

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

На правах рукописи



ВЛАСКИН КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ФЕРРОЗОНДОВОГО ТИПА**

Специальность 05.11.13 –

«Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Прищепов Сергей Константинович

Уфа – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1. Актуальность темы исследований. История вопроса.....	12
1.2. Методы и средства магнитометрии.....	20
1.3. Основные направления совершенствования феррозондовых преобразователей.....	37
1.4. Постановка задач исследований.....	38
ВЫВОДЫ.....	38
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	39
2.1. Разработка математической модели феррозондового преобразователя.....	39
2.2. Графо-аналитический метод исследования магнитопроводов феррозондовых преобразователей.....	44
2.3. Теоретические основы метрологического контроля и идентификации тонкопленочных сердечников феррозондовых преобразователей.....	50
2.4. Способ изготовления магнитопроводов для феррозондовых преобразователей из тонкопленочных аморфных сплавов	56
2.5. Методика контроля и идентификации параметров магнитопроводов из тонкопленочных аморфных сплавов.....	59
ВЫВОДЫ.....	64
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНЫХ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ АМОΡФНЫХ СПЛАВОВ И ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ.....	65

3.1. Интегральные и гибридные технологии производства феррозондовых преобразователей.....	67
3.2. Миниатюризация феррозондовых преобразователей.....	74
3.3. Технологии изготовления феррозондовых преобразователей.....	79
3.4. Параметры магнитопроводов как факторы снижения энергопотребления феррозондовых преобразователей.....	87
3.5. Метрологические исследования и идентификация параметров магнитопроводов из аморфных сплавов	90
ВЫВОДЫ.....	93
ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИИ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С МАГНИТОПРОВОДАМИ ИЗ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ.....	94
4.1. Однокомпонентный феррозондовый магнитометр с функциями полемера и градиентомера.....	95
4.2. Феррозондовый датчик постоянных и переменных магнитных полей.....	99
4.3. Комплексный прибор для обнаружения подземных магнитных аномалий.....	102
4.4. Многофункциональный трехкомпонентный феррозондовый магнитометр.....	108
4.5. Комплексный прибор для вычисления магнитного курса.....	114
4.6. Применение трехкомпонентного феррозондового датчика в САУ компенсации магнитных аномалий.....	115
4.7. Феррозондовые датчики в режиме контроля динамических объектов.....	120
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	131
Список сокращений и условных обозначений.....	133
Список литературы.....	134
Приложения	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Значимость измерений магнитных величин, разнообразие и важность задач, решаемых при помощи магнитометров, определяют многообразие методов и средств магнитометрии. Широкое распространение получили феррозондовые (ФЗ) магнитометры.

Обусловлено это тем, что датчики феррозондового типа (ФЗД) обладают совокупностью свойств, которая другим магнитометрическим преобразователям не принадлежит: возможность измерения модуля вектора магнитного воздействия; направления вектора (знака); переменных, импульсных полей, а также компонент вектора и градиента магнитного воздействия.

Благодаря достоинствам ФЗД, в частности, малым габаритам, они с момента своего появления по сегодняшний день непрерывно находятся в процессе исследований, совершенствования и существуют в разнообразных технических воплощениях. Исследования составляют ряд разноплановых научно-технических задач, так как малогабаритные ФЗД являются прецизионными средствами измерений и, одновременно, представляют собой сложную электромагнитную систему, состоящую из магнитопровода (МП) - одного или нескольких сердечников, и обмоток: сигнальной и возбуждения. Кроме того электромагнитные системы ФЗД имеют множество модификаций: с замкнутыми и разомкнутыми МП; с различным количеством обмоток; дифференциального типа и т.д. Параллельно развитию теории и поиску новых конструкций исследуются и развиваются технологии изготовления ФЗД, в частности, гибридные и интегральные.

Актуальны исследования способов контроля электромагнитных параметров элементов структуры ФЗД с целью их идентификации. Идентичность элементов определяет принцип действия ФЗ дифференциального типа, в основном задает метрологические характеристики ФЗД. В процессе идентификации особое место занимают МП, как основа измерительных структур датчиков вне зависимости от типа и конструктивного исполнения. Особенности работы МП в структурах ФЗД предъявляют к ним ряд особых требований: высокая магнитная проницаемость;

малые потери на перемагничивание; прецизионные технологии изготовления и метрологического контроля; высокая стабильность эксплуатационных характеристик; широкий температурный диапазон; устойчивость к магнитным и механическим возмущениям. Приведенная совокупность требований исключает применение в ФЗД целого ряда ферромагнитных материалов, в частности ферритов.

Наибольшее применение в качестве МП измерительных преобразователей нашли пермаллои. Однако сложности технологий производства сердечников из пермалловых сплавов явились стимулом к поиску альтернативных материалов. В настоящее время проводятся исследования по использованию в качестве материалов МП ФЗД различного рода аморфных сплавов (АмС). Они представляют собой тонкопленочные структуры, не имеющие кристаллической решетки, чем объясняются их особые свойства. В частности, механическая жесткость и прочность АмС усложняет процессы производства из тонкопленочных заготовок магнитных сердечников, обеспечивающих: точное соблюдение заданных размеров; чистоту обрабатываемых поверхностей; не нарушение сертифицированных магнитных характеристик заготовок; соблюдение повторяемости характеристик сердечников в рамках выпускаемой серии. Приведенная совокупность требований исключает ряд современных и прогрессивных технологий изготовления тонкопленочных МП из АмС. Основополагающая роль при производстве МП принадлежит средствам контроля их качества т.к. отбраковка пермалловых сердечников при серийном производстве ФЗД достигает 60%. Наиболее важными позициями контроля являются: сохранение у МП магнитных свойств, принадлежащих материалам их сертифицированных заготовок; заданные размеры, а также составление групп из отдельных сердечников в рамках выпускаемой серии методом идентификации их технических параметров. В работе обосновано применение технологии электроэрозионной резки (ЭР) как наиболее эффективной при изготовлении малогабаритных магниточувствительных сердечников (ММС) из тонкопленочных АмС.

Таким образом, задача совершенствования методов изготовления и контроля ММС для прецизионных магнитометрических датчиков является актуальной, а исследования в данной области представляют собой важное научно-техническое направление.

Степень разработанности темы

Основы теории и проектирования феррозондовых датчиков создали в своих работах авторы: Р. И. Янус, Ю. В. Афанасьев, Ю. Ф. Понаморов, М. А. Розенблат, Н. Aschenbrener, G. Goubeau, F. Forster, P. Ripka и др. Опубликованные работы носят разноплановый характер и не полностью освещают вопросы по анализу свойств ФЗ, в частности дифференциальных (ДФЗ), технологии изготовления, миниатюризации, методам контроля параметров феррозондовых датчиков. Таким образом, данные вопросы требуют дополнительных исследований.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертации является научное обоснование новых и совершенствование существующих методов и средств изготовления и контроля магнитометрических преобразователей феррозондового типа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Произвести анализ существующих методов и средств изготовления и контроля малогабаритных магниточувствительных сердечников, с целью определения оптимальных, для прецизионных датчиков феррозондового типа.
2. Разработать математическую модель связи информационного сигнала дифференциального феррозондового датчика с параметрами электромагнитной системы как стержневого, так и замкнутого типов.
3. Разработать математическую модель идентификации малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов по ограниченному ряду их геометрических параметров.
4. Разработать способ изготовления и методику контроля малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов с применением технологии электроэрозионной резки, сохраняющей магнитные свойства исходного материала.

5. Произвести экспериментальные исследования дифференциальных феррозондовых датчиков с разработанными малогабаритными магниточувствительными сердечниками из аморфных сплавов.

Научная новизна работы:

1. Идентичность параметров магнитопроводов определена как основной влияющий фактор на метрологические характеристики прецизионных малогабаритных ДФЗ: типа полемер; типа градиентомер; в особенности – мультисенсорных.

2. Разработана математическая модель для анализа и проектирования электромагнитных систем дифференциальных феррозондов, как стержневого типа, так и с замкнутыми магнитопроводами.

3. Разработан способ изготовления малогабаритных магниточувствительных сердечников, обеспечивающий идентификацию параметров электромагнитных систем дифференциальных феррозондов и сохранение магнитных свойств исходного материала.

4. Разработаны математическая модель идентификации параметров малогабаритных магниточувствительных сердечников и методика определения качества малогабаритных магниточувствительных сердечников в рамках выпускаемой партии.

5. Проектирование феррозондовых магнитометров типа полемер, типа градиентомер, мультисенсорных на основе метрологического контроля и идентификации элементов их измерительных структур (патенты № 108638; №109568; №2448350).

Теоретическая и практическая значимость

Разработана математическая модель ДФЗ для анализа и расчета электромагнитных параметров вне зависимости от их структуры: стержневого типа, с замкнутым магнитопроводом, дифференциальных.

Разработан способ изготовления и методика метрологических исследований ММС из тонкопленочных АмС, не нарушающие магнитные свойства исходных

материалов и обеспечивающая заданные метрологические и эксплуатационные характеристики ФЗ в рамках выпускаемой партии.

Разработаны математическая модель и методика идентификации магнитных характеристик тонкопленочных ММС по ограниченному ряду их геометрических параметров.

На основе разработанных математических моделей обеспечен анализ и расчет электромагнитных параметров ДФЗ.

На основе разработанных: математической модели, способа и методики метрологических исследований обеспечены изготовление и метрологический контроль ММС из тонкопленочных АМС.

Разработан и применен стенд по определению характеристик и идентификации параметров ММС.

На основе теоретических положений диссертации обеспечено расширение функциональных возможностей феррозондовых магнитометров: типа полемер; типа градиентомер; мультисенсорных, за счет идентификации элементов их электромагнитных систем.

Разработан и применен ряд магнитометрических датчиков и приборов на основе малогабаритных тонкопленочных ДФЗ:

1. Контрольно-измерительный прибор «полемер - градиентомер» на предприятии ООО «Хисап».
2. Контрольно-измерительный прибор «феррозондовый градиентомер» на предприятии ООО «СитиТрейд».
3. Многофункциональный трехкомпонентный феррозондовый магнитометр на НПП «Квазар».

Использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

Объект исследования. Электромагнитные системы малогабаритных измерительных преобразователей феррозондового типа.

Предмет исследования. Магнитные и геометрические характеристики малогабаритных магниточувствительных сердечников из аморфных сплавов на этапах их изготовления и контроля.

Методы исследования. Применяется математический аппарат для анализа и проектирования электромагнитных систем феррозондов. Используются методы математического моделирования с применением положений теории нелинейных электрических цепей и теории пространственной ориентации твердых тел. Для исследования полученных математических моделей были использованы методы и средства компьютерного анализа. При обработке результатов экспериментальных исследований использованы методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, связывающая основной информативный параметр дифференциального феррозонда – уровень второй гармонической составляющей, с разделенными по группам параметрами его электромагнитной системы.

2. Математическая модель идентификации магнитных характеристик тонкопленочных малогабаритных магниточувствительных сердечников по ограниченному ряду их геометрических параметров (длина, ширина торцов).

3. Способ изготовления ММС из тонкопленочных АмС для прецизионных ДФЗ с применением технологии электроэрозионной резки обеспечивает точность геометрических параметров и сохраняет магнитные свойства исходного материала.

4. Методика метрологического контроля ММС из тонкопленочных АмС обеспечивает идентификацию сердечников в рамках выпускаемой партии.

5. Разработаны измерительные структуры магнитометрических приборов на основе идентификации полуэлементов ДФЗ: типа полемер; типа градиентомер; мультисенсорных.

Достоверность научных положений и выводов. Изложенные в работе положения теоретически обоснованы, подтверждены патентами и материалами публикаций в рецензируемых изданиях, сопоставлением их с результатами

экспериментов, а также практическим выражением в виде действующих макетных образцов, приборов, внедрений на промышленных предприятиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VIII Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2007); Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2009); X Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2009); Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2012);

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 28 печатных работ, из них 9 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получен 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели.

В работах, перечисленных в списке литературы, соискателем лично получены следующие результаты:

– в работе [13; 52] представлены математические модели дифференциальных феррозондовых датчиков;

– в работе [14] представлена математическая модель идентификации магнитных характеристик (распределения магнитного потока вдоль сердечника) тонкопленочных малогабаритных магниточувствительных сердечников по ограниченному ряду их геометрических параметров (длина, ширина торцов);

– в работах [15; 18; 49; 50; 58] представлены способ и методика контроля тонкопленочных малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов;

– в работах [30; 53; 55; 56; 59; 62; 63; 64; 78; 128] представлены экспериментальные исследования дифференциальных феррозондовых датчиков с разработанными малогабаритными магниточувствительными сердечниками из аморфных сплавов;

– в работах [16; 17; 48; 51; 52; 54; 57; 63; 84; 85; 90] представлены измерительные структуры магнитометрических приборов на основе дифференциальных феррозондовых датчиков: типа полемер, типа градиентомер; мультисенсорных.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты выносимые на защиту, отражены в публикациях автора. Работы написаны совместно с научным руководителем и другими членами научного коллектива.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 155 страницах машинописного текста, и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 наименований и приложения, включает 66 рисунков и 7 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Актуальность темы исследований. История вопроса

На протяжении столетий существовали и существуют в наши дни проблемы и задачи, решение которых было бы невозможным без применения методов и средств магнитометрии. Одной из наиболее древних задач, решаемых при помощи магнитометров, являлась навигация. Ориентирование на местности (в пустыне, на море) осуществлялось по небесным светилам и уступало методу магнитометрии по точности и надежности измерений, так как ориентирование в пасмурную погоду невозможно. Эта проблема инициировала изобретение первого магнитометрического прибора – компаса [28].

Способность намагниченной стрелки указывать направление на Север было известно ещё в 120 г. до н. э. [21; 35]. Однако это был не измерительный прибор, поскольку на нем не было числовой шкалы. В 1269 году было произведено радикальное усовершенствование стрелочного магнитометра: компас был объединен с морской астролябией, снабженной градуированной шкалой и базисной линейкой для измерения [95]. Так магнитная стрелка, как чувствительный элемент (ЧЭ), стала основой магнитометрических приборов [96].

Дальнейшее использование и совершенствование компаса привело к обнаружению новых физических эффектов и решению более сложных магнитометрических задач. Было открыто магнитное склонение [33; 95], т.е. различие между географическим и магнитным направлениями на Север (рисунок 1.1).

Как средство магнитометрии, компас совершенствуется и по сей день, хотя и не является оптимальным средством измерений. Поэтому получили развитие приборы, основанные на различных магнитных эффектах, таких как: индукционный, эффект Холла, эффект Гаусса, ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и др. [4; 38; 93; 94; 131]. Техническая реализация данных эффектов

позволяет классифицировать магнитометры как по техническим характеристикам, так и по областям применения[97; 108; 131], согласно рисунку 1.2.

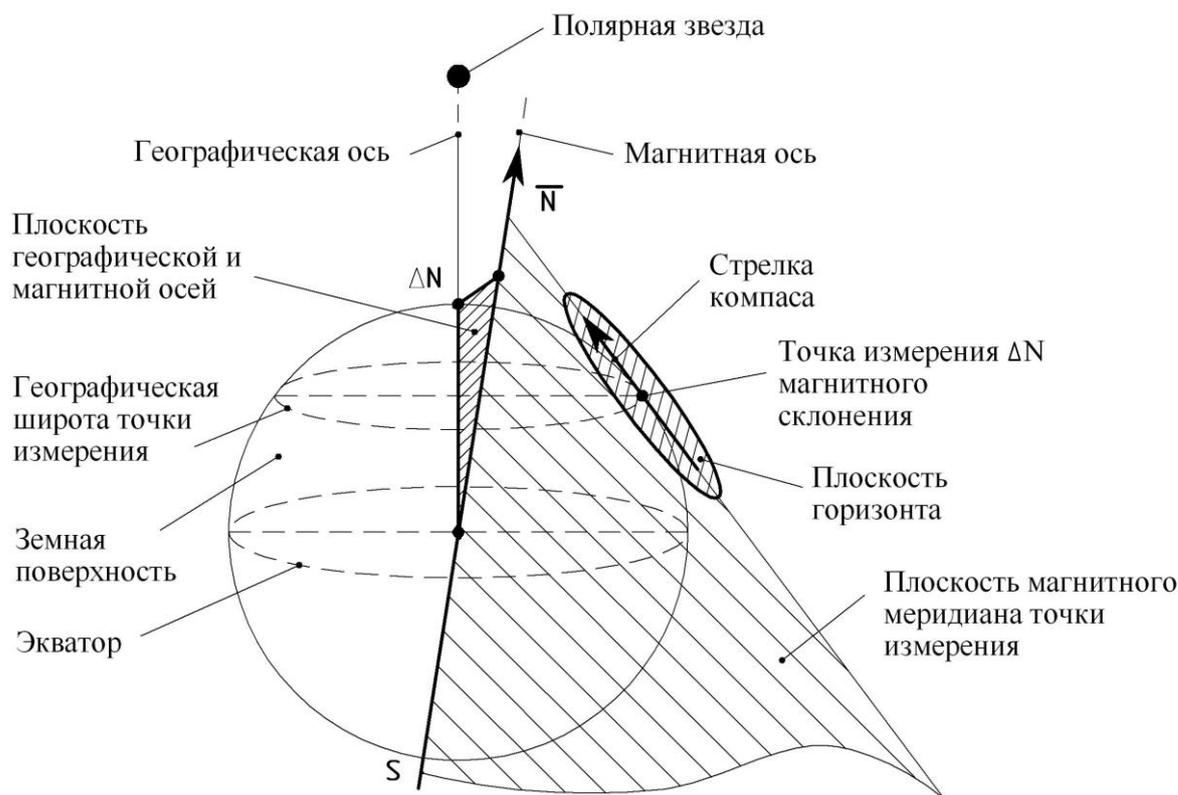


Рисунок 1.1 – Определение Земного ΔN – магнитного склонения

Таким образом, с использованием методов магнитометрии были экспериментально получены первые сведения о природе и свойствах геоструктур и околоземного пространства [21; 28; 89; 94].

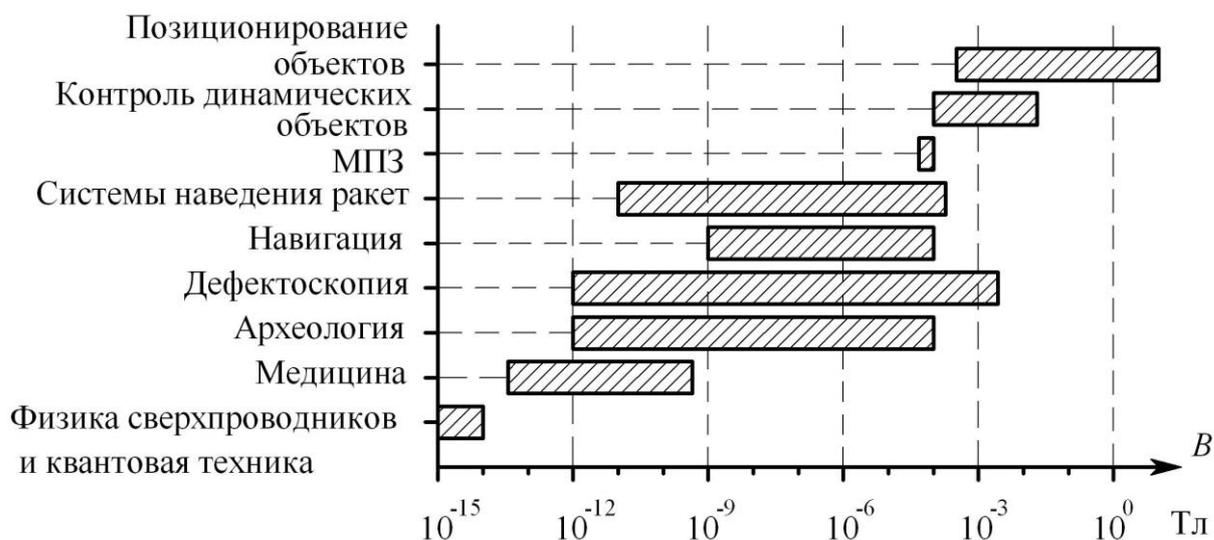


Рисунок 1.2 – Диапазоны магнитных сигналов датчиков в различных областях применения

Из рисунка 1.2 следует, что методами магнитометрии сегодня решаются не только технические задачи, но и проблемы гуманитарного характера в частности экологические, имеющие в настоящее время особую значимость. Это определяет основные области применения магнитометрии:

Таблица 1.1. Области применения магнитометрии

№	Области применения магнитометрии	Диапазон измеряемых сигналов, Тл.
1	Метрологические задачи геомагнетизма	$10^{-12} - 10^{-4}$
2	Исследование магнитных явлений и объектов космического пространства	$10^{-12} - 10^{-6}$
3	Контроль динамических объектов	$10^{-12} - 10^0$
4	Исследование техногенных магнитных явлений	$10^{-4} - 10^{-2}$
5	Исследование биомагнитных объектов и явлений	$10^{-13} - 10^{-9}$
6	Исследование квантовых явлений и объектов микро- мира	$10^{-15} - 10^{-14}$

Задачи *геомагнетизма* связаны с изучением распространения в пространстве и изменений во времени нормального МПЗ (НМПЗ), а также с исследованием геофизических процессов в недрах Земли и верхней атмосфере.

Основными методами в изучении МПЗ являются непосредственные наблюдения над пространственным распределением его силовых линий и его вариациями на поверхности Земли и в околоземном пространстве. Наблюдения заключаются в измерениях элементов Земного магнетизма в различных точках и носят название *магнитных съёмки*. В зависимости от того, где они производятся, съёмки подразделяются на морские, наземные, аэромагнитные и спутниковые. Особый успех в изучении пространственной структуры геомагнитного поля был достигнут благодаря модульной съёмке с искусственных спутников Земли.

Первые спутниковые магнитограммы МПЗ (рисунок 1.3) были получены с помощью отечественного *феррозондового* магнитометра СГ-45 [46]. В

дальнейшем использовались также квантовые магнитометры. Согласно рисунку 1.3, было определено не возмущенное НМПЗ, величина которого была принята 50 мкТл.

Погрешность спутниковой магнитометрии оценивается в $10\div 30$ нТл, что позволяет решать совокупность вопросов, связанных со структурой, состоянием и изменениями НМПЗ.

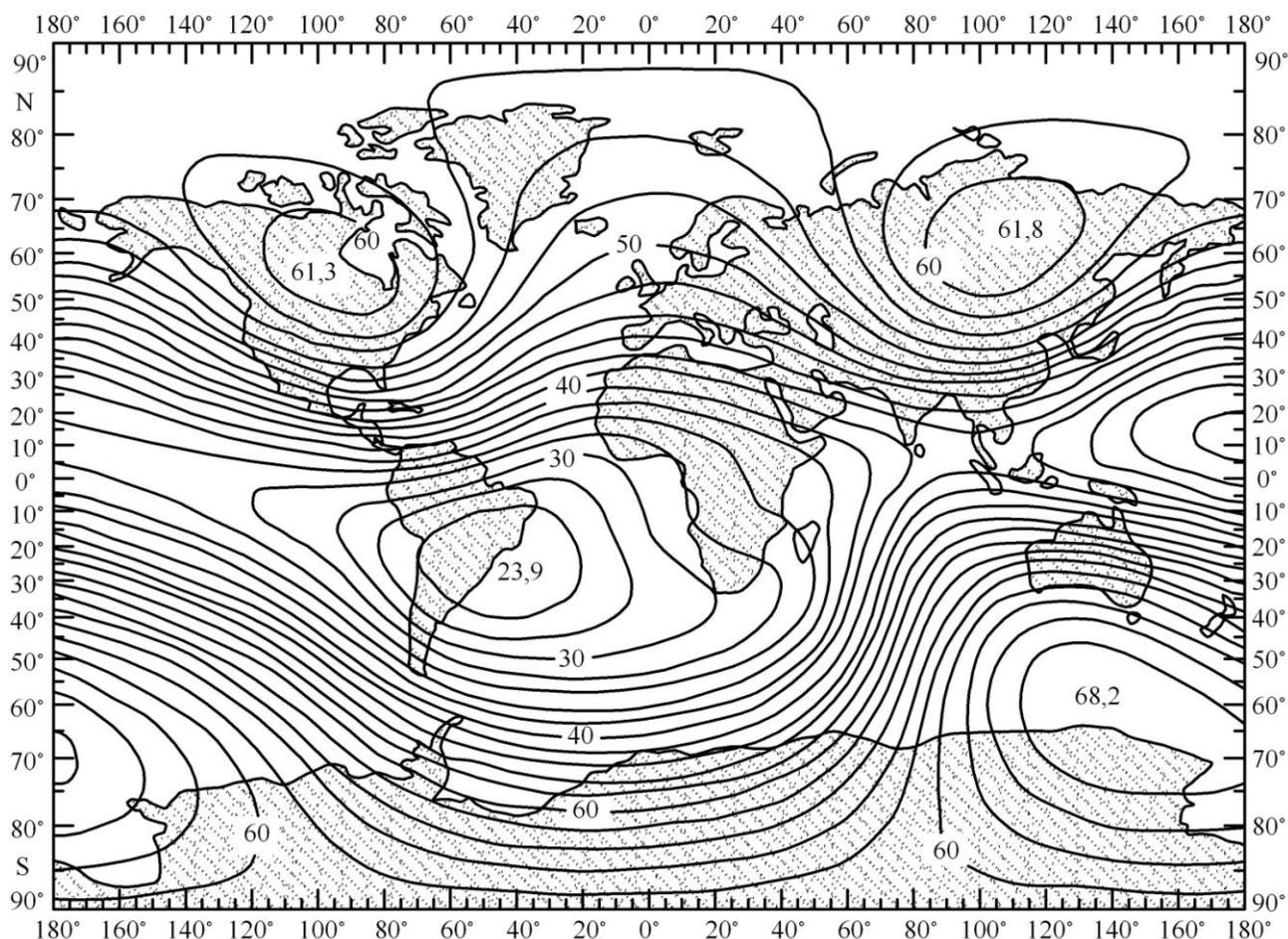


Рисунок 1.3 –Спутниковая магнитная съемка Земной поверхности феррозондовым магнитометром: 23,9[мкТл] – наименьшее значение геомагнитного поля; 68,2[мкТл] – наибольшее значение геомагнитного поля

Для получения представления о *векторном* распределении МПЗ разработаны методы анализа на основе комбинаций результатов спутниковых (рисунок 1.3) и наземных данных, получаемых, в частности, при помощи феррозондовых магнитометров (ФЗМ) [95].

