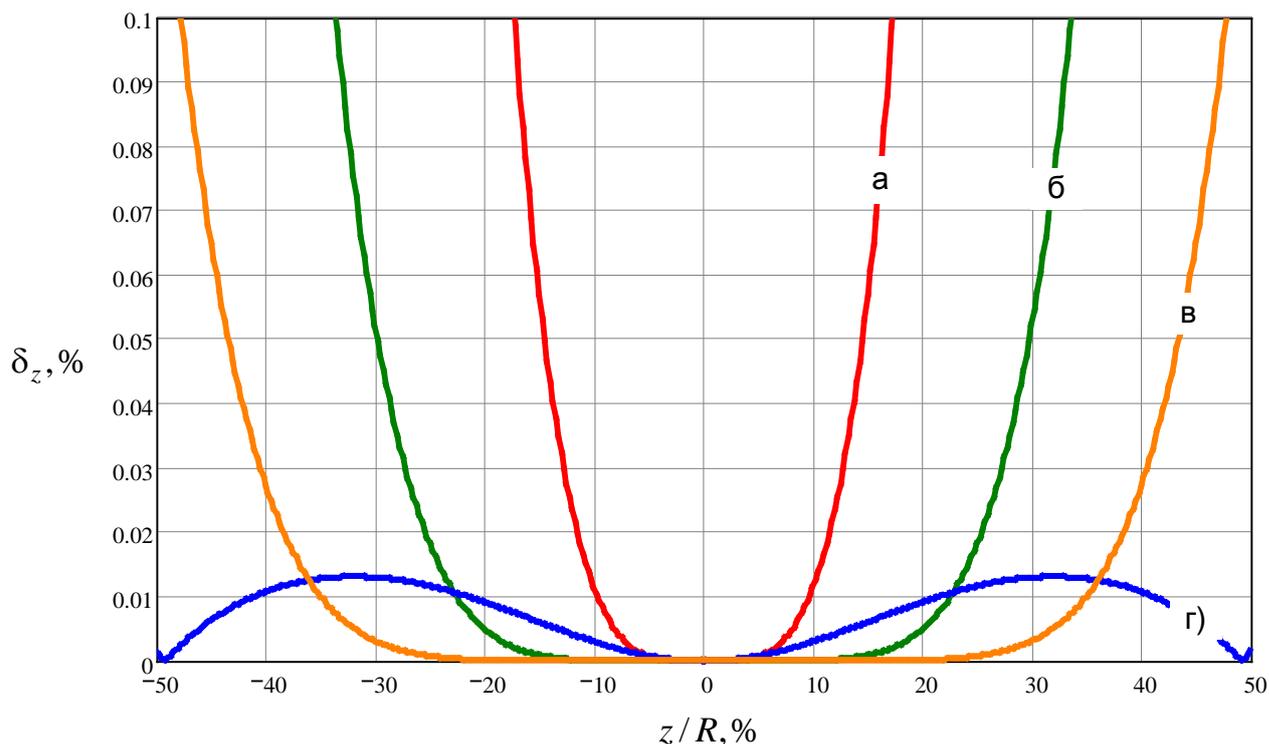


Рисунок 3.10 – Неоднородность магнитного поля, созданного катушками Гельмгольца (а), трехкатушечной системой (б), четырехкатушечной системой Бэйкера (в), восьмикатушечной системой (г).

### 3.3 Моделирование калибровочной системы методом конечных элементов

Для подтверждения полученных аналитических расчетов было проведено моделирование аксиальных многокатушечных систем в среде конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics 4.4. Моделировалось магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца и восьмикатушечной системой [123-124].

Для более наглядного представления распределения магнитного поля моделирование проводилось в трехмерном пространстве. Расчет магнитного поля производился в модуле **mf (Magnetic Fields)**, поскольку только он позволяет использовать модуль **Multi-Turn Coil Domain** для 3D моделирования катушек.

Среда COMSOL Multiphysics позволяет численно моделировать стационарные задачи, проводить временной и частотный анализ. Распределение постоянно-

го магнитного поля, созданного системой катушек, является стационарной задачей, поэтому в качестве типа исследования был выбран **Stationary**.

Управление процедурой моделирования осуществляется через конструктор моделей **Model Builder**, окно которого показано на рисунке 3.11.

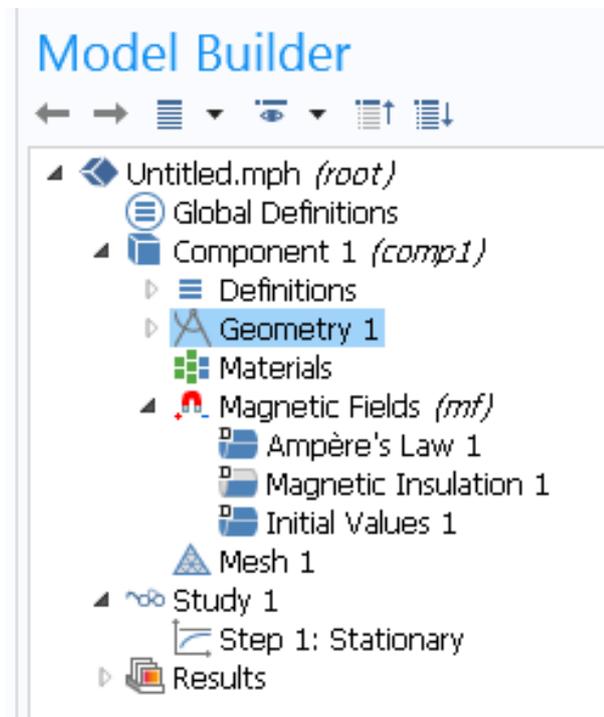


Рисунок 3.11 – Окно конструктора моделей

**Model Builder** включает дерево объектов со всей функциональностью и операциями для конструирования физических и математических моделей, численного моделирования, анализа и представления результатов [125-126].

### *Построение геометрии*

Создание геометрии систем катушек проводилось с использованием встроенных в COMSOL Multiphysics конструкторов. Для построения двух колец прямоугольного сечения была использована функция **Work Plane**, позволяющая создать двухмерную плоскость в трехмерном пространстве, как показано на рисунке 3.12. Сечение проводника для всех моделируемых катушек было принято равным  $0,5 \text{ мм}^2$ . Количество витков в катушках Гельмгольца было принято равным 10.

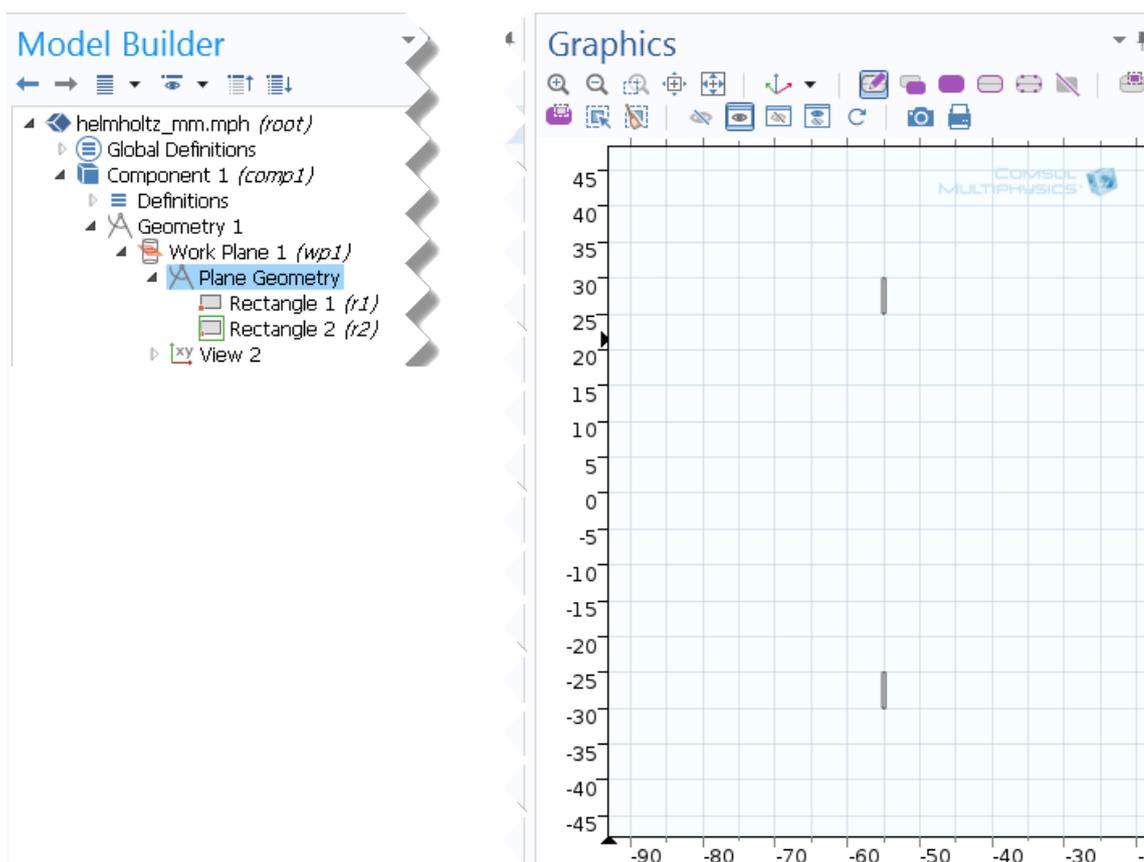


Рисунок 3.12 – Геометрия катушек Гельмгольца в 2D

После применения функции **Revolve**, разворачивающей двумерные объекты вокруг заданной оси, была получена трехмерная геометрия катушек Гельмгольца, изображенная на рисунке 3.13.

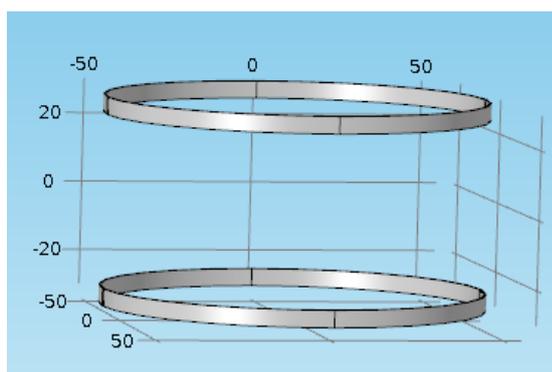


Рисунок 3.13 – Геометрия катушек Гельмгольца в 3D

Для расчета магнитного поля, создаваемого системой катушек, необходимо поместить катушки в объем с воздухом. Для этого вокруг катушек Гельмгольца была создана сфера радиусом 180 мм, как показана на рисунке 3.14.

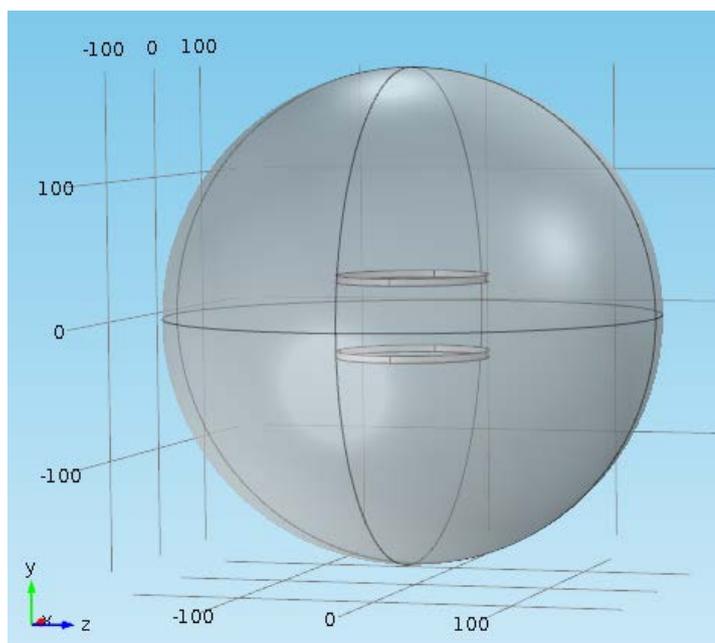


Рисунок 3.14 – Геометрия модели катушек Гельмгольца в 3D

#### *Задание материалов*

В COMSOL существует возможность применять библиотеку материалов **Material Browser**, что позволяет быстро и эффективно проводить моделирование физических систем с реальными параметрами. В качестве материала для катушек Гельмгольца была выбрана медь. В качестве материала сферы, окружающей двухкатушечную систему, был выбран воздух. Отметим, что поскольку магнитная проницаемость меди близка к магнитной проницаемости воздуха, при моделировании можно использовать только один материал – воздух.

#### *Задание граничных условий*

Для моделирования катушек в COMSOL Multiphysics предусмотрен специальный модуль **Multi-Turn Coil Domain**, разработанный для расчета магнитного поля внутри и вокруг проводника с током.

Преимуществом модуля **Multi-Turn Coil Domain** является возможность задания любого числа витков без прорисовки геометрии каждого отдельного витка, что значительно упрощает расчет модели.

Катушки Гельмгольца имеют замкнутую геометрию с круговым сечением, перпендикулярным оси  $z$ , поэтому тип катушек был выбран **Circular**. Направление протекания тока в этом случае определяется заданием границы (**reference edge**), вдоль которой течёт ток, как изображено на рисунке 3.15. Моделирование проводилось при токе 1 мА.

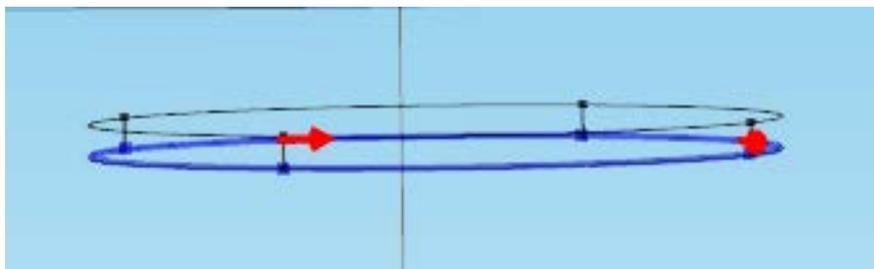


Рисунок 3.15 – Задание граничных условий

#### *Разбиение на конечные элементы*

После создания геометрии, определения свойств и граничных условий модели было проведено разбиение области моделирования на конечные элементы. При разбиении геометрии использовалась тетраэдрическая сетка с максимальным размером элемента 12,6 мм, а минимальным 0,54 мм, как показано на рисунке 3.16.

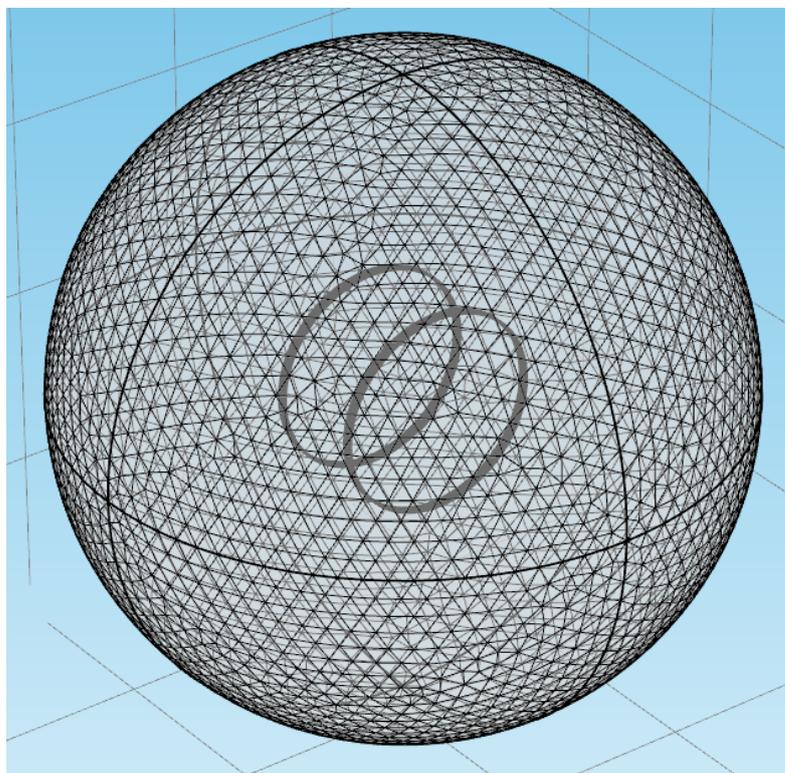


Рисунок 3.16 – Сетка конечных элементов

### *Проведение расчетов*

Очевидно, что от выбора решающего устройства и его параметров зависит достоверность вычислений и правильная оптимизация решения. Неправильная настройка может привести к грубым ошибкам решения, которые очень трудно выявить. Неадекватный подбор параметров может привести к длительным расчетам тривиальной задачи, поэтому правильный выбор решателя и его настроек является одним из базовых этапов моделирования.

Так, как задача нахождения постоянного магнитного поля является стационарной и линейной, в качестве решающего устройства был выбран **Stationary Solver**.

### *Визуализация результатов моделирования*

Визуализация результатов численного моделирования проводится с помощью опций пункта **Results** в **Model Builder**. Было создано графическое представление распределения магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца в аксиальном и радиальном направлениях. Изображения магнитного поля показаны на рисунке 3.17 и рисунке 3.18.

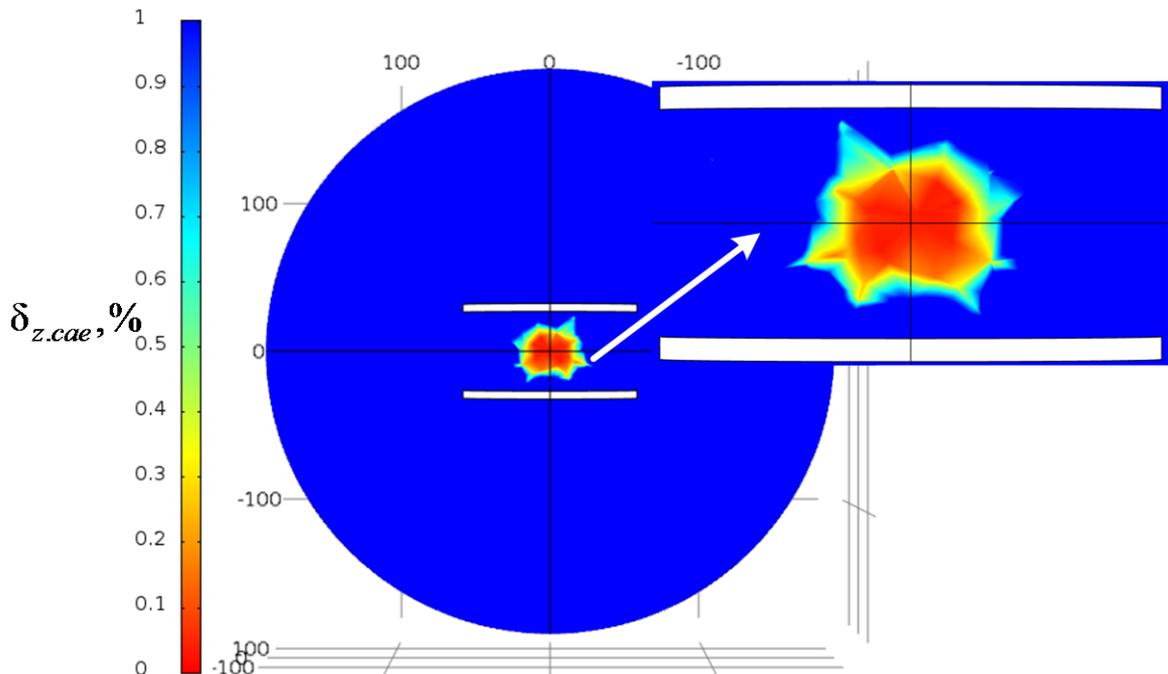


Рисунок 3.17 – Распределения магнитного поля созданного катушками Гельмгольца в аксиальном направлении

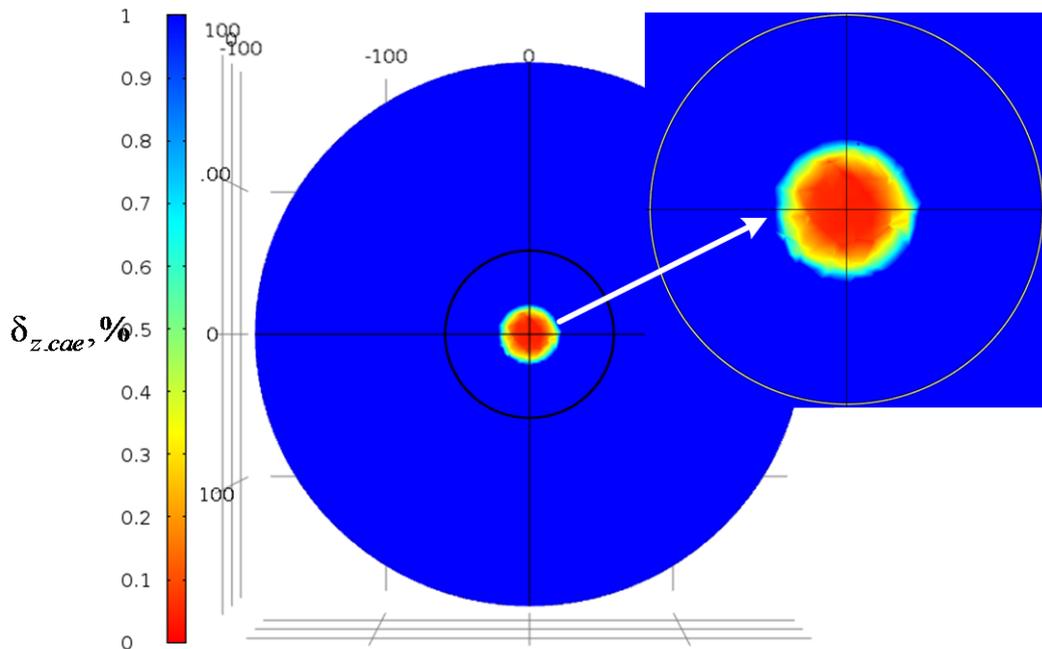


Рисунок 3.18 – Распределения магнитного поля созданного катушками Гельмгольца в радиальном направлении

Для сравнения результатов конечно-элементного моделирования с аналитическими расчетами была построена зависимость относительной неоднородности магнитного поля от значения координат по оси  $z$ , приведенных к радиусу катушки (см. рисунок 3.19), полученная в результате моделирования.

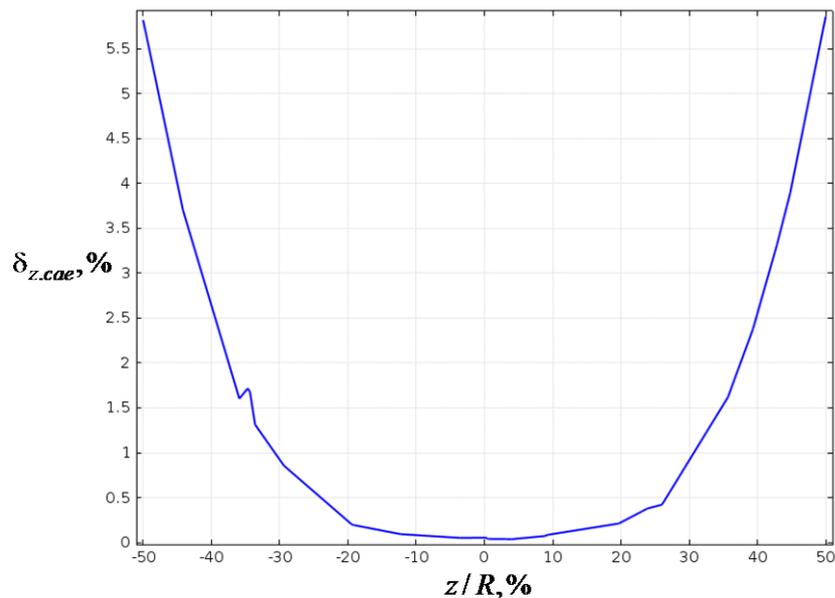


Рисунок 3.19 – Неоднородность магнитного поля, созданного катушками Гельмгольца, значения координаты по оси  $z$  приведены к радиусу катушки  $R$

За меру близости результатов конечно-элементного моделирования и аналитического расчета неоднородности магнитного поля было принято линейное расстояние  $D$ :

$$D = \frac{(\delta_{z.cae} - \delta_z)}{\delta_z} \cdot 100, \quad (3.29)$$

где  $\delta_z$  – неоднородность магнитного поля полученная аналитически, %;

$\delta_{z.cae}$  – неоднородность магнитного поля полученная в результате моделирования, %.

Максимальное линейное отклонение между результатами аналитического расчета и конечно-элементного моделирования катушек Гельмгольца не превысило 1 %.

Модель восьмикатушечной системы отличается от модели двухкатушечной только геометрией. Внешний вид восьмикатушечной системы, созданной в среде COMSOL, приведен на рисунке 3.20.

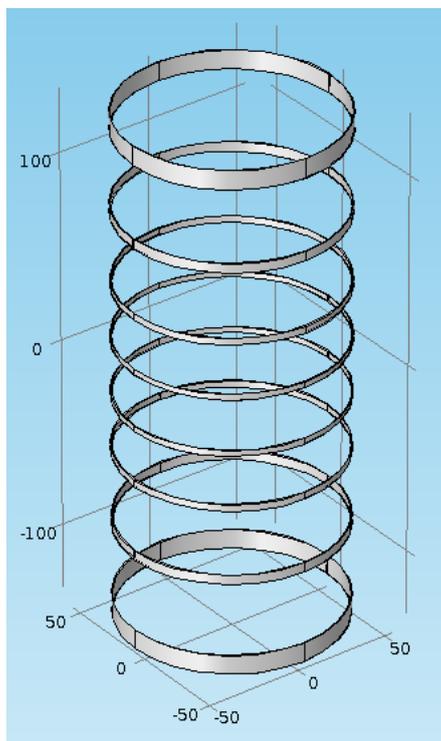


Рисунок 3.20 – Геометрия восьмикатушечной системы в 3D

Число витков и расстояния от центра системы катушек до начала координат были заданы в соответствии с данными, указанными в таблице 3.2.

Распределение магнитного поля, создаваемого восьмикатушечной системой в аксиальном и радиальном направлениях, представлено на рисунке 3.21 и рисунке 3.22.

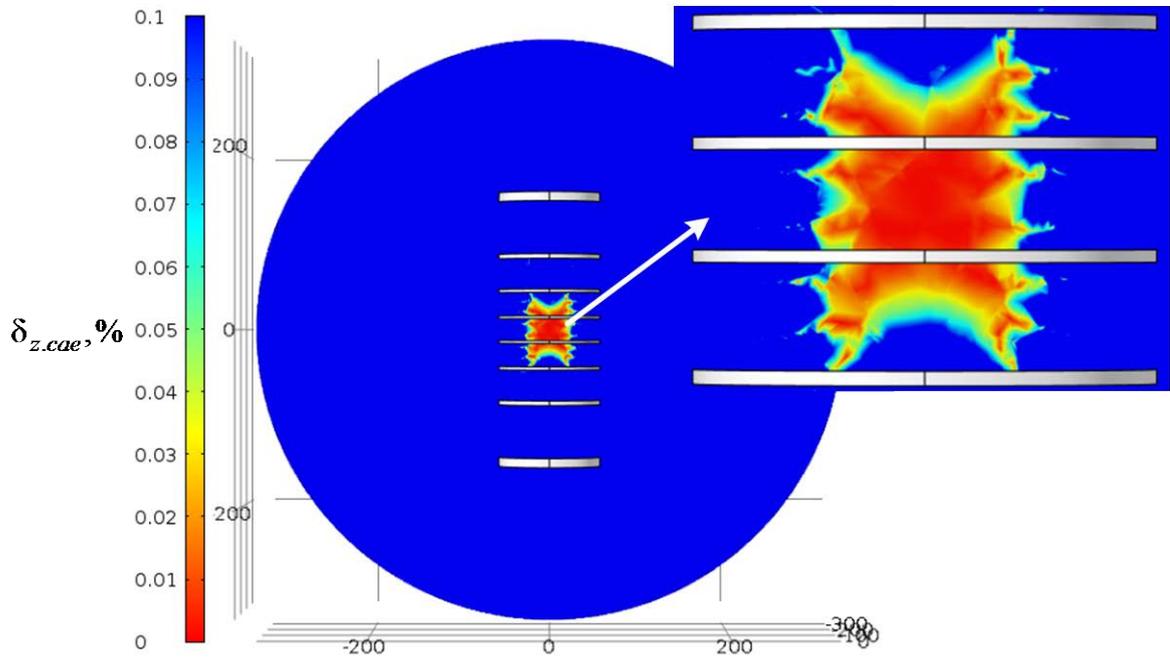


Рисунок 3.21 – Распределения магнитного поля созданного восьмикатушечной системой в аксиальном направлении

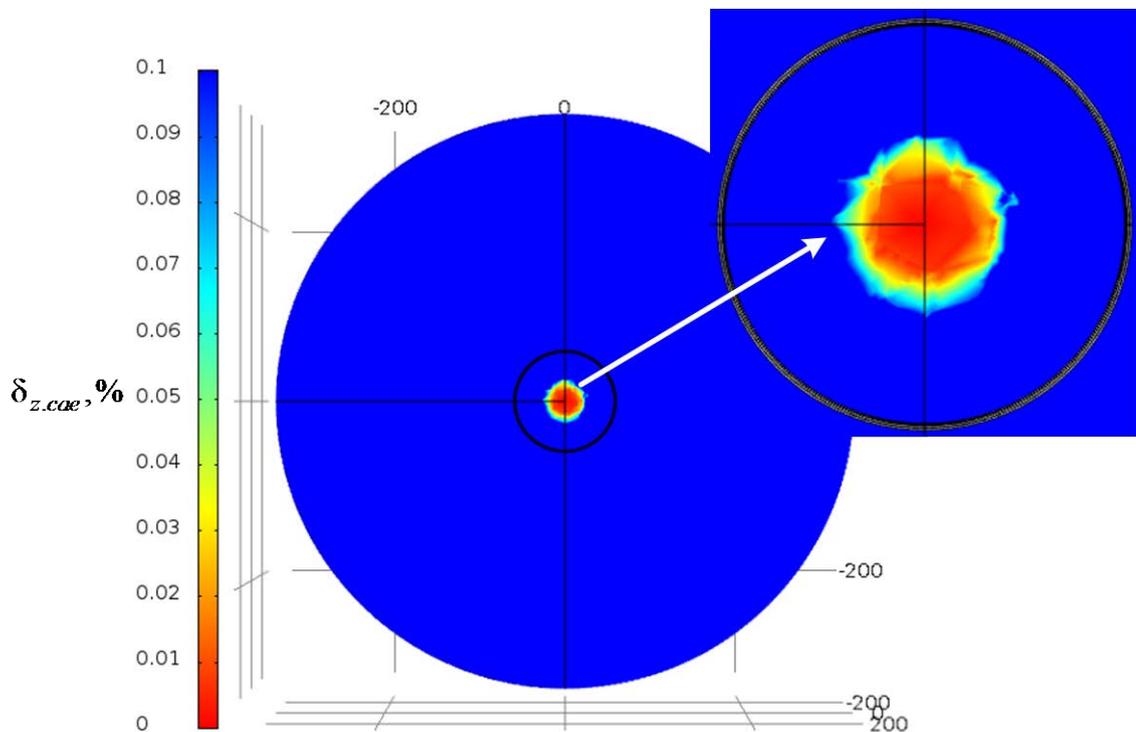


Рисунок 3.22 – Распределения магнитного поля созданного восьмикатушечной системой

Для сравнения результатов конечно-элементного моделирования восьмикатушечной системы с аналитическими расчетами была построена зависимость относительной неоднородности магнитного поля от значения координат по оси  $z$ , приведенных к радиусу катушки (см. рисунок 3.23), полученная в результате моделирования.

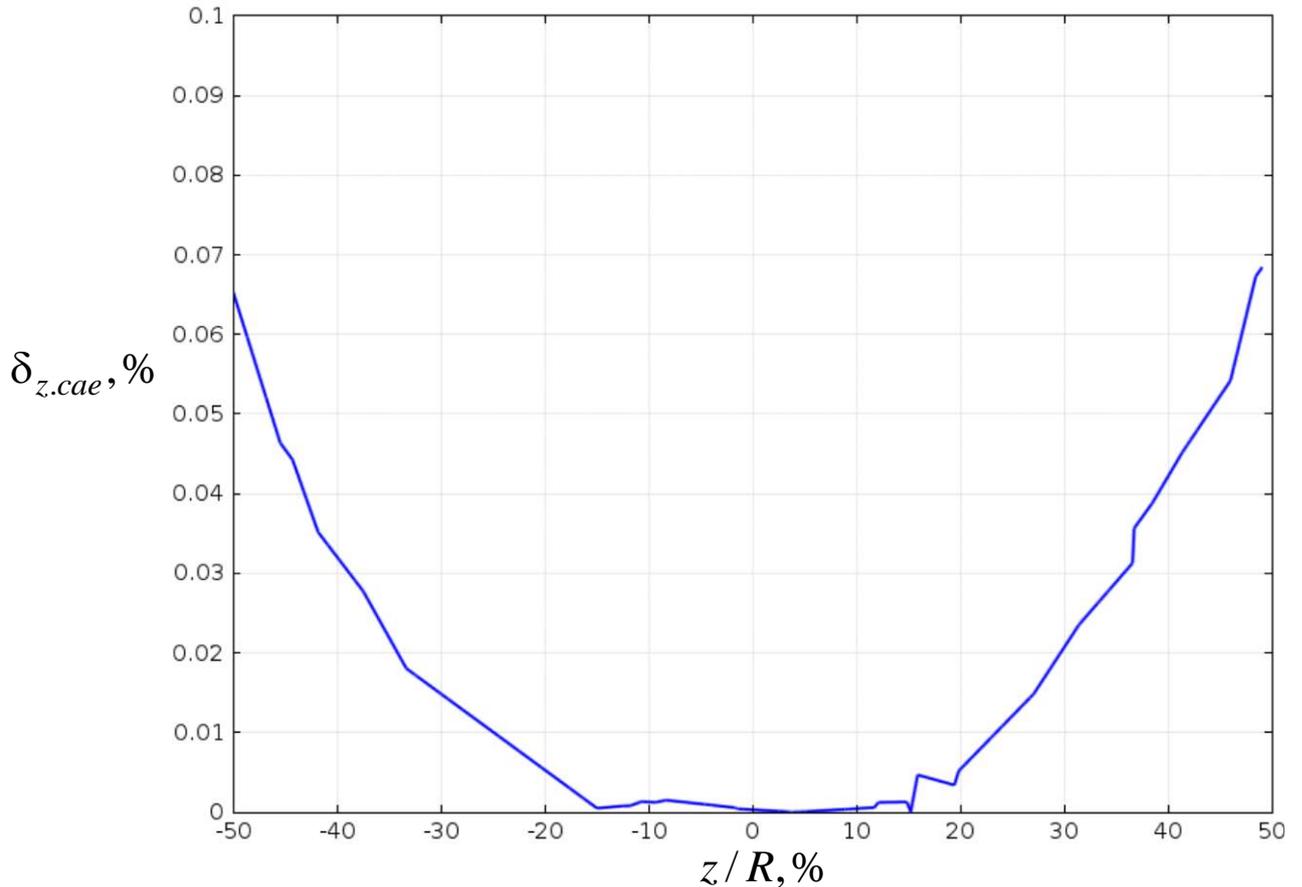


Рисунок 3.23 – Неоднородность магнитного поля, созданного восьмикатушечной системой, значения координаты по оси  $z$  приведены к радиусу катушки  $R$

Результаты конечно-элементного моделирования с достаточной точностью совпадают с аналитическими расчетами. Максимальная неоднородность вдоль оси  $z$  на расстоянии  $\pm R/2$  составляет 0,065 %.

Таким образом, рассчитанная конструкция системы из восьми катушек позволяет создать равномерное поле с неоднородностью менее 0,1 % на расстояниях  $\pm R/2$  от центра системы вдоль оси  $z$ .

Следует отметить, что результаты аналитического расчета восьмикатушечной системы получены для бесконечно тонких витков. Однако реально применяют катушки с большим количеством витков для уменьшения тока питания при создании необходимого по величине магнитного поля. Вследствие этого вторая и последующие четные производные при разложении в ряд Тейлора не равны нулю для пар витков находящихся на расстояниях, отличных от указанных в таблице 3.2, и неоднородность поля возрастает. Поэтому при моделировании катушек в среде COMSOL неоднородность в точках  $\pm R/2$  по оси  $z$  в 6 раз больше чем рассчитанная аналитически.

### 3.4 Изготовление и апробация калибровочной системы катушек

Для изготовления системы катушек была использована цилиндрическая основа в виде ПВХ трубы диаметром 110 мм и длиной 300 мм. Провод в катушке (секции) наматывался виток к витку. Направление намотки у всех секций одинаковое. Было обеспечено совпадение центров катушек с размерами, указанными в таблице 3.2. Общее число витков – 146. Марка использованного для изготовления обмоток провода – ПЭВШО 0,2.

Внешний вид изготовленной системы катушек приведен на рисунке 3.24.