Спутниковые съёмки использовались также для развития другого направления космической магнитометрии – исследования магнитных полей планет (Таблица 1.2). Так, космическим аппаратом «Луна-2», при помощи феррозондовых магнитометров, были произведены измерения, благодаря которым было установлено, что магнитное поле Луны (естественного спутника Земли) близко к нулю [46; 81]. Основные измерения проводились при помощи 3-х компонентного ФЗМ, разработанного в Российском научно-исследовательском институте Земного магнетизма [46; 81].

Таблица 1.2. Измерения магнитных полей планет и спутников Солнечной системы.

Планеты и спутники	Радиус планеты, км	Космический аппарат	Дата измерений	Максимальная индукция поля, мкТл	Тип прибора	Максимальное сближение с планетой, км
Меркурий	2420	Mariner-10	1974	0,35	ФЗМ	322
Венера	6057	Mariner-2	1962	0,015	ФЗМ	40000
		Венера-4	1967		ФЗМ	200
		Mariner-5	1967		ФЗМ	10000
		Mariner-10	1974		ФЗМ	13000
		Венера-9	1975		ФЗМ	посадка
Венера-10	1975	ФЗМ	посадка			
Земля	6373	ИСЗ-3	1958	68	ФЗМ	226
		Космос-26	1964		КМ	271
		Космос-49	1965		КМ	260
		РОГО-2	1965		КМ	413
		РОГО-4	1967		КМ	412
		РОГО-6	1970		КМ	396
		Космос-321	1970		КМ	280
		ИК-18	1978		ФЗМ	410
ИК-20	1978	ФЗМ	500			
Луна	1738	Луна-1	1959	0,0002	ФЗМ	5000
		Луна-2	1959		ФЗМ	800
		Explorer-18	1963		ФЗМ	200
		Луна-10	1966		ФЗМ	350
Марс	3390	Mariner-4	1965	0,064	ФЗМ	1320
		Марс-2	1971		ФЗМ	1380
		Марс-3	1971		ФЗМ	1500
		Марс-5	1974		ФЗМ	1755
Юпитер	71398	Pioneer-10	1973	1430	КМ	207000
		Pioneer-11	1974		КМ	121400
		Voyager-1	1979		ФЗМ	349800
Сатурн	60330	Pioneer-11	1979	84	КМ	80800
Уран	25559	Voyager-2	1986	96	ФЗМ	81500
Нептун	24764	Voyager-2	1989	90	ФЗМ	48000

В таблице 1.2: ФЗМ – феррозондовый магнитометр; КМ – квантовый магнитометр.

Таким образом, *данные магнитометрии*, согласно рисунку 1.2; таблице 1.1, являются источником новых знаний о космосе, составляют основу современных и перспективных теорий и методик исследования явлений и объектов космического пространства.

Методы магнитометрии, согласно таблице 1.1, относятся к ряду основных при исследовании *недр Земли и горных пород*. Особенности образования залежей полезных ископаемых и процессы разрушения горных пород представляют интерес с трех точек зрения. Во-первых, ценным является способность горных пород сохранять в течении миллионов лет намагниченность, полученную ими в период их образования. То есть магнетизм залежей недр Земли и горных пород является физической базой для палеомагнитных исследований [21]. Во-вторых, магнитные свойства минералов, входящих в горные породы, состав этих минералов, зависят от условий, в которых образовывалась, формировалась и существовала порода. То есть исследование магнетизма горных пород позволяет изучать строение и эволюцию Земли. И, наконец, познание механизма намагничивания ферромагнитных тел в однородном поле имеет большое значение в развитии теории магнитной разведки, так как магнитные аномалии НМПЗ вызываются именно ферромагнитными породами. Исследование магнитных аномалий имеет, прежде всего, практическое значение. Так, исследование локальных магнитных аномалий позволяет определить места залегания полезных ископаемых, в первую очередь, железных руд [95].

Бурное развитие электротехники послужило толчком для создания магнитоизмерительных приборов с различными временными и уровневыми характеристиками, в частности с целью оценки свойств ферромагнитных материалов. Существенное развитие магнитоизмерительная техника получила в связи с исследованиями Курской магнитной аномалии. При этом впервые в мире был внедрен метод аэромагнитной съёмки. Таким образом расширялась номенклатура приборов, разрабатывались новые принципы действия магнитометров на основе новых эффектов преобразования магнитных величин.

Это касается приборов для ведения магниторазведочных работ на нефть и газ, для аэро-, океано-, космических исследований.

Магнитные возмущения, связанные, например, с магнитной бурей МПЗ, возникают на несколько часов раньше, чем результаты её воздействия. В результате магнитных бурь происходит нарушение радиосвязи, выход из строя электронной аппаратуры. Опережающее обнаружение и измерение магнитных возмущений позволяет делать магнитные прогнозы, необходимые для защиты от магнитных бурь: бесперебойной радиосвязи, для оценки радиационной обстановки в околоземном пространстве, в частности, при космических полётах [29].

Стабильный вектор НМПЗ составляет основу наземных навигационных систем, а также подземных и подводных.

Наиболее сложными по технической реализации являются подземные *инклинометрические* навигационные системы. В них вектор НМПЗ является базой системы координат, в которой вычисляется траектория движения подземного (скважинного) объекта. Так как подвижный скважинный объект скрыт средой, непроницаемой для прямого пеленга его эволюций, *единственным* [27] методом построения траектории движения является *метод счисления пути* (рисунок 1.4). При реализации данного метода к магнитометру инклинометра предъявляются особые требования, в первую очередь – точность измерений:

при измерении зенитного угла $\pm 5'$; азимута $\pm 0,5^\circ$. Эти показатели точности должны быть достигнуты в осложненных условиях эксплуатации: максимальное рабочее давление 150 МПа; максимальная рабочая температура 250°C; уровень ударных и вибрационных перегрузок 20g [22].

Цель инклинометрии – попадание забоя в оптимальную область продуктивного пласта [27]. По данным замеров зенитного угла и азимута искривления скважины, а также - глубины ствола в точке замера строится план (инклинограмма) – проекция оси скважины на горизонтальную плоскость и профиль – вертикальная проекция на плоскость магнитного меридиана (рисунок 1.4).

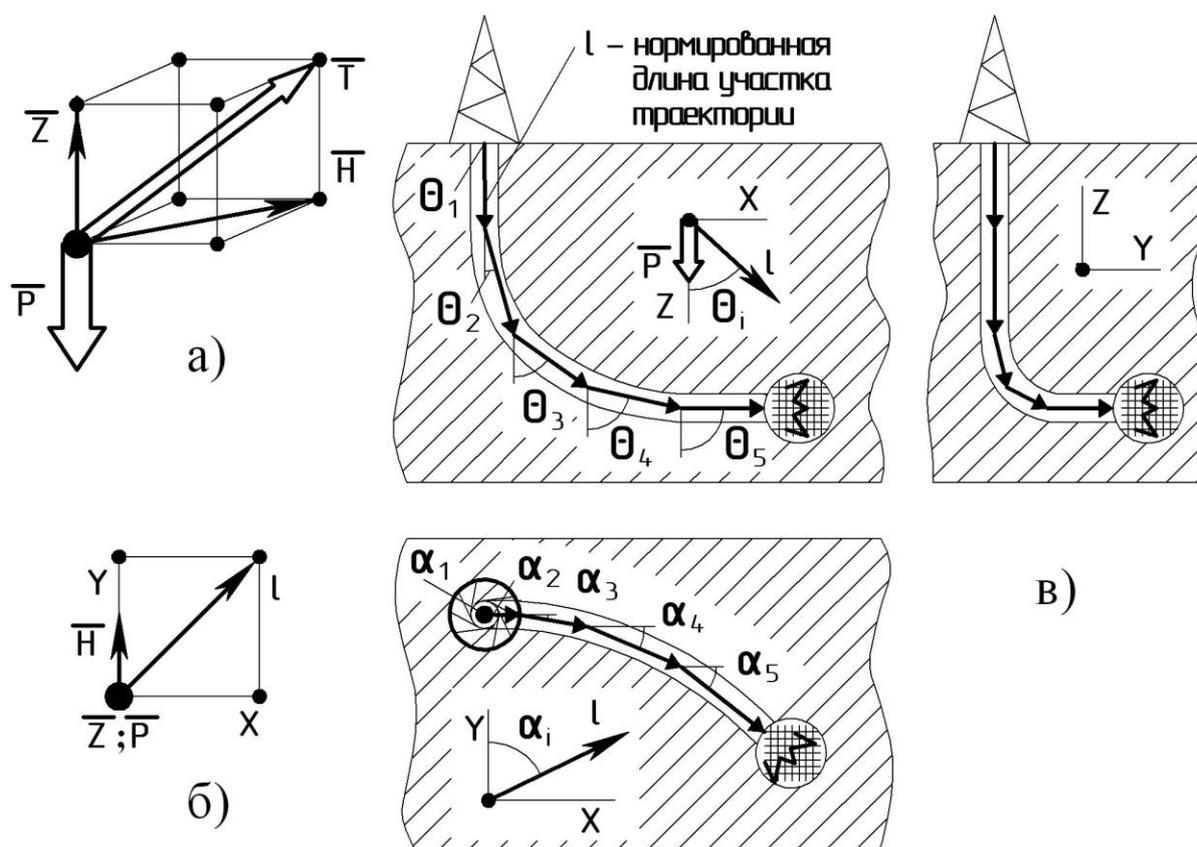


Рисунок 1.4 – Инклинометрия скважин методом счисления пути.
 α – угол азимута; θ – зенитный угол; T – полный вектор МПЗ; H – горизонтальная составляющая МПЗ; Z – вертикальная составляющая МПЗ; P – вектор силы тяжести

Наличие фактических координат бурящихся скважин позволяет точно установить точки пересечения скважиной различных участков геологического разреза, т.е. установить правильность бурения в заданном направлении [10; 40]. Для измерения угла азимута применяются *феррозондовые* преобразователи азимута (ФПА) [31; 70].

Из проведенного анализа следует:

1. Значимость измерений магнитных величин, степень совершенства технических характеристик, широкий спектр функциональных возможностей и сфер применения определяют магнитометрические приборы как основополагающие в ряду современных и перспективных средств измерительной техники.

2. Разнообразие и важность задач, решаемых с применением магнитометров обуславливает многообразие методов и средств магнитометрии.

3. В классе магнитометрических приборов наиболее ценным признаком является *совокупность* высоких технических характеристик, а следовательно, широкие функциональные возможности магнитометра.

1.2. Методы и средства магнитометрии

Совершенствование магнитных измерительных технологий, разнообразие и важность задач, решаемых при помощи магнитометров, определяют многообразие методов и средств магнитометрии. Следует отметить, что на начальном этапе развития магнитометрии приборы использовались исключительно как *полемеры* (ПМ), т.е. в качестве измерителей параметров однородных магнитных полей. Магнитометрических *градиентометров* (ГрМ) не существовало так как еще не были созданы техногенные источники магнитных аномалий (МА) НМПЗ. Факты существования МА исследователями отмечались, но задачи измерения градиента НМПЗ не возникало. Наибольшее распространение получили магнитометры следующих типов:

- а) магнитомеханические преобразователи;
- б) индукционные преобразователи;
- в) гальваномагнитные преобразователи:
 - в.1. датчики Холла
 - в.2. магниторезистивные преобразователи:
 - в.2.1. магниторезисторы на эффекте Гаусса;
 - в.2.2. анизотропные магниторезистивные преобразователи (AMR);
 - в.2.3. гигантские магниторезистивные преобразователи (GMR);
 - в.2.4. преобразователи, основанные на эффекте гигантского магнитоимпеданса (GMI-преобразователи);
 - в.3. магнитодиоды;
 - в.4. магнитотранзисторы;
- г) магнитооптические преобразователи;
- д) ЯМР магнитометры;

- д.1. с вынужденной ядерной прецессией;
- д.2. со свободной ядерной прецессией;
- д.3. с оптической накачкой;
- е) СКВИДы;
- ж) феррозондовые преобразователи.

Магнитомеханические преобразователи

Магнитомеханическими называются преобразователи (ММП), принцип работы которых основан на взаимодействии постоянного магнита с измеряемым магнитным полем [4; 33; 93].

Достоинства: низкий порог чувствительности: $G \sim 1$ нТл; простота эксплуатации.

Недостатки: отсутствие функциональной совместимости с электроизмерительными приборами (ЭИП) из-за визуального считывания результатов измерения; низкая надежность; малое быстродействие; сложность технологий изготовления и эксплуатации; высокая стоимость.

Гальваномагнитные преобразователи

Гальваномагнитными называются преобразователи (ГМП), принцип работы которых основан на использовании физических явлений, возникающих при воздействии магнитного поля на движущийся заряд.

В настоящее время ГМП составляют наиболее крупный класс магнитометрических преобразователей. Это является признаком высокой их эффективности, как преобразователей магнитных величин, что подтверждается образованием среди них подклассов по типу собственной функции преобразования: 1) эффект Холла, 2) магниторезистивный эффект; 3) анизотропный магниторезистивный эффект (AMR); 4) гигантский магниторезистивный эффект (GMR), в частности, туннельный магниторезистивный эффект (TMR); 5) явления гигантского магнитного импеданса (GMI).

Датчики Холла

Эффект Холла – явление возникновения поперечной разности потенциалов в проводнике с постоянным током при помещении его в магнитное поле [4; 12; 25; 131]:

Достоинства: наиболее недорогой и простой в изготовлении и эксплуатации, а следовательно, широко используемый датчик магнитного поля; измерение постоянных и переменных магнитных величин [74; 75].

Недостатки: смещение нуля; повышенный уровень собственных шумов; низкая стабильность эксплуатационных и метрологических характеристик, что вообще характерно для полупроводниковых преобразователей; малая чувствительность; высокий уровень потребляемой мощности; малое быстродействие; миниатюризация датчиков Холла ухудшает их характеристики; спонтанная индивидуальная для каждого датчика диаграмма направленности: её несимметрия и деформация [7].

Магниторезистивные преобразователи (MR).

MR (Magnetoresistance) называются преобразователи, электрическое сопротивление которых изменяется под воздействием магнитного поля. В преобразователях данного типа реализуются различные физические эффекты: а) магниторезистивный эффект (эффект Гаусса); б) анизотропный магниторезистивный эффект (*AMR*); в) гигантский магниторезистивный эффект (*GMR*); г) явление гигантского магнитного импеданса (*GMI*).

а) Магниторезистивные датчики на эффекте Гаусса.

Эффект Гаусса - изменение электрического сопротивления магниторезистивного материала вследствие искривления траектории движения носителей заряда под действием внешнего постоянного магнитного поля [12; 25; 92].

Достоинства: технологичность изготовления, малые габариты, низкая стоимость.

Недостатки: низкий уровень показателей чувствительности, направленности, энергопотребления.

б) Анизотропные магниторезистивные преобразователи (AMR).

Принцип работы анизотропных магниторезистивных преобразователей (*Anisotropic Magnetoresistance*) основан на изменении электрического сопротивления тонкопленочных ферромагнетиков под воздействием измеряемого магнитного поля [8; 9; 37; 76].

Достоинства: наличие оси чувствительности (ОЧ) – зависимость сопротивления ρ от угла θ ; малое влияние на характеристики дрейфа магнитных параметров; малая зависимость характеристик от температуры.

Недостатки: низкая чувствительность; нелинейность – квадратичная зависимость ρ от θ , из чего следует, что данный тип преобразователей не позволяет определять направление (знак) магнитного поля. Данные недостатки могут быть устранены в конструкции чувствительного элемента, который представляет собой комплект из четырех чередующихся резистивных ферромагнитных пленок выполненных на одном кристалле, включенных по мостовой схеме [76; 131].

в) Гигантские магниторезистивные преобразователи (GMR).

Принцип действия гигантских магниторезистивных датчиков (*Giant Magnetoresistance*) основан на эффекте преобразования магнитных величин в многослойных структурах ферромагнетиков [45; 77]. То есть в GMR-датчиках реализуется преобразование угла между направлением тока и силовыми линиями измеряемого магнитного поля в электросопротивление многослойной структуры, состоящей из разнородных, по магнитным свойствам, материалов [131]:

Достоинства: большая плотность интеграции, как следствие высокая разрешающая способность при распознавании близлежащих микрогабаритных магнитных объектов (в частности, битов на магнитных носителях). Высокое быстродействие – частота срабатывания достигает нескольких ГГц. Низкое потребление энергии.

Недостатки: диаграмма направленности имеет деформацию и не является острой.

г) Преобразователи, основанные на эффекте гигантского магнитоимпеданса (*GMI* - преобразователи).

Принцип работы *GMI* – преобразователей основан на эффекте изменения комплексного сопротивления ферромагнитного проводника под воздействием внешнего магнитного поля [126].

Достоинства: возможность создания датчиков без использования катушек индуктивности; относительная простота, технологичность изготовления датчика.

Недостатки: ограниченные функциональные возможности: не определяется знак вектора \mathbf{B} ; деформированная диаграмма направленности; чувствительность к механическим воздействиям; большая величина гистерезиса; необходимость дополнительных приспособлений (магнитное поле смещения; создание калибровочного механического напряжения и т.д.).

Магнитодиоды

Принцип действия магнитодиодных датчиков основан на эффекте преобразования магнитных величин в полупроводниковой структуре с *p-n* переходом [92; 138].

Достоинства: технологичность производства.

Недостатки: отсутствие оси направленности; малая чувствительность; большое энергопотребление; работа лишь в режиме индикатора наличия либо отсутствия внешнего \mathbf{B} поля.

Магнитотранзисторы

Магнитотранзисторами называются полупроводниковые элементы, конструктивные и рабочие параметры которых оптимизированы для получения максимальной чувствительности коллекторного тока к магнитному полю [7; 8; 76].

Достоинства: технологичность производства.

Недостатки: отсутствие оси направленности; малая чувствительность; работа лишь в режиме индикатора наличия либо отсутствия внешнего поля \mathbf{B} .

Магнитооптические преобразователи

Принцип действия магнитооптических преобразователей основан на эффекте Фарадея. Магнитооптический эффект Фарадея заключается в том, что,

при распространении линейно поляризованного света через вещество, находящееся в магнитном поле H , наблюдается поворот плоскости поляризации, угол φ которого пропорционален магнитному полю H и длине l магнитооптического материала [19; 43; 124; 131].

Достоинства: датчик не содержит металлических деталей – возможно его расположение вблизи источников электроэнергии большой мощности; взрывопожаробезопасность при измерении больших токов; широкий частотный диапазон.

Недостатки: низкие чувствительность и точность; неопределенная диаграмма направленности; сложность считывания изображения угла φ как информационного сигнала; зависимость выходного сигнала датчика от температурных и механических воздействий; большие энергопотребление, габариты и вес датчика.

ЯМР магнитометры

Принцип действия ЯМР магнитометров основан на зависимости от измеряемого постоянного магнитного поля резонансной частоты возбуждающего магнитного поля, на которой происходит резкое поглощение энергии возбуждения в объеме рабочего вещества [1; 72; 93; 131].

Преобразователи магнитного поля, основанные на ЯМР, подразделяются:

- а) ЯМР с вынужденной ядерной прецессией;
- б) ЯМР со свободной ядерной прецессией;
- в) магнитометр с оптической накачкой.

Достоинства: высокая чувствительность; приемлемые габариты и вес магнитометра.

Недостатки: низкое быстродействие; большие габариты чувствительного элемента; ограниченный ресурс рабочего вещества датчика; невозможность определения направления и компонент магнитного воздействия; ограниченный температурный диапазон.

Сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики (СКВИДы)

СВИД – прибор для измерения напряженности слабых магнитных полей, основу работы которого составляют: явление квантования магнитного потока в сверхпроводнике и эффект Джозефсона [4; 11]:

Достоинства: наиболее высокая чувствительность среди магнитометрических преобразователей; низкий уровень шумов.

Недостатки: специализированный тип приборов, представляющий собой стационарное лабораторное оборудование; специальные требования по температуре; большие габариты и вес; необходимость дополнительного экранирования измерительного объема; ограниченные размеры измерительного объема.

Индукционные преобразователи

Индукционными называются преобразователи (ИндП), принцип действия которых основан на законе электромагнитной индукции. То есть в ИндП реализуется преобразование изменяющегося во времени магнитного потока в ЭДС. В общем случае ЭДС в витке провода, при изменении сцепляющегося с ним магнитного потока, равна [4; 93; 94; 131; 134]:

$$e = -\left(\frac{d\Phi}{dt}\right), \quad (1.1)$$

где e – ЭДС; Φ – сцепляющийся с витком магнитный поток.

Классическим представителем этого вида преобразователя является измерительная катушка (ИК). На рисунке 1.5 катушка 1, поперечного сечения s с обмоткой, имеющей w витков, помещена в магнитное поле и с ней сцепляется магнитный поток Φ . Тогда, полный магнитный поток равен:

$$\psi = w \cdot \Phi = H \cdot \mu \cdot s \cdot w \cdot \cos \alpha, \quad (1.2)$$

где H – напряженность магнитного поля; μ – магнитная проницаемость среды; α – угол между направлением вектора H и n нормалью к поверхности катушки.

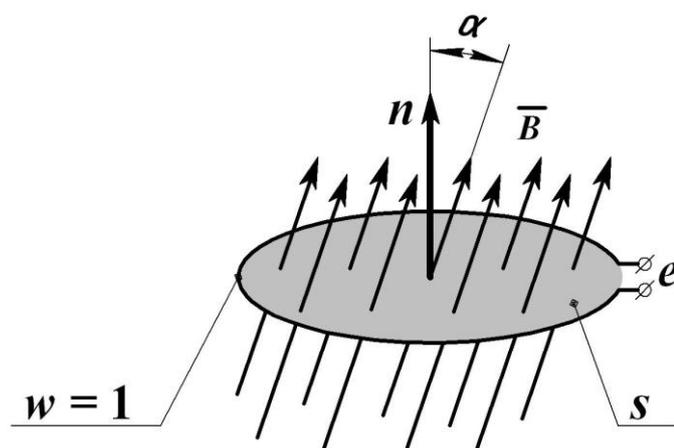


Рисунок 1.5 – Схема, поясняющая принцип действия ИндП

Примером технической реализации ИндП согласно рисунку 1.5 является магнитометр LEM1 120 (Львовский центр Института космических исследований).

Основные технические характеристики [123]:

- частотный диапазон: 0,0001 ÷ 1000 Гц;
- уровень шума при 100 Гц: $\leq 0,01 \text{ пТл} / \sqrt{\text{Гц}}$;
- чувствительность: 200 мВ / нТл;
- потребляемая мощность: 225 мВт;
- напряжение питания: ± 6 до ± 15 В;
- диапазон рабочих температур: от -10°C до 50°C ;
- габариты – $\text{Ø}85 \times 1340$ мм;
- вес: 5,7 кг.

Достоинства: широкие функциональные возможности (многофункциональность); простота проектирования, расчета и эксплуатации; широкий частотный диапазон измеряемых величин.

Недостатки: Чувствительность только к переменному магнитному полю; наличие подвижных частей конструкции; большие габариты. Вместе с тем, микрокатушки современных и перспективных ИндП могут быть реализованы за счет использования интегральных технологий, в частности, тонкопленочных многослойных.

Из выражения (1.2) следует, что величина e есть функция многих

аргументов, то есть формирование ЭДС как информационного сигнала можно осуществить изменением нескольких параметров, а именно: 1) $\cos\alpha$; 2) H ; 3) s ; 4) μ .

Преобразование по параметру $\cos\alpha$ реализуется в магнитоэлектрических веберметрах и тесламерах при помощи вращения ИК в измеряемом поле. Простейшие тесламеры с катушкой на валу синхронного двигателя обладают чувствительностью $G \sim 10$ нТл.

Функция преобразования по аргументу H реализуется путем плоскопараллельных колебаний ИК, при которых она частично выходит из измеряемого магнитного поля. Чувствительность вибрационных магнитометров составляет $G \sim (0,1 \div 1)$ нТл.

Функция преобразования по аргументу s , осуществляемая путем изменения поперечного сечения катушки, не получила широкого практического применения.

Особо значимая функция преобразования основана на периодическом ω изменении магнитной проницаемости μ сердечника. Действующие по этому принципу датчики образуют отдельный класс магнитометров: *феррозондовые преобразователи*. Чувствительность ФЗ достигает $G \sim 0,001$ нТл. Датчики феррозондового типа отличаются широкими функциональными возможностями [4]. Уникальная совокупность функциональных возможностей ФЗ преобразователей выдвигает их на позиции наиболее совершенных и перспективных средств магнитометрии (таблица 1.3). Улучшению рабочих параметров ФЗ посвящена данная диссертационная работа.

Феррозондовые преобразователи

Феррозонды были изобретены в начале 30-х годов XX века. Как средства измерений ФЗ были разработаны немецкими учеными Х. Ашенбреном и Г. Губо [5]. Они разработали ФЗ с кольцевым МП, согласно рисунку 1.6.

В обмотку возбуждения подается ток $i_{\text{возб}}$ частоты 500 Гц. С сигнальной обмотки (СО) снимается выходная ЭДС U_{2f} частоты 1000 Гц, несущая информацию о компоненте вектора поля H_0 , лежащей в плоскости кольцевого сердечника и совпадающей с нормалью к плоскости витков измерительной обмотки. Схема выделения информационного U_{2f} сигнала представляет собой

резонансный LC фильтр, в котором L есть индуктивность CO . Применение данной элементарной схемы ограничивает возможности ФЗ как средства измерения и объясняется низким уровнем развития электроники в период изобретения ФЗ.

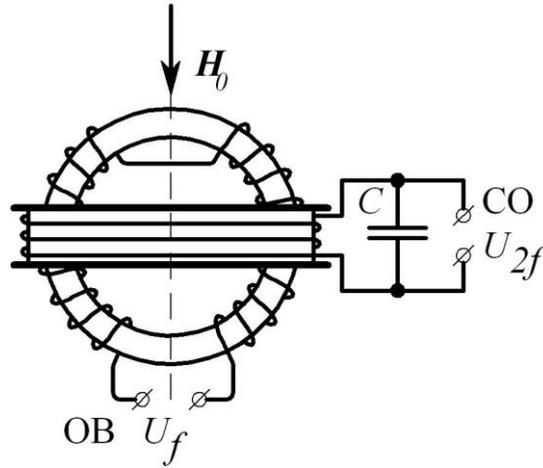


Рисунок 1.6 – Феррозонд Ашенбренера и Губо

Сложность изготовления *кольцевых* ФЗ явилась стимулом изобретения *стержневых измерительных структур* феррозондов.

Феррозонд отечественного изобретателя П. А. Халилеева не является дифференциальным и содержит один сердечник и одну обмотку, выполняющую функции как возбуждения, так и измерительной (рисунок 1.7). В начале 40-х годов феррозондовые приборы Халилеева использовались для поиска железных руд. Схема выделения информационного сигнала, как и по рисунку 1.6, не является эффективной – ограничивает возможности ФЗ как средства измерения.

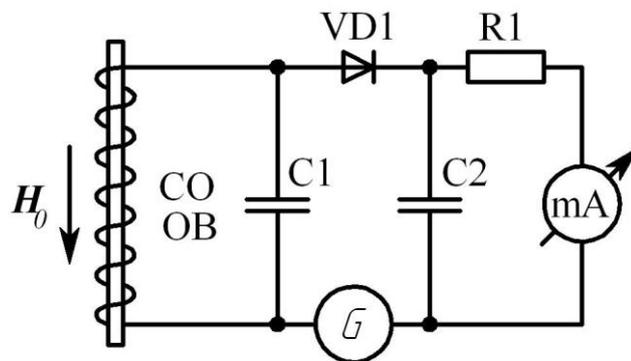


Рисунок 1.7 – Магнитометр П.А. Халилеева

Позднее [6] Ф. Фёстер предложил использовать стержневые сердечники взамен кольцевых в дифференциальных феррозондах (рисунок 1.8). Фёрстер применил два идентичных стержневых сердечника, расположив на каждом из них не только обмотку переменного тока, но и измерительную. Созданный прибор содержит эффективные электронные устройства: ламповые генератор, усилитель, детектор, усилитель постоянного тока и регистратор, что позволяет более полно проявить возможность ДФЗ как средства измерений. Прибор был рекомендован, для измерения низкочастотных магнитных полей, в частности для регистрации короткопериодных вариаций магнитного поля Земли [5].

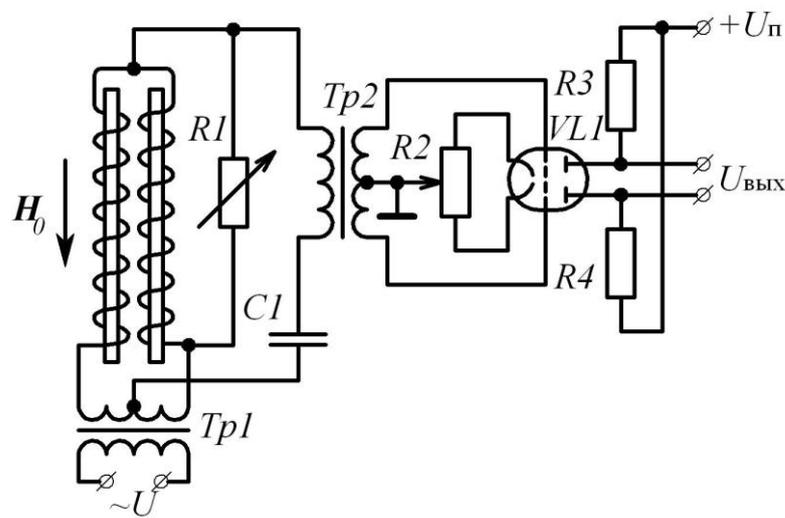


Рисунок 1.8 – Ламповый магнитометр со стержневым ДФЗ

В 1944 г. группой сотрудников Горьковского физико-технического исследовательского института (Г.С. Горелик, И.Л. Берштейн, К.А. Горонина и И.С. Жукова) был предложен феррозонд с поперечным возбуждением. Феррозонд содержал стержневой (проволочный) сердечник, по которому пропускали достаточно сильный переменный ток; измерительная обмотка наматывалась вокруг сердечника. При наличии внешнего постоянного поля H_0 в измерительной обмотке наводилась ЭДС второй гармоники. Авторы способствовали развитию теории феррозондов и гальваномангнитных преобразователей [5; 47; 67].

Американские инженеры под руководством В. Вакье, остановившись на схеме ДФЗ, разработали более совершенные электронные узлы, применили синхронное детектирование и реализовали компенсационный метод измерения

как наиболее точный. Публикации об этих приборах появились лишь в конце 40-х годов.

Новый мощный толчок развитию феррозондовой техники был дан началом космических исследований. Он совпал с революцией в области электронного приборостроения, с переходом от вакуумных элементов к полупроводниковым, позволяющим во много раз уменьшить габариты, массу и энергопотребление приборов, повысить их функциональные возможности и надежность.

Уже на третьем советском спутнике (1958 г.) был установлен и успешно функционировал феррозондовый магнитометр, электронная часть которого была выполнена на транзисторах.

В 60-х годах в СССР и США были разработаны трехкомпонентные (неориентируемые) феррозондовые магнитометры для обнаружения и изучения магнитных полей Луны, Венеры, Марса, других планет и межпланетного пространства. Приборы подобного типа широко используются в практике космических исследований и в настоящее время.

Несмотря на сравнительную давность изобретения феррозондов, сколь-нибудь цельная и последовательная теория их, которую можно было бы положить в основу анализа, расчетов и проектирования феррозондовых приборов, появилась значительно позднее.

Значительный вклад в развитие теории феррозондов внесен советскими учеными.

Прежде всего следует указать на учение о намагниченности тел конечных размеров во внешнем поле, развитое еще задолго до изобретений феррозондов известным физиком В.К. Аркадьевым. Проведя четкое различие между магнитными проницаемостями вещества, формы и тела, В.К. Аркадьев записал математические выражения, которые стали исходными в теории феррозондов.

На основе этого учения М. А. Розенблат предложил и экспериментально проверил универсальное полуэмпирическое выражение для расчета проницаемости формы или коэффициентов размагничивания стержневых сердечников. Розенблатом даны также формулы для инженерного расчета

стрержневых феррозондов.

Дальнейшему развитию параметрической теории феррозондов в нашей стране способствовали работы Ю.Ф. Пономарева, Л.Я. Мизюка, Р.Я. Беркмана [39].

В 1969 г. вышла монография Ю.В. Афанасьева «Феррозонды». Это была первая обобщающая работа, в которой последовательно излагались вопросы теории, проектирования и применения феррозондов. Особо подчеркивалась правомерность параметрической теории и её полезность для описания процессов преобразования магнитных величин в феррозондах различного типа, а также для изучения в них новых явлений и эффектов.

С 2000 г. по 2010 г. и в настоящее время феррозондовые приборы и измерительные технологии на основе феррозондов находятся в стадии интенсивного развития. Это связано с уплотнением и расширением мирового информационного пространства, с открытием новых областей применения наиболее совершенных магнитометрических датчиков.

Информационный сигнал феррозонда содержит данные о величине, линии и направлении действия вектора измеряемого магнитного поля. Закономерно, что феррозондовые приборы и методы составили основу *векторной* магнитометрии, сложившейся, в частности при изучении космического пространства.

Для решения задач пространственных векторных дистанционных измерений необходимы параметры феррозондовых датчиков, полученные на высшем уровне научных исследований (п.1.1 Глава 1). Векторные измерения феррозонд обеспечивает благодаря строгой функциональной зависимости уровня информационного сигнала от угла α между вектором поля и собственной осью чувствительности. Точность угловых измерений при этом определяется прежде всего линейностью характеристики феррозонда в диапазоне измеряемых величин.

Вопросы магнитного влияния (магнитной чистоты) космического летательного аппарата на достоверность измерений решаются при помощи вспомогательных *феррозондовых градиентометров*, устанавливаемых совместно с векторными магнитометрами на удлинительных штангах. Стабильность и

точность измерительных схем в цепях ОВ и СО феррозондов обеспечивается современной аналоговой, цифровой и микропроцессорной электроникой.

Пример конструктивного исполнения феррозондового датчика для космических векторных магнитных измерений на рисунке 1.9.

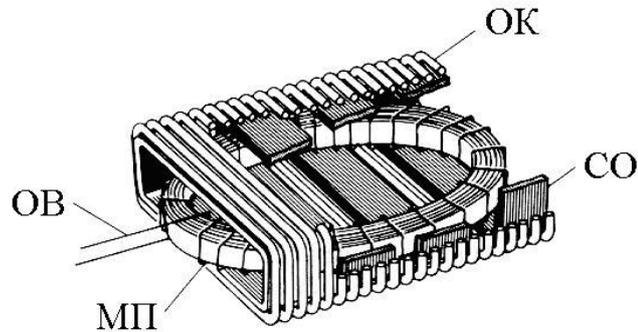


Рисунок 1.9 – ФЗ датчик для космических векторных магнитных измерений.

ОВ – обмотка возбуждения ФЗ; ОК – обмотка компенсации ФЗ; СО – сигнальная обмотка ФЗ; МП – магнитопровод

Схема феррозондового космического векторного магнитометра на рисунке 1.10.

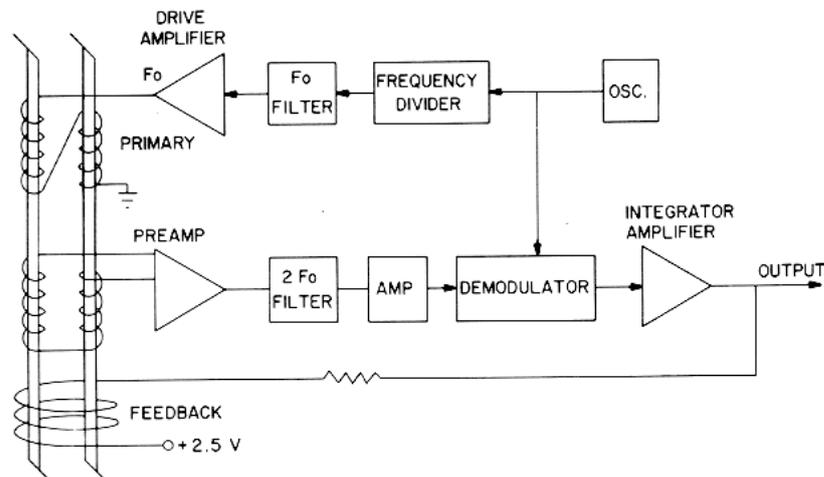


Рисунок 1.10 – Схема феррозондового космического векторного магнитометра.

Feedback – обмотка компенсации ФЗ; *primary* – обмотка возбуждения ФЗ; *drive amplifier* – усилитель возбуждения; *filter* – фильтр; *frequency divider* – делитель частоты; *osc.* – генератор возбуждения ФЗ; *preamp* – предварительный усилитель; *amp* – усилитель; *demodulator* – детектор; *integrator* – интегратор

Свойства феррозондовых преобразователей

Феррозондовый (ФЗ) преобразователь – устройство для измерения постоянных или медленно меняющихся магнитных полей, их компонент и градиентов. Принцип действия феррозондовых преобразователей основан на изменении магнитного состояния материала магнитопровода под воздействием двух магнитных полей: измеряемого и вспомогательного (возбуждения)[4; 131].

ФЗ является разновидностью индукционных преобразователей. Функция преобразования ФЗ основана на периодическом изменении магнитной проницаемости μ сердечника и в общем случае, определяется зависимостью [5]:

$$e = -2 \cdot s \cdot w_2 \cdot H_0 \cdot \mu_0 \frac{d\mu_0^*}{dt}, \quad (1.3)$$

где e – ЭДС сигнальной обмотки; s – поперечное сечение магнитопровода; w_2 – количество витков сигнальной обмотки; μ_0 – дифференциальная магнитная проницаемость магнитопровода; H_0 – измеряемое магнитное поле; t – время.

Преобразованием формулы (1.3) определяется зависимость ЭДС e от измеряемого поля H_0 для дифференциального (ДФЗ) феррозонда [5]:

$$e = 6 \cdot \omega \cdot b \cdot s \cdot w_2 \cdot H_0 \cdot H_1^2 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t), \quad (1.4)$$

где e – выходная ЭДС сигнальной обмотки; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, f – частота возбуждающего поля; H_1 – амплитуда возбуждающего поля; b – коэффициент аппроксимации, зависящий от материала и формы магнитопровода; s – поперечное сечение магнитопровода; w_2 – количество витков сигнальной обмотки; H_0 – измеряемое магнитное поле; t – время.

По рисунку 1.11 (в) ДФЗ содержит два идентичных стержневых сердечника из магнитомягкого ферромагнетика и охватывающие их две катушки возбуждения, питаемые переменным током. Кроме обмоток возбуждения существует сигнальная обмотка, которая охватывает оба сердечника.

В ДФЗ обмотки возбуждения соединены таким образом, что протекающий в них переменный ток i создает в объеме сердечников поля H_1 , равные по величине, но противоположные по направлению. В отсутствие измеряемого магнитного поля, сердечник, под действием переменного магнитного поля,

создаваемого током i в катушке возбуждения, перемещается по симметричному циклу. Если на сердечник действует измеряемое постоянное или слабо меняющееся переменное магнитное поле, то кривая перемещения изменяет свои размеры и форму и становится несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС индукции в сигнальной катушке. В частности, появляются четные гармоники, величина которых пропорциональна напряженности измеряемого поля и которые отсутствуют при симметричном цикле перемещения.

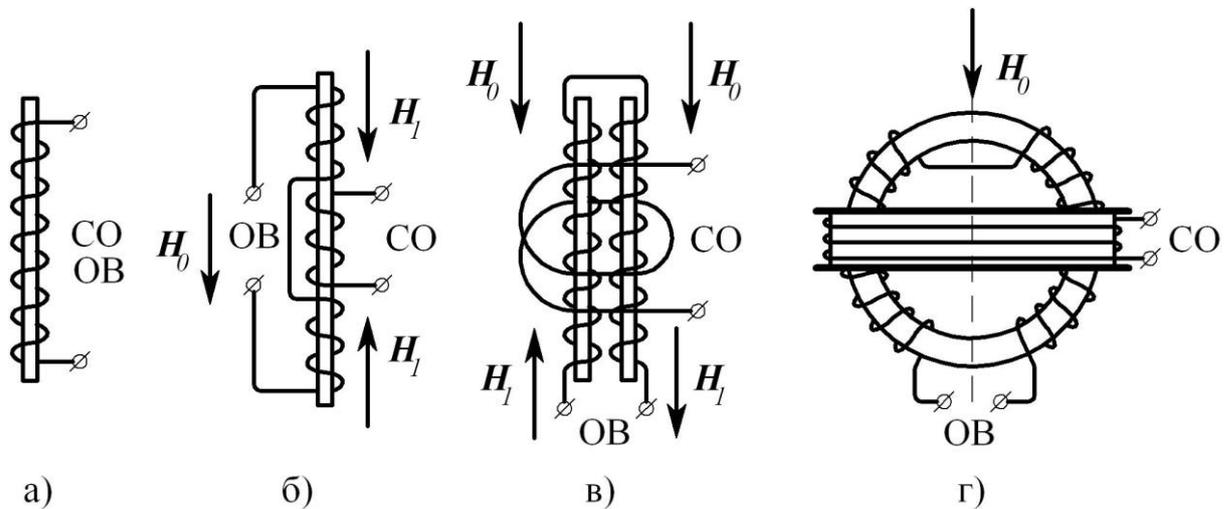


Рисунок 1.11– Измерительные структуры феррозондовых преобразователей.

OB – обмотка возбуждения ФЗ; CO – сигнальная обмотка ФЗ; H_0 – измеряемое магнитное поле; H_1 – поле возбуждения ФЗ.

а) одностержневой ФЗ; б) одностержневой дифференциальный ФЗ;
в) двухстержневой дифференциальный ФЗ; г) кольцевой дифференциальный ФЗ

Примером технической реализации ДФЗ является преобразователь НВ0391.5-35 (ООО "НПО ЭНТ", Россия).

Основные технические характеристики [44]:

- предел измерения: ± 100 мкТл;
- порог чувствительности: 0,5 нТл;
- нелинейность: 1,0 %;
- уровень шума при $f_{\text{В}} = 1$ Гц: $0,018 \text{ нТл} / \sqrt{\text{Гц}}$;
- диапазон рабочих температур: от -55°C до 120°C ;
- габариты: $\text{Ø}11,8 \times 35$ мм.

Достоинства: низкий порог чувствительности; наиболее полная совокупность функциональных возможностей: измерения направления, частоты, модуля и градиента магнитного поля; большой динамический диапазон; симметричная двуполярная диаграмма направленности; наличие оси чувствительности – возможность построения многокомпонентных датчиков; надежность; механическая прочность; низкое энергопотребление; широкий диапазон рабочих температур.

Недостатки: необходимость организации прецизионных технологий изготовления; сложность настройки измерительных схем.

Таблица 1.3. Сравнительный анализ магнитометрических датчиков.

	ММП	ИндП	Датчик Холла	MR	AMR	GMR	GMI	Магнитодиоды	Магнитотранзисторы	МО	ЯМР	СКВИД	ДФЗ
Порог чувствительности 0,01÷1,0 нТл	+	+	–	–	+	–	–	–	–	–	+	+	+
Динамический диапазон ≥80 дБ	+	+	–	–	+	–	+	–	–	+	+	+	+
Измерение постоянных маг. полей	+	–	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+
Измерение переменных маг. полей	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
Быстродействие, до 10 кГц	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
Диаграмма направленности	+	+	–	–	+	+	+	–	–	–	–	±	+
Диапазон рабочих температур -50 ÷ +200 °С	±	±	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Малое энергопотребление	+	–	+	–	+	+	+	±	+	–	–	–	+
Малые габариты	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–	–	–	+
Технологичность изготовления	±	+	+	+	+	+	+	+	+	±	±	–	±

1.3. Основные направления совершенствования феррозондовых преобразователей

В настоящее время разработку, внедрение и коммерческое использование ФЗ датчиков осуществляют множество государственных предприятий, корпораций и частных фирм. Передовые разработки ФЗ датчиков и ЧЭ ФЗ принадлежат фирмам: Samsung Electronics CO., LTD; Siemens AG; Bartington Instruments; Magson GmbH; Wuntronic GmbH; Autonnica; ООО "НПО ЭНТ"; Applied Physics Systems; Institute Dr. Forster; Ebinger GmbH; Vallon; Schontedt Instrument Co.; Laboratory of Electromagnetic Innovations (LEMI); Furuno Electric CO., LTD и др.[44; 99; 100; 123; 125; 136].

По совокупности научно-технических достижений, ФЗ датчики и ФЗ ЧЭ характеризуются следующими наивысшего уровня параметрами:

- порог чувствительности: 0,001 нТл;
- чувствительность: 0,073 мВ/нТл;
- частотный диапазон: 0 ÷ 20 МГц; известны результаты [106] получения информационного сигнала ДФЗ на частотах $f_{\text{возб}} \leq 700$ МГц;
- потребляемая мощность: 1 мВт [106];
- предел измерения: ± 80 мкТл;
- нелинейность: 0,1%;
- уровень шума при $f=1$ Гц: ≤ 6 пТл / $\sqrt{\Gamma_{\text{ш}}}$; $f=2$ кГц: $\leq 0,001$ пТл / $\sqrt{\Gamma_{\text{ш}}}$ [113];
- диапазон рабочих температур: от -55 °С до $+215$ °С [112];
- габариты: 1,7 мм × 0,6 мм [106].

Несмотря на высокий уровень представленных характеристик остаются общие направления совершенствования феррозондовых преобразователей:

- а) миниатюризация;
- б) технологичность производства;
- в) снижение энергопотребления;
- г) снижение стоимости.

1.4. Постановка задач исследований

Проведенный в 1.2 анализ современных средств и методов магнитометрии и его результаты по таблице 1.3 определяют задачи диссертационных исследований по научному обоснованию новых и совершенствованию существующих методов и средств изготовления и контроля магнитометрических преобразователей феррозондового типа:

1. Произвести анализ существующих методов и средств изготовления ММС для прецизионных магнитометрических датчиков, в частности ФЗ типа.

2. Разработать математическую модель связи информационного сигнала дифференциальных феррозондов с параметрами электромагнитной системы как стержневого, так и замкнутого типов.

3. Разработать математическую модель идентификации ММС из тонкопленочных аморфных сплавов по ограниченному ряду их геометрических параметров.

4. Разработать способ изготовления и контроля ММС из тонкопленочных аморфных сплавов с применением технологии электроэрозионной резки, сохраняющей магнитные свойства исходного материала.

5. Экспериментальные исследования дифференциальных феррозондовых датчиков с разработанными малогабаритными магниточувствительными сердечниками из аморфных сплавов.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ методов и средств магнитометрии показал, что феррозондовые преобразователи обладают совокупностью позитивных свойств, которая другим магнитометрическим датчиками не принадлежит. Поэтому существуют задачи расширения областей применения ФЗ и создания на их основе прогрессивных измерительных технологий. Следовательно, необходимо научное обоснование новых и совершенствование существующих методов и средств изготовления и контроля преобразователей феррозондового типа, в частности магнитопроводов, как основополагающих элементов их измерительных структур.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

2.1. Разработка математической модели феррозондового преобразователя

Существующие математические модели ДФЗ представляют собой функциональную связь информационного сигнала с измеряемыми магнитными величинами. Основными аргументами при этом являются параметры магнитной системы ДФЗ. Поэтому для достижения цели диссертации необходима научная разработка методов и средств изготовления и контроля МП из АмС, как основы измерительных структур ДФЗ, вне зависимости от их типа: стержневых; кольцевых; сложной формы.

Постановка задачи: разработать математическую модель связи ЭДС сигнальной обмотки, как основного информативного параметра феррозонда, с уровнем измеряемого H_0 магнитного воздействия и базовыми характеристиками μ_B ; H_S ; B_S материала магнитопровода ФЗ как стержневого, так и замкнутого типов.

В настоящее время решению этой задачи посвящены работы, являющиеся классическими в плане построения теории феррозондовых датчиков. Авторами данных работ являются: Ю.В. Афанасьев, М.А. Розенблат, Л.Я. Мизюк. [6; 39; 68].

Так в работах [39; 68], с использованием графо-аналитического метода исследований МП, выведена формула связи информативного e параметра ДФЗ с измеряемым H_0 :

$$e_{2f} = \frac{4 \cdot w_2 \cdot s \cdot \omega \cdot H_1 \cdot \mu_T}{3 \cdot \pi} \left\{ \left[1 - \left(\frac{H_S - H_0}{H_1} \right)^2 \right]^{3/2} - \left[1 - \left(\frac{H_S + H_0}{H_1} \right)^2 \right]^{3/2} \right\} \cdot \sin 2\omega t, \quad (2.1)$$

где e_{2f} – ЭДС информационного сигнала ДФЗ; $\omega = 2\pi f$, f – частота возбуждающего поля; H_1 – амплитуда возбуждающего поля; $\mu_T = f\{\mu_0; \mu_M; N\}$ – магнитная проницаемость тела, μ_M – магнитная проницаемость материала, N –

обобщенный конструктивный коэффициент; s – поперечное сечение магнитопровода; w_2 – количество витков сигнальной обмотки; H_0 – измеряемое магнитное поле; H_S – напряженность насыщения магнитопровода; t – время.

В работе [5] выведена аналогичная (2.1) зависимость информативного параметра e от измеряемого H_0 :

$$e = 6 \cdot \omega \cdot b \cdot s \cdot w_2 \cdot H_0 \cdot H_1^2 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t), \quad (2.2)$$

где e – выходная ЭДС сигнальной обмотки как совокупность четных гармоник частоты f возбуждения; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; f – частота возбуждающего поля; H_1 – амплитуда возбуждающего поля; b – коэффициент аппроксимации, зависящий от материала и формы магнитопровода; s – поперечное сечение магнитопровода; w_2 – количество витков сигнальной обмотки; H_0 – измеряемое магнитное поле; t – время.

Анализ (2.1), (2.2) позволяет сделать следующие заключения:

Следствие 1: формула (2.1) представляет собой сложную функциональную зависимость e от измеряемого H_0 , что затрудняет определение параметров диаграммы направленности ДФЗ и его основополагающих метрологических характеристик.

Следствие 2: в правой части формулы 2.2 содержатся константа и обобщенный b коэффициент, характеризующие работу стержневых ДФЗ с двумя параллельными сердечниками как по рисунку 1.11,в.

Следствие 3: в правой части формулы 2.2 не содержатся в явном виде аргументы отражающие μ_B , H_S , B_S – базовые характеристики исходного материала МП ДФЗ.

Следствие 4: при заданных характеристиках стержневого ДФЗ формула 2.2, в отличие от 2.1, представляет собой прямую $K = \text{const}$ функциональную зависимость основного e информативного параметра ДФЗ от H_0 измеряемой величины:

$$e = k \cdot H_0, \quad (2.3)$$

где e – выходная ЭДС сигнальной обмотки; k – постоянная феррозонда; H_0 – измеряемое магнитное поле.

В работе [33] дана формула связи $e=f(H_0)$ в виде:

$$e = k \cdot H_0 \cdot \cos \alpha \cdot \sin 2\omega t, \quad (2.4)$$

где e – выходная ЭДС сигнальной обмотки; k – постоянная феррозонда; $\omega=2\cdot\pi\cdot f$; f – частота возбуждающего поля; α – угол между вектором H_0 и осью чувствительности феррозонда; H_0 – измеряемое магнитное поле; t – время.

В (2.4) аргумент $\sin 2\omega t$, подобно (2.1), (2.2), характеризует параметры сигнала возбуждения ДФЗ. В реальных схемах магнитометров, ДФЗ работают на строго фиксированных: частоте $f_{\text{возб}} = \text{const}$ и A амплитуде, что в (2.4) превращает $A \cdot \sin 2\omega t$ при $A=1$ в $\sin 2\omega t$ детерминированную функцию. При заданных ω и A данная функция выражается действующим за период числовым const значением:

$\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T A^2 \cdot \sin^2 \omega \cdot t dt}$, что позволяет включить ее как множитель в состав коэффициента K , подобно (2.3). Тогда формула (2.4) принимает вид:

$$e = k \cdot H_0 \cdot \cos \alpha, \quad (2.5)$$

Аргумент $\cos \alpha$ в (2.5) раскрывает важнейшее свойство феррозондовых датчиков – наличие симметричной двулепестковой диаграммы направленности (рисунок 2.9,а). При $H_0=\text{const}$ по модулю и направлению, эволюции ОЧ ДФЗ вокруг H_0 в диапазоне углов $\alpha=(0\div 360)^\circ$ полностью определяются уровнем и знаком e информационного сигнала.