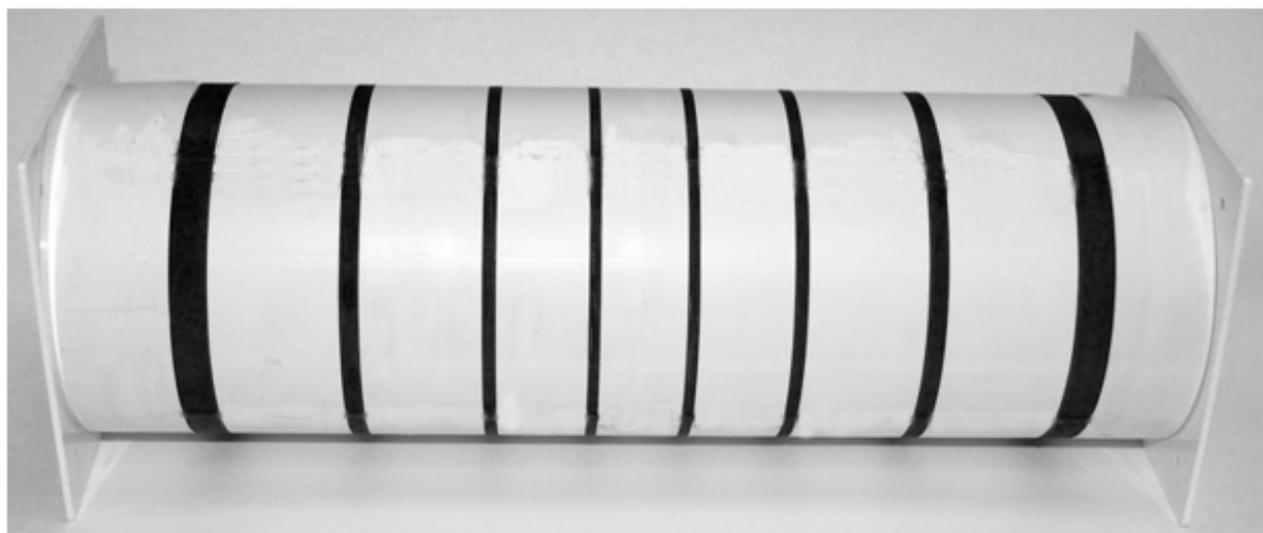


Рисунок 3.24 – Внешний вид изготовленной системы катушек.

Для экспериментальных исследований изготовленной системы из восьми аксиальных катушек в качестве эталонного средства измерений постоянного магнитного поля был использован магнитометр Mag-01 фирмы Bartington Instruments [127] внешний вид которого показан на рисунке 3.25, а в качестве источника силы постоянного тока – калибратор универсальный Fluke 5520A [128] (Номер в Госреестре СИ 51160-12). Калибратор Fluke 5520A позволяет воспроизводить постоянный ток в диапазоне от минус 20,5 до 20,5 А с разрешающей способностью до 1 нА.



Рисунок 3.25 – Феррозондовый магнитометр Mag-01 производства фирмы Bartington Instruments

Результаты измерений магнитной индукции в центре системы катушек и на расстояниях  $\pm R/2$  от центра при токах от 1 до 100 мА приведены в таблице 3.3. Относительные отклонения магнитной индукции на расстояниях  $\pm R/2$  от значения в центре системы рассчитаны по формуле (3.30):

$$\delta_z = \frac{(B_{z=0} - B_{z \neq 0})}{B_{z=0}} \cdot 100. \quad (3.30)$$

Таблица 3.3 – Результаты измерений магнитной индукции в системе катушек

Ток, мА	Магнитная индукция, мкТл				
	$z = 0$	$z = R/2$	$\delta_{z=R/2}$	$z = -R/2$	$\delta_{z=-R/2}$
1	0,452	0,452	0	0,452	0
2	0,904	0,904	0	0,904	0

Ток, мА	Магнитная индукция, мкТл				
	$z = 0$	$z = R/2$	$\delta_{z=R/2}$	$z = -R/2$	$\delta_{z=-R/2}$
3	1,356	1,357	0,073	1,357	0,074
4	1,808	1,809	0,055	1,809	0,055
5	2,260	2,262	0,089	2,261	0,044
6	2,712	2,714	0,074	2,714	0,074
7	3,164	3,166	0,063	3,166	0,063
8	3,616	3,619	0,083	3,618	0,055
9	4,068	4,071	0,074	4,071	0,074
10	4,520	4,523	0,066	4,523	0,066
20	9,040	9,048	0,089	9,046	0,066
30	13,559	13,571	0,089	13,569	0,07375
40	18,080	18,093	0,072	18,092	0,06637
50	22,60	22,62	0,089	22,61	0,04425
60	27,12	27,14	0,074	27,14	0,07375
70	31,64	31,66	0,063	31,66	0,06321
80	36,16	36,19	0,083	36,18	0,05531
90	40,68	40,71	0,074	40,71	0,07375
100	45,20	45,23	0,066	45,23	0,06637

Из результатов экспериментальных исследований [129] разработанной системы восьми аксиальных катушек следует, что значение магнитной индукции в центре системы катушек при токе 1 мА составляет 452 нТл, и отличается от расчетного на 0,7 %. Неоднородность магнитного поля на расстояниях  $\pm R/2$  от центра системы катушек не превышает 0,09 %. Следует отметить, что неоднородность магнитного поля в реальной системе катушек больше по сравнению с расчетной вследствие того, что при аналитических расчетах неоднородности не была учтена толщина витков катушек.

Диапазон значений магнитной индукции воспроизводимых системой катушек при токах от 1 до 100 мА составляет от 0,452 до 45,2 мкТл соответственно. В данном диапазоне токов статическая характеристика (функция преобразования) изготовленной системы катушек имеет линейный характер, прямо пропорциональный входному току.

### 3.5 Выводы к главе 3

1. Проведен сравнительный математический анализ неоднородности магнитного поля создаваемого катушками Гельмгольца, трех- и четырехкатушечными системами Максвелла, четырехкатушечными системами Бэйкера, Браунбека и Гарретта.

2. Для калибровки и градуировки датчиков слабых магнитных полей и магнитометров на их основе рассчитана, промоделирована и изготовлена система из восьми соосных катушек с повышенной однородностью магнитного поля.

3. Разработанная восьмикатушечная система позволяет создать магнитное поле с неоднородностью не хуже 0,1 % на расстоянии половины радиуса от геометрического центра системы, при токе питания от 0 до 200 мА.

## ГЛАВА 4

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВОГО МАГНИТОМЕТРА

В данной главе рассмотрены вопросы экспериментального исследования процедуры обработки сигналов с феррозондового датчика, предложенной во второй главе. Проведено исследование чувствительности типового дифференциального феррозондового датчика на второй, четвертой и шестой гармониках при возбуждении сигналами синусоидальной и прямоугольной форм. Приведено описание практической реализации устройства кондиционирования сигналов с феррозондового датчика и проведена оценка погрешности прототипа магнитометра.

#### 4.1 Исследование дифференциального феррозондового датчика

Для проверки теоретических предположений, сделанных во второй главе, был использован типовой дифференциальный феррозондовый датчик Mag Probe F [127] фирмы Bartington Instruments (Великобритания), внешний вид которого изображен на рисунке 4.1. Характеристики данного датчика приведены в таблице 4.1.



Рисунок 4.1 – Феррозондовый датчик Mag Probe F

Для исследований чувствительности феррозондового датчика в зависимости от формы сигнала возбуждения на второй, четвертой и шестой гармониках была собрана схема эксперимента, представленная на рисунке 4.2.

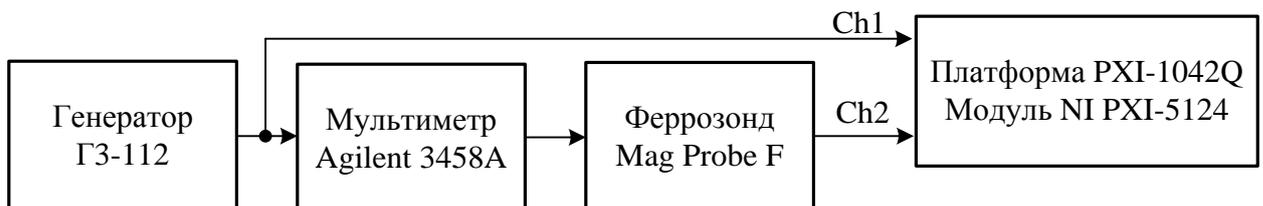


Рисунок 4.2 – Схема для исследований феррозондового датчика

Таблица 4.1 – Характеристики датчика Mag Probe F

Разрешающая способность	5 нТл
Относительная погрешность	1 %
Линейность	0,01 %
Температурная погрешность	0.003 %/К
Смещение	меньше 5 нТл
Шум	меньше 100 пТл
Гистерезис	меньше 1 нТл
Рабочая полоса частот	10 Гц
Сопротивление катушки возбуждения	22 Ом
Сопротивление измерительной катушки	59 Ом
Количество измерительных осей	1
Габаритные размеры, мм	62×8×8

В схеме на рисунке 4.2 генератор ГЗ-112 (номер в Госреестре СИ 6702-78) использован для возбуждения феррозонда сигналами синусоидальной и прямоугольной форм заданной амплитуды и частоты. Мультиметр Agilent 3458A (номер в Госреестре СИ 25900-03) использован для измерения тока возбуждения феррозондового датчика. Платформа PXI-1042Q [130] с модулем NI PXI-5124 [131] применялась для оцифровывания и спектрального анализа сигнала возбуждения феррозондового датчика и напряжения с его выхода, пропорционального измеряемой магнитной индукции.

NI PXI-5124 (номер в Госреестре СИ 38136-08) представляет собой двухканальный 12-битный осциллограф/дигитайзер с частотой дискретизации 200 МГц, относительная погрешность измерения напряжения составляет 1 %. Для спектрального анализа применялось программное обеспечение NI Spectral Measurements Toolkit фирмы National Instruments.

#### 4.1.1 Определение частоты сигнала возбуждения

В таблице 4.2 представлены результаты экспериментального определения зависимости амплитуды второй гармоники в сигнале с выхода датчика Mag

Probe F от амплитуды и частоты тока возбуждения при воздействии на датчик магнитного поля Земли (около 50 мкТл).

Таблица 4.2 – Зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды и частоты тока возбуждения

Частота, кГц	Ток, мА					
	0,5√2	1,0√2	1,5√2	2,0√2	<b>2,5√2</b>	3,0√2
	Напряжение, В					
20	0,06	0,16	0,44	1,11	1,65	1,76
21	0,07	0,21	0,52	1,33	1,71	1,82
22	0,09	0,27	0,65	1,54	1,78	1,87
23	0,11	0,31	0,74	1,76	1,94	2,07
24	0,15	0,46	1,13	2,01	2,46	2,51
<b>25</b>	0,16	0,49	1,28	2,12	<b>2,78</b>	2,73
26	0,16	0,48	1,27	2,11	2,76	2,72
27	0,15	0,47	1,25	2,11	2,75	2,72
28	0,14	0,45	1,25	2,10	2,75	2,70
29	0,14	0,42	1,24	2,08	2,73	2,68
30	0,13	0,42	1,21	2,07	2,69	2,65

Из анализа данных, приведенных в таблице 4.2, следует, что максимальная чувствительность (2,78 В) достигается при возбуждении датчика сигналом синусоидальной формы на частоте 25 кГц при токе возбуждения 2,5 мА среднеквадратического значения. Следовательно, дальнейшие исследования будем проводить при частоте тока возбуждения, равной 25 кГц.

#### 4.1.2 Исследование гармонического состава выходного сигнала при синусоидальном сигнале возбуждения

В таблице 4.3 приведены результаты измерения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник в сигнале с выхода датчика Mag Probe F при различных заданных значениях амплитуды тока возбуждения синусоидальной формы на частоте 25 кГц при воздействии на датчик магнитного поля Земли.

Таблица 4.3 – Амплитуды второй, четвертой и шестой гармоник на выходе датчика при возбуждении сигналом синусоидальной формы

Ток, мА	Напряжение, В		
	$U_2$	$U_4$	$U_6$
$0,5\sqrt{2}$	0,16	–	–
$1,0\sqrt{2}$	0,47	0,038	0,005
$1,5\sqrt{2}$	1,11	0,086	0,015
$2,0\sqrt{2}$	2,12	0,13	0,041
$2,5\sqrt{2}$	2,78	0,19	0,048
$3,0\sqrt{2}$	2,62	0,18	0,046

На рисунке 4.3 показаны эюры напряжений на катушке возбуждения и измерительной катушке при синусоидальном токе возбуждения 1,5 мА среднеквадратического значения.

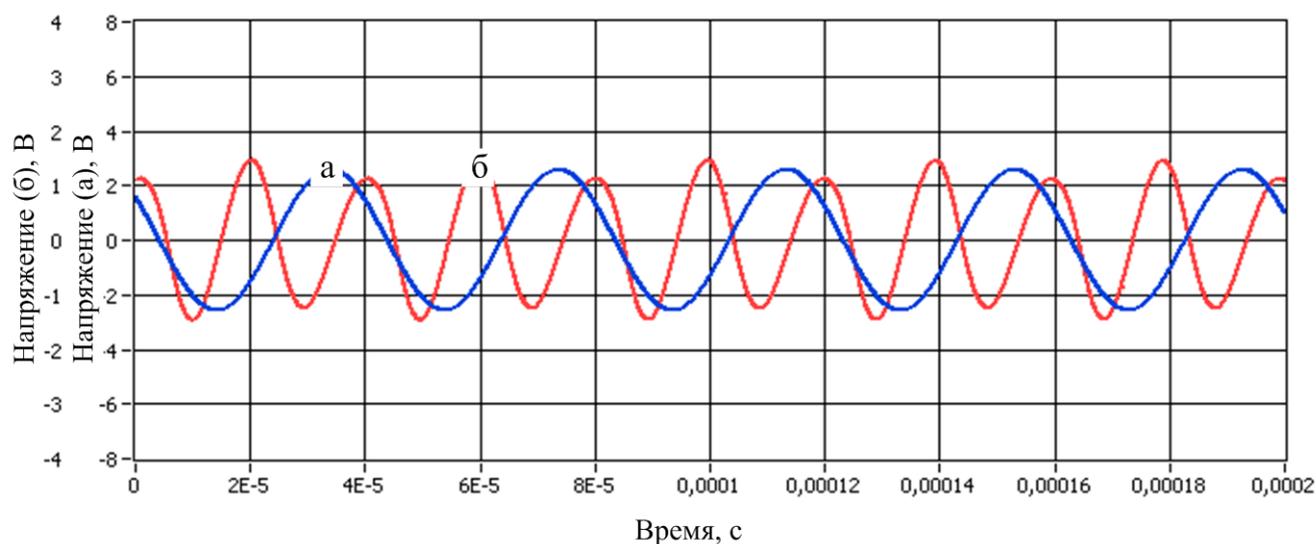


Рисунок 4.3 – Эюры напряжений на катушке возбуждения (а) и измерительной катушке (б) при синусоидальном сигнале возбуждения

На рисунке 4.4 приведены спектры синусоидального сигнала возбуждения и выходного сигнала с измерительной катушки при токе возбуждения 1,5 мА среднеквадратического значения.

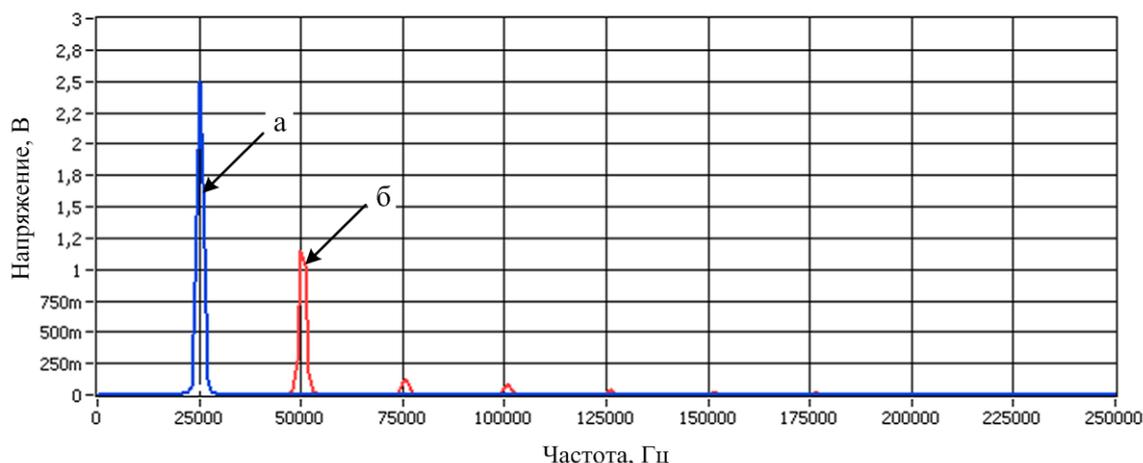


Рисунок 4.4 – Спектры синусоидального сигнала возбуждения (а) и выходного сигнала (б) с измерительной катушки

#### 4.1.3 Исследование гармонического состава выходного сигнала при прямоугольном сигнале возбуждения

В таблице 4.4 приведены результаты измерения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник на выходе датчика Mag Probe F при различных заданных значениях амплитуды тока возбуждения прямоугольной формы на частоте 25 кГц при воздействии на датчик магнитного поля Земли.

Таблица 4.4 – Амплитуды второй, четвертой и шестой гармоник на выходе датчика при возбуждении сигналом прямоугольной формы

Ток, мА	Напряжение, В		
	$U_2$	$U_4$	$U_6$
$0,5\sqrt{2}$	0,47	0,16	0,07
$1,0\sqrt{2}$	1,59	0,47	0,12
$1,5\sqrt{2}$	2,23	0,84	0,23
$2,0\sqrt{2}$	2,21	0,82	0,22
$2,5\sqrt{2}$	2,22	0,83	0,26

На рисунке 4.5 показаны эпюры напряжений на катушке возбуждения и измерительной катушке при токе возбуждения 1,5 мА среднеквадратического значения прямоугольной формы.