Однако при метрологическом контроле ДФЗ аргумент $\cos \alpha$ вносит неопределенность функции e , в частности, в случае действия (рисунок 2.9,а) вектора H_0 ортогонально ОЧ: $\alpha=90^\circ$, $\alpha=270^\circ$, то есть – принадлежности H_0 плоскости экваториального сечения ДФЗ [14]. Для исключения неопределенности при метрологическом контроле ДФЗ задают $\alpha=(0^\circ; 180^\circ)=\text{const}$, то есть ориентируют ОЧ по вектору H_0 , что позволяет включить аргумент $\cos \alpha=\text{const}$ в состав коэффициента K и привести (2.4) к форме (2.3).

Следствие 5: по (2.5) для исследуемого ДФЗ при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ равенство $e_{(\alpha=0)}=e_{(\alpha=180)}$ является необходимым условием «идеальной» диаграммы направленности ДФЗ.

Следствия 1-5 определяют общие требования к математической модели ДФЗ:

1. Прямая зависимость информативного параметра ДФЗ от измеряемой величины $e=k \cdot H_0$.

2. Исключение взаимовлияющих аргументов таких как H_1 и H_s в (2.1).

3. Представление обобщенного коэффициента «К – постоянная феррозонда» в виде независимых $K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ сомножителей, характеризующих:

K_1 – коэффициент, определяющийся типом ДФЗ: стержневой; кольцевой; сложной формы.

K_2 – коэффициент, определяющийся геометрическими параметрами ДФЗ.

K_3 – коэффициент, определяющийся электромагнитными параметрами ДФЗ.

Таким образом, согласно следствиям 1-5, требованиям, соответствующим постановке задач диссертации, отвечает математическая модель (2.6), полученная на основе представленного графо-аналитического метода исследования МП ДФЗ:

$$e = K \cdot \mu_0 \cdot \mu_M \cdot H_0 \cdot (\omega \cdot w_2 \cdot S \cdot H_s \cdot \sin 2\omega t), \quad (2.6)$$

где $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ – постоянная феррозонда; $K_1 < 1$ – коэффициент, определяющийся типом ДФЗ; $K_2 < 1$ – коэффициент, определяющийся геометрическими параметрами ДФЗ; $K_3 < 1$ – коэффициент, определяющийся электромагнитными параметрами ДФЗ, уменьшающий угол наклона μ_M до μ_M^* по рисунку 2.1,б. Диапазон изменения $K_3 = \mu_M^* / \mu_M$ составляет $0 \div 1$. Параметры μ_0 , ω , w_2 , S , H_s являются общими для методик представленных в [6; 39; 68].

K_1 является эмпирическим коэффициентом, наиболее полное его значение обосновано и представлено в [5]. K_1 изменяется в диапазоне $0,5 \div 0,87$. Максимальное значение K_1 характеризует ФЗ кольцевого типа.

K_2 является конструктивным коэффициентом и вычисляется для ФЗ при определенных на этапе проектирования геометрических параметрах. Функциональная зависимость K_2 от определяющих аргументов имеет вид $K_2 = f\{d/l; r; d_{np}\}$, где d – внутренний диаметр обмотки, l – длина обмотки, r – расстояние между полуэлементами ДФЗ, d_{np} – диаметр провода обмоток [5].

Основными аргументами определяющими значение K_3 являются параметры магнитопровода ФЗ $\mu_M; i_{возб} (H_S); B_S$. Согласно графо-аналитическому методу приведенному в п. 2.2 диссертации, K_3 вычисляется как отношение магнитной проницаемости сертифицированного магнитного материала МП к магнитной проницаемости сердечника, параметры которого определяются по методике метрологических исследований (Глава 2 п.2.5).

По разработанной (п 2.5.) методике метрологических исследований ДФЗ было определено влияние параметров электромагнитной системы на уровень информационного сигнала. Тем самым была осуществлена проверка адекватности математической модели (2.6) ДФЗ по аргументам: μ^* ; S (таблицы 2.1, 2.2.).

По таблицам 2.1, 2.2 на рисунке 2.1 (а) для (2.6) определен характер зависимости информационного сигнала U_{2f} от площади S сечения группы сердечников с идентичным μ_M . График согласуется с теоретическими результатами 2.9 – 2.19, полученными в п.2.3 диссертации.

По рисунку 2.1(б) определено соотношение $\mu_1^* > \mu_2^*$ для МП ДФЗ с одинаковыми геометрическими параметрами. Данное неравенство определяет закономерное различие уровней $i_{возб} (H_{возб})$ для получения равных по уровню информационных сигналов U_{2f} аттестационного ДФЗ (п.2.5). Таким образом, результаты измерений, проведенных по разработанной методике (Глава 2 п. 2.5) подтверждают адекватность математической модели (2.6).

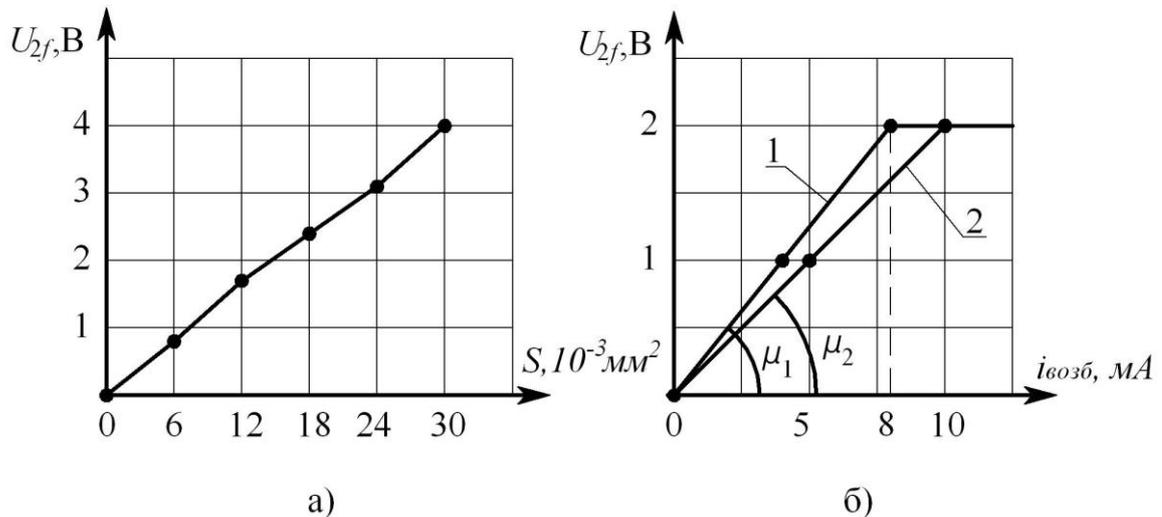


Рисунок 2.1 – Результаты измерений для исследования адекватности математической модели по аргументам $S; \mu^*$

Таблица 2.1 $H_s = const; l = const; H_0 = const$

$S, \text{мм}^2$	0,03	0,024	0,018	0,012	0,006
$U_{2f}, \text{В}$	4	3,1	2,4	1,7	0,8

Таблица 2.2 $S = const; l = const; H_0 = const$

Сплав	82К3ХСР			86КГСР		
$i_{\text{возб}}, \text{мА}$	0	5	10	0	4	9
$U_{2f}, \text{В}$	0	1,0	2,0	0	1,0	2,0

2.2. Графо-аналитический метод исследования магнитопроводов феррозондовых преобразователей

Феррозондовые датчики относятся к классу магнитомодуляционных преобразователей, принцип действия которых в основном определяется свойствами их магнитных систем [39; 68]. Магнитопроводы (МП) феррозондов подразделяются на стержневые, кольцевые, сложной формы. Вне зависимости от типа МП, основополагающими магнитными параметрами, определяющими функциональные и метрологические характеристики ФЗ являются: высокая магнитная проницаемость исходного материала $\mu_M \leq 10^5$; малый уровень поля перемагничивания $H_s \leq 5 \text{ А/м}$; малый уровень коэрцитивной силы $H_c \leq 0,2 \text{ А/м}$; большое значение индукции насыщения $B_s \leq 1,5 \text{ Тл}$; высокая частота перемагничивания $f \leq 1 \text{ МГц}$ [6]. Данным техническим требованиям в полной мере удовлетворяют сердечники, изготавливаемые в настоящее время из ферромагнитных аморфных сплавов [18].

Эксплуатационные характеристики сердечников ФЗ зависят не только от параметров исходного материала, но определяются также геометрическими размерами МП. Из многообразия размеров и форм магнитопроводов следует необходимость разработки общей методики анализа их магнитных характеристик для последующего расчета электромагнитных систем ФЗ. Основу разрабатываемой в данной диссертации математической модели составляет графо-аналитический метод, традиционно применяемый [6; 39; 68] для исследования и интерпретации свойств ферромагнитных сердечников, исходя из

числовых данных и форм петель гистерезиса (ПГ), полученных при симметричном двуполярном перемагничивании МП.

Целью применения в диссертации графо-аналитического метода было математически обоснованное отображение параметрами формы информационного сигнала ДФЗ уровня измеряемого магнитного воздействия H_0 . На рисунке 2.2 (а) получен информационный сигнал ДФЗ в виде e_1+e_2 совокупности ЭДС его полуэлементов. Параметры МП заданы параметрами его петли гистерезиса: $\mu_{мп}$; H_s ; B_s . Для реализации методики был применен пакет *Matlab*. В данном пакете для решения поставленной задачи был разработан следующий алгоритм:

1. Вводится математическое выражение выбранной аппроксимационной петли гистерезиса материала магнитопровода ДФЗ.

2. Согласно п.1 программа графически отображает форму петли гистерезиса - основного элемента преобразования магнитных воздействий на ДФЗ.

3. Вводятся параметры поля возбуждения $H_{возб}$. Согласно рисунку 2.2, ДФЗ возбуждается в классическом, для продольного возбуждения, режиме $H_{возб} \geq 3H_s$ [5], что приводит к двуполярному перемагничиванию сердечника на всех трех - магниточувствительном и насыщения участках кривой $B(H)$.

4. Вводится величина измеряемого поля H_0 .

5. Программа посредством петли гистерезиса отображает введенные параметры в виде изменения формы графиков индукции B_1 , B_2 в каждом из полуэлементов ДФЗ.

6. Программа преобразует изменения по п. 5 в суммарный сигнал полуэлементов ДФЗ (e_1+e_2).

Разработанный алгоритм позволяет графо-аналитическим методом оценивать адекватность разработанной математической модели ДФЗ, как результат сравнения форм (e_1+e_2) полученных теоретически с формами ЭДС полученных экспериментально.

По рисунку 2.2(а) выявлено несоответствие теоретической формы сигнала (e_1+e_2) ДФЗ экспериментальной (рисунок 2.3,б), полученного с МП из АмС. Это

нашло объяснение в различии параметров аппроксимационной «широкой» петли гистерезиса (ПГ) и параметров μ ; H_s ; B_s материала АмС.

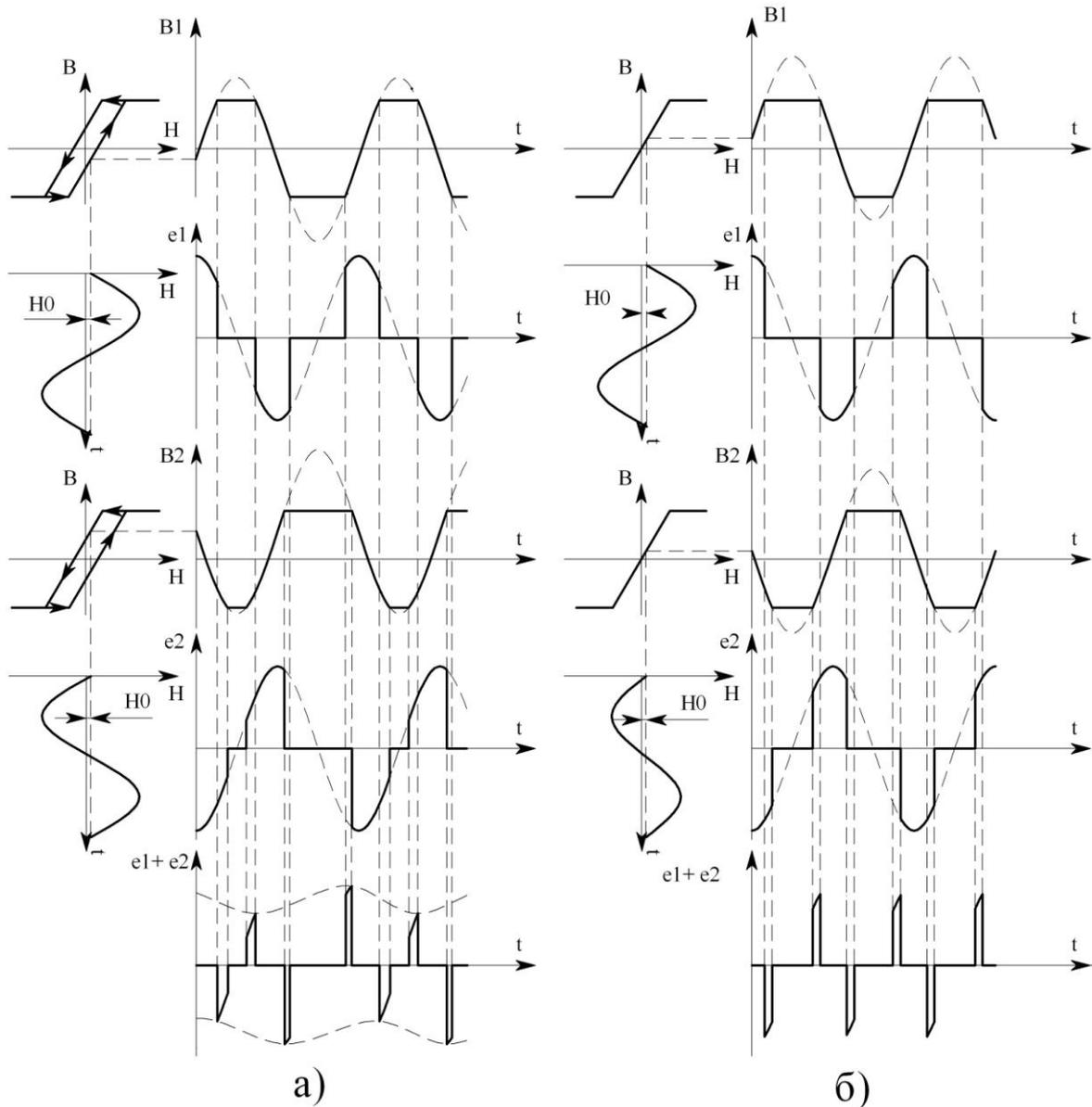


Рисунок 2.2 – Графо-аналитический метод определения параметров информационного сигнала ДФЗ

С целью устранения выявленного несоответствия, «широкая» ПГ по рисунку 2.2 (а) была заменена кривой перемангничивания (КП). В [6] приведена совокупность формул аппроксимации КП, наиболее полно отражающих особенности магнитных свойств МП.

На рисунке 2.3 представлена нелинейная КП, применяемая как универсальная – отражающая общие свойства МП, согласно формуле:

$$B = \alpha \cdot \text{arctg}(\beta H), \quad (2.7)$$

где $\alpha = \frac{2}{\pi} \cdot B_s$; $\beta = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{H_s}$; $\pm H_s$ – внешнее поле перемангничивания МП; B_s –

индукция насыщения МП.

С применением рассматриваемого графоаналитического метода формула (2.7) и рисунок 2.2 (а) позволяют построить в пакете *Matlab* на рисунке 2.3 (в) теоретическую форму информационного сигнала ДФЗ [13].

Методика позволяет выявить несоответствия формы аппроксимационной кривой (рисунок 2.3,а) числовым характеристикам аморфных сплавов, в частности: отсутствие участков насыщения $\Delta B/\Delta H = \mu_d = 0$, где μ_d – дифференциальная магнитная проницаемость материала МП; сложность численного определения основополагающих для ФЗ параметров $+H_s$; $-H_s$. Данные несоответствия приводят к некоторым отклонениям построенной на рисунке 2.3 (в) графической формы информационного e сигнала от осциллограммы реального ДФЗ по рисунку 2.3 (б), что является признаком различий их спектрального состава. Кроме того, нелинейность КП, с необходимостью использования $\mu_d = \text{var}$ – дифференциальной магнитной проницаемости, затрудняет решение задач по определению влияния параметров МП на функциональные характеристики ФЗ.

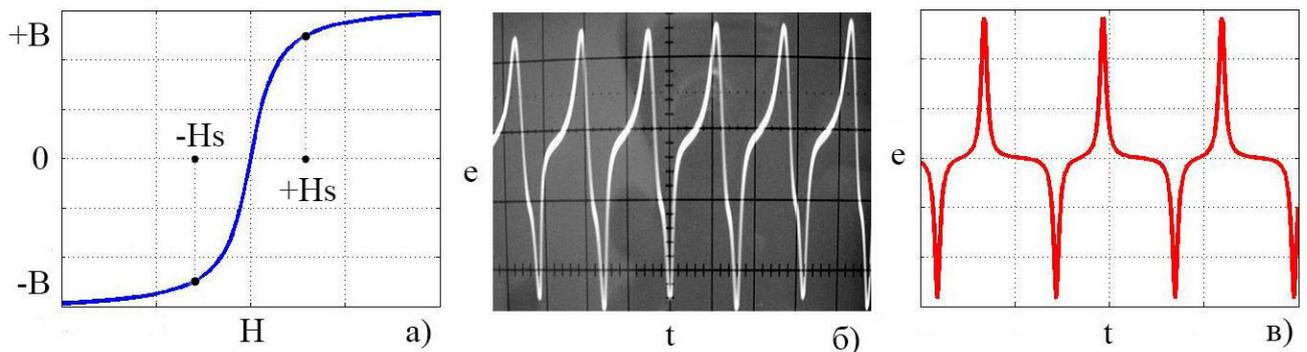


Рисунок 2.3 – Экспериментальная (б) и теоретическая (в) формы дифференциальных ФЗ при нелинейной (а) аппроксимации КП

На рисунках 2.2 (б), 2.4 (а) представлена форма КП, полученная методом кусочно-линейной аппроксимации, определяемая аналитически как:

$$\begin{cases} B = \mu_M \cdot H |_{H \leq H_S} \\ |B| = B_S |_{H \geq H_S} \end{cases}, \quad (2.8)$$

где $\mu_M = const$ – магнитная проницаемость материала МП.

Данная форма КП, в отличие от нелинейной по рисунку 2.3 (а) позволяет в диапазоне перемагничивания $(+H_S) \div (-H_S)$, с учетом $\mu_M = const$, однозначно определять для МП, с заданными числовыми параметрами исходного материала μ_M ; H_S ; B_S , зависимости эксплуатационных характеристик ФЗ от типа и размеров МП. Так например, по рисунку 2.1 (а) уменьшение площади сечения МП, при прочих неизменных электромагнитных параметрах ФЗ, приводит к уменьшению B_S исходного магнитного материала МП до уровня B_S^* (Таблица 2.1). Эта тенденция однозначно интерпретируется как изменение угла $\mu_M^* < \mu_M$ в диапазоне перемагничивания $(+H_S) \div (-H_S)$.

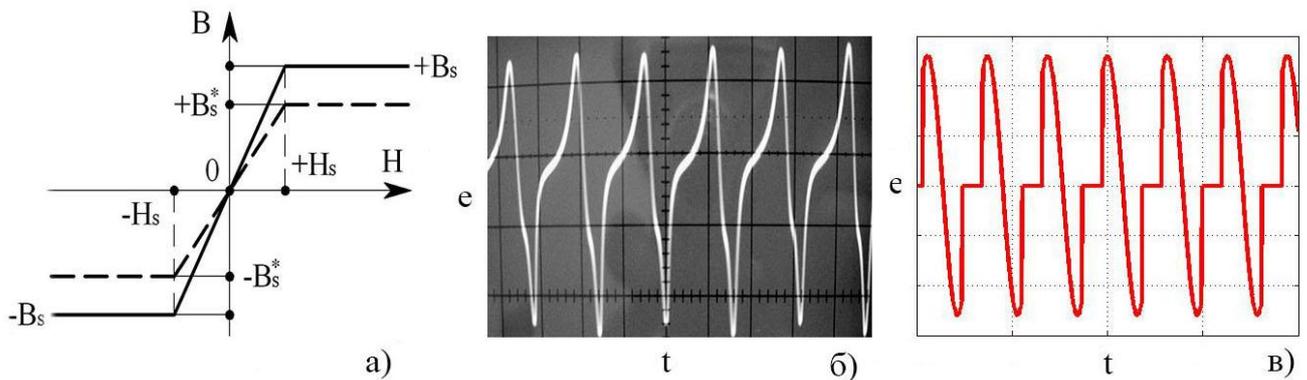


Рисунок 2.4 – Формы ЭДС ДФЗ при кусочно-линейной аппроксимации КП; а) $\pm B_S$ при $\mu = \mu_M$; $\pm B_S^*$ при $\mu = \mu_M^*$; б) осциллограмма ЭДС ДФЗ; в) теоретическая форма ЭДС ДФЗ при аппроксимации КП по а)

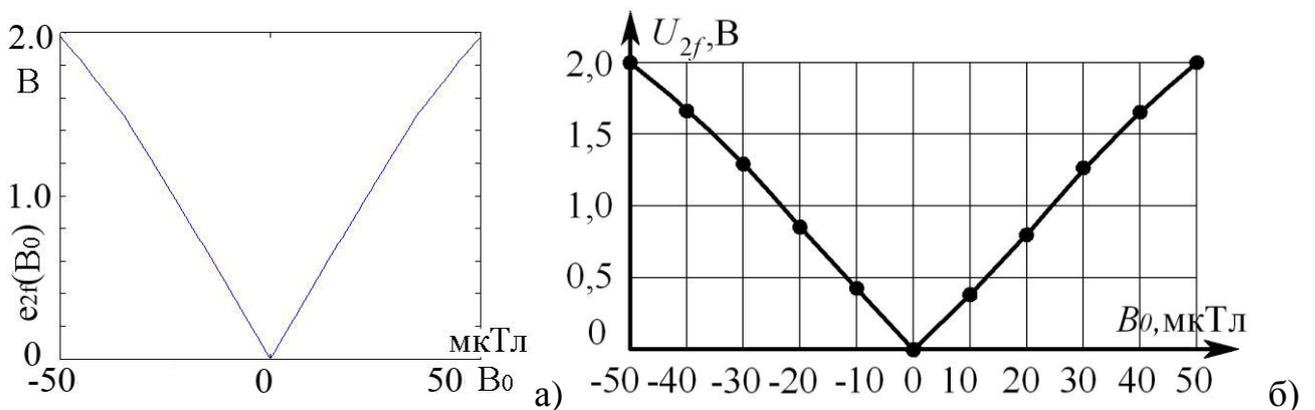


Рисунок 2.5 – График зависимости $e_{ДФЗ} = f(B_0)$ при $f_{возб} = 100$ кГц;

а) теоретический; б) экспериментальный

Адекватность полученной математической модели (2.6) при аппроксимации КП МП по рисунку 2.4(а) подтверждается построением в пакете Matlab графиков зависимости $e=f(H_0)$ при вводе различных данных МП; $H_{\text{возб}}$; H_0 (рисунок 2.5).

График по рисунку 2.5, в частности свидетельствует о линейности преобразования, по полученной математической модели 2.6, уровня измеряемого поля H_0 , в уровень информационного сигнала ДФЗ, что соответствует требованиям п.2.1., а также форме диаграммы направленности ДФЗ (рисунок 2.9).

Результаты исследований в п.п.2.1-2.2. определяют следующие заключения:

1. Проведенный в 2.1, 2.2. анализ показал, что методики определения и формулы зависимости $e=f(H_0)$ разнообразны и не содержат прямой функциональной связи ЭДС ФЗ с H_0 параметрами μ_M ; H_S ; B_S материала МП.

2. Согласно разработанной в диссертации методике, обобщение согласно рисунку 2.3 (а) зависимостей μ_M^* от μ_M исходного магнитного материала, типа и размеров МП, позволяет создать математическую модель (2.6) функциональной связи информативного e параметра ФЗ с определяющими характеристиками его измерительной структуры.

3. На основе графо-аналитического метода исследования МП ДФЗ разработана математическая модель связи эдс e , как информативного параметра феррозонда, с уровнем измеряемого H_0 магнитного воздействия и базовыми характеристиками μ_B ; H_S ; B_S материала магнитопровода ФЗ.

4. Представленная методика дает возможность определения метрологических и эксплуатационных характеристик ФЗ при вариациях: формы, размеров и свойств магнитопроводов, как независимых параметров.

5. Метод кусочно-линейной аппроксимации КП МП обеспечивает достаточную степень сходимости теоретических и экспериментальных результатов анализа информативных параметров ФЗ, при значительном упрощении математической модели и графической интерпретации функциональных связей определяющих факторов.

2.3. Теоретические основы метрологического контроля и идентификации тонкопленочных сердечников феррозондовых преобразователей

ФЗ-датчики, как наиболее эффективные средства прецизионных измерений магнитных величин характеризуются: высокими чувствительностью и быстродействием, малыми габаритами и энергоемкостью, острой диаграммой направленности. Данная совокупность характеристик ФЗ позволяет получать малые погрешности измерений вне зависимости от характера контролируемого магнитного воздействия: скалярного, векторного или тензорного.

Дифференциальный стержневой феррозонд (ДСФ) классического исполнения имеет конструкцию с параллельными полуэлементами (рисунок 2.4,а). Недостатком данной конструкции является необходимость строгой идентификации параметров двух магниточувствительных сердечников. В конструкции по рисунку 2.6 (б) полуэлементы ДСФ расположены соосно, что способствует совмещению его геометрической оси с физической осью чувствительности (ОЧ) датчика. При этом магнитопровод может состоять из двух идентичных стержней или быть общим для полуэлементов ДСФ.

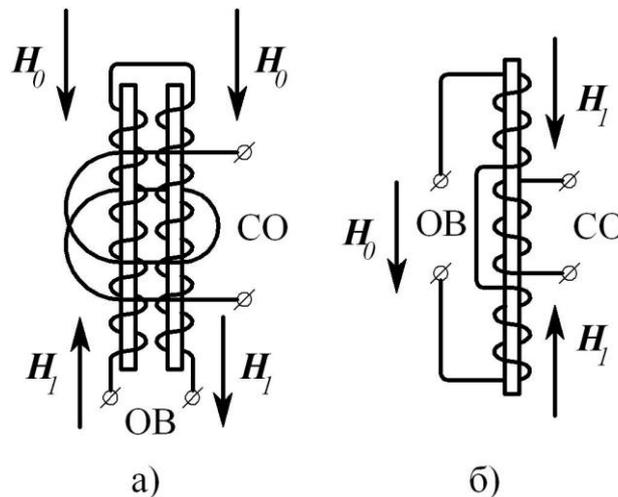


Рисунок 2.6 – Функциональные схемы ДСФ.

ОВ – обмотка возбуждения ФЗ; СО – сигнальная обмотка ФЗ; H_0 – измеряемое магнитное воздействие; H_1 – поле возбуждения

Задача идентификации параметров магниточувствительных сердечников усложняется тем, что распространяется как на геометрические, так и на физические характеристики магнитопроводов. В настоящее время в качестве материалов магнитопроводов ДСФ применяются аморфные сплавы, обеспечивающие заданные метрологические и эксплуатационные характеристики датчиков. Аморфные сплавы производятся в виде лент со строго нормированной толщиной 32 ± 6 мкм и шириной $5 \div 60$ мм. При этом технологически обеспечивается идентичность магнитных свойств аморфного сплава по всей длине и ширине ленты. Ширина изготавливаемых из лент магниточувствительных сердечников $0,2 \div 2,5$ мм является для феррозондов расчетной величиной, так как определяет их параметры возбуждения, чувствительность и диаграмму направленности. Соотношение ширины и толщины сердечника представляет его как тонкопленочную структуру, поэтому ФЗ с такими сердечниками относятся к магнитометрическим датчикам с плоскими магнитными пленками (ПМП) [49; 50].

Следовательно, с учетом однородности исходного магнитного материала по ширине и длине ленты, стержневой ПМП сердечник, для идентификации его параметров, можно представить в виде плоской фигуры с определенными размерами a, b, l , как по рисунку 2.7.

График по рисунку 2.7 (а) отражает приведенную в [5; 68] математическую модель распределения по длине l магнитных параметров B ; Φ в равномерном $a=b$ стержневом сердечнике, помещенном в однородное магнитное поле H :

$$B_x = B_y \cdot \left(1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2} \right), \quad (2.9)$$

где B_x – значение магнитной индукции в сечении, расположенном на расстоянии x от центра $x=0$; B_y – значение магнитной индукции в центральном сечении; C – постоянный коэффициент, зависящий от формы сердечника.

С учетом площади поперечного сечения сердечника $S(x)$, из (2.9) следует:

$$\Phi_x = B_y \cdot \left(1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2} \right) \cdot S(x), \quad (2.10)$$

где Φ_x – магнитный поток через $S(x)$.

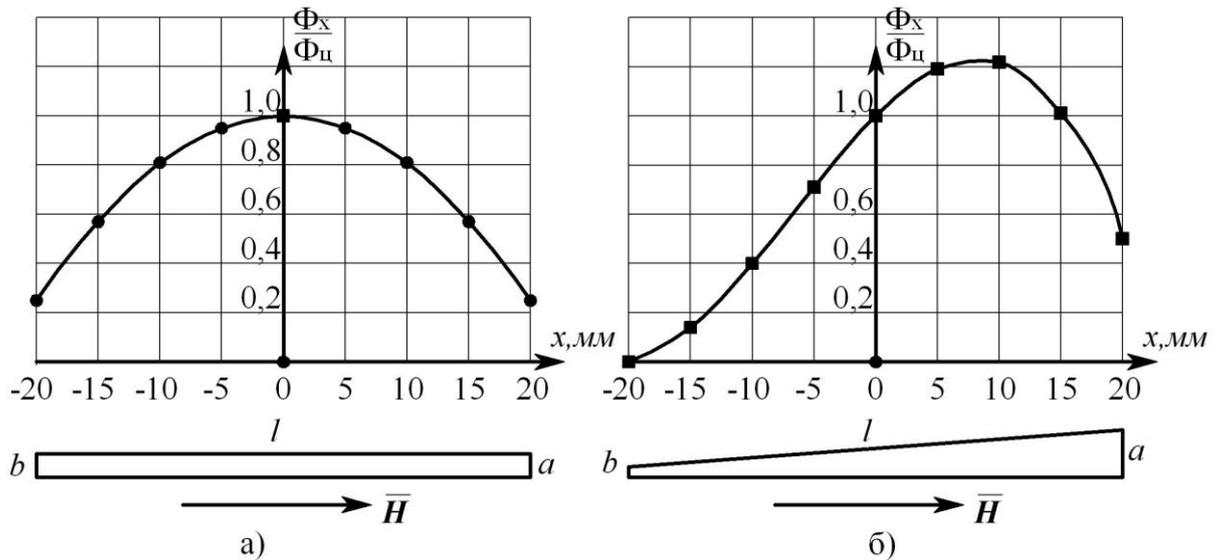


Рисунок 2.7 – Распределение магнитных параметров по длине сердечника.

а) график при $a=b$; б) график при $a > b$; a, b – ширина сердечника на противоположных его краях; l – длина сердечника; Φ_0 – магнитный поток в центральном $x=0$ сечении сердечника; H – однородное магнитное поле

Для сердечника прямоугольной $a=b$ формы $S(x)$ равна площади центрального $x = 0$ сечения сердечника S_0 : $S(x) = S_0$. Тогда при $x=0$; $\Phi_x = const$:

$$\frac{\Phi_x}{\Phi_0} = 1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2}, \quad (2.11)$$

Для сердечника трапецеидальной формы $a \neq b$ площадь поперечного сечения зависит от координаты x :

$$S(x) = \left[\frac{(a-b) \cdot x}{l} - \frac{a+b}{2} \right] \cdot \delta, \quad (2.12)$$

где δ – толщина ПМП сердечника; $a > b$ соотношение размеров сердечника, согласно рисунку 2.7, б.

С учетом формул (2.10) и (2.12):

$$\frac{\Phi_x}{\Phi_0} = \frac{1}{S_0} \cdot \left(1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2} \right) \cdot \left[\frac{(a-b) \cdot x}{l} - \frac{a+b}{2} \right] \cdot \delta, \quad (2.13)$$

В общем случае $a \neq b$ и S_0 в (2.13) определяется:

$$S_0 = \frac{a+b}{2} \cdot \delta. \quad (2.14)$$

Подставляя (2.14) в (2.13) получаем:

$$\frac{\Phi_x}{\Phi_y} = \frac{2}{a+b} \cdot \left(1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2}\right) \cdot \left[\frac{(a-b) \cdot x}{l} - \frac{a+b}{2}\right]. \quad (2.15)$$

Характер распределения магнитных параметров, согласно формулам (2.11), (2.15) представлен на рисунке 2.7.

Полученные в (2.10) – (2.15) функциональные зависимости позволяют определить магнитные параметры полуэлементов $\left[-\frac{l}{2}; 0\right]$ и $\left[0; \frac{l}{2}\right]$ сердечника ДСФ. Средний магнитный поток Φ_{cp} трапецеидального ПМП сердечника определяется:

$$\Phi_{cp} = \frac{1}{l} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} B_y \cdot \delta \cdot \left(1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2}\right) \cdot \left[\frac{(a-b) \cdot x}{l} - \frac{a+b}{2}\right] \cdot dx, \quad (2.16)$$

где $\left(-\frac{l}{2}\right)$ соответствует $x = -20$ мм; $\left(\frac{l}{2}\right)$ соответствует $x = 20$ мм.

Из (2.16) определяются средние магнитные потоки полуэлементов Φ_{cp1} и Φ_{cp2} :

$$\Phi_{cp} = \frac{2}{l} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^0 B_y \cdot \delta \cdot \left(1 - C \cdot \frac{4 \cdot x^2}{l^2}\right) \cdot \left[\frac{(a-b) \cdot x}{l} - \frac{a+b}{2}\right] \cdot dx; \quad (2.17)$$

$$\Phi_{cp1} = \frac{B_y \cdot \delta}{2} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{3} \cdot C\right) \cdot (a+b) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \cdot C\right) \cdot (b-a)\right]; \quad (2.18)$$

$$\Phi_{cp2} = \frac{B_y \cdot \delta}{2} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{3} \cdot C\right) \cdot (a+b) - \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \cdot C\right) \cdot (b-a)\right]. \quad (2.19)$$

Из формул (2.18) и (2.19) следует, что равенство магнитных потоков $\Phi_{cp1} = \Phi_{cp2}$, обеспечивающее баланс дифференциального ФЗ, выполняется в ДСФ с сердечниками прямоугольной формы $a=b$ (рисунок 2.7).

Методика проведения и результаты экспериментальных исследований по определению адекватности математических моделей 2.15 – 2.19 приведены в главе 3.

С целью определения адекватности математических моделей (2.15), (2.18), (2.19) полученных для ПМП трапецеидальной формы, были проведены экспериментальные исследования распределения магнитных параметров по длине

$l=40$ мм тонкопленочных $\delta=30$ мкм сердечников с заданными $a=2$ мм, $b=0,1$ мм. Исследования проводились двумя независимыми методами: феррозондовым и измерения индуктивности.

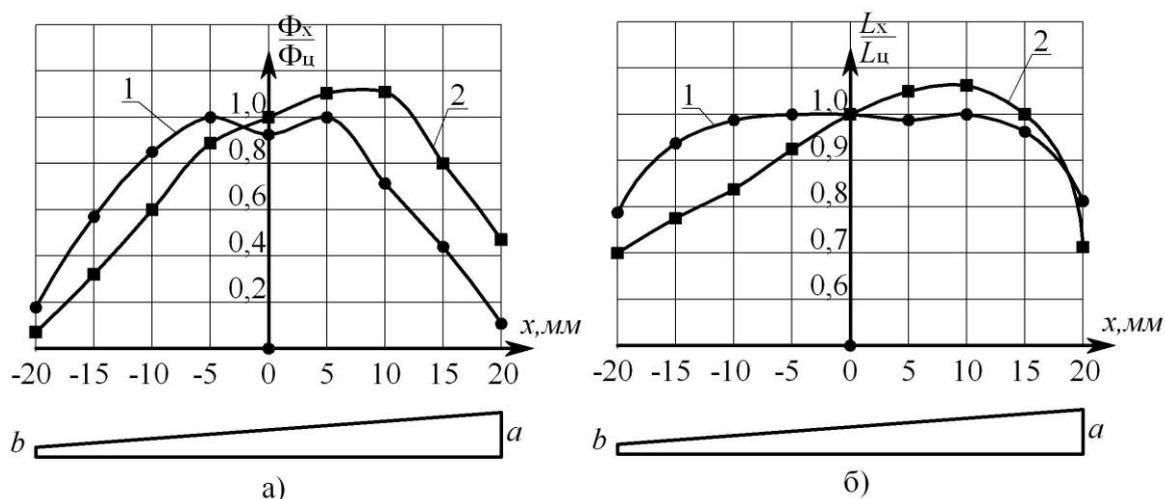


Рисунок 2.8 – Результаты измерений магнитных параметров сердечников.

а) феррозондовый метод; б) метод измерения индуктивности.

1 – график при $a=b$; 2 – график при $a>b$

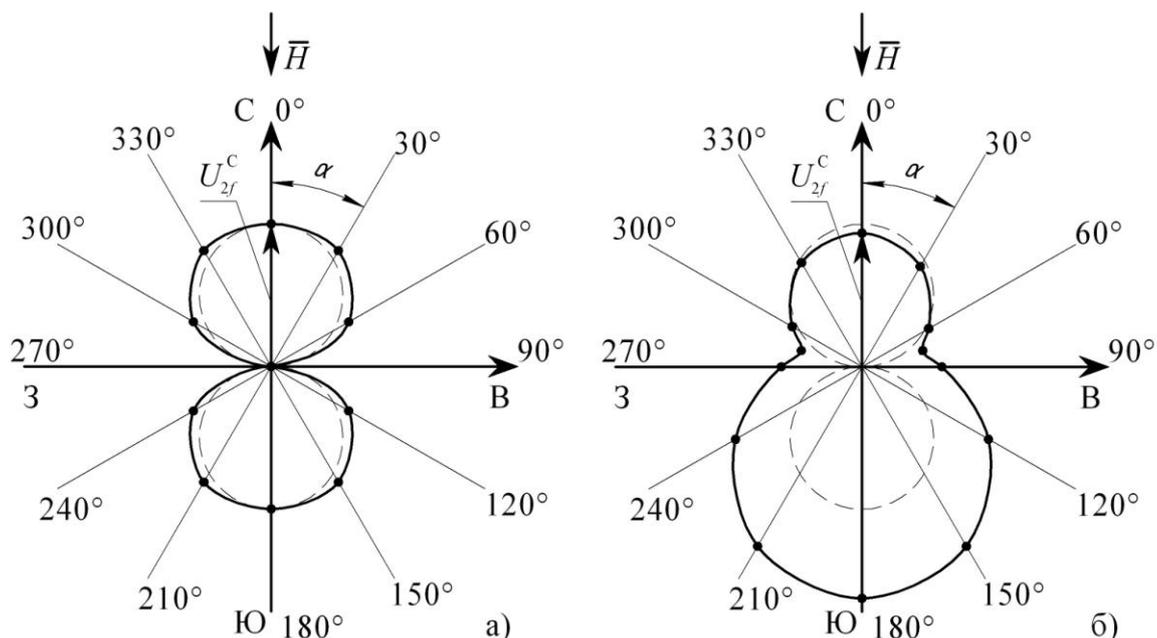


Рисунок 2.9 – Диаграммы направленности ДСФ с трапецидальным сердечником.

$C, Ю, З, В$ – географические координаты; \mathbf{H} – вектор магнитного поля Земли; U_{2f} – информационный сигнал ФЗ; U_{2f}^c – U_{2f} при $ОЧ\ ФЗ \parallel \mathbf{H}$; α – угол между $ОЧ\ ФЗ$ и \mathbf{H} ; а) диаграмма при $a=b$ по рисунку 2.8, а – основная линия; диаграмма «идеального» ДСФ – пунктир; б) диаграмма при $a>b$ по рисунку 2.6, б – основная линия; диаграмма «идеального» ДСФ – пунктир

Графики (рисунок 2.8) свидетельствуют о сходимости результатов независимых измерений, что подтверждает их достоверность, а также соответствие данных эксперимента – теоретическим.

Заключительный этап экспериментальных исследований (рисунок 2.9) был проведен по классической методике [5] – для определения влияния неравномерности $a > b$ сердечника по его длине l на диаграмму направленности одностержневого ДСФ конструкции по рисунку 2.6 (б) в однородном магнитном поле Земли H .

Результаты исследований в п.2.3 определяют следующие заключения:

1. С учетом однородности исходного материала, для идентификации магнитных параметров стержневых ПМП сердечников справедливо представлять их в виде плоской трапецеидальной фигуры (рисунок 2.7) с определенными a, b, l – параметрами.

2. Распределение магнитных свойств по l – длине трапецеидального стержневого сердечника относительно его центра адекватно представляется математической моделью, содержащей геометрические параметры полуэлементов

$$\left[-\frac{l}{2}; 0 \right], \left[0; \frac{l}{2} \right].$$

3. При использовании ПМП сердечников трапецеидальной a, b, l – формы (рисунок 2.7), условием баланса одностержневого ДСФ (рисунок 2.6,б), обеспечивающего в частности, близкую к «идеальной» диаграмму направленности (рисунок 2.9,а) является равенство сторон трапеции $a = b$.

2.4. Способ изготовления магнитопроводов для феррозондовых преобразователей из тонкопленочных аморфных сплавов

Основу феррозондовых датчиков составляют сердечники из магнитомягких материалов, помещаемые внутрь обмоток: сигнальной и возбуждения. В настоящее время традиционно применяемые в качестве материалов сердечников пермаллои вытесняются аморфными сплавами [2], обеспечивающими лучшие метрологические и эксплуатационные характеристики феррозондов. Аморфные сплавы производятся в виде лент толщиной 32 ± 6 мкм и шириной $5 \div 60$ мм. Ширина изготавливаемых ПМП магниточувствительных сердечников $0,2 \div 2,5$ мм является расчетной величиной, так как определяет параметры возбуждения и чувствительность ФЗ.

Постановка задачи: разработать для малогабаритных ДФЗ технологию изготовления ПМП сердечников из АмС, не нарушающую магнитные свойства исходного материала.

При изготовлении ФЗ с ПМП, в частности дифференциального типа, существует проблема точности обеспечения заданной ширины сердечника и её равномерности на длине до 60 мм. Решение проблемы осложняется тем, что сплавы ПМП характеризуются высокой степенью прочности и твердости порядка 10 ГПа.

Известны следующие 5 способов изготовления сердечников из аморфных ПМП: штамповка; механическая резка; лазерная резка; травление; гидроабразивная резка.

Первые два способа оказывают непосредственное влияние на ферромагнитные свойства ПМП. Кроме того, данные методы дают большую шероховатость кромки сердечника по его длине: $17 \div 40$ мкм. Это приводит к ухудшению метрологических характеристик ФЗ, а также к разбросу параметров сердечников, что затрудняет их идентификацию в пределах выпускаемой партии. Недостатком механических методов обработки является также образование заусенцев на кромке ПМП, что требует дополнительных технологических операций по их удалению.

Лазерная резка лент из АмС обеспечивает наименьшую шероховатость кромки сердечника, порядка 15 мкм. Однако, вследствие температурного воздействия на ПМП в процессе резки образуется бордюр [110], магнитные свойства которого отличаются от свойств ленты из АмС. Кроме того, для изготовленных сердечников требуется дополнительная технологическая операция – отжиг при температуре 450 °С [26]. Приведенные недостатки определяют метод лазерной резки как неприемлемый для изготовления МП из АмС.

При химическом травлении лент из АмС, по кромке образуется бордюр из материала не обладающего магнитными свойствами заготовки, который представляет собой сложное химическое соединение окислов компонентов АмС.

Метод гидроабразивной резки обеспечивает температурную стабильность (60-90 °С) режима обработки АмС. Метод разработан как альтернативный неприемлемым для изготовления МП из АмС: лазерному, механической резке, штамповке.

Недостатки метода: низкие равномерность и чистота обработки кромки АмС; механическое воздействие на тонкую пленку АмС при изготовлении МП. Затруднительно выполнение МП сложных криволинейных форм.

Следовательно, представленные методы обработки АмС не обеспечивают требуемого качества изготовления МП, в особенности для ДФЗ малых габаритов.

Известен метод электроэрозионной обработки материалов, основу которого составляет искровой разряд, направленное воздействие которого на обрабатываемый образец сосредоточено в объемах, соизмеримых с его микроструктурой [41].

Решение задачи диссертационных исследований заключалось в разработке технологии изготовления магниточувствительных ПМП-сердечников для феррозондовых датчиков методом электроэрозионной резки с сохранением сертифицированных магнитных свойств аморфных сплавов ПМП.

Электроэрозионная обработка основана на выбивании частиц материала заготовки с её поверхности энергией направленного искрового разряда [41]. Режимы обработки задаются уровнем электрического напряжения и расстоянием

между электродами, а также свойствами жидкого диэлектрика, в который данные электроды погружены. При сближении электродов, одним из которых является обрабатываемая заготовка, происходит пробой диэлектрика – возникает искровой разряд, канал которого является направляющим и сосредоточивающим электроэнергию источника питания. Длительность процесса выбивания частиц заготовки с её поверхности не превышает 0,01с, поэтому выделяющееся тепло не успевает проникнуть вглубь материала. Кроме того, нагреванию заготовки выше температуры окружающей среды препятствует достаточно большой объем жидкого диэлектрика.

Таким образом, метод электроэрозионной обработки обеспечивает высокое качество обрабатываемых поверхностей токопроводящих твердых образцов и сложных изделий при отсутствии механических и температурных воздействий на материал заготовки.

Для решения поставленной задачи был разработан способ изготовления ПМП сердечников из АмС методом электроэрозионной резки [15] (таблица 2.3). Исследования результатов применения разработанной технологии представлены в главе 3.

Результаты исследований в п.2.4 определяют следующие заключения:

1. Разработанный способ изготовления исключает механическое воздействие инструмента на изготавливаемый МП.
2. Разработанный способ изготовления исключает температурное воздействие на изготавливаемый МП.
3. Разработанная технология исключает модификацию состава и структуры исходного магнитного материала, в частности – образование расплава.
4. Обеспечивается требуемая точность и чистота обработки поверхностей изготавливаемого МП.
5. Обеспечивается возможность изготовления МП разнообразных форм, в частности – замкнутого типа.

Таблица 2.3. Технология изготовления магнитопроводов ДФЗ из АмС

А 01	Подготовка исходного материала	
Б 02	Оборудование предварительной формовки	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ1
О 03	Отрезать заготовку длиной $l = 70 \pm$ мм, шириной $10 \pm$ мм.	
Т 04	Гильотина	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ2
А 05	Сортировка заготовок	
Б 06	Специальная электропроводящая струбцина	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ3
О 07	Зажать штабель из 20 заготовок	
Т 08	Специальная электропроводящая струбцина	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ3
А 09	Подготовка электроэрозионного станка	
Б 10	Электроэрозионный проволочно-вырезной станок А207.86 –М2	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ4
О 12	1. Установить режущий электрод (струна) $d=0.25$ мм	
13	2. Механически и электрически соединить струбцину с электроэрозионным станком	
14		АБВГ.ХХХХХХ.ХХ5
15	3. Залить в ванну жидкий диэлектрик (воду)	
16	4. Запрограммировать электроэрозионный станок по заданным параметрам сердечника: $axb = S$	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ6
17		
18	5. Установить силу тока режущего электрода	
19	6. Установить скорость движения режущего электрода	
20	7. Запустить программу	
21	8. Конец программы	
22	9. Изъять из ванны с жидким диэлектриком 20 сердечников	АБВГ.ХХХХХХ.ХХ6

2.5. Методика контроля и идентификации параметров

магнитопроводов из тонкопленочных аморфных сплавов

С целью технического использования теоретических научных положений диссертации разработана методика контроля сердечников из аморфных сплавов для ДФЗ, не нарушающая магнитные свойства исходного материала.

Настоящая методика разработана на основе ГОСТ 29004-91, ГОСТ 28997-91 предназначенных для изготовления и сертификации магнитных сердечников применяемых в трансформаторах и катушках индуктивности. В настоящих стандартах приводится перечень методик, используемых при сертификации сердечников для катушек индуктивности и трансформаторов, применяемых в электронной аппаратуре, а также для испытаний и методов измерений, которые могут быть выбраны для составления групповых ТУ на эти изделия.

1. Исходным материалом для изготовления магнитопроводов феррозондовых преобразователей является быстрозакаленная лента из магнитомягких аморфных сплавов (ТУ 14-123-149-2009).

Лента исходного материала имеет следующие характеристики: толщина - 32 ± 6 мкм, ширина $5 \div 60$ мм.

Лента исходного материала выпускается предприятием-изготовителем смотанная в рулоны на пластмассовых кольцах с внутренним диаметром 28 ± 1 мм. Каждая партия ленты сопровождается сертификатом качества.

2. Лента исходного материала разрезается механическим способом на гильотине на заготовки длиной 70 ± 1 мм, и шириной 10 ± 1 мм.

3. На основе визуального контроля производится сортировка по группам из 20 заготовок соответствующих размеров и качества.

4. Группа из 20 отсортированных заготовок зажимается в специальной электропроводящей струбцине.

5. Изготовление магнитопроводов выполняется с помощью электроэрозионного проволочно-вырезного станка А207.86-М2.

6. Производят установку режущего электрода – струны требуемого типа (латунная, молибденовая, медная) и диаметра (от 0,025 до 0,3 мм).

7. Механически и электрически соединяют струбцину с электроэрозионным станком.

8. Заливают в ванну жидкий диэлектрик (воду).

9. Выполняют программирование электроэрозионного станка в соответствии с требуемыми параметрами:

- габаритные размеры магнитопровода (длина, ширина);

- скорость движения режущего инструмента.

10. По заданной программе выполняют операцию резки магнитопроводов.

11. Производят изъятие из ванны с жидким диэлектриком 20 магнитопроводов.

12. Качество обработки кромки на наличие заусенцев, трещин и других дефектов проверяют с использованием оптического микроскопа.

13. Контроль качества с целью сертификации производится на сердечниках одинакового наименования, типоразмера и материала.

14. При контроле качества с целью сертификации определяют характеристики сердечников с помощью испытательных стендов:

а) стенд определения характеристик сердечника методом измерения индуктивности;

б) стенд для определения характеристик сердечника феррозондовым методом по информативному параметру U_{2f} (рисунок 2.10,а);

в) стенд для определения характеристик сердечника феррозондовым методом по спектральному составу выходного сигнала СО ДФЗ (рисунок 2.10,б).

15. При измерении индуктивности или другого параметра сердечника, связанного с индуктивностью, следует принять во внимание меры предосторожности, изложенные в разделе 4 ГОСТ 29004-91.

16. При измерении индуктивности применяют измерительную катушку, обеспечивающую необходимое взаимодействие между магнитным материалом и её витками. При измерении параметров (L, μ) сердечника, форма измерительной катушки должна соответствовать форме катушек, обычно используемых с данным сердечником (форма соленоида), и влияние её формы на величину измеряемой индуктивности должно быть незначительным. Катушка должна иметь метку, для определения её положения. Следует сохранять заданное положение катушки до конца измерений для обеспечения максимальной повторяемости результатов.

17. С помощью микроскопа производят контроль геометрических параметров сердечников $a=b$.