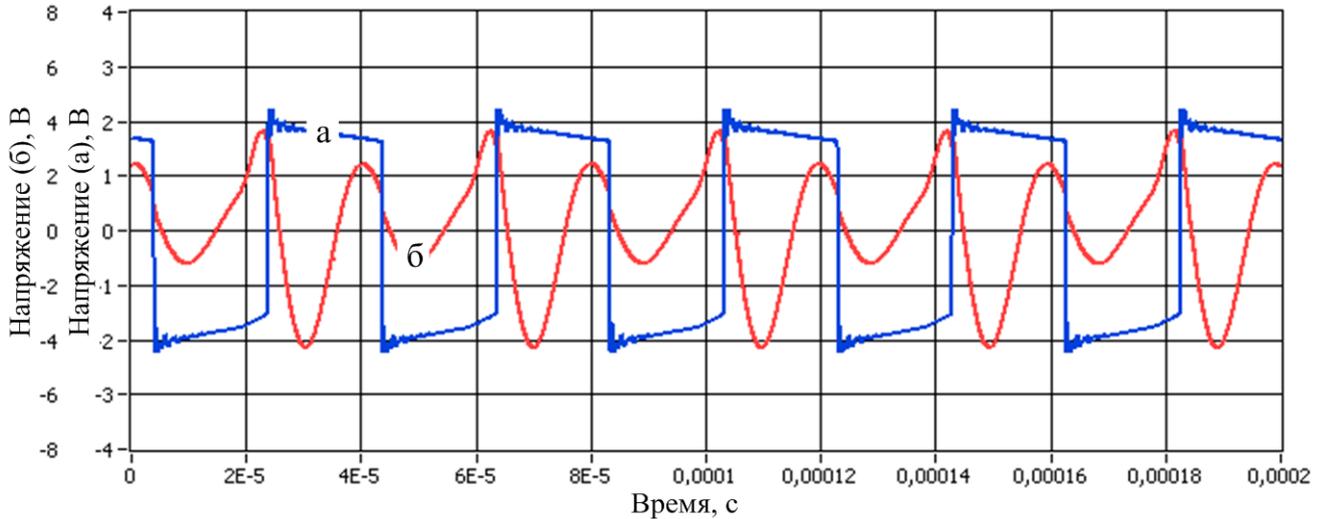


Рисунок 4.5 – Эпюры напряжений на катушке возбуждения (а) и измерительной катушке (б) при прямоугольном сигнале возбуждения

На рисунке 4.6 приведены спектры прямоугольного сигнала возбуждения и выходного сигнала с измерительной катушки при токе возбуждения 1,5 мА среднеквадратического значения.

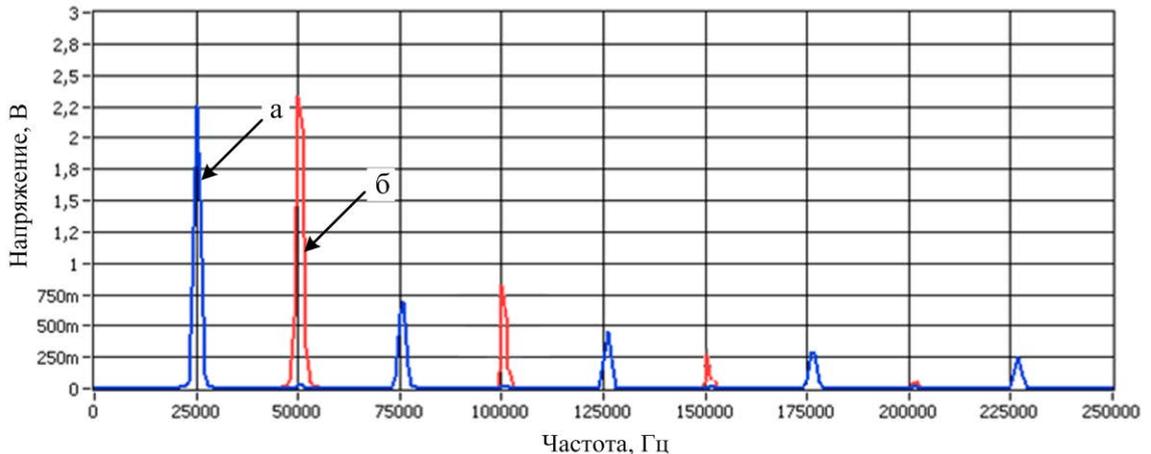


Рисунок 4.6 – Спектры прямоугольного сигнала возбуждения (а) и выходного сигнала (б) с измерительной катушки

На рисунках 4.7-4.9 приведены зависимости амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник на выходе датчика от тока возбуждения при возбуждении сигналами синусоидальной и прямоугольной форм.

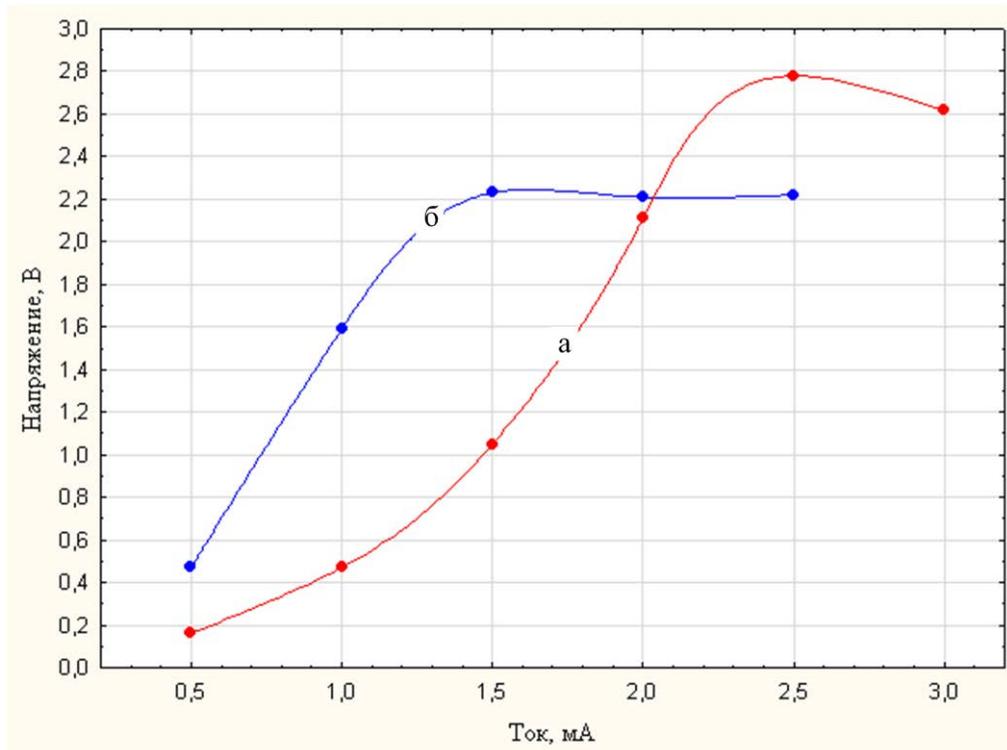


Рисунок 4.7 – Зависимости амплитуд второй гармоники на выходе датчика от тока возбуждения при возбуждении сигналами синусоидальной (а) и прямоугольной форм (б)

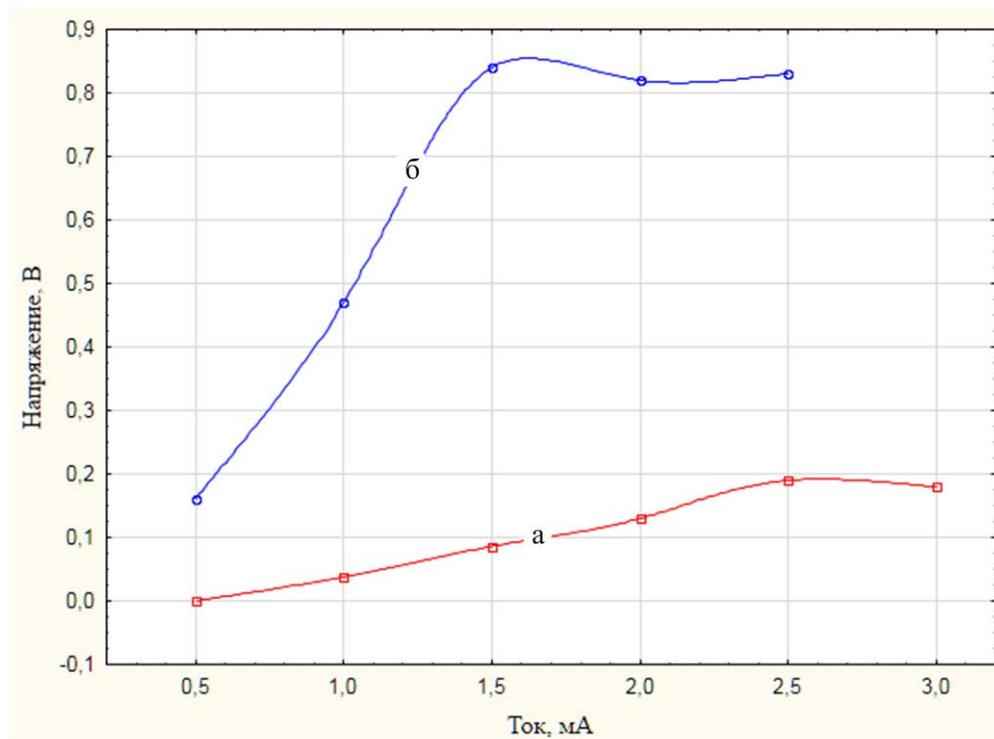


Рисунок 4.8 – Зависимости амплитуд четвертой гармоники на выходе датчика от тока возбуждения при возбуждении сигналами синусоидальной (а) и прямоугольной форм (б)

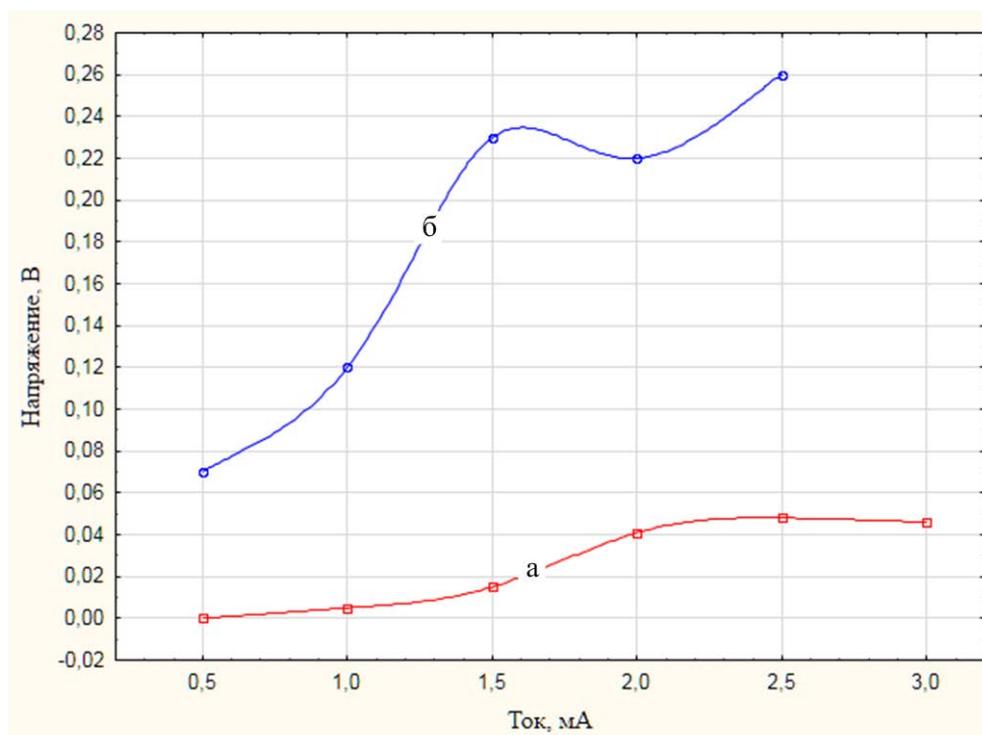


Рисунок 4.9 – Зависимости амплитуд шестой гармоники на выходе датчика от тока возбуждения при возбуждении сигналами синусоидальной (а) и прямоугольной форм (б)

Анализ результатов измерений, приведенных в таблицах 4.3-4.4 и на рисунках 4.7-4.9, показывает, что чувствительность феррозондового датчика на второй гармонике при возбуждении сигналом прямоугольной формы выше, чем при возбуждении сигналом синусоидальной формы вплоть до значения тока возбуждения  $2,0\sqrt{2}$  мА. При этом максимальная чувствительность достигается при токе  $1,5\sqrt{2}$  мА. На четвертой и шестой гармониках чувствительность феррозондового датчика при возбуждении сигналом прямоугольной формы значительно выше во всем диапазоне значений тока возбуждения.

#### 4.1.4 Проверка способа повышения чувствительности феррозондового датчика

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенного во второй главе способа повышения чувствительности феррозондового датчика была собрана схема эксперимента, представленная на рисунке 4.10.

Исследуемый феррозондовый датчик с помощью крепления из текстолита помещался в центр восьмикатушечной калибровочной системы, описанной в третьей главе. В качестве источника силы постоянного тока к восьмикатушечной системе был подключен калибратор универсальный Fluke 5520A. На генераторе ГЗ-112 была установлена прямоугольная форма сигнала для возбуждения датчика с частотой 25 кГц. Напряжение на генераторе устанавливалось таким образом, чтобы через феррозонд протекал ток 1,5 мА среднеквадратического значения. Значение тока контролировалось по мультиметру Agilent 3458A.

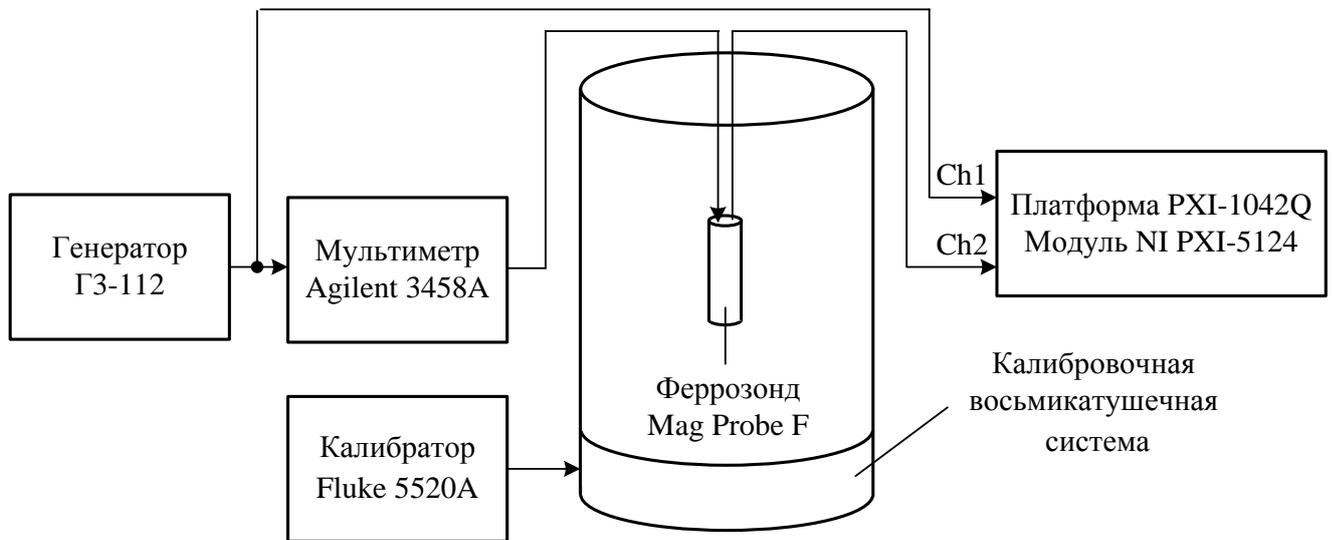


Рисунок 4.10 – Схема для исследований чувствительности феррозондового датчика

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 создаваемая индукция магнитного поля восьмикатушечной системой вычиталась из нормального поля Земли, а не складывалась.

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 по следующей формуле:

$$\bar{U}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{gi}, \quad (4.1)$$

где  $g$  – номер гармоники;

$n$  – число измерений;

$U_{gi}$  –  $i$ -ый результат измерения амплитуды  $g$ -ой гармоники, В.

Результаты измерения амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник в напряжении с выхода феррозондового датчика от изменения магнитной индукции приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Амплитуды второй, четвертой и шестой гармоник в напряжении с выхода датчика при изменении магнитной индукции

Ток калибратора, мА	Относительное изменение магнитной индукции, мкТл	Напряжение, В		
		$\bar{U}_2$	$\bar{U}_4$	$\bar{U}_6$
0	–	2,23	0,85	0,23
10	4,52	1,97	0,75	0,22
20	9,04	1,73	0,67	0,19
30	13,56	1,48	0,59	0,16
40	18,08	1,24	0,49	0,15
50	22,6	0,98	0,4	0,13
60	27,12	0,73	0,3	0,1
70	31,64	0,49	0,22	0,09
80	36,16	0,23	0,13	0,07

Для анализа данных, приведенных в таблице 4.5, были рассчитаны соответственно индивидуальные и средние изменения значений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник от изменения магнитной индукции:

$$\Delta_g = U_{gk} - U_{gk-1}, \quad (4.2)$$

где  $k$  – номер результата измерения амплитуды  $g$ -ой гармоники.

$$\bar{\Delta}_g = \frac{1}{8} \sum_{k=2}^9 \Delta_{gk}, \quad (4.3)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Индивидуальные и средние изменения значений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник

Номер измерения $k$	Параметры генерируемого магнитного поля		Изменение значений амплитуд, В		
	Ток питания, мА	Магнитная индукция, мкТл	$\Delta_2$	$\Delta_4$	$\Delta_6$
1	0	–	–	–	–
2	10	4,52	0,26	0,1	0,01
3	20	9,04	0,24	0,08	0,03
4	30	13,56	0,25	0,08	0,03
5	40	18,08	0,24	0,1	0,01
6	50	22,6	0,26	0,09	0,02
7	60	27,12	0,25	0,1	0,03
8	70	31,64	0,24	0,08	0,01
9	80	36,16	0,26	0,09	0,02
			$\bar{\Delta}_2 = 0,25$	$\bar{\Delta}_4 = 0,09$	$\bar{\Delta}_6 = 0,02$

Из анализа данных, приведенных в таблице 4.6, следует, что при возбуждении феррозондового преобразователя сигналом прямоугольной формы и изменении магнитной индукции на 4,52 мкТл значение амплитуды второй гармоники изменяется на 0,25 В, четвертой гармоники изменяется на 0,09 В, шестой гармоники изменяется на 0,02 В.