18. Измерение индуктивности выполняется с помощью RLC–метра. Значение магнитной проницаемости μ_M^* определяют по формуле [39]:

$$\mu_M^* = \frac{L_{МП}}{L_0}, \quad (2.20)$$

где μ_M^* – магнитная проницаемость катушки; $L_{МП}$ – индуктивность катушки с магнитопроводом; L_0 – индуктивность катушки без магнитопровода.

19. При контроле качества с целью сертификации сердечников по рисунку 2.10. генератор G переменного тока устанавливают на заданную частоту $f_{\text{возб}}$ и регулируют ток при помощи $R1^*$ до получения требуемого амплитудного значения U_{2f} при $H_m = H_s$ [5]. При этом H_m определяется как функция тока $I_{\text{возб}}$ и электромагнитных параметров обмотки возбуждения (соленоида).

По полученным данным определяют индукцию в сердечнике [23]:

$$B = \frac{I_{\text{возб}} \cdot R_{\text{ОВ}} \cdot \sqrt{2}}{\omega \cdot w \cdot S}, \quad (2.21)$$

где $I_{\text{возб}}$ – ток возбуждения, $R_{\text{ОВ}}$ – сопротивление обмотки возбуждения ДФЗ ($R_{\text{ОВ}} \ll R_2$); S – площадь поперечного сечения магнитопровода; w – количество витков ОВ; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; f – частота возбуждающего поля.

20. Селективный вольтметр по рисунку 2.10 (а) настраивается на частоту $2 \cdot f_{\text{возб}}$. Вольтметром V2 измеряют амплитуду U_{2f} второй гармонической составляющей $f_{\text{возб}}$. Проводят проверочный расчет площади поперечного сечения сердечника S по формуле:

$$S = \frac{U_{2f}}{\mu_0 \cdot \mu_M^* \cdot H_0 \cdot \omega \cdot w_2 \cdot H_s}, \quad (2.22)$$

где $\mu_M^* = K_3 \cdot \mu_M$ – полученная по 2.20 магнитная проницаемость сердечника.

21. По схеме, приведенной на рисунке 2.10 (б) определяют спектральный состав выходного сигнала СО ДФЗ;

22. По результатам пунктов 17 – 21 производят группирование и отбраковку сердечников.

Приборы и оборудование по рисунку 2.10: генератор ГЗ-112/1; селективный вольтметр *Selective Nano Voltmeter type 233*; осциллограф GW Instek GOS-620; вольтметр GW Instek GDM-8135; цифровой осциллограф АКПП-4107/1. Параметры R1, R2, C1, C2, ОВ, СО в процессе контроля измеряются при помощи LRC метра INSTEK LCR-816.

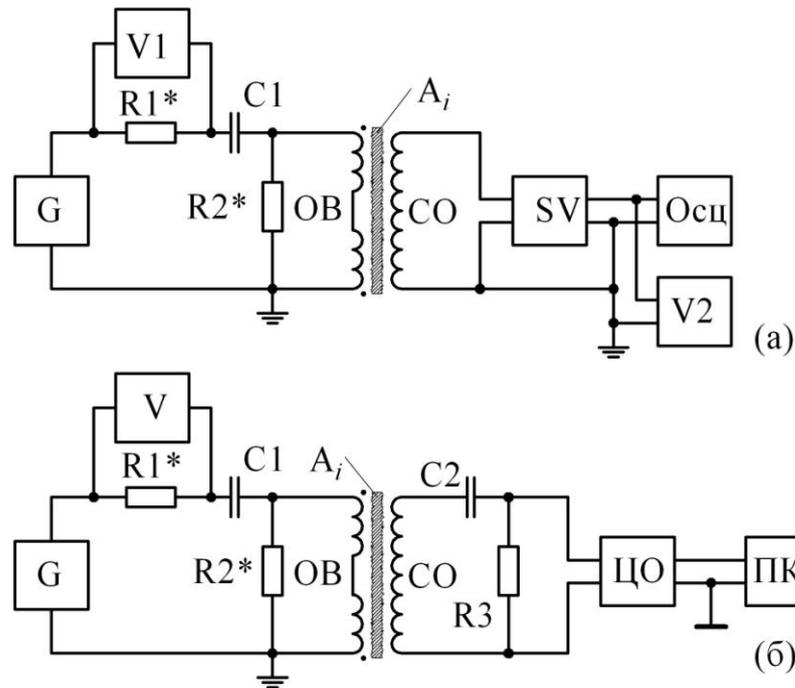


Рисунок 2.10 – Варианты схем испытательного стенда

Особенности разработанной методики, по сравнению с аналогами, состоят в следующем:

1. Методика является специализированной – предназначенной для проектирования, изготовления и идентификации ММС ДФЗ из АмС.
2. Методика обеспечивает измерение параметров ММС из АмС с учетом магнитных параметров исходных сертифицированных материалов.
3. Методика обеспечивает идентификацию ММС из АмС по ограниченному ряду контролируемых геометрических параметров.
4. Методика сочетается с разработанным способом изготовления ММС из АмС по технологии электроэрозионной резки.
5. Соответствует положениям ГОСТ 29004-91, ГОСТ 28997-91.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическую модель феррозонда, определяющая связь параметров его электромагнитной системы с информационным сигналом, действительная для измерительных систем как стержневого, так и замкнутого типов.

2. Разработана математическая модель магниточувствительной системы феррозонда, в которой геометрические параметры сердечника из тонкопленочного аморфного сплава задают распределение магнитного потока, что позволяет производить идентификацию сердечников по минимальному числу контролируемых параметров.

3. Разработан для феррозондовых преобразователей способ изготовления малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов, обеспечивающий заданные размеры и требуемую чистоту обрабатываемых поверхностей при сохранении у полученных магнитопроводов магнитных свойств исходного сертифицированного материала.

4. Разработана методика метрологических исследований и идентификации параметров малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов, позволяющая производить в рамках выпускаемой партии их идентификацию по минимальному числу измеряемых величин.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНЫХ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ И ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Решение задач диссертационной работы по совершенствованию электромагнитных систем ДФЗ, связано прежде всего с поддержанием и улучшением высоких метрологических характеристик этого типа датчиков. Сочетание всей совокупности наилучших параметров ДФЗ в единой конструкции невозможно, так как оптимизация одних приводит к ухудшению других. Например, миниатюризация ухудшает угловую чувствительность. Поэтому при разработке новых принципов построения ДФЗ ориентиром является ряд основополагающих характеристик ДФЗ как высших качественных показателей, достигнутых в настоящее время (глава 1, п. 1.3).

Согласно результатам анализа разработок ведущих фирм по исследованиям и производству ФЗ, основными направлениями совершенствования феррозондовых датчиков являются:

- а) миниатюризация;
- б) технологичность производства;
- в) снижение энергопотребления;
- г) снижение стоимости.

Совокупность данных по практическому применению и совершенствованию ФЗ определяет общие требования, предъявляемые к материалам феррозондовых сердечников:

- высокая магнитная проницаемость $\mu_M \leq 10^6$;
- низкая коэрцитивная сила $H_c \geq 0,5$ А/м; (в результате малое энергопотребление ФЗ: $U_{\text{возб}} < 1\text{В}$; $I_{\text{возб}} < 10$ мА);
- большая индукция насыщения $B_s \leq 1$ Тл; (в результате высокий уровень U_{2f} информационного сигнала);

- высокая частота перемагничивания: $f_B \leq 1$ МГц;
- низкая магнитострикция;
- низкий уровень шума;
- однородность параметров в объеме магнитопровода;
- малая электропроводность;
- технологичность производства;
- низкая стоимость.

Наиболее эффективными и перспективными материалами для МП ФЗ в настоящее время являются:

- аморфные сплавы [101; 133];
- пермаллои [5];
- нанокристаллические сплавы [42];
- феррогранатовые пленки [80].

В данном ряду, по совокупности метрологических и эксплуатационных характеристик МП ФЗ, приоритет принадлежит аморфным сплавам.

3.1. Интегральные и гибридные технологии производства феррозондовых преобразователей

Ориентирование оси чувствительности (ОЧ) датчика феррозондового типа на базовой поверхности измерительного прибора с высокой степенью *точности* является проблемой общего характера, так как определяет основную погрешность измерения магнитных величин вне зависимости от характера их воздействия (скалярная, векторная величина магнитного поля, его градиент). Не менее важна *стабильность* заданного положения ОЧ феррозонда в базовых координатах магнитометра, как фактор, определяющий идентичность его характеристик, полученных при метрологическом контроле и достигаемых в условиях стендовых и промышленных испытаний. Причина возрастания погрешностей феррозондовых преобразователей, особенно в экстремальных условиях эксплуатации (вибрации, ударные воздействия до $20g$; колебания температуры $-50^{\circ} \div +150^{\circ}C$ и т.д.), заключается в угловом смещении физической ОЧ датчика относительно оси геометрической. Такой вид погрешности характерен для феррозондов с кольцевыми и объемными пермаллоевыми стержневыми сердечниками, а также для чувствительных элементов (ЧЭ) на тонких магнитных пленках (ТМП) с многовитковыми обмотками каркасного типа [58].

Существует еще один вид погрешности направленности кольцевых и двухстержневых дифференциальных феррозондов (ДФЗ) с параллельными полуэлементами, которая обусловлена наличием расстояния $2 \div 10$ мм между ними. При вращении таких ЧЭ в диапазоне $0^{\circ} \div 360^{\circ}$ вокруг собственной физической ОЧ, ортогонально которой действует вектор магнитного поля с градиентом порядка $0,5$ мкТл/мм, уровни информационного сигнала (второй гармонической U_{2f} составляющей частоты сигнала возбуждения) в положениях 0° ; 180° и 90° ; 270° различаются на $20 \div 150\%$ в зависимости от расстояния между полуэлементами.

Кроме того, ДФЗ с параллельными полуэлементами имеют деформированную диаграмму направленности при плоских угловых

перемещениях вокруг собственного центра симметрии в неоднородном магнитном поле [58].

Рассмотренные недостатки устранены применением структуры стержневого дифференциального феррозонда, полуэлементы которого по рисунку 3.1 расположены соосно, что способствует совмещению геометрической оси ЧЭ с физической осью чувствительности датчика. При этом магнитопровод может состоять из двух идентичных стержней или быть общим для полуэлементов ДФЗ. В качестве магнитопровода целесообразно использовать сердечники с ТМП, например цилиндрическими (ЦТМП), когда магниточувствительный слой пермаллоя осаждается на поверхность бронзового стержня $\varnothing 0,1 \div 0,3$ мм. Обмотки возбуждения ОВ и сигнальная СО соленоидного типа (витки в один ряд) выполняются бифилярными, что обеспечивает идентичность полуэлементов, а следовательно, высокую степень сбалансированности дифференциального феррозонда (снижение порога чувствительности, компенсация в СО сигнала U_f частоты возбуждения и т.д.). Обмотки соленоидного типа не имеют каркаса, что позволяет жестко закреплять их в специально профилированном пазу корпуса магнитометра. При этом получается монолитный модуль, сохраняющий метрологическую устойчивость при эксплуатации в условиях разрушающих природных и промышленных воздействий. Кроме того, бескаркасные соленоидные обмотки обладают направляющими свойствами и, совмещая собственную продольную ось с осью симметрии сердечника, образуют физическую ОЧ феррозонда, ориентируя её параллельно геометрической оси профилирующего паза измерительной платформы магнитометра. Эти свойства особенно важны при создании многокомпонентных модульных структур феррозондовых магнитометров, в которых точность взаимной ориентации комплекса ОЧ определяет принципиальную возможность алгоритмической обработки совокупности информационных сигналов ДФЗ-компонентов [60].

Разработанная в рамках темы данной диссертации технология изготовления ДФЗ позволяет исключить непроизводительные операции прецизионной механической настройки измерительной системы магнитометра и

обеспечивает совмещение геометрической оси стержневого дифференциального феррозонда с его физической ОЧ с точностью не хуже 0,5 угл. мин. [58].

Направляющие свойства профилированного паза и бескаркасных обмоток обеспечили возможность по рисунку 3.1 применения вместо ТМП цилиндрических - плоских магнитных пленок (ПМП) с сохранением показателей точности и других преимуществ ДФЗ [65]. В настоящее время технологии производства ПМП проще и доступнее, чем ЦТМП, позволяющие при этом улучшить характеристики магнитопроводов ЧЭ. Особенно широко внедряются в производство магниточувствительных датчиков сплавы аморфного железа, которые не уступают традиционно используемому пермаллою по магнитным свойствам и превосходят его по стабильности характеристик в условиях эксплуатации [58].

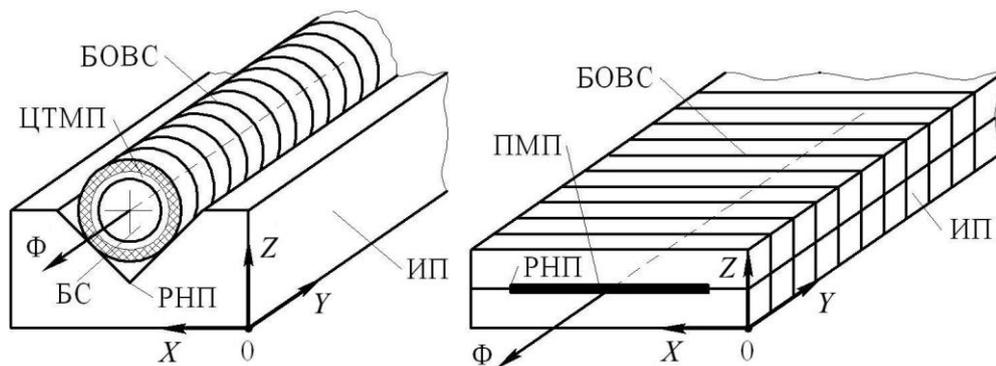


Рисунок 3.1 – Полуэлементы ДФЗ с ТМП.

ИП – измерительная платформа магнитометра с ортонормированным базисом $OXYZ$; Φ – ось чувствительности ДФЗ; БОВС – бифилярные обмотки возбуждения и сигнала ДФЗ; ЦТМП – цилиндрическая тонкая магнитная пленка; БС – бронзовый стержень; РНП – ребро направляющего паза; ПМП – плоская магнитная пленка

Применение ПМП из аморфных сплавов в качестве сердечников феррозондов открывает возможность изготовления ЧЭ данного типа по гибридным, и перспективу их производства по интегральным технологиям. На рисунке 3.2 представлен вариант проекта по серийному производству гибридных дифференциальных феррозондов (ДФЗ). Датчик создан по оптимизированной [58] структуре измерительной системы ЧЭ - состоит из полуэлементов по рисунку 3.1,

расположенных соосно и разнесенных по ОЧ на заданное расстояние, что обеспечивает возможность работы ГДФ как в режиме полемера, так и градиентомера [73]. Интегральные технологии обеспечивают идентичность ОВ и СО датчика, что решает вопросы совместимости ЧЭ с электронными схемами возбуждения и преобразования информационного сигнала.

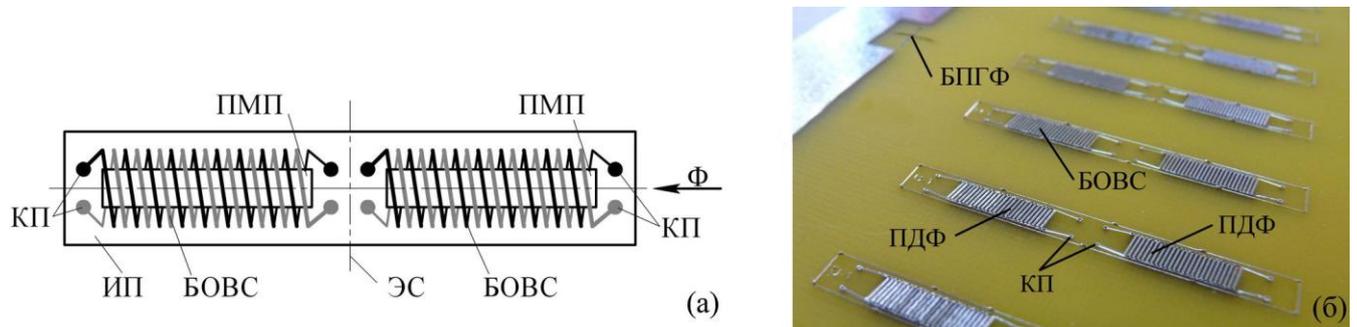


Рисунок 3.2 – Проект производства гибридных ДФЗ с ПМП.

(а) Модель гибридного ДФЗ с ПМП: ПМП – плоская магнитная пленка; ИП – измерительная платформа магнитометра; ЭС – экваториальное сечение ДФЗ; Φ – ось чувствительности ДФЗ; КП – контактные площадки; БОВС – бифилярные обмотки возбуждения и сигнала. (б) Фотография платы гибридных ДФЗ: ПДФ – полуэлемент дифференциального феррозонда; БОВС – бифилярная обмотка возбуждения и сигнала; КП – контактные площадки; БПГФ – база платы гибридных феррозондов

Плоские индуктивности обмоток ФЗ, выполненные по интегральным технологиям имеют меньшую, по сравнению с катушечными, величину межвитковой емкости. Кроме того, в плоских обмотках ФЗ практически устранен разброс параметров – они соответствуют заданным при проектировании, что важно для улучшения метрологических характеристик ДФЗ, в частности – снижения порога чувствительности дифференциальных ЧЭ.

Известны зарубежные аналоги гибридных и интегральных тонкопленочных ФЗ [98; 107; 114; 115; 119; 120; 137]. Существуют *MEMS fluxgate sensors*, выполненные полностью по интегральной технологии [104; 108]. Как правило, современные *MEMS*–феррозонды изготавливаются на основе замкнутого магнитопровода (рисунок 3.3), обеспечивающего минимальный уровень

собственных шумов ФЗ. Однако, переход к нанотехнологиям не освободил интегральные датчики от ряда недостатков.

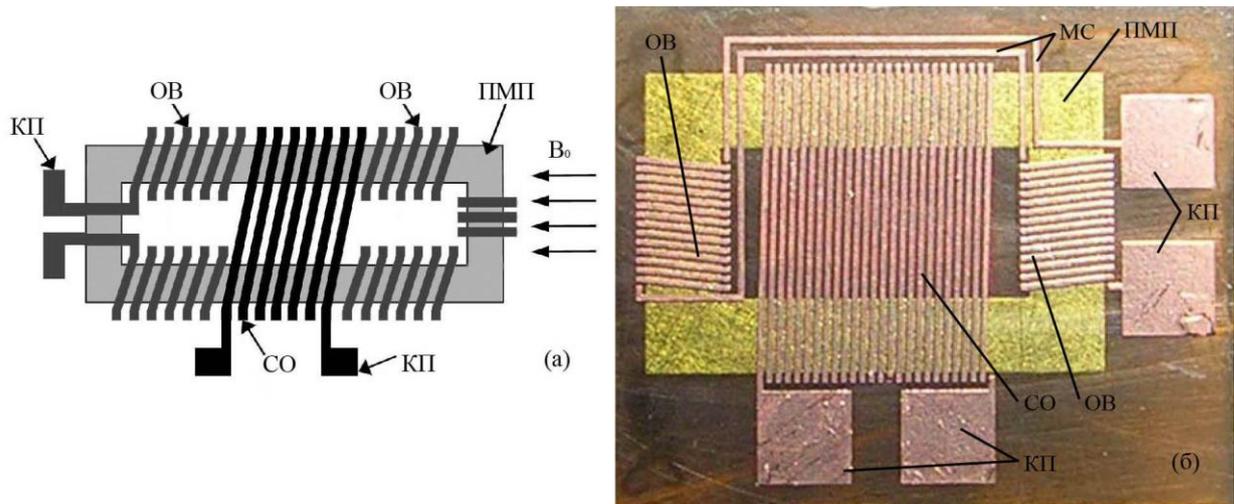


Рисунок 3.3 – Проект производства интегральных ДФЗ с ПМП.

(а) Модель интегрального ДФЗ с ПМП: B_0 – силовые линии магнитного поля; ПМП – плоская магнитная пленка; ОВ – обмотка возбуждения; СО – сигнальная обмотка; КП – контактные площадки. (б) Фотография интегрального ДФЗ с ПМП: МС – межобмоточные соединения; ОВ – обмотка возбуждения; СО – сигнальная обмотка; ПМП – плоская магнитная пленка; КП – контактные площадки

Топология *MEMS fluxgate sensors* разработана так, что осаждаемые пленки магнитопроводов выполняются, как правило, из магнитомягких материалов. При этом утрачивается возможность оптимизации магнитных свойств сердечника ФЗ: термообработки; формирования оси «легкого перемагничивания» и т.д. Как следствие, повышенные 100-300 мА уровни тока возбуждения сигналом оптимальной синусоидальной формы [107]. При этом значения плотности тока приближаются к предельным, что плохо согласуется с интегральным исполнением обмоток ФЗ и микроразмерами датчика.

В представленной на рисунке 3.3(б) конструкции *MEMS fluxgate sensor* магнитопровод заполняет лишь незначительную часть площади витка сигнальной обмотки, что приводит обычно к деформации диаграммы направленности дифференциального феррозонда. Данная особенность негативно влияет на работу ФЗ в неоднородном измеряемом поле: не случайно на рисунке 3.3(а) силовые

линии B_0 отображают ламинарное магнитное воздействие. Проблематично также по рисунку 3.3 определить пространственное положение и плоскостность экваториального сечения дифференциального *MEMS fluxgate sensor*.

В плане минимизации факторов, негативно влияющих на характеристики *MEMS fluxgate sensors* при непосредственном участии автора разработан способ изготовления стержневых дифференциальных феррозондов, сочетающая преимущества гибридных и интегральных технологий. В основу положена реализация достоинств сертифицированных тонкопленочных аморфных сплавов, как магниточувствительной системы ФЗ. Для улучшения метрологических характеристик достаточно обеспечить идентичность геометрических параметров стержневых сердечников по рисунку 3.2(а), которые в совокупности с плоскими интегральными обмотками образуют два полуэлемента ДФЗ. Данный ФЗ обладает явно выраженной анизотропией формы (соотношение продольных и поперечных размеров), что обеспечивает острую направленность, совмещение геометрической и физической осей чувствительности ФЗ, а, следовательно, возможность измерения параметров полей как малого, так и большого градиента. При измерении параметров однородных магнитных полей, полуэлементы ФЗ можно располагать, в отличие от рисунка 3.2, параллельно для сокращения размеров датчика.

Плоские ОВ и СО обмотки по рисунку 3.2 выполнены бифилярными (БОВС), что делает структуру ДФЗ универсальной и предполагает его использование как в режиме полемера, так и градиентомера. Для переключения режимов достаточно изменить комбинацию связей МС, между КП БОВС полуэлементов по рисунку 3.2(а).

Бифилярное исполнение обмоток приближает площадь сечения витка к площади сечения магнитопровода, что обеспечивает концентрацию потоков БОВС вдоль оси чувствительности ДФЗ – улучшает метрологические характеристики ЧЭ.

В лабораторных условиях с применением стандартных приборов были получены сравнительные характеристики модульных ПМП феррозондов и ГДФ.

Основопологающие для сравниваемых ДФЗ данные по: чувствительности, отношению сигнал/шум, потребляемой мощности, степени деформации диаграммы направленности – оказались соизмеримыми, что позволяет сделать вывод о целесообразности совершенствования гибридных и интегральных технологий производства ПМП феррозондов.

Результаты технической реализации ДФЗ по разработанной технологии на уровне ОКР по рисунку 3.2 следующие:

- потребляемый ток синусоидальной формы ≥ 7 мА;
- потребляемая мощность $\geq 3,5$ мВт;
- допустимый (без деформации диаграммы направленности) градиент магнитного воздействия 15 нТл/ (2×10^2) мм.
- точность взаимной пространственной ориентации экваториального сечения и оси чувствительности ДФЗ: $0,2$ угл. мин.
- габариты дифференциального феррозондового датчика (длина): $15-30$ мм.

Результаты исследований в п.3.1 определяют следующие заключения:

Основу точности и стабильности метрологических характеристик ДФЗ с ПМП составляют ориентирующие свойства жесткого модуля «профилирующий паз – бескаркасная обмотка» и стержневая магнитная система дифференциального ЧЭ. Необходимым условием оптимизации характеристик ФЗ является применение сертифицированных тонкопленочных магнитопроводов из АмС. Сочетание гибридных и интегральных технологий позволяет: оптимизировать параметры производства и эксплуатации ПМП ДФЗ; создавать многокомпонентные модульные структуры феррозондовых магнитометров; сократить процент отбраковки и стоимость ДФЗ как высокоэффективных ЧЭ.

3.2. Миниатюризация феррозондовых преобразователей

В настоящее время осуществляется промышленное производство метрологически аттестованных ДФЗ магнитометрических авиационных компасов ИД-6. Их основу составляют двухкомпонентный датчик с ДФЗ по рисунку 3.4.

Характеристики ДФЗ ИД-6: длина – 42 мм; диаметр – 8 мм; масса – 8 г.

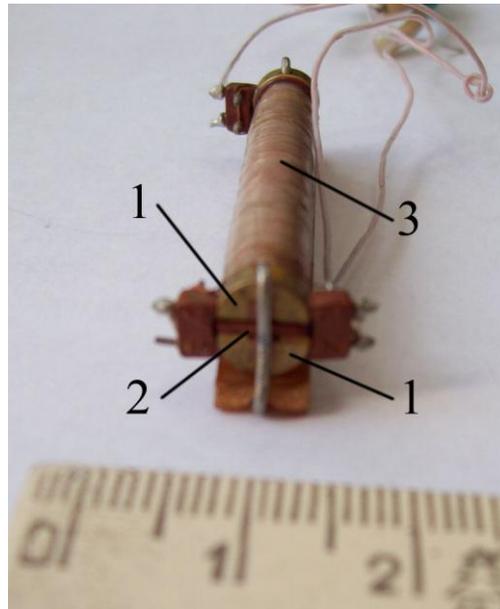


Рисунок 3.4 – Стержневой ДФЗ авиационных систем навигации.

1 – полуэлемент ДФЗ; 2 – каркас для МП ДФЗ; 3 – ОВ и СО ДФЗ

Множество областей применения феррозондовых датчиков требует малые размеры ФЗ. Процесс миниатюризации ДФЗ достаточно сложен, так как их магнитный шум резко возрастает с уменьшением длины МП. Отечественные и зарубежные фирмы разрабатывают и производят малогабаритные феррозонды как с разомкнутыми, так и с замкнутыми сердечниками (рисунок 3.5) [107].

В настоящее время, качество МП в виде распыленного или электролитически осажденного пермаллоя не является достаточным для обеспечения требуемых метрологических характеристик феррозонда. Поэтому для создания сердечников миниатюрных ФЗ часто используют не интегральные, а гибридные технологии изготовления, в частности шаблонное травление аморфной

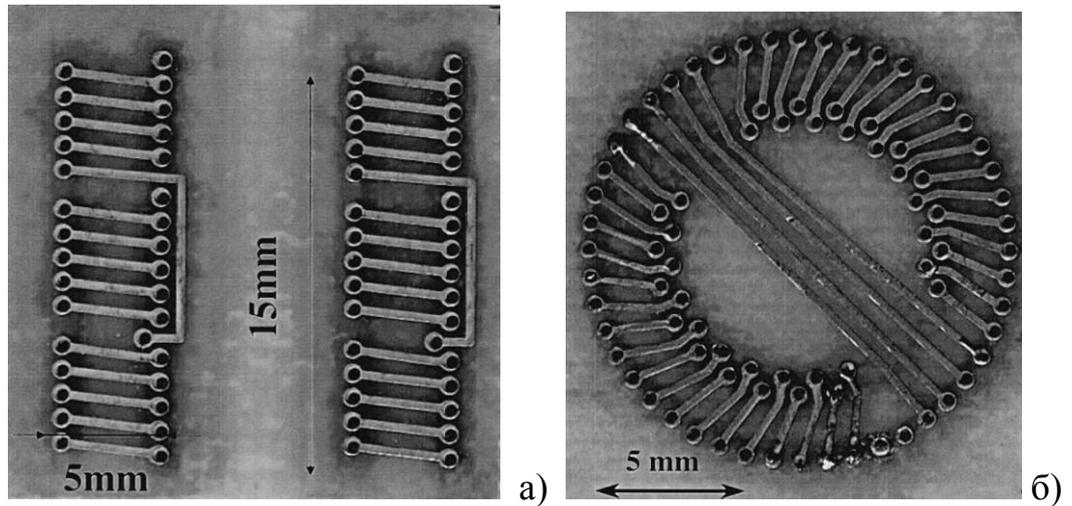


Рисунок 3.5 – ДФЗ выполненные по технологии изготовления печатных плат

ленты. Феррозонды с такими МП (рисунок 3.5) имеют наибольший размер 15мм [107]. Отожженный сердечник из аморфной пленки зажат под давлением между двумя слоями печатной платы, внешние стороны которых металлизированы и представляют собой полуобмотки ФЗ. Затем слои соединяются гальваническим методом.

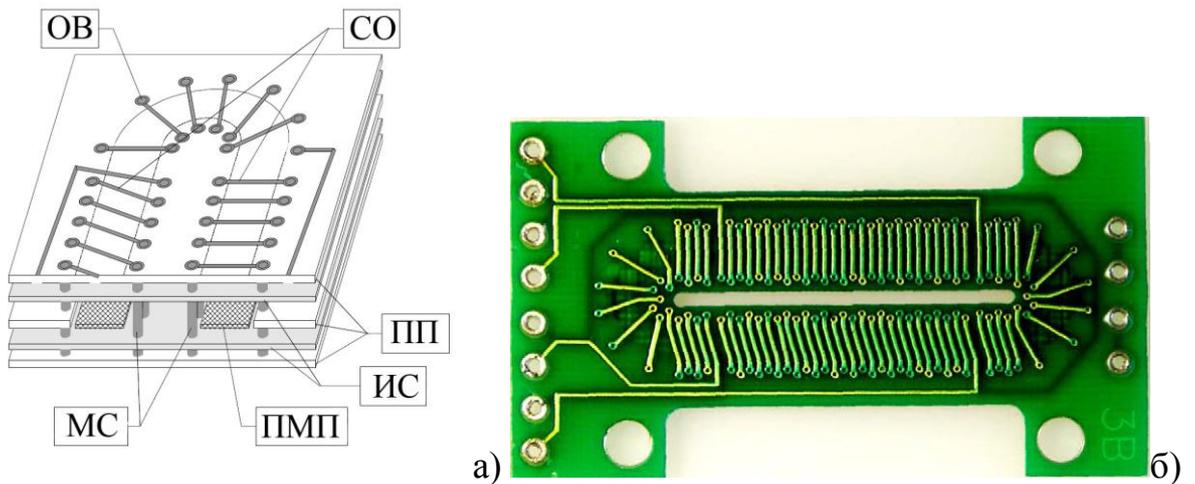


Рисунок 3.6 – Гибридный ДФЗ с замкнутым МП овальной формы.

(а) – графическая модель ДФЗ: ОВ – обмотка возбуждения ДФЗ; СО – сигнальная обмотка ДФЗ; ПМП – плоская магнитная пленка; ИС – изолирующий слой; ПП – печатная плата; МС – межслойные соединения; (б) – конструктивное исполнение ДФЗ

Планарный феррозондовый датчик с плоскими катушками возбуждения и сигнала был представлен в ряде работ [103; 129]. Сердечник датчика из пермаллоя в виде двух последовательно сформированных полосок длиной 1,4 мм распылен толщиной 2 мкм. Плоские катушки возбуждения насыщают полосы в противоположных направлениях, дифференциальный поток измеряется двумя встречно соединенными обмотками СО. Максимальная чувствительность 0,073 мкВ/нТл была достигнута при токе возбуждения 150 мА ($f_{возб} = 1\text{МГц}$). Датчик аналогичных габаритов $l_{ФЗ} \geq 1,5\text{ мм}$, имеющий три плоских катушки возбуждения, представлен в работе [132]. Уровень измеряемого поля ДФЗ [122] по рисунку 3.6 достигает 250 мкТл без обратной связи [120; 121]. В диапазоне $\pm 60\text{ мкТл}$ погрешность нелинейности и погрешность гистерезиса меньше $\pm 1,2\%$. Погрешность диаграммы направленности при $H_0 \leq 50\text{ мкТл}$ составляет $\pm 1,6\%$.

Интегральные и гибридные технологии обеспечивают миниатюризацию также двухкомпонентных феррозондовых магнитометров (рисунок 3.7) [102].

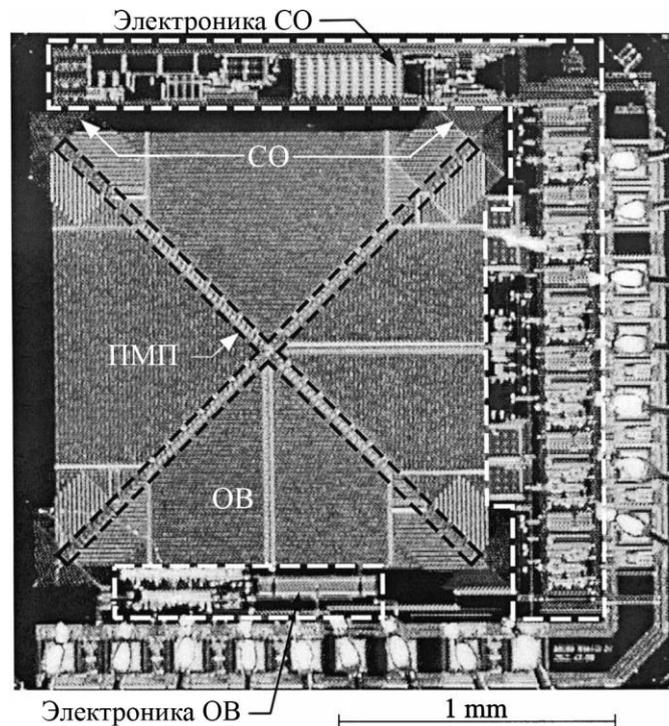


Рисунок 3.7 – Двухкомпонентный компас на стержневых ДФЗ выполненный по CMOS технологии

Датчик с кольцевыми сердечниками (рисунок 3.8, а) \varnothing 10 мм выполнен на МП из АмС. МП изготовлены методом травления [118]. Разрешение датчика 40 нТл; погрешность нелинейности в диапазоне 400 мкТл составляет 0,5%.

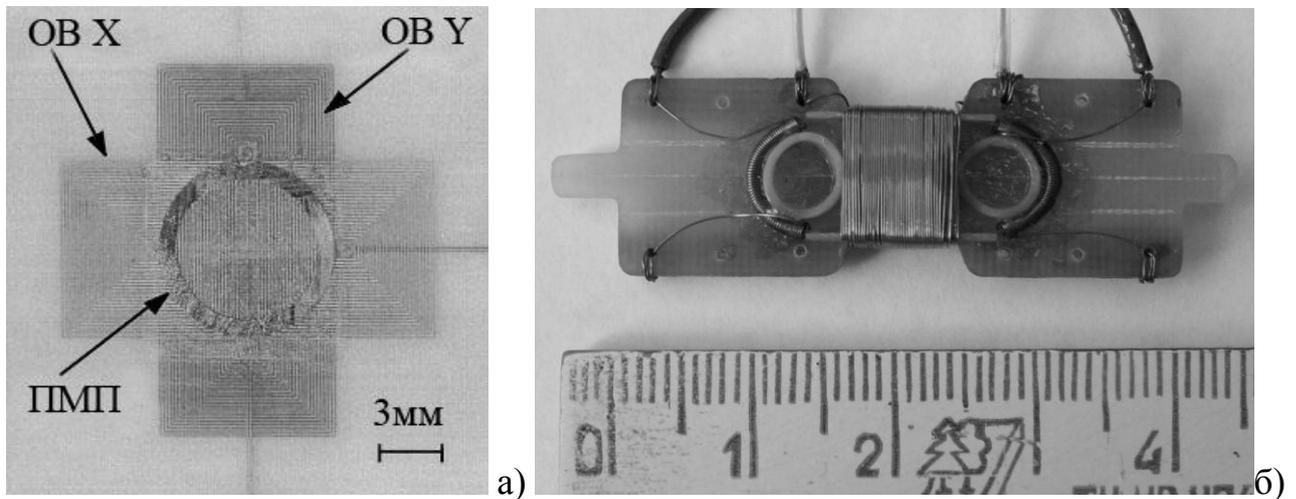


Рисунок 3.8 – ДФЗ с кольцевыми МП:

а) Двухкомпонентный компас; б) предлагаемый однокомпонентный ДФЗ с соленоидными ОВ

Общий недостаток интегральных плоских катушек (рисунок 3.8а), в отличие от ФЗ по рисунку 3.8 (б) в том, что они не могут достаточно насыщать МП ФЗ по двум причинам: (1) более слабая связь с сердечником, чем в случае с соленоидной катушкой и (2) малая толщина слоя металлизации ОВ, и как следствие ограничение амплитуды возбуждающего тока.

Двухслойная металлизация (рисунок 3.9) может образовать ОВ и СО вокруг сердечника [117; 137]. Разрешение такого датчика составляет 40 нТл (размах); длина сердечника 5мм. Аналогичный датчик был разработан в *Fraunhofer Institute* и стал частью интегрального КМОП магнитометра [111].

В плане подготовки данной диссертации при непосредственном участии автора были разработаны, изготовлены и исследованы ДФЗ с плоскими ОВ и СО, выполненными по интегральным технологиям. При этом основу гибридных конструкций ДФЗ составляли тонкопленочные АмС. Для решения задачи миниатюризации ДФЗ применялись также ОВ и СО соленоидного типа. В результате наибольший габарит стержневого ДФЗ был сокращен до 2,0 мм по

структуре измерительной системы с двумя параллельными сердечниками и общей СО. Характеристики данного малогабаритного ДФЗ:

- наибольший габарит $l_{\text{ДФЗ}} = 2,0$ мм;
- ток возбуждения $I_{\text{возб}} = 15$ мА;
- напряжение возбуждения $U_{\text{возб}} = 0,5$ В;
- частота возбуждения $f_{\text{возб}} = 100$ кГц;
- чувствительность по U_{2f} : 0,01 мВ/нТл;
- диапазон 250 мкТл;
- погрешность направленности 1,5 %.

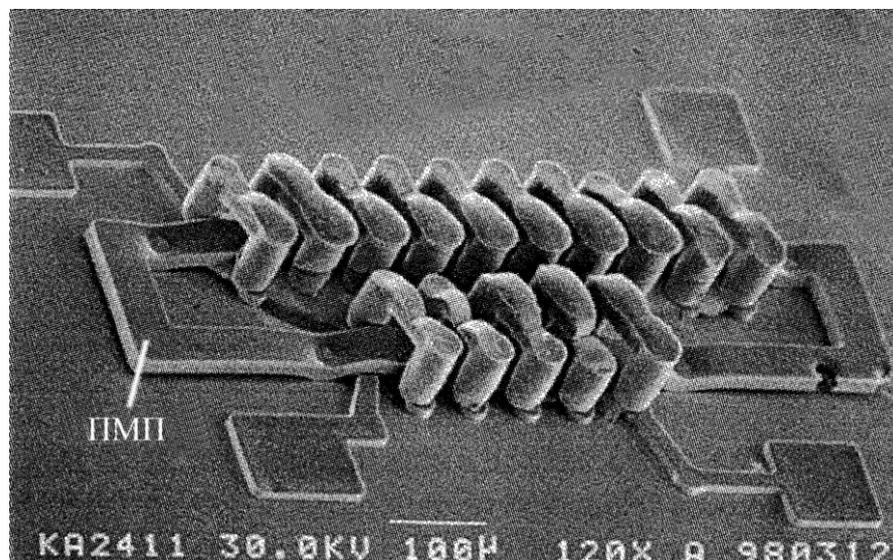


Рисунок 3.9 – Интегральная индуктивность с ПМП сердечником

Результаты исследований в п.3.2. определяют следующие заключения:

1. Гибридные и интегральные технологии позволяют обеспечить миниатюризацию ФЗ кольцевых, стержневых, 2-х компонентных на уровне 1,0 мм (наибольший габарит).
2. Проблемы миниатюризации ФЗ необходимо решать совместно с задачами: (а) снижения энергопотребления; (б) снижения уровня шумов; (в) улучшения характеристик линейности и направленности.

3.3. Технологии изготовления феррозондовых преобразователей

При изготовлении ФЗ с ПМП, в частности дифференциального типа, существует проблема точности обеспечения заданной ширины сердечника и её равномерности на длине до 60 мм. Решение проблемы осложняется тем, что сплавы ПМП из АмС характеризуются высокой степенью прочности и твердости порядка 10 ГПа. В соответствии с задачей диссертационной работы и выводами п.2.4, для изготовления МП малогабаритных ДФЗ из АмС был применен метод электроэрозионной резки на станке А207.86-М2 с числовым программным управлением. Наряду с положениями п.2.4, обоснованием выбора данного метода являются данные сравнительного анализа применения: штамповки; механической резки; лазерной резки; травления; гидроабразивной резки для изготовления МП из АмС. Так на рисунке 3.10 показана нелинейность и степень шероховатости 50 мкм кромки МП, полученного методом механической резки. Негативным фактором данного метода является образование заусенцев, которые с учетом жесткости АмС представляют опасность для малогабаритных микротоковых соленоидных обмоток ДФЗ диаметр провода которых не превышает $0,05 \div 0,1$ мм. Для удаления заусенцев требуются специальные технологические операции, приводящие к усложнению и удорожанию производства МП из АмС.

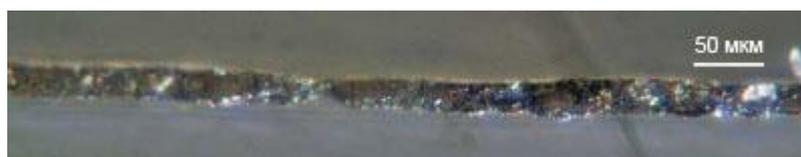


Рисунок 3.10 – Фотография торца ПМП-сердечника, полученного методом механической резки

На рисунке 3.11 представлены результаты обработки кромки АмС - сердечника по его длине методом лазерной резки. Показательным фрагментом является зона расплава тонкой пленки АмС, температура которого в процессе резки достигает 2700°C [110]. С учетом теплопроводности материала АмС экстремальное температурное воздействие распространяется от кромки расплава по всей поверхности ПМП, изменяя её первоначальные магнитные свойства. Согласно

рисунку 3.11, при заданной для малогабаритного ДФЗ ширине МП 100÷300 мкм зона расплава, отличающаяся от АмС неопределенностью магнитных свойств, будет составлять полный, заключенный между бордюрами, объем сердечника.

Представленные особенности обработки тонких пленок из высокотемпературных сплавов методом лазерной резки определяет его как неприемлемый для изготовления МП из АмС с сохранением первоначальных магнитных свойств исходного материала для малогабаритных ДФЗ.

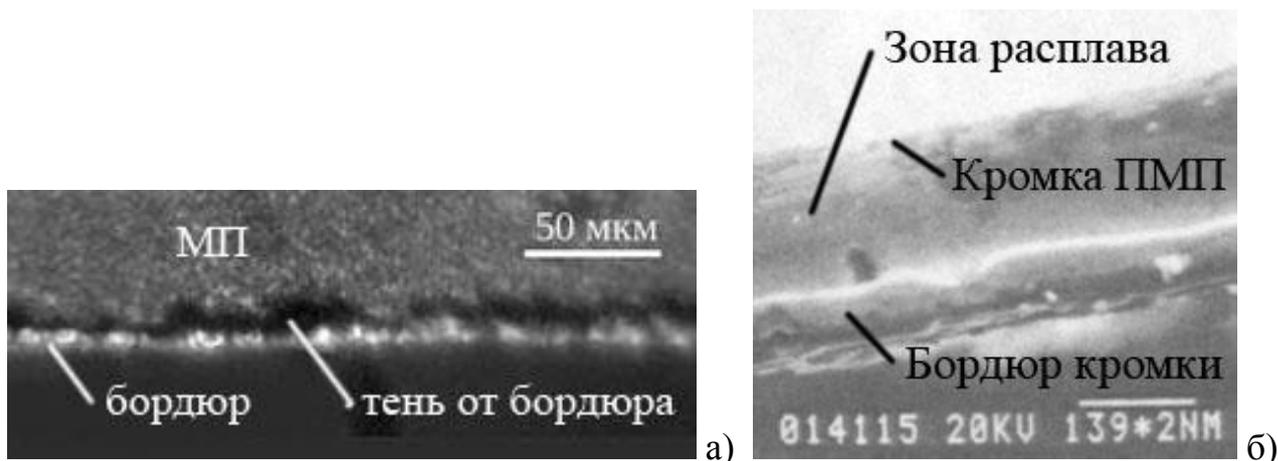


Рисунок 3.11 – Фотография ПМП-сердечника, полученного методом лазерной резки.

(а): степень линейности кромки по длине МП; (б): укрупненный вид кромки МП

На рисунке 3.12 представлены результаты обработки тонкопленочных АмС методом химического травления. Экстремальных температурных воздействий на магнитные свойства АмС при этом не существует. Однако шероховатость кромки МП и неравномерность проникновения химического растворителя к центру поперечного сечения сердечника в совокупности значительно превышают 50 мкм. Это является усугублением недостатка, характерного для метода лазерной резки. В результате кромки МП представляют собой бордюры из сложных химических соединений окислов и растворов компонентов АмС. Магнитные свойства этих бордюров являются неопределенными как по длине тонкопленочного сердечника, так и в его объеме. Таким образом, применение метода химического травления для изготовления малогабаритных МП шириной 100 – 300 мкм из тонкопленочных АмС следует считать нецелесообразным.

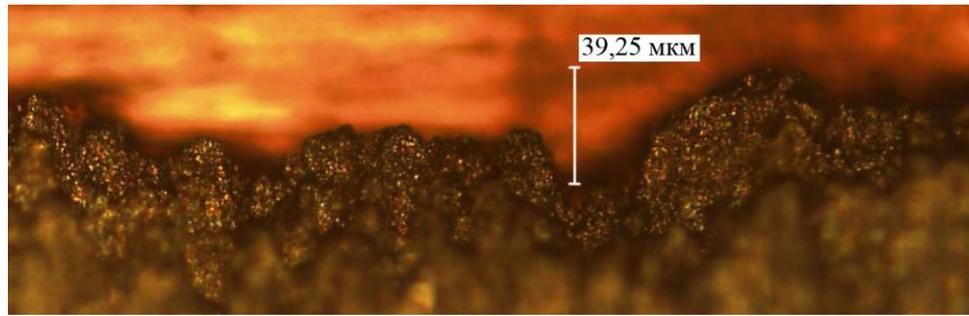


Рисунок 3.12 – Фотография ПМП-сердечника, полученного методом травления

На рисунке 3.13 представлен ПМП сердечник из АмС, изготовленный методом гидроабразивной резки [105]. Данный метод хотя и обеспечивает температурную стабильность (60 - 90) °С режима обработки ПМП, подобно методу химического травления, устраняя действие экстремально высоких температур на магнитные свойства АмС, но имеет существенный недостаток механического воздействия на тонкую пленку, подобно штамповке и механической резке. Кроме того, большие неравномерность и шероховатость кромки, полученные в результате обработки ПМП данным методом не позволяют применять его для изготовления МП малых габаритов и, тем более, сложных форм.

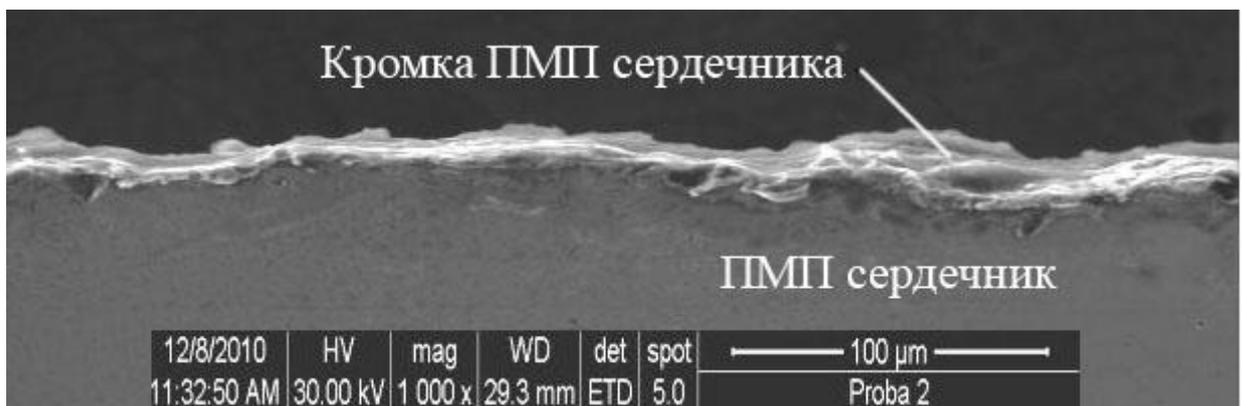


Рисунок 3.13 – Фотография ПМП-сердечника, полученного методом гидроабразивной резки

Таким образом, на основании приведенных данных и в результате анализа особенностей представленных методов обработки тонкопленочных АмС следует

вывод о том, что эти методы не обеспечивают требуемого качества изготовления МП, в особенности для ДФЗ малых габаритов.

Альтернативным решением является нанесение пермаллоевых пленок при интегральной технологии изготовления ДФЗ (рисунок 3.14) [116]. Недостатки: неустойчивые механические характеристики пленки вплоть до появления трещин и расколов; ухудшение магнитных характеристик исходного материала, что приводит к снижению магнитной проницаемости μ и повышению H_s . Это выражается в необходимости повышения потребляемой мощности ДФЗ до 0,2 Вт.

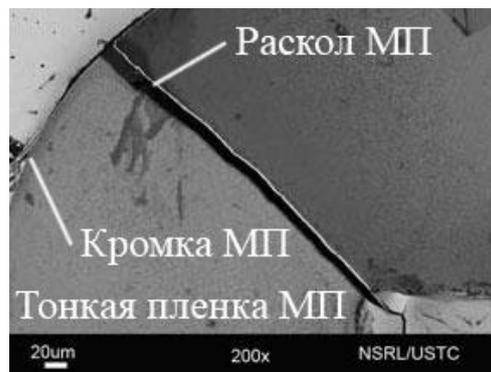


Рисунок 3.14 – Фотография ПМП-сердечника, полученного методом электроосаждения

Задача диссертационных исследований автора заключалась в создании технологии изготовления тонкопленочных сердечников из АмС для малогабаритных ДФЗ методом электроэрозионной резки с сохранением сертифицированных магнитных свойств исходных аморфных сплавов.

Электроэрозионная обработка основана на выбивании частиц материала заготовки с её поверхности энергией направленного искрового разряда. Режимы обработки задаются уровнем электрического напряжения и расстоянием между электродами, а также свойствами жидкого диэлектрика, в который данные электроды погружены. При сближении электродов, одним из которых является обрабатываемая заготовка, происходит пробой диэлектрика – возникает искровой разряд, канал которого является направляющим и сосредоточивающим электроэнергию источника питания. Длительность процесса выбивания частиц заготовки с её поверхности не превышает 0,01с, поэтому выделяющееся тепло не успевает проникнуть вглубь материала. Кроме того, нагреванию заготовки выше

температуры окружающей среды препятствует достаточно большой объем жидкого диэлектрика.

Таким образом, метод электроэрозионной обработки обеспечивает высокое качество обрабатываемых поверхностей токопроводящих твердых образцов и сложных изделий при отсутствии механических и температурных воздействий на материал заготовки.

Предмет экспериментальных исследований по изготовлению сердечников ФЭ составляет резка ПМП электроэрозионным методом согласно рисунку 3.15.