Для оценки эффективности суммирования результатов измерений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник с целью повышения чувствительности измерения магнитной индукции феррозондовыми датчиками были вычислены индивидуальные и средние изменения их суммарных значений.

$$\Delta_{2,4} = \Delta_2 + \Delta_4. \quad (4.4)$$

$$\Delta_{2,4,6} = \Delta_2 + \Delta_4 + \Delta_6. \quad (4.5)$$

Результаты расчета приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Суммарные изменения значений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник

Номер измерения $k$	Параметры генерируемого магнитного поля		Изменение значений амплитуд, В		
	Ток питания, мА	Магнитная индукция, мкТл	$\Delta_2$	$\Delta_{2,4}$	$\Delta_{2,4,6}$
1	0	–	–	–	–
2	10	4,52	0,26	0,36	0,37
3	20	9,04	0,24	0,32	0,35
4	30	13,56	0,25	0,33	0,36
5	40	18,08	0,24	0,34	0,35
6	50	22,6	0,26	0,35	0,37
7	60	27,12	0,25	0,35	0,38
8	70	31,64	0,24	0,32	0,33
9	80	36,16	0,26	0,35	0,37
			$\bar{\Delta}_2 = 0,25$	$\bar{\Delta}_{2,4} = 0,34$	$\bar{\Delta}_{2,4,6} = 0,36$

Выигрыш от суммирования результатов измерений амплитуд второй и четвертой гармоник рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon_{2,4} = \frac{|\bar{\Delta}_2 - \bar{\Delta}_{2,4}|}{\bar{\Delta}_2} \cdot 100, \% \quad (4.6)$$

Выигрыш от суммирования результатов измерений амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon_{2,4,6} = \frac{|\bar{\Delta}_2 - \bar{\Delta}_{2,4,6}|}{\bar{\Delta}_2} \cdot 100, \% \quad (4.7)$$

Расчеты по формулам (4.6) и (4.7) показали, что суммирование амплитуд второй и четвертой гармоник позволило повысить чувствительность измерений магнитной индукции феррозондовыми датчиками на 31 %; суммирование амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник обеспечило повышение чувствительности на 40 %.

Следовательно, применение предложенного способа повышения чувствительности феррозондового датчика за счет измерения амплитуд второй, четвертой

и шестой гармоник с последующим суммированием результатов измерений, позволило повысить чувствительность измерения магнитного поля на 40%.

Чувствительность датчика определяется как:

$$S_{2,4,6} = \frac{\overline{\Delta}_{2,4,6}}{\Delta B}, \quad (4.8)$$

где  $\Delta B$  – шаг изменения магнитной индукции равный 4,52 мкТл.

Тогда итоговая чувствительность используемого в экспериментах датчика Mag Probe F будет составлять 0,08 В/мкТл.

## 4.2 Устройство кондиционирования данных с феррозондового датчика

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

Традиционно для возбуждения феррозонда и кондиционирования с него сигналов применяются две типовые схемы [2], представленные на рисунках 4.11 и 4.12.

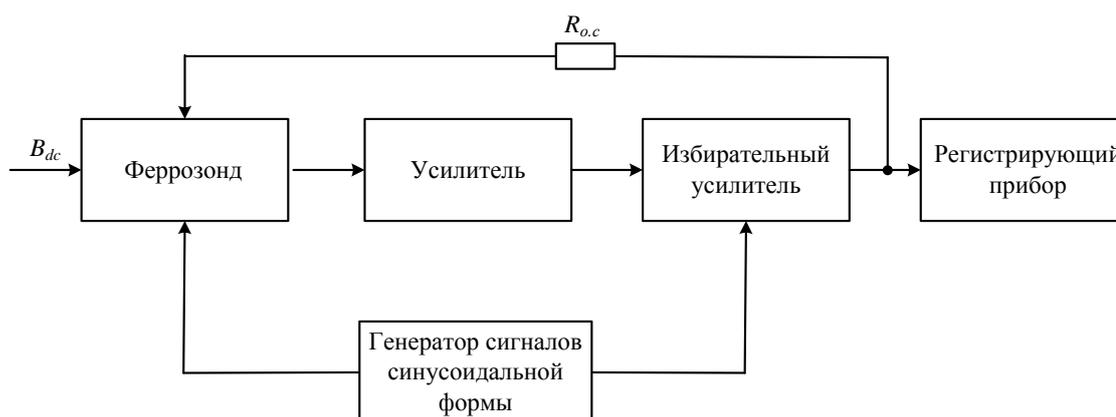


Рисунок 4.11 – Традиционная структурная схема кондиционирования сигнала с феррозондового датчика

В соответствии со схемой на рисунке 4.11 феррозонд подключен к генератору синусоидального тока, а выделение сигнала второй гармоники

производится с помощью полосовых фильтров и избирательных усилителей. При этом реализуется способ некогерентного измерения малых сигналов.

В этой схеме для повышения чувствительности измерений первая и третья гармоники напряжения в выходном сигнале феррозонда должны подавляться в фильтре или избирательном усилителе не менее чем на 60 дБ, в то же время коэффициент усиления по второй гармонике должен быть порядка 100 дБ. Повышение чувствительности за счет повышения коэффициента усиления приводит к неустойчивости измерительного канала, охваченного отрицательной обратной связью, и затрудняет его настройку. Для обеспечения устойчивости ограничивают глубину обратной связи, что ухудшает метрологические характеристики прибора [2, 132].

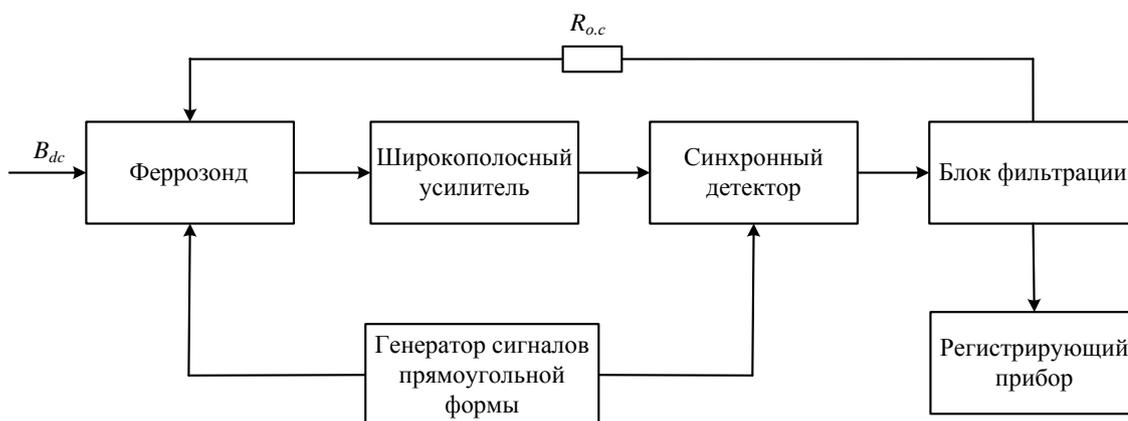


Рисунок 4.12 – Традиционная структурная схема кондиционирования сигнала с феррозондового датчика с параметрической фильтрацией

Схема на рисунке 4.12 обладает рядом преимуществ по сравнению с предыдущим подходом. В этом подходе обмотка возбуждения феррозонда подключена к генератору знакопеременных прямоугольных импульсов тока и реализуется способ когерентного измерения.

Усиление полезного сигнала производится с помощью широкополосного усилителя с последующим синхронным детектированием на частоте второй гармоники и фильтрацией. Данная схема принципиально может быть охвачена более глубокой обратной связью [2].

Для реализации предложенных решений по повышению чувствительности за счет синхронного детектирования выходной ЭДС на второй, четвертой и шестой гармониках с последующим суммированием результатов, на основе схемы на рисунке 4.12 была спроектирована схема возбуждения и кондиционирования сигналов [133] с феррозонда, представленная на рисунке 4.13.

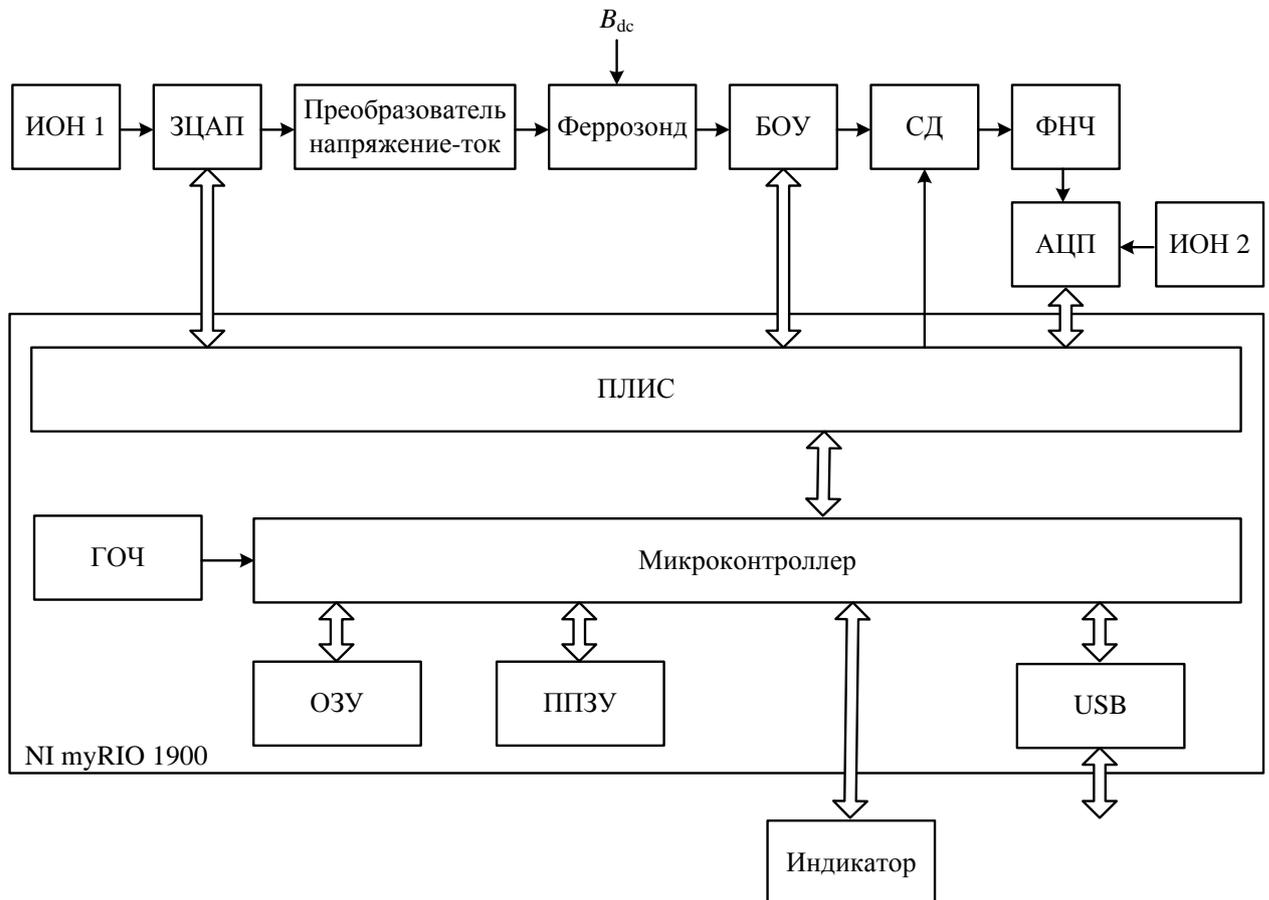


Рисунок 4.13 – Структурная схема возбуждения и кондиционирования сигналов феррозонда

В состав разработанной схемы входят:

- источники опорного напряжения (ИОН 1 и ИОН 2), ИОН 1 используются для формирования опорного напряжения для задающего цифро-аналогового 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 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 с микросхемой Xilinx Zynq-7010 выполняет функции программной и аппаратной логики;
- динамическое оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) используется в качестве блока оперативной памяти;
- энергонезависимая перепрограммируемая память (ППЗУ) типа EEPROM выполняют функции энергонезависимой памяти;
- программируемая интегральная логическая схема (ПЛИС) используется для управления ЗЦАП, БОУ и СД.
- генератор опорной частоты 40 МГц (ГОЧ) используется для тактирования микроконтроллера и ПЛИС.

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  $2f$ . 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  $4f$ , 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  $6f$ , 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 и выводится на индикатор.

Интерфейс USB используется для перепрограммирования NI myRIO 1900 и передачи измерительной информации на персональный компьютер.

Преобразователь напряжение в ток собран на микросхеме широкополосного видео-усилителя EL2099 по схеме неинвертирующего включения операционного усилителя с коэффициентом усиления 1. Для ограничения тока на выходе микросхемы установлен резистор номинальным сопротивлением 1 кОм, а для устранения постоянной составляющей в выходном сигнале и недопущения режима подмагничивания феррозонда постоянным током последовательно с резистором включен конденсатор номиналом 10 мкФ. Микросхема EL2099 позволяет обеспечить ток возбуждения до 200 мА, при этом амплитуда тока изменяется посредством изменения амплитуды напряжения с выхода ЗЦАП.

БОУ представляет собой каскадное включение двух инструментальных усилителей (ИУ) DA1 и DA2 PGA207 [134]. Изменение коэффициента усиления осуществляется с помощью микроконтроллера и ПЛИС. Использование двух последовательно включенных ИУ PGA207 позволяет реализовать следующие коэффициенты усиления 1, 2, 4, 5, 10, 25, 50, 100.

Схема СД собрана на микросхеме AD630, которая представляет собой прецизионный, высокоскоростной модулятор/демодулятор сигналов. Для устранения

постоянной составляющей в детектируемом и опорном сигналах на входах СД установлены дифференцирующие  $RC$  цепи.

С выхода СД сигнал поступает на ФНЧ, который является фильтром Бесселя третьего порядка с частотой среза 0,2 Гц. ФНЧ собран на микросхеме  $OP270$ . На рисунке 4.14 представлена схема ФНЧ.

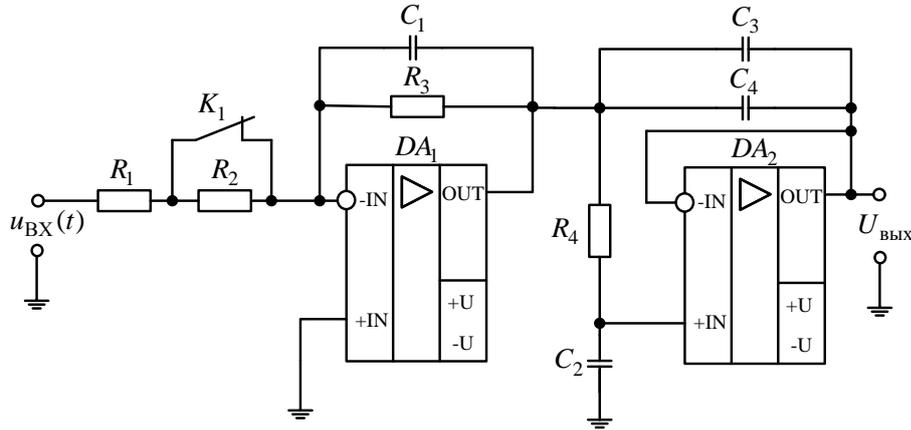


Рисунок 4.14 – Схема фильтра нижних частот

ФНЧ имеет два коэффициента усиления 1 и 10. Изменение усиления ФНЧ осуществляется микроконтроллером, который управляет реле  $K_1$ .

Для получения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик фильтра было проведено схемотехническое моделирование в среде Multisim. Собранная в среде модель представлена на рисунке 4.15.

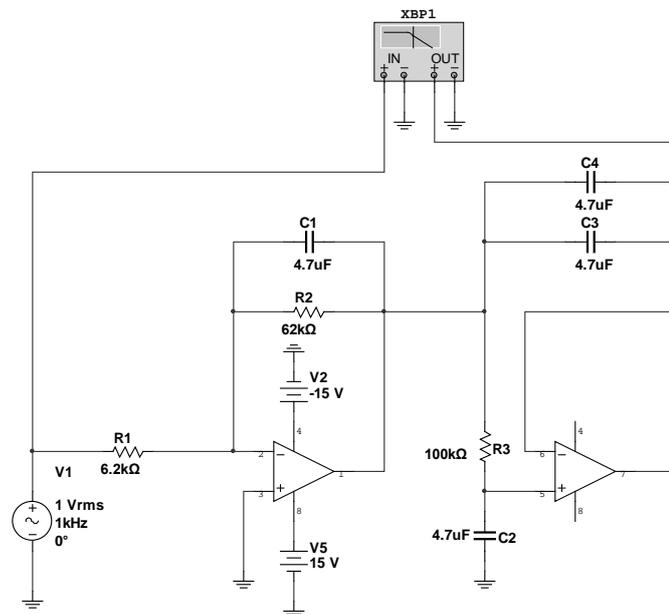


Рисунок 4.15 – Модель схемы фильтра нижних частот на частоту среза 0,2 Гц

На рисунке 4.16 приведены амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ФНЧ, полученные в результате моделирования.

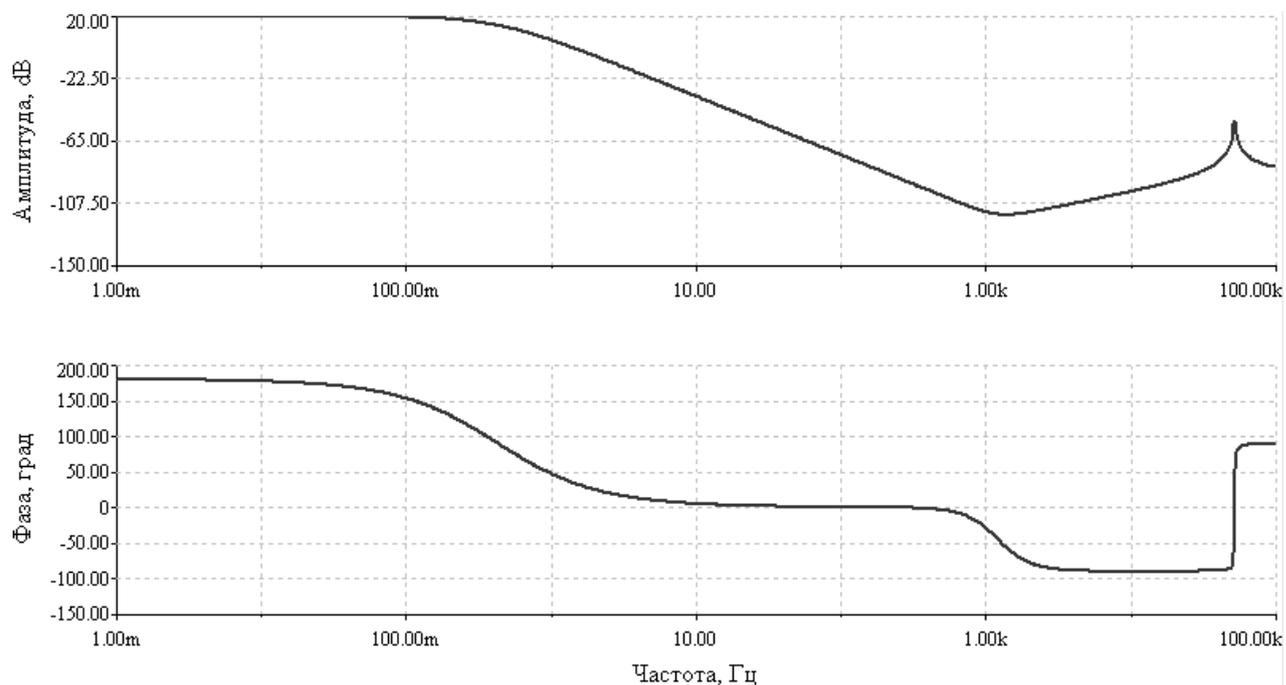


Рисунок 4.16 – АЧХ и ФЧХ ФНЧ на частоту среза 0,2 Гц

Результаты моделирования показывают, что при заданных параметрах схемы частота среза фильтра по уровню минус 3 дБ составляет 0,2 Гц, а коэффициент усиления постоянной составляющей равен 10. Таким образом, данная схема пригодна для фильтрации сигнала после синхронного детектирования.

Для оцифровывания измерительной информации используется АЦП со следующими характеристиками: разрешающая способность 12 бит, частота дискретизации до 500 кГц, полоса пропускания 50 кГц.

Для отображения измерительной информации используется 4 семи-сегментных индикатора.

Для синтеза сигналов возбуждения феррозонда, управления коэффициентом усиления БОУ, оцифровывания измерительной информации, ее последующей обработки и вывода на индикатор в среде графического программирования LabVIEW разработано специализированное программное обеспечение (ПО).

ПО разделено на две части: детерминированное приложение и недетерминированное приложение. Эти приложения расположены в разных

виртуальных приборах (ВИ). Под детерминированным приложением будем понимать такой ВИ, в котором входящие в его состав задачи будут всегда выполняться в заданное время.

На рисунке 4.17 приведена блок-диаграмма недетерминированного ВИ отвечающего за прямой цифровой синтез сигнала возбуждения.

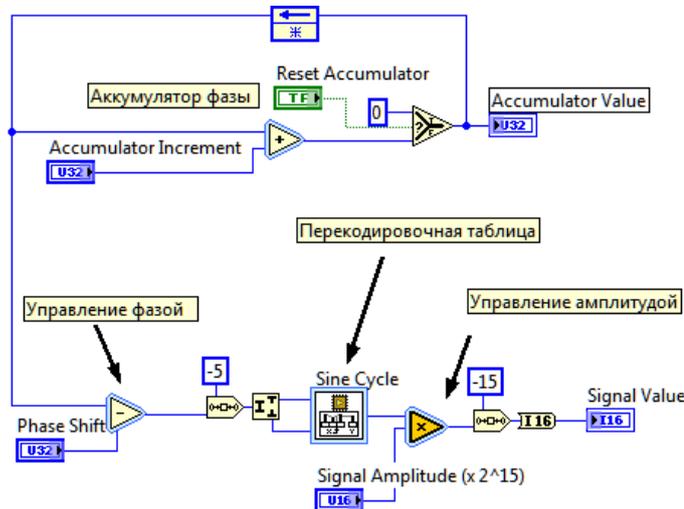


Рисунок 4.17 – Блок-диаграмма недетерминированного ВИ

Данный ВИ включает в себя аккумулятор фазы, перекодировочную таблицу, содержащую один период сигнала возбуждения и блок управления амплитудой сигнала. Изменяя содержимое перекодировочной таблицы, можно изменять форму выходного сигнала.

На рисунке 4.18 приведена блок-диаграмма детерминированного ВИ, отвечающего за управление тактовой частотой и управление ЗЦАП.

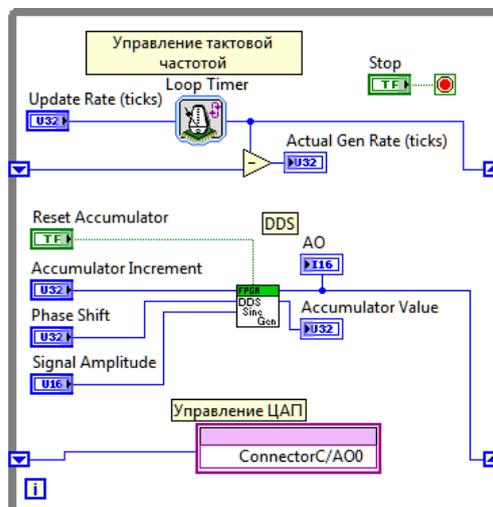


Рисунок 4.18 – Блок-диаграмма детерминированного ВИ



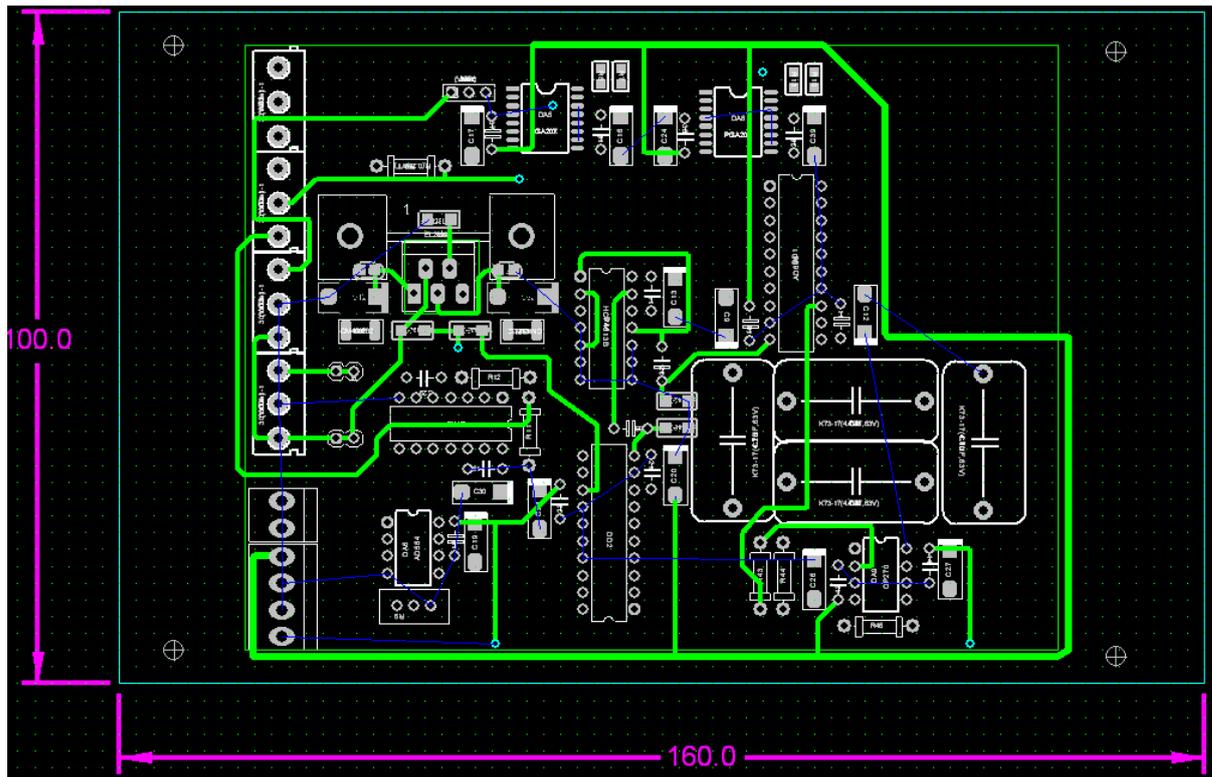


Рисунок 4.20 – Нижний сигнальный слой

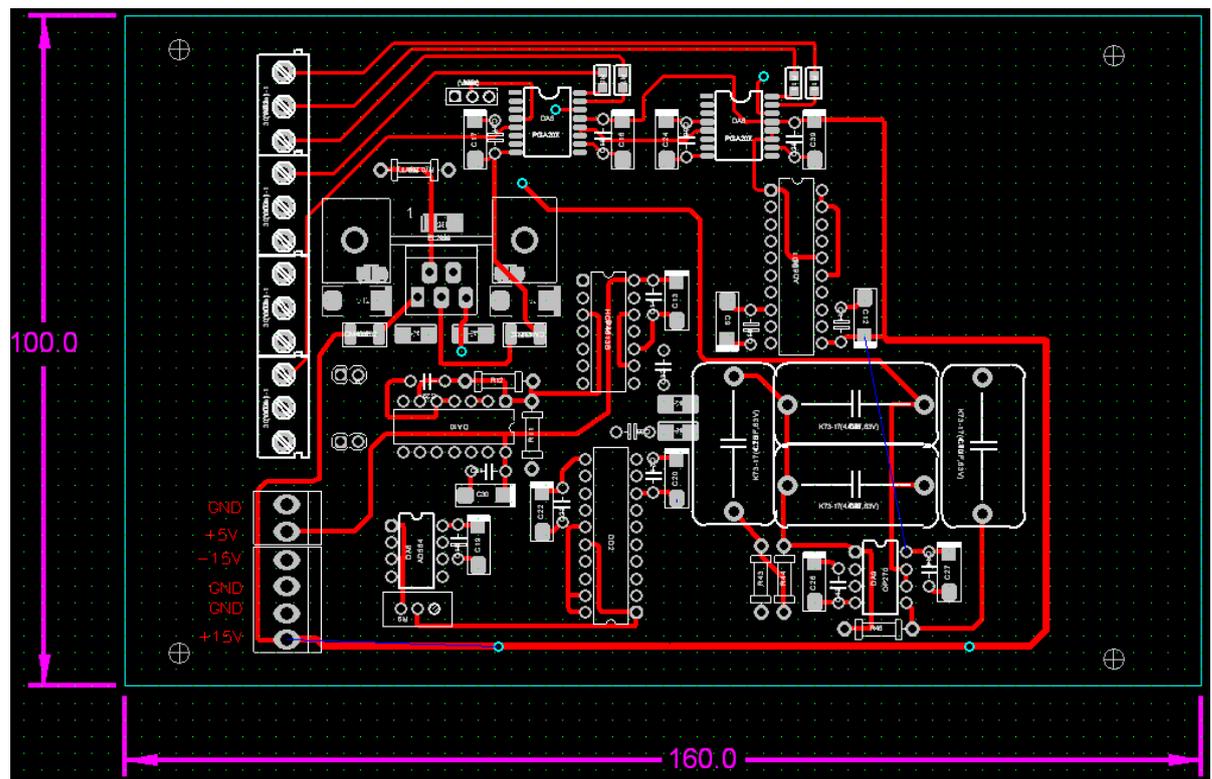


Рисунок 4.21 – Верхний сигнальный слой

Печатная плата (ПП) имеет размеры 100 мм на 160 мм. Проектирование ПП осуществлялось в среде автоматизированного проектирования электроники

*PCAD*. ПП разведена в двух сигнальных слоях, в нижнем сигнальном слое присутствует экран, подключаемый к общей земле в точке. Все микросхемы подключаются отдельными проводниками к общей земле также в этой точке.

На рисунках 4.21, 4.22 представлены внешний вид макета магнитометра

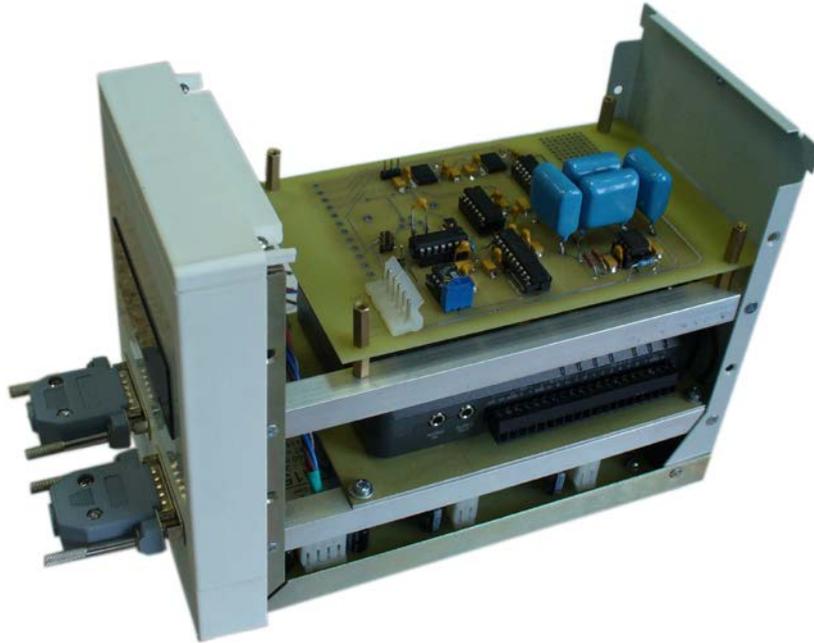


Рисунок 4.21 – Внешний вид макета магнитометра без кожуха



Рисунок 4.22 – Внешний вид макета магнитометра в сборе

### 4.3 Исследование метрологических характеристик магнитометра

Погрешность магнитометра складывается из погрешности преобразования феррозондом магнитной индукции в напряжение и погрешности коэффициента преобразования измерительного канала устройства кондиционирования сигналов с феррозонда.

#### 4.3.1 Определение погрешности коэффициента преобразования устройства кондиционирования

Для определения погрешности коэффициента преобразования измерительного канала устройства кондиционирования сигналов была собрана схема, представленная на рисунке 4.23.

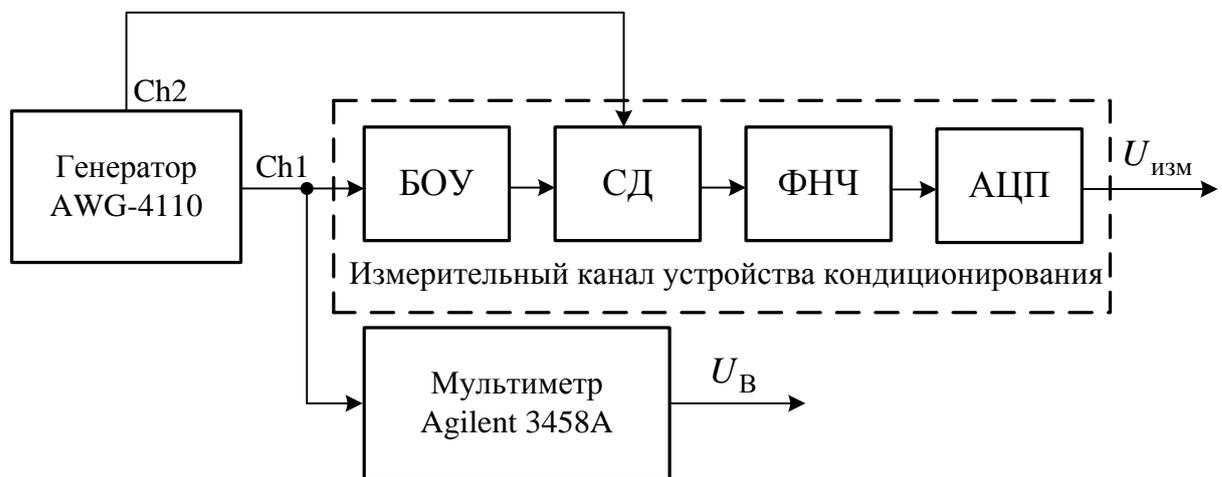


Рисунок 4.23 – Схема определения погрешности коэффициента преобразования устройства кондиционирования сигналов

Определение погрешности коэффициента преобразования устройством кондиционирования осуществляли следующим образом. С первого выхода (CH1) генератора AWG-4110 на вход устройства кондиционирования подавали синусоидальное напряжение амплитудой от 3 мВ до 3 В на частотах 50 кГц, 100 кГц и 150 кГц, амплитуду напряжения с выхода генератора контролировали с помощью мультиметра Agilent 3458A. Со второго выхода (CH2) генератора AWG-4110 на опорный вход СД подавали прямоугольное напряжение без постоянной состав-

ляющей амплитудой 1 В и скважностью 50 %. Напряжение со второго выхода (СН2) устанавливалось с той же фазой, что и напряжение с первого выхода (СН1) генератора. Измеренное устройством кондиционирования напряжение фиксировали по индикатору.

Коэффициент преобразования устройства кондиционирования рассчитывался по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\text{изм}}}{U_{\text{В}}}, \quad (4.9)$$

где  $U_{\text{изм}}$  – значение напряжения, измеренное устройством кондиционирования, В;

$U_{\text{В}}$  – значение напряжения, измеренное с помощью мультиметра Agilent 3458А.

Средний коэффициент преобразования устройства кондиционирования рассчитывался по формуле:

$$\bar{K}_{\Pi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\Pi i}, \quad (4.10)$$

где  $n$  – количество измерений коэффициента преобразования;

$K_{\Pi i}$  –  $i$ -ый коэффициент преобразования.

Как отмечено выше БОУ позволяет программно изменять коэффициент усиления  $K$  измерительного канала устройства кондиционирования. Поэтому определение погрешности коэффициента преобразования измерительного канала проводили при различных коэффициентах усиления.

В таблицах 4.8-4.10 приведены результаты измерений коэффициента преобразования на частотах 50, 100 и 150 кГц, при коэффициенте усиления измерительного канала  $K = 1$ .

Относительная погрешность коэффициента преобразования измерительного канала устройства кондиционирования рассчитана по формуле:

$$\delta_U = \frac{|U_{\text{В}} - U_{\text{изм}} / \bar{K}_{\Pi}|}{U_{\text{В}}} \cdot 100, \%. \quad (4.11)$$

В таблицах 4.11-4.13 приведены результаты расчета относительной погрешности коэффициента преобразования на частотах 50, 100 и 150 кГц, при коэффициенте усиления устройства кондиционирования  $K = 1$ .

Таблица 4.8 – Результаты измерений напряжения на частоте 50 кГц при коэффициенте усиления  $K = 1$

Напряжение на выходе Ch1 AWG-4110, В	$U_B$ , В	$U_{изм}$ , В	$K_{п}$
0,01	0,0099	0,0070	0,7050
0,03	0,0303	0,0216	0,7131
0,05	0,0504	0,0359	0,7119
0,07	0,0705	0,0502	0,7116
0,1	0,1007	0,0718	0,7127
0,3	0,2996	0,2132	0,7115
0,5	0,4995	0,3552	0,7111
0,7	0,6973	0,4961	0,7114
1	0,9972	0,7095	0,7115
3	3,0028	2,136	0,7113
			$\bar{K}_{п} = 0,71$

Таблица 4.9 – Результаты измерений напряжения на частоте 100 кГц при коэффициенте усиления  $K = 1$

Напряжение на выходе Ch1 AWG-4110, В	$U_B$ , В	$U_{изм}$ , В	$K_{п}$
0,01	0,0099	0,0072	0,7232
0,03	0,0304	0,0220	0,7236
0,05	0,0508	0,0363	0,7178
0,07	0,0708	0,0507	0,7161
0,1	0,1011	0,0723	0,7152
0,3	0,3007	0,2148	0,7142
0,5	0,5009	0,3572	0,7130
0,7	0,7002	0,4991	0,7128
1	1,0006	0,7136	0,7132
3	2,9962	2,138	0,7137
			$\bar{K}_{п} = 0,71$

Таблица 4.10 – Результаты измерений напряжения на частоте 150 кГц при коэффициенте усиления  $K = 1$

Напряжение на выходе Ch1 AWG-4110, В	$U_B$ , В	$U_{изм}$ , В	$K_{п}$
0,01	0,0097	0,0071	0,7255
0,03	0,0305	0,0218	0,7143
0,05	0,0508	0,0368	0,7248
0,07	0,0711	0,0513	0,7217
0,1	0,1014	0,0728	0,7176
0,3	0,3019	0,2155	0,7136
0,5	0,5027	0,3586	0,7132
0,7	0,7031	0,5022	0,7143
1	0,1004	0,7162	0,7131
3	0,3033	2,165	0,7138
			$\bar{K}_{п} = 0,71$

Таблица 4.11 – Относительная погрешность коэффициента преобразования на частоте 50 кГц при коэффициенте усиления  $K = 1$

$U_B$ , В	0,0099	0,0303	0,0504	0,0705	0,1007	0,2996	0,4995	0,6973	0,9972	3,0028
$U_{изм}$ , В	0,0070	0,0216	0,0359	0,0502	0,0718	0,2132	0,3552	0,4961	0,7095	2,136
$\delta_U$	0,69	0,43	0,26	0,23	0,37	0,21	0,15	0,20	0,21	0,19

Таблица 4.12 – Относительная погрешность коэффициента преобразования на частоте 100 кГц при коэффициенте усиления  $K = 1$

$U_B$ , В	0,0099	0,0304	0,0508	0,0708	0,1011	0,3007	0,5009	0,7002	1,0006	2,9962
$U_{изм}$ , В	0,0072	0,0220	0,0363	0,0507	0,0723	0,2148	0,3572	0,4991	0,7136	2,138
$\delta_U$	0,44	0,54	0,12	0,54	0,66	0,80	0,97	0,99	0,95	0,88

Таблица 4.13 – Относительная погрешность коэффициента преобразования на частоте 150 кГц при коэффициенте усиления  $K = 1$

$U_B$ , В	0,0097	0,0305	0,0508	0,0711	0,1014	0,3019	0,5027	0,7031	0,1004	0,3033
$U_{изм}$ , В	0,0071	0,0218	0,0368	0,0513	0,0728	0,2155	0,3586	0,5022	0,7162	2,165
$\delta_U$	0,76	0,79	0,67	0,24	0,34	0,89	0,93	0,79	0,96	0,86

Из результатов измерений, приведенных в таблицах 4.8-4.13, видно, что погрешность измерения напряжения на частотах 50 кГц, 100 кГц и 150 кГц устройством кондиционирования сигналов при коэффициенте усиления  $K = 1$  не превышает 1 % во всем динамическом диапазоне входных напряжений.

В таблицах 4.14-4.16 приведены результаты измерений коэффициент преобразования на частотах 50 кГц, 100 кГц и 150 кГц соответственно, при коэффициенте усиления устройства кондиционирования  $K = 10$ .

В таблицах 4.17-4.19 приведены результаты расчета относительной погрешности коэффициента преобразования на частотах 50, 100 и 150 кГц, при коэффициенте усиления устройства кондиционирования  $K = 10$ .

Таблица 4.14 – Результаты измерений напряжения на частоте 50 кГц при коэффициенте усиления  $K = 10$

AWG-4110, В	$U_B$ , В	$U_{изм}$ , В	$K_{п}$
0,01	0,0099	0,0705	7,1012
0,03	0,0303	0,2158	7,1239
0,05	0,0504	0,3589	7,1167
0,07	0,0705	0,5014	7,1079
0,1	0,1007	0,7165	7,1118
0,3	0,3010	2,147	7,1305
			$\bar{K}_{п} = 7,1$

Таблица 4.15 – Результаты измерений напряжения на частоте 100 кГц при коэффициенте усиления  $K = 10$

AWG-4110, В	$U_B$ , В	$U_{изм}$ , В	$K_{п}$
0,01	0,0099	0,0708	7,1112
0,03	0,0304	0,2163	7,1138
0,05	0,0506	0,3593	7,1047
0,07	0,0708	0,5026	7,0993
0,1	0,1011	0,7179	7,1017
0,3	0,3025	2,145	7,0988
			$\bar{K}_{п} = 7,1$

Таблица 4.16 – Результаты измерений напряжения на частоте 150 кГц при коэффициенте усиления  $K = 10$

AWG-4110, В	$U_B$ , В	$U_{изм}$ , В	$K_{\Pi}$
0,01	0,0101	0,0716	7,1509
0,03	0,0305	0,2168	7,1038
0,05	0,0508	0,3598	7,0868
0,07	0,0711	0,5037	7,0865
0,1	0,1014	0,7186	7,0829
0,3	0,3058	2,161	7,0678
			$\bar{K}_{\Pi} = 7,1$

Таблица 4.17 – Относительная погрешность коэффициента преобразования на частоте 50 кГц при коэффициенте усиления  $K = 10$

$U_B$ , В	0,0099	0,0303	0,0504	0,0705	0,1007	0,3010
$U_{изм}$ , В	0,0705	0,2158	0,3589	0,5014	0,7165	2,147
$\delta_U$	0,02	0,34	0,23	0,11	0,17	0,43

Таблица 4.18 – Относительная погрешность коэффициента преобразования на частоте 100 кГц при коэффициенте усиления  $K = 10$

$U_B$ , В	0,0099	0,0304	0,0506	0,0708	0,1011	0,3025
$U_{изм}$ , В	0,0708	0,2163	0,3593	0,5026	0,7179	2,145
$\delta_U$	0,16	0,19	0,07	0,01	0,02	0,02

Таблица 4.19 – Относительная погрешность коэффициента преобразования на частоте 150 кГц при коэффициенте усиления  $K = 10$

$U_B$ , В	0,0101	0,0305	0,0508	0,0711	0,1014	0,3058
$U_{изм}$ , В	0,0716	0,2168	0,3598	0,5037	0,7186	2,161
$\delta_U$	0,72	0,05	0,18	0,19	0,24	0,45

Из результатов измерений, приведенных в таблицах 4.14-4.19, видно, что погрешность измерения напряжения на частотах 50 кГц, 100 кГц и 150 кГц устрой-

ством кондиционирования данных при коэффициенте усиления  $K = 10$  не превышает 0,7 % во всем динамическом диапазоне входных напряжения.

### 4.3.2 Определение погрешности измерения магнитной индукции

Для определения погрешности и диапазона измерений магнитной индукции разработанного магнитометра была собрана схема эксперимента, показанная на рисунке 4.24.

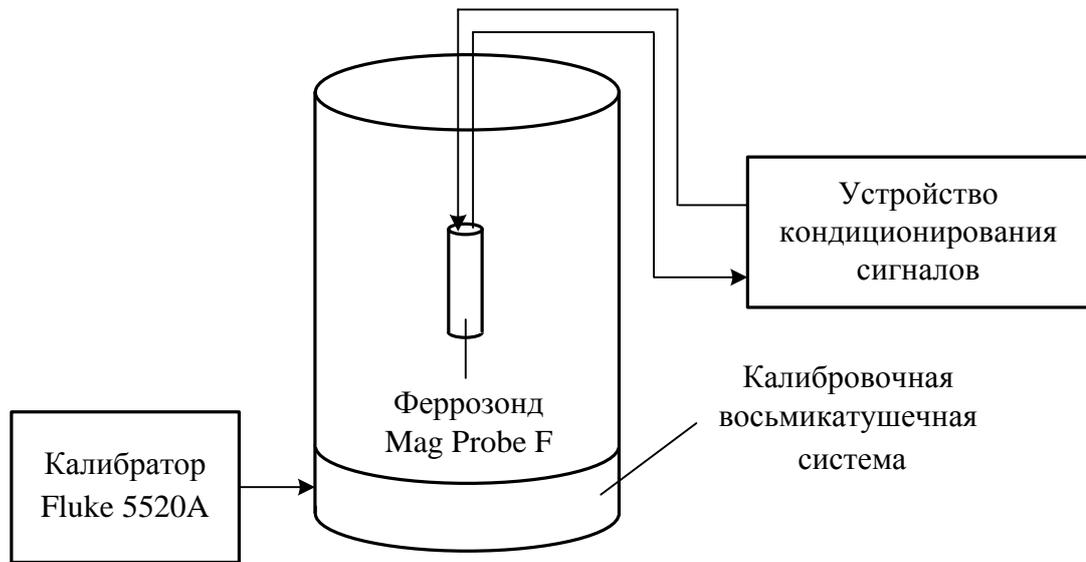


Рисунок 4.24 – Схема для исследований погрешности магнитометра

С помощью калибратора Fluke 5520A и описанной в главе 3 калибровочной восьмикатушечной 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 [135-136]. 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:

$$\delta_{B_{dc}} = \frac{|B_3 - U_{\text{изм}} / \bar{K}_\Pi \cdot S_{2,4,6}|}{B_3} \cdot 100, \% \quad (4.12)$$

В таблице 4.20 приведены результаты измерения магнитной индукции с помощью разработанного магнитометра в диапазоне от 9 нТл до 90 мкТл.

Таблица 4.20 – Результаты измерения магнитной индукции

Fluke 5520, мА	$B_z$ , мкТл	$U_{\text{изм}}$ , В	$\bar{K}_{\Pi}$	$\delta_{B_{dc}}$ , %
0,02	0,00904	0,0523	71	1,87
0,04	0,01808	0,1045		1,76
0,06	0,02712	0,1561		1,34
0,08	0,03616	0,2086		1,56
0,1	0,0452	0,2612		1,74
0,2	0,0904	0,5214		1,54
0,4	0,1808	1,045		1,76
0,6	0,2712	1,565		1,60
0,8	0,3616	2,078		1,17
1	0,452	2,597		1,15
2	0,904	5,164		0,57
4	1,808	1,039		7,1
6	2,712	1,559	1,21	
8	3,616	2,068	0,69	
10	4,52	2,593	0,99	
20	9,04	5,157	0,43	
40	18,08	1,015	0,71	
60	27,12	1,521		1,26
80	36,16	2,043		0,53
100	45,2	2,552		0,59
200	90,4	5,114		0,41

Из результатов измерений следует, что разработанный 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 %.

#### 4.4 Выводы к главе 4

1. Экспериментально проверена процедура обработки сигналов с феррозондового датчика, включающая измерения амплитуд второй, четвертой и шестой

гармоник, с последующим суммированием результатов измерений, обеспечивающая повышение чувствительности измерения магнитного поля на 40 %.

2. 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 %.

3. Разработанные универсальные выражения для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда и чувствительности на любой из гармоник независимо от формы сигнала возбуждения послужили основой для создания магнитометра. Характеризующаяся высокой однородностью генерируемого магнитного поля калибровочная восьмикатушечная система и магнитометр были использованы при выполнении НИР по темам: «Система контроля магнитного окружения квантового процессора на основе феррозондового датчика сверхвысокого разрешения»; «Научные основы проектирования синхронных усилителей с дифференциальным входом для измерений малых отклонений физических величин на фоне большой синфазной помехи», «Телекоммуникационные системы мониторинга и управления для автономных подводных роботов».

4. Разработанный магнитометр и калибровочная восьмикатушечная система используются в рамках научно-технического сотрудничества Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики ТУСУРа г. Томск и Томского политехнического университета при проектировании систем управления двигателями 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 (Приложение А).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Разработанные универсальные выражения для расчета ЭДС в измерительной обмотке феррозонда и чувствительности на любой из гармоник независимо от формы сигнала возбуждения, магнитометр и калибровочная восьмикатушечная система были использованы при выполнении НИР по темам: «Система контроля магнитного окружения квантового процессора на основе феррозондового датчика сверхвысокого разрешения»; «Научные основы проектирования синхронных усилителей с дифференциальным входом для измерений малых отклонений физических величин на фоне большой синфазной помехи», «Телекоммуникационные системы мониторинга и управления для автономных подводных роботов».
6. Разработанный магнитометр и калибровочная восьмикатушечная система используются в рамках научно-технического сотрудничества Научно-

исследовательского института автоматики и электромеханики ТУСУРа г. Томск и Томского политехнического университета при проектировании систем управления двигателями 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.

**Список используемой литературы**

- 1 Ripka, P. *Magnetic Sensors and Magnetometers* / P. Ripka. – Boston: Artech house, 2000. – 494 p.
- 2 Афанасьев, Ю.В. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия. Ленингр. Отделение, 1979. – 320 с.
- 3 Петрукович, А. А. Первые советские космические эксперименты в 1957–1959 гг.: история и результаты / А. А. Петрукович, Т. М. Мулярчик, С. В. Васюков, М. И. Веригин, Г. А. Котова, В. А. Стяжкин // *История наук о Земле*. – 2009, Т.2, № 4. – С. 5-24.
- 4 Carr, C. The Double Star magnetic field investigation // *Ann. Geophys.* – 2005. – № 23. – P. 2713-2732.
- 5 Бараночников, М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – Т. 1, – 544 с.
- 6 Nava Can, Uğur Topal Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March*. – 2015. – Vol. 28, № 3. – P.1093-1096.
- 7 Гормаков А.Н., Ульянов И.А., Федулов А.В. Комплекс для проверки магнитометров скважинных инклинометров в полевых условиях // *НТВ «Каротажник»*. – Тверь: АИС, 2014. – Вып. 239. – С. 61-67.
- 8 Скважинный магнитометр-инклинометр МИ-3803М [Электронный ресурс] / Ю.Г. Астраханцев. – Режим доступа: <http://www.igeoph.net/Documents/Well/MI-3803.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
- 9 Казаков, А.В. Магнитогироскопическая система - достойный соперник гравитационной системы ориентации на малых спутниках [Электронный ресурс] / А.В. Казаков – Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/100/13.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус..
- 10 Johnson M.W., Amin M.H.S., Gildert S., et al., Quantum annealing with manufactured spins // *Nature*. – 2011. – Vol. 473, № 7346. – P. 194-198.

11 Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F. Sample 3D magnetometer for a dilution refrigerator // Proc. of the 26th Intern. Conf. on Low Temperature Physics (LT26). – Beijing, 2011.

12 Uchaikin S.V. Fluxgate Magnetometer for Cryogenics // In Proc. of the 21st International Conference on Low Temperature Physics (LT21), Czechoslovak Journal of Physics, 1996, P. 2809.

13 Щербаков Г.Н., Анцелевич М. А., Удинцев Д. Н., Шлыков Ю. А., Бровин А.В. Применение магнитной томографии в проходных металлодетекторах // Специальная Техника. – 2007. – № 6. – С. 20-25.

14 Суханов, Д. Я. Магнитная интроскопия с использованием решетки датчиков магнитного поля / Д. Я. Суханов, Е. С. Берзина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. –Т. 56, № 8/2. – С. 23-26.

15 Винокуров, Б.Б. Измерение неэлектрических величин: учебное пособие / Б.Б. Винокуров, Г.В. Вавилова, И.Л. Клубович. – Томск: Томский политехнический университет, 2008. – 290 с.

16 Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии: учебное пособие / М.Я. Марусина, А.О.Казначеева. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 132 с

17 Магнитометрические датчики для охраны периметров [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.infotel-sec.ru/news/magnetic-sensors-for-the-protection-of-the-perimeter/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

18 Baschiroto, A. A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup // Measurement. – 2010. – Vol.43. – P. 46–53.

19 Butta M., Ripka P. Model for coil-less fluxgate // Sensors and Actuators. – 2009. – Vol.156, № 11.– P. 269-273

20 ГОСТ 24284– 80 Гравиразведка и магниторазведка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 18 с.

21 Магнитное поле [Электронный ресурс]. – Физическая энциклопедия. – Режим доступа: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_physics/1564/МАГНИТНОЕ](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1564/МАГНИТНОЕ), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

22 Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Пути повышения помехоустойчивости магнитометрических средств поиска и их практическая реализация // Специальная техника.– 2005.– № 3.– С.19-24.

23 Ripka, P. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors journal. – 2010. – Vol. 10, N 6. – P.1108-1116.

24 Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.

25 Хомерики, О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля / О. К. Хомерики. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.

26 Егиазарян, Г. А., Стафеев, В. И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение / Г. А. Егиазарян, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1987.- 88 с.

27 Бараночников, М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2002. – Т. 2. – 691 с.

28 Lenz, J.E. A Review of Magnetic Sensors // Proceeding of the IEEE. – 1990. – Vol.78, № 6. – P. 973-989.

29 Mahdia A.E., Panina L., Mapps D. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials // Sensors and Actuators. – 2003. – Vol. 105. – P. 271-285.

30 Lenz J. E., Edelstein A. S., Magnetic Sensors and Their Applications // IEEE Sensors Journal. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P.631-649.

31 Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: пер. с англ. / В.Д. Новиков. – М.: Мир, 1990. – 535 с.

32 Васильева, Н. П., Касаткин С. И., Муравьев А. М. Магниторезистивные датчики на тонких ферромагнитных пленках. Обзор // Приборы и системы управления. – 1994. – № 8. – С. 20-23.

33 Хомерики, О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля / О. К. Хомерики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136с.

34 Machado F.L.A., da Silva B.L., Rezende S.M., Martins C.S. Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet  $\text{Co}_{70.4}\text{Fe}_{4.6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol.75. – P. 6563 - 6565.

35 Современные АМР датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей [Электронный ресурс] / А.Борисов // Компоненты и технологии: сетевой журн. – 2006. – № 7. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006\\_7\\_56.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006_7_56.php), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

36 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002/1021/1022 [Электронный ресурс] / Honeywell. – 2008. – 15 p. Режим доступа: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/002e/0900766b8002e129.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

37 Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 3. Физические основы и коммерческие перспективы технологий полупроводниковых и пермаллоевых магниторезистивных датчиков [Электронный ресурс] / С. Сыроева // Компоненты и технологии: сетевой журн. – 2005. – № 4. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2005\\_4\\_52.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2005_4_52.php), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

38 Гигантское магнитосопротивление: от открытия до Нобелевской премии [Электронный ресурс] / А.В. Хвальковский. – Режим доступа: [http://www.amtc.ru/publications/articles/2084/?sphrase\\_id=1993](http://www.amtc.ru/publications/articles/2084/?sphrase_id=1993), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

39 Автомобильный датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 4 [Электронный ресурс] / С.Сыроева // Компоненты и технологии: сетевой журн. – 2005. – № 5. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2005\\_5\\_60.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2005_5_60.php), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

40 Mohri, K. Sensitive micro magnetic sensor family utilizing magneto-impedance (MI) and stress-impedance (SI) effects for intelligent measurements and controls / K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L.V. Panina // Sensors and actuators. – 2001. – № 91. – P.85–90.

41 Ферт, А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники / А. Ферт; пер. с англ. А.Н. Калиш, А.К. Звездин // Успехи физических наук / Нобелевские лекции по физике – 2007. – Декабрь 2008. – Том 178, №12. – С. 1136-1348.

42 Deak J., Jander A., Lange E., Mundon S., Brownell D., Tran L., Delta-sigma digital magnetometer utilizing bistable spin-dependent-tunneling magnetic sensors // J.Appl.Phys. – 2006. – Vol. 99, issue 8. – P.08B320-08B320-3.

43 Техника и приборы. Квантовые магнитометры [Электронный ресурс] / С.О. Арбузов. – Режим доступа: [http://ligis.ru/tech\\_87.htm](http://ligis.ru/tech_87.htm), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

44 Афанасьев, Ю.В. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, А.П. Щелкин – Л: Энергия, 1972. – 272 с

45 SeaSPY Overhauser Magnetometer. Technical Application Guide [Электронный ресурс] / Doug Hrvoic. – 2007. – 17 p. Режим доступа: <http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/uploads/2008/03/seaspy-technical-application-guide-rev15.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

46 Квантовые магнитометры с оптической накачкой для поиска взрывоопасных предметов [Электронный ресурс] / С.С. Звездинский, И.В. Парфенцев // Спецтехника и связь. – 2009. – Вып. 3. – С. 18-28. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/kvantovye-magnitometry-s-opticheskoy-nakashkoy-dlya-poiska-vzryvoopasnyh-predmetov>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

47 Щербаков, Е.Ф. Физические основы электротехники: учеб. пособие / Е.Ф. Щербаков, В.М. Петров. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 290 с.

48 Ройтман, М.С. Квантовая метрология: учеб. пособие / М.С. Ройтман – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 188 с.

49 Учайкин С.В. Разработка криогенных детекторов частиц и молекул на основе сверхпроводящего термометра и их использование в экспериментальной физике и приборостроении: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.01 / Учайкин Сергей Викторович. – Томск., 2008. – 303 с.

50 Greenberg Ya. S. Selfconsistent Theory of Voltage-Current Characteristics and of Intrinsic Noise of a Hysteretic RF SQUID // J. Low Temp. Phys. – 1993. – Vol. 92. – P. 367-413.

51 Афанасьев, Ю. В. Феррозонды / Ю. В. Афанасьев. – Л.: Энергия, 1969. – 168 с.

52 Bruno Ando, Salvatore Baglio, Adi R. Bulsara, Vincenzo Sacco Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers // IEEE Sensors journal. – 2005. – Vol. 5, № 5. – P. 895-904.

53 C. Moldovanu, P. Brauer, O.V. Nielsen, J. R. Petersen The noise of the Vacquier type sensors referred to changes of the sensor geometrical dimensions // Sensors and Actuators A: Physical. – 2000. – Vol. 81, № 1-3. – P. 197-199.

54 Delevoye, E. Microfluxgate sensors for high frequency and low power applications / E. Delevoye, M. Audoin, M. Beranger, R. Cuchet, R. Hida, T. Jager. // Sensors and Actuators A. – 2008. – Vol. 145-146. – P. 271- 277.

55 P. Ripka, S.W. Billingsley Tuned vs. Untuned Output // IEEE Trans. Magn– 1998. – Vol. 34. – P. 1303-1305.

56 Victor Vacquier Sr. dies at 101; geophysicist was a master of magnetic [Электронный ресурс] // Los Angeles Times. – 2015. – Режим доступа: <http://www.latimes.com/science/la-me-vacquier24-2009jan24-story.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

57 FGM - 1 [Электронный ресурс] / Bartington Instruments. – 2005. – 22 p. Режим доступа: <http://www.speakesensors.co.uk>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

58 PIC Magnetometry Logger [Электронный ресурс] / Practical Electronics. – 2004. – 74 p. Режим доступа: <http://david.alfaromeo.eu/elektro/EPE/2004/EPE%202004-08.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

59 Y. Nishio, F. Tohyama, N. Onishi The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite // Meas. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 18. – P. 2721–2730.

60 Andrea Baschiroto, Enrico Dallago, Piero Malcovati, Marco Marchesi, Enrico Melissano, Marco Morelli, Pietro Siciliano, Giuseppe Venchi An Integrated Micro-Fluxgate Magnetic Sensor With Front-End Circuitry // *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement* – 2009. – Vol. 58. – № 9. – P. 3269 - 3275.

61 A. Baschiroto A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup // *Measurement*. – 2010. – Vol.43. – P.46-53

62 P. M. Drljaca, P. Kejik, F.Vincent, D. Piguet, R. S. Popovic Lowpower 2-D fully integrated CMOS fluxgate magnetometer // *IEEE Sensors J.* – 2005. – Vol. 5. – P. 909-915.

63 A. Baschiroto A fluxgate magnetic sensor: From PCB to microintegrated technology // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2007. – Vol. 56. – P. 25-31.

64 M. Woytasik, J.-P. Grandchamp, E. Dufour-Gergam, J.-P. Gilles, S. Megherbi, E. Martincic, H. Mathias, and P. Crozat Two- and three-dimensional microcoil fabrication process for three-axis magnetic sensors on flexible substrates // *Sens. Act. A: Phys.* – 2006. – Vol. 132. – P. 2-7

65 Lei C, Wang R, Zhou Y, Zhou ZM MEMS micro fluxgate sensors with mutual vertical excitation coils and detection coils // *MicrosystTechnol.* – 2009. – Vol. 15(7), – P. 969–972.

66 P.-M.Wu and C. H. Ahn Design of a low-power micromachined fluxgate sensor using localized core saturation method // *IEEE Sensors J.* – 2008. – Vol. 8. – P. 308-313.

67 Olivier Dezuari, Eric Belloy, Scott E. Gilbert, and Martin A. M. Gijs New Hybrid Technology for Planar Fluxgate Sensor Fabrication // *IEEE Transactions on magnetics.* – 1999. – Vol. 35, № 4

68 Ripka, P. New directions in fluxgate sensors // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2000. – Vol. 215–216. – P. 735–739

69 J. Kubík, L. Pavel, P. Ripka PCB racetrack fluxgate sensor with improved temperature stability // *Sens. Act. A Phys.* – 2006. – Vol. 130. – P. 184-188.

70 J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka, P. Kaspar Low-power printed circuit board fluxgate sensor // *IEEE Sensors J.* – 2007. – Vol. 7. – P. 179–183.

71 J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka, P. Kaspar Low-power PCB Fluxgate Sensor // IEEE Sensors. – 2005. – In Proc. of the 4-th IEEE Conference on Sensors Irvine, CA: IEEE Sensors. – 2005. – P. 432-435.

72 Bruno Andò, Salvatore Baglio, Vincenzo Sacco, Adi R. Bulsara, Visarath In PCB fluxgate magnetometers with a residence times difference readout strategy: the effects of noise // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2008. – Vol. 57, № 1.

73 НМС1001 [Электронный ресурс] / Honeywell. – 2008. – 15 p. Режим доступа: <http://honeywell.com/Pages/Home.aspx>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

74 KMZ51 [Электронный ресурс] / Philips Semiconductors. – 1998. – 8 p. Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17844/PHILIPS/KMZ51.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

75 TFM100-G2 [Электронный ресурс] / Billingsley Aerospace & Defense. – 2008. – 1 p. Режим доступа: <http://magnetometer.com/products/fluxgate-magnetometers/tfm100g2/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

76 Mag-01 [Электронный ресурс] / Bartington Instruments. – 2009. – 8 p. Режим доступа: <http://www.bartington.com/mag-01-mag-01h-single-axis-fluxgate-magnetometers.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

77 Chao Zuo Shi, Chen Shaobin, Wu Jun Ouyang, Lei Yu, Xiaofei Yang Design and Simulation of Interface ASIC for Micro-fluxgate Sensor // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – Vol. 263, – P. 012011.

78 Piotr Frydrych, Roman Szewczyk, Jacek Salach, Krzysztof Trzcinka Two-Axis, Miniature Fluxgate Sensors // IEEE Transactions on magnetics. – 2012. – Vol. 48, № 4.

79 Заруцкий А., Обидин А., Малинский Т. Лазерные технологии при изготовлении феррзондовых датчиков магнитного поля // Компоненты и технологии: сетевой журн. 2006 URL: [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2009\\_04\\_164.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2009_04_164.php)

80 David Ciudad, Marina Díaz-Michelena, Lucas Pérez, Claudio Aroca Small Fluxgate Magnetometers: Development and Future Trends in Spain // Sensors. – 2010. – Vol. 10, – P. 1859-1870.

81 Marina Díaz-Michelena Small Magnetic Sensors for Space Applications // Sensors. – 2009. – Vol.9. – P. 2271-2288.

82 N. Sharafi, M.A.Nekoui Analyzing Optimization of Fluxgate Sensor // In Proc. of the International Conference on Electronic Design. – Malaysia, Penang, December 1 - 3, 2008. – P. 1-4.

83 Chong Lei, Jian Lei, Zhen Yang, Tao Wang, Yong Zhou A low power micro fluxgate sensor with improved magnetic core // Microsyst Technol. – 2013. – Vol.19. – P. 591–598

84 Wei Gao, Guochen Wang, Qichao Zhao Design Realization of Fluxgate Sensor Signal Processing Unit // In Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – China, Beijing, August 7 - 10, 2011. – P. 2386-2391.

85 Mattia Butta, Ichiro Sasada Sources of noise in a magnetometer based on orthogonal fluxgate operated in fundamental mode // IEEE Transactions on magnetics. – 2012. – Vol. 48, № 4. – P. 1508-1511

86 Eyal Weiss, Asaf Grosz, Shai Amrusi, Eugene Paperno Orthogonal fluxgate employing digital selective bandpass sampling // IEEE Transactions on magnetics. – 2012. – Vol. 48, № 11. – P. 4089-4091

87 РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения – М.: Стандартинформ, 2014. – 117 с.

88 A. R. Bulsara, A. Kho, A. Palacios, P. Longhini, J. Neff, G. Anderson, C. Obra, S. Baglio, B. Ando Exploiting nonlinear dynamics in a coupled-core fluxgate magnetometer // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19, № 7. – P. 075203.

89 Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы / Ю.В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.

90 Bruno Andò, Salvatore Baglio, Salvatore La Malfa, Adi R. Bulsara Adaptive Modeling of Hysteretic Magnetometers // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2012. – Vol. 61. – № 5. – P. 1361-1367.

91 Кожухов, В. П. Магнитные компасы: учебник для вузов морск. трансп. / В. П. Кожухов, В. В. Воронов, В. В. Григорьев. – М.: Транспорт, 1981. – 212 с.

92 Мизюк, Л. Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей / Л. Я. Мизюк. – К.: Наукова думка, 1964. – 168с.

93 Розенблат, М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники / М. А. Розенблат. – М.: Наука, 1966. – 419 с.

94 F. Primdahl The fluxgate mechanism, part I: the gating curves of parallel and orthogonal fluxgates. – IEEE Trans. Magn. – 1970. – Vol. 6, № 2. – P. 376-383

95 F. Forster A method for the measurement of dc field differences and its application to nondestructive testing // Nondestruct. Test. – 1955. – Vol. 13. – P. 31–41.

96 Won-Youl Choi, Jun-Sik Hwang, Sang-On Choi The microfluxgate magnetic sensor having closed magnetic path // IEEE Sensors journal. – 2004. – Vol. 4, № 6. – P. 768 - 771

97 Ripka, P. Zaveta, K. Jurek, K. Nanocrystalline fluxgate cores with transverse anisotropy // Proceedings of IEEE Sensors. – 2004. – Vol.3. – P. 1570-1572

98 Andrea Baschiroto, Alessandro Cabrini, Enrico Dallago, Piero Malcovati, Marco Marchesi, Giuseppe Venchi Development and Analysis of a PCB Vector 2-D Magnetic Field Sensor System for Electronic Compasses // IEEE Sensors journal. – 2006. – Vol. 6, № 2. – P. 365-371

99 B. Ando, S. Baglio, A. Bulsara, V. Sacco Effects of driving mode on RTD-FluxGate performances // In Proc. of the IMTC-2004 Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Italy, Como, May 18 – 20, 2004. – P. 1419-1423.

100 Si Li, Daping Cao, Changzhong Jiang A solution of fluxgate excitation fed by squarewave voltage // Sensors and Actuators. – 2010. – Vol. 163. – P. 118-121.

101 M.C. Duffy, S.C. Tang, P. Ripka Application of fluxgate excitation circuit with saturable inductor to magnetic sensing // Sensors and Actuators. – 2005. – Vol. 123-124. – P. 430–437.

102 Баранова В.Е., Баранов П.Ф. Пути повышения чувствительности феррозондовых преобразователей // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVI международной научно-технической конференции. Том 1. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 57-60.

103 Antonín Platil, Pavel Ripka Fluxgate sensor and real operating-mode b-h curve // Journal of electrical engineering. – 2012. – Vol 63, № 7s. – P.118-121

104 ГОСТ 10160-75 Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 47 с.

105 Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Огай В.Е., Учайкин С.В. Феррозондовый магнитометр для измерения магнитной индукции до 1 нТл // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 89–92.

106 Огай В.Е., Баранов П.Ф. Разработка однокомпонентного феррозондового магнитометра // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Апреля 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – Т.1. – С. 227-228.

107 ГОСТ 8.030-91 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-12}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл, постоянного магнитного потока, магнитной индукции и магнитного момента в интервале частот от 0 до 20000 Гц. – Введ. с 1992-01-01 – М.: Издательство стандартов, 1992. – 13 с.

108 МИ 156-78 Методика поверки рабочих средств измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл – М.: Издательство стандартов, 1979 – 11 с.

109 R.J. Hanson, F.M. Pipkin Magnetically Shielded Solenoid with Field of High Homogeneity // Review of Scientific Instruments. – 1965. – Vol. 36, № 2. – P. 179-188.

110 Schill R.A., Karin H. Characterizing and calibrating a large Helmholtz coil at low ac magnetic field levels with peak magnitudes below the earth's magnetic field // Review of Scientific Instruments. – 2001. – Vol. 72, № 6. – P. 2769-2776.

111 Po Gyu Park, Kim Y.G., Kalabin V.N., Shifrin V.Y., AC magnetic flux density standards in the low frequency range // Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. CPEM 2008. – Broomfield, June 8-13, 2008. – P. 456-457.

112 Po Gyu Park, Kim Y.G., Kim W.S., Shifrin V.Y., AC/DC magnetic flux density standard systems at KRISS // Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. СРЕМ 2010. – Daejeon, June 13-18, 2010. – P. 312-313.

113 Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 11 изд., стер. – М.: Академия, 2006. – 558 с..

114 Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.

115 Carter R.G., Coil-system design for production of uniform magnetic-fields // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1976. – Vol. 123 (11). – P. 1279-1283.

116 Barker J.R. New coil systems for the production of uniform magnetic fields // Review of Scientific Instruments. – 1949. – Vol. 26. – P. 213-215.

117 S.-G. Lee, S.K. Chan, J. W. Chang, Square Loop Coil System for Balancing and Calibration of Second-Order SQUID Gradiometers // IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 3769-3772.

118 McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic fields // Review of Scientific Instruments. – 1936. – Vol. 7. – P. 150-153.

119 Hosoya M., Goto E. Coils for generating uniform fields in a cylindrical ferromagnetic shield // Review of Scientific Instruments. – 1991. – Vol. 62. – P. 2472-2475.

120 Baranova V., Baranov P. The Helmholtz coils simulating and improved in COMSOL // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) . – 2014. – P.1-4..

121 R S Caprari Optimal current loop systems for producing uniform magnetic fields // Measurement Science and Technology. – 1995. – Vol. 6, № 5 – P. 593–597.

122 Uchaikin S., Eltony A Method to produce an uniform magnetic field in a dilution refrigerator // Proc. of the 26th Intern. Conf. on Low Temperature Physics (LT26). – August 10–17, 2011, Beijing, China. – Beijing, 2011. – P. 1-4.

123 Ogay (Baranova) V., Baranov P., Stepankova A. Modelling coils system for generating homogeneous magnetic field // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2009. – Vol. 66

124 Огай 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.

125 Khusnulina A.L. Ogay V.E, Chudinova A.L. The calculation of temperature field of fluxgate sensor controls the magnetic environment of the quantum computer // 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.

126 Хуснулина А.Л., Огай В.Е. Моделирование теплофизических свойств феррозондового датчика при сверхнизких температурах // 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

127 Mag-01 Single Axis Fluxgate Magnetometer [Электронный ресурс] / Bartington Instruments. – 2011. – 1 р. Режим доступа: <http://www.bartington.com/Default.aspx?PageID=5187129&A=SearchResult&SearchID=176003&ObjectID=5187129&ObjectType=1>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

128 Fluke 5520A [Электронный ресурс] / Fluke. Режим доступа: [http://fluke-pribor.ru/index.php?route=product/product&keyword=5520&product\\_id=195](http://fluke-pribor.ru/index.php?route=product/product&keyword=5520&product_id=195), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

129 Баранова В.Е., Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Учайкин С.В. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров // Измерительная техника, 2015. – № 5. – С. 52-56.

130 PXI-1042Q [Электронный ресурс] / National Instruments. – 2014. – 8 р. Режим доступа: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-256>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

131 NI PXI-5124 [Электронный ресурс] / National Instruments. – 2004. – 27 p. Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371135a.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

132 Primdahl F., Risbo T., Merayo J. M. G., Brauer P., and Tøffner-Clausen L., In-flight spacecraft magnetic field monitoring using scalar/vector gradiometry // Measurement Science Technology. – 2006. – Vol. 17, № 6. – P. 1563-1569.

133 Baranova V.E., Baranov P.F., Muravyov S.V., Uchaikin S.V. Fluxgate magnetometer for measuring ultra low magnetic induction // In Proc. of the XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry. – Czech Republic, Prague, August 30 - September 4, 2015. – P. 498-502.

134 Baranov P.F., Tsimbalist E.I., Baranova V.E. Instrument for measurement of transfer function voltage dividers // SIBCON-2015 In Proc. of the International Siberian Conference – Omsk, May 23-25, 2015. – P. 1-4.

135 Finemet [Электронный ресурс] / Hitachi. – 2012. – 12 p. Режим доступа: <http://www.hilltech.com/pdf/hl-fm10-cFinemetIntro.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

136 Огай В.Е., Баранов П.Ф. Разработка системы магнитного вакуума // 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.

Приложение А

Акты внедрения результатов диссертационной работы