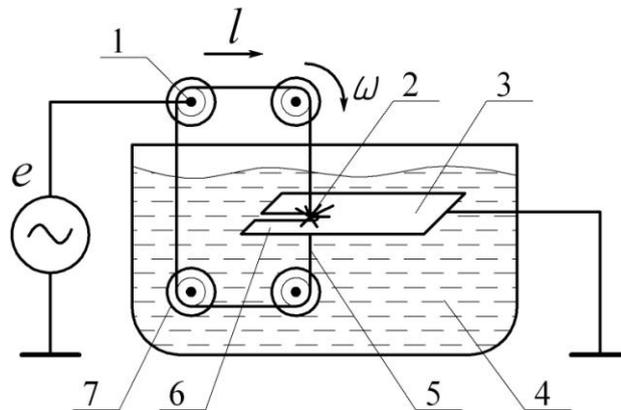


Рисунок 3.15 – Схема технологической электроэрозионной установки:

1 – ось электрического контакта; 2 – искровой разряд; 3 – заготовка ПМП; 4 – охлаждающая диэлектрическая жидкость; 5 – электропроводящая режущая струна; 6 – сердечник; 7 – ролики натяжения струны; e – высоковольтный источник питания; l – линейное перемещение режущего инструмента; ω – направление вращения роликов

Заготовка ПМП 3, являющаяся электродом, помещается в жидкий диэлектрик 4. Между заготовкой и режущим инструментом 5 подается напряжение e высоковольтного источника питания. Линейное перемещение l режущего инструмента 5 приближает его к электроду 3 и на заданном расстоянии между ними происходит пробой диэлектрика 4 – возникает электрический разряд, канал которого отделяет сердечник 6 от заготовки ПМП 3. В процессе обработки происходит испарение как материала заготовки 3, так и режущего инструмента 5. Поэтому, для обеспечения равномерного по длине уменьшения диаметра

режущей проволоки, производится её перематка на роликах 7 с постоянной угловой скоростью ω . Напряжение источника питания e для искрового пробоя в межэлектродном объеме подключается к электропроводящей режущей струне 5 посредством электрического контакта 1 через ось ролика 7.

В экспериментальных исследованиях по изготовлению ПМП-сердечников использовался электроэрозионный проволочно-вырезной станок А207.86-М2 фирмы «ИНТЕЛПРОМ». На рисунке 3.16 представлена фотография процесса электроэрозионной резки: длина заготовок 3 из лент различных ПМП аморфных сплавов составляла $10 \div 60$ мм. Заготовки устанавливались в электропроводящем держателе 5 при помощи стягивающих винтов 6. Держатель с заготовкой ПМП

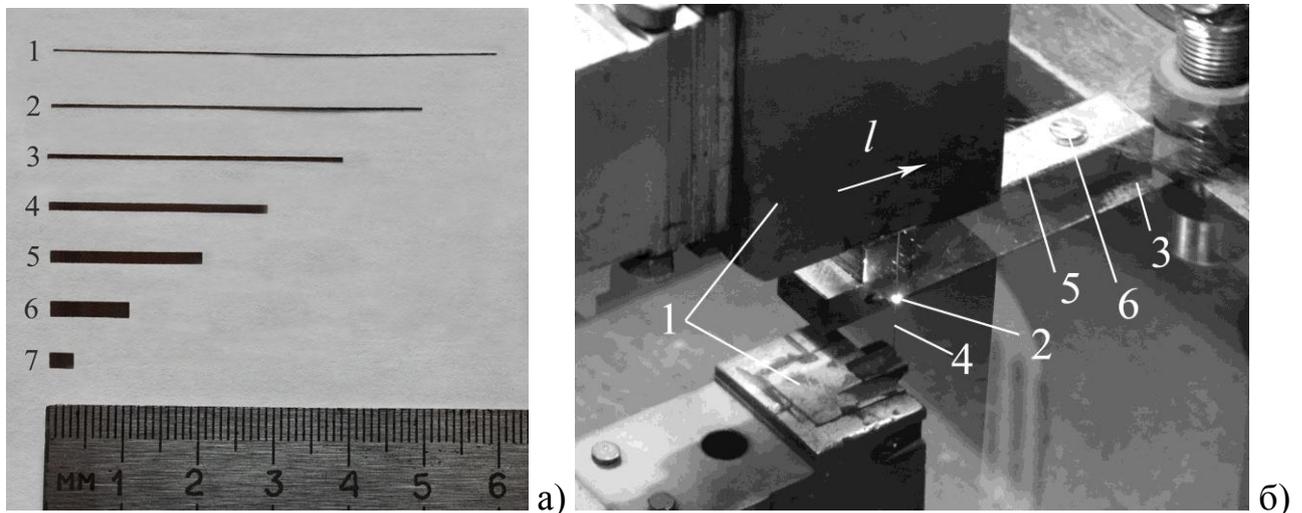


Рисунок 3.16 – Процесс изготовления ММС из АмС методом электроэрозионной резки:

(а) – ММС из АмС, изготовленные методом электроэрозионной резки: 1 – $l = 60$ мм, $a=b=0,2$ мм; 2 – $l = 50$ мм, $a=b=0,3$ мм; 3 – $l = 40$ мм, $a=b=0,5$ мм; 4 – $l = 30$ мм, $a=b=1,0$ мм; (б) – фотография процесса электроэрозионной резки:

1 – модуль режущего инструмента; 2 – искровой разряд; 3 – заготовка ПМП; 4 – режущая струна; 5 – держатель заготовки ПМП; 6 – стягивающий винт; l – линейное перемещение режущего инструмента

жестко прикреплялся к основанию станка, то есть оставался неподвижным в процессе изготовления сердечника. При этом уровень диэлектрической охлаждающей жидкости доводился оператором до погружения в неё ПМП на

глубину порядка 50 мм. В соответствии со схемой рисунка 3.15, на рисунке 3.16 модуль режущего инструмента 1, подключенный к высоковольтному источнику питания, содержит электропроводящую режущую струну 4 и совершает линейное перемещение l вдоль держателя 6. Расстояние от кромки ПМП до канала искрового разряда 2 является шириной изготавливаемого сердечника и задается на компьютерном пульте управления станка с точностью ± 5 мкм.

На рисунке 3.17 представлена фотография части ПМП-сердечника, позволяющая оценить степень шероховатости его кромки, оставленной искровым режущим инструментом.

Используемый электроэрозионный станок оснащается режущей проволокой различных диаметров $\varnothing 0,025 \div 0,3$ мм с заданными электромеханическими свойствами (материалы: молибден; латунь и др.). Экспериментальная база исследований была ограничена: применялась лишь латунная струна $\varnothing 0,25$ мм. Можно прогнозировать уменьшение шероховатости кромки сердечника по мере сокращения: (а) диаметра используемых режущих струн вплоть до $\varnothing 0,025$ мм; (б) мощности искрового разряда – достаточных для разрушения ПМП малой толщины.

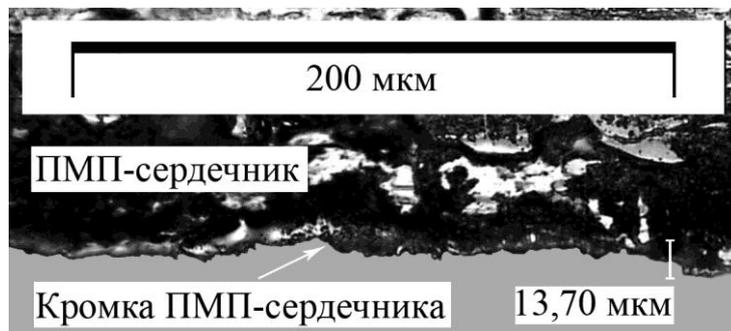


Рисунок 3.17 – Фотография ПМП-сердечника, полученного методом электроэрозионной резки

Координаты траектории перемещений режущего инструмента в горизонтальной плоскости задаются на компьютерном пульте управления станка с точностью ± 5 мкм, что позволяет воспроизводить магниточувствительные элементы различных размеров и конфигураций: линейных, лекальных, кольцевых, эллипсообразных.

Позитивными признаками представленной технологии являются: отсутствие механического воздействия на ПМП в процессе изготовления сердечника; минимизация температурного воздействия на ПМП-заготовку, так как её обработка ведётся практически при температуре окружающей среды – в объеме жидкого диэлектрика. В связи с этим основным достоинством данной технологии является сохранение в изготовленном сердечнике свойств, идентичных сертификату исходной ПМП. Идентификация свойств сердечников производилась согласно методике (глава 2, п.2.5.), разработанной в рамках данной диссертации. Исследования показали, что представленный процесс электроэрозионной обработки не является фактором, влияющим на свойства изготавливаемых магниточувствительных сердечников, которые определяют основные метрологические характеристики ДФЗ (чувствительность; параметры возбуждения; диаграмма направленности).

Результаты исследований в п.3.3. определяют следующие заключения:

1. Требуемые технические характеристики феррозондов обеспечиваются применением магниточувствительных сердечников из аморфных сплавов при их изготовлении способом, сохраняющим сертифицированные магнитные свойства исходного материала.

2. При электроэрозионном способе резки плоских магнитных пленок практически устранены факторы, влияющие на магнитные, механические и другие свойства изготавливаемых сердечников.

3. Электроэрозионный способ позволяет воспроизводить из различных сплавов в виде тонких пленок магниточувствительные сердечники различных размеров и конфигураций для феррозондовых датчиков с улучшенными метрологическими характеристиками.

3.4. Параметры магнитопроводов как факторы снижения энергопотребления феррозондовых преобразователей

Схема возбуждения ФЗ обычно потребляет значительную часть мощности электропитания феррозондовых магнитометров. Амплитуда тока возбуждения должна быть достаточно большой, чтобы полностью насытить сердечник феррозонда в каждом цикле перемагничивания для того, чтобы удалить остаточную индукцию МП. Снижение тока возбуждения может быть достигнуто с помощью настроечного конденсатора, включенного параллельно с обмоткой возбуждения (рисунки 3.18, 3.19). Данная настройка может также уменьшить искажение второй гармоники информационного U_{2f} -сигнала СО [130].

Цепь возбуждения в виде параллельного LC-контура была проанализирована в [127]. Данный способ снижения энергопотребления ДФЗ эффективен, но имеет и недостатки. Настройка возбуждения может ухудшить температурную стабильность датчика. Построечный конденсатор должен располагаться вблизи ОВ и быть с очень низким температурным коэффициентом, что усложняет схему магнитометра.

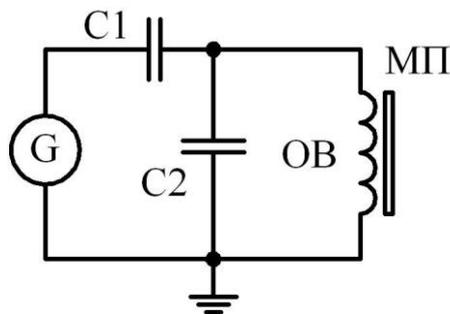


Рисунок 3.18 – Электросберегающая схема возбуждения ФЗ.

G – генератор тока возбуждения ФЗ; C1 – конденсатор отсечки постоянного тока;
C2, OB – контур возбуждения ФЗ

Если цепь C1-C2-OB правильно настроена, генератор поставляет только энергию перемагничивания МП.



Рисунок 3.19 – Формы выходных сигналов феррозонда: 1 – ток возбуждения генератора 0,5 А / дел.; 2 – выходной сигнал СО без конденсатора С2; 3 – выходной сигнал СО с конденсатором С2

При выполнении данной диссертации были проведены исследования схемы по рисунку 3.18 на предмет энергосбережения ФЗ при преобразовании сигнала возбуждения прямоугольной формы в синусоидальный, как по рисунку 3.20.

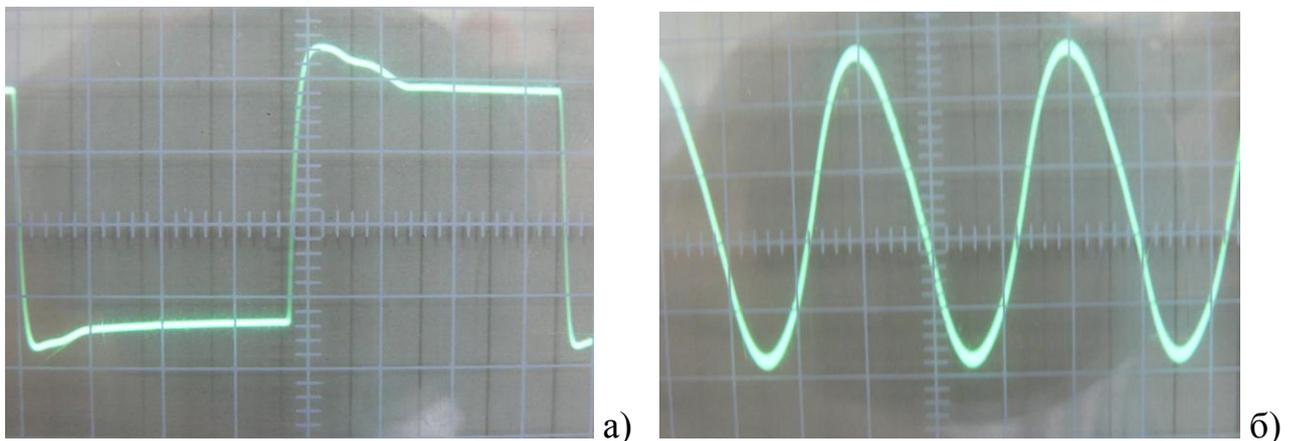


Рисунок 3.20 – Осциллограммы сигнала возбуждения ДФЗ.

(а) – сигнал на выходе кварцевого генератора возбуждения; (б) – сигнал полученный из (а) на ОВ ДФЗ по схеме 3.18

Преимуществом цифровой генерации $I_{\text{возб}}$ является простота кварцевой стабилизации частоты $f_{\text{возб}}$. Синусоидальный $I_{\text{возб}}$ в ОВ ФЗ сохраняет

стабильность $f_{\text{возб}}$, одновременно улучшая спектр информационного сигнала СО ФЗ. Подключением С2 уровень тока $I_{\text{возб}}(\sin)$ был снижен в 2 раза по сравнению с $I_{\text{возб}}$ прямоугольным.

Повышение частоты возбуждения также является методом снижения энергопотребления ФЗ. Диапазон частоты возбуждения для феррозондовых магнитометров, как правило, $1 \div 20$ кГц. Миниатюрные феррозонды иногда возбуждаются частотами выше чем 1 МГц [106]. Это снижает энергопотребление ФЗ на порядок, но и ухудшает чувствительность, что вызвано миниатюризацией сердечника и низким числом витков ОВ и СО.

В данной диссертационной работе были проведены исследования по энергосбережению в схемах ОВ методом оптимизации электромагнитной системы ФЗ и согласованием цепи ОВ с генераторами возбуждения. Для ДФЗ исследовалось влияние на уровень тока $I_{\text{возб}}$ параметров:

- магнитные характеристики МП;
- сечение МП;
- диаметр витков ОВ и СО;
- количество витков ОВ и СО;
- частота тока возбуждения;
- форма тока возбуждения.

В результате энергетические параметры возбуждения были минимизированы: $I_{\text{возб}} \geq 3,5$ мА; $U_{\text{возб}} \geq 0,5$ В; $P_{\text{возб}} \geq 1,75$ мВт.

3.5. Метрологические исследования и идентификации параметров магнитопроводов из тонкопленочных аморфных сплавов

Согласно разработанной «Методики контроля и идентификации параметров магнитопроводов из тонкопленочных аморфных сплавов» (п.2.5 Главы 2) были спроектированы и применены стенды метрологического контроля МП (рисунки 3.21, 3.22) Для обеспечения достоверности результатов, параметры МП определялись двумя методами: индуктивным и феррозондовым. Оба метода основаны на данных контроля геометрических параметров МП: форма; длина; ширина; неравномерность по длине; шероховатость кромок. Главным

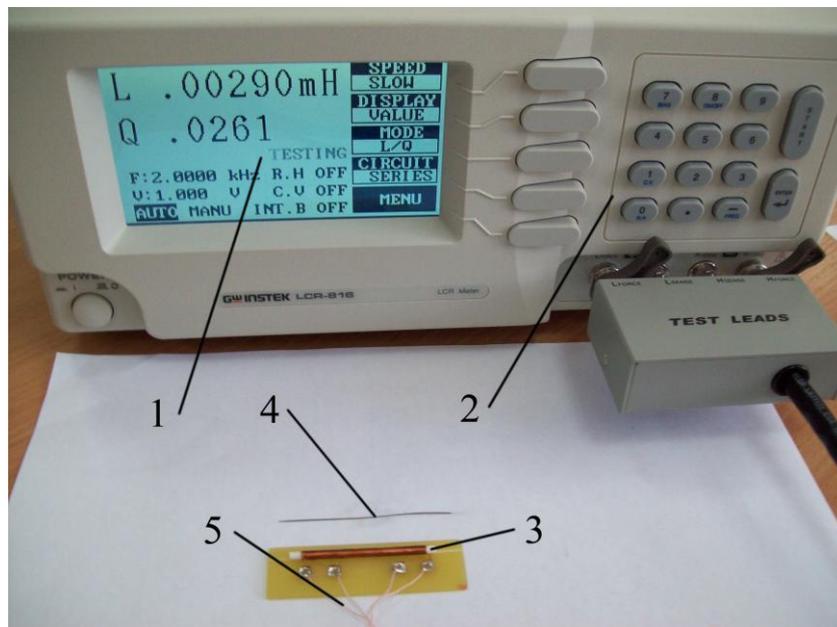


Рисунок 3.21 – Стенд для определения индуктивным методом характеристик МП.

1 – дисплей считывания данных L ; C ; R ДФЗ; 2 – программатор; 3 – каркас для МП ДФЗ; 4 – МП стержневого типа из АмС; 5 – кабель ДФЗ

являются аттестационные индуктивности и феррозонды (рисунок 3.23; 3.24) Для обеспечения достоверности результатов измерений аттестовывались МП функциональным блоком стендов различных форм (рисунок 3.24) с проведением сопоставительного анализа их характеристик. Результаты измерений представлены на рисунках 3.25; 3.26.

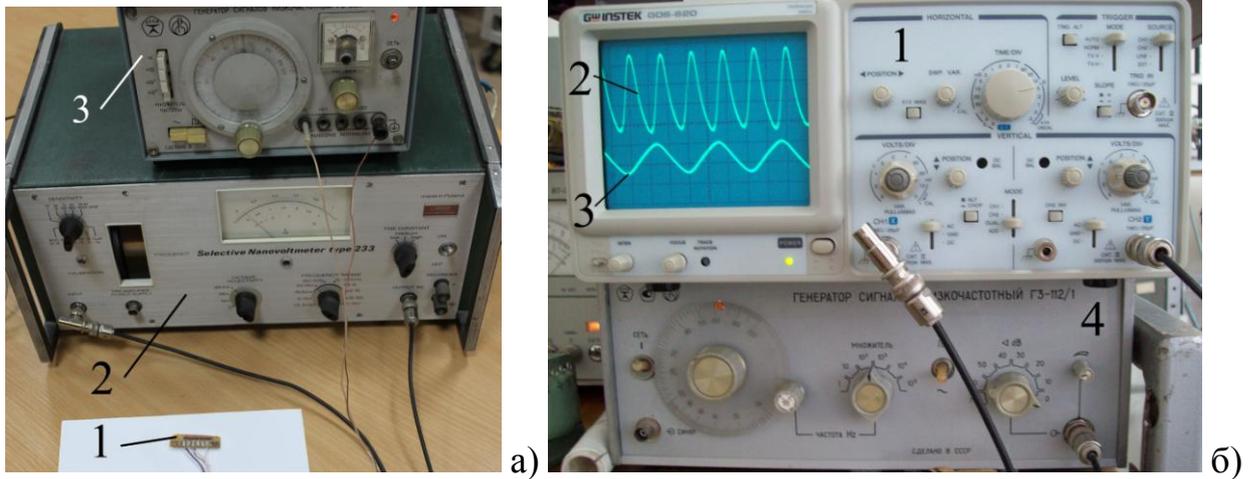


Рисунок 3.22 – Стенды для определения феррозондовым методом характеристик МП.

(а) : 1 – аттестационный ДФЗ; 2 – селективный вольтметр; 3 – генератор возбуждения аттестационного ДФЗ. (б): 1 – двухлучевой осциллограф; 2 – сигнал $2f_{\text{возб}}$ СО ДФЗ; 3 – сигнал $f_{\text{возб}}$ ОВ ДФЗ; 4 – генератор возбуждения аттестационного ДФЗ

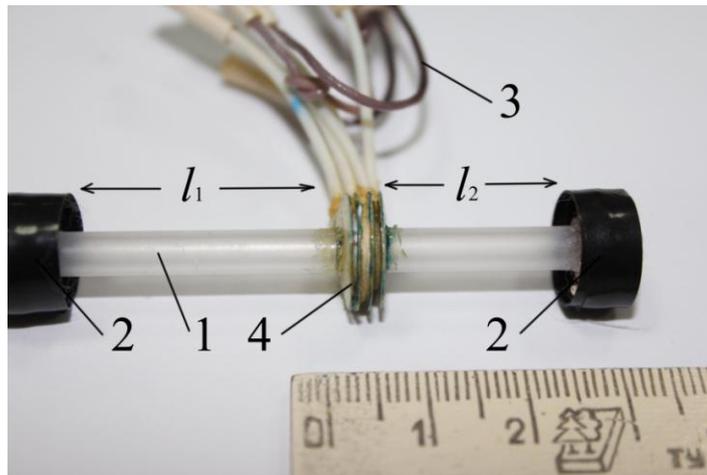


Рисунок 3.23 – Аттестационный модуль для определения характеристик МП феррозондовым методом. 1 – каркас для размещения аттестуемых МП; 2 – опоры каркаса; 3 – кабель аттестационного ФЗ; 4 – аттестационный ФЗ; l_1 ; l_2 – диапазон линейных перемещений аттестационного ФЗ

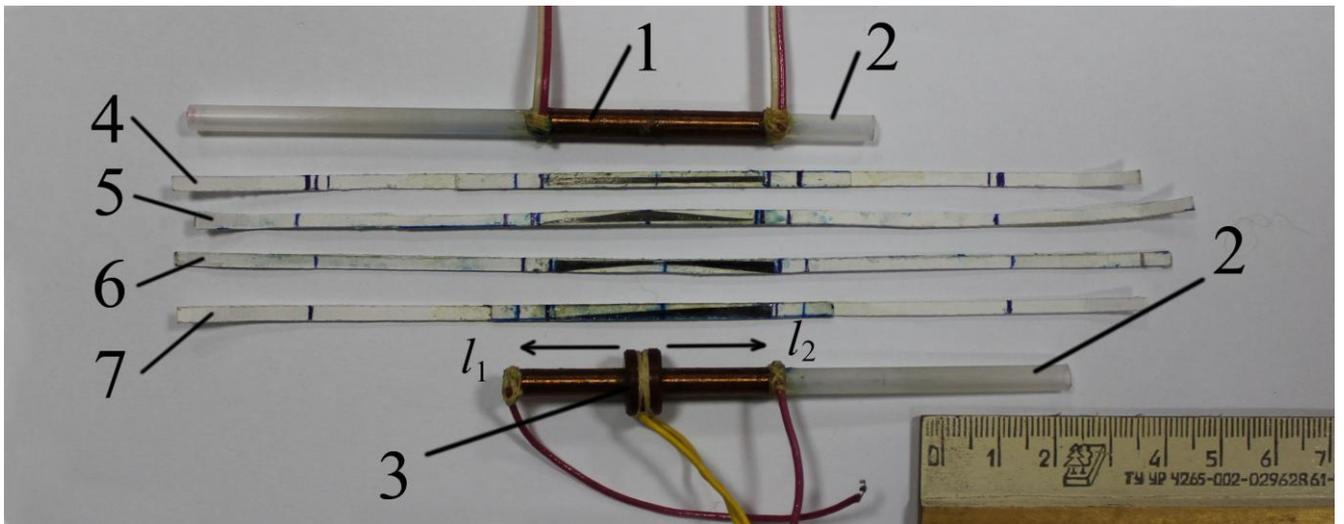


Рисунок 3.24 – Определение характеристик тонкопленочных МП из АмС
комбинированным методом:

1 – аттестационная индуктивность; 2 – каркас для размещения аттестуемых МП; 3 – аттестационный ДФЗ; 4 – равномерный по ширине сердечник; 5– уменьшение ширины на полюсах сердечника; 6– уменьшение ширины в центре сердечника; 6 – треугольный сердечник; l_1 ; l_2 – диапазон перемещений аттестационного ДФЗ

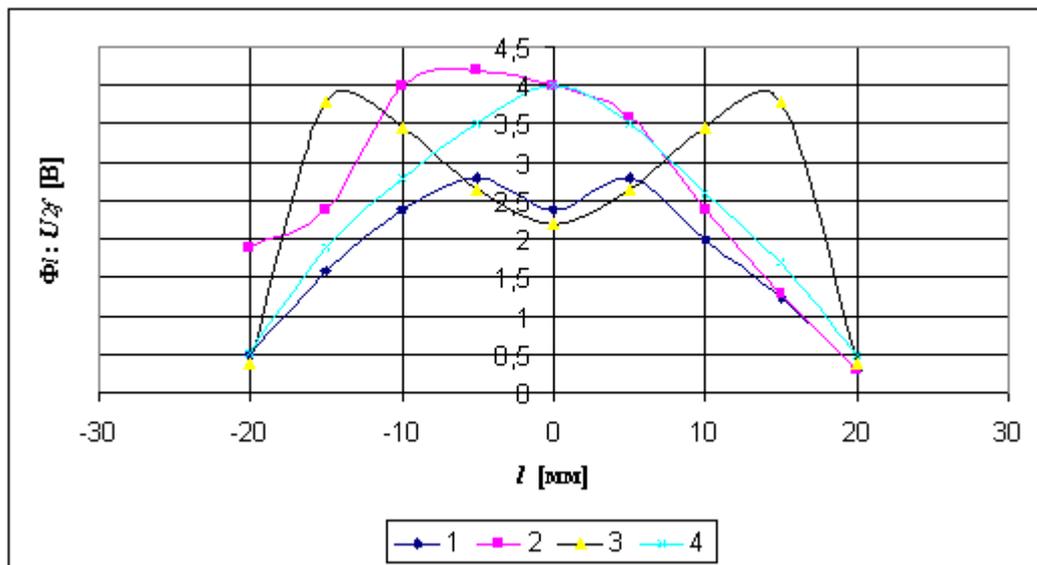


Рисунок 3.25 – Результаты аттестации феррозондовым методом МП различной формы согласно рисунку 3.24.

1 – равномерный по ширине сердечник; 2 – треугольный сердечник; 3– уменьшение ширины на полюсах сердечника; 4 – уменьшение ширины в центре сердечника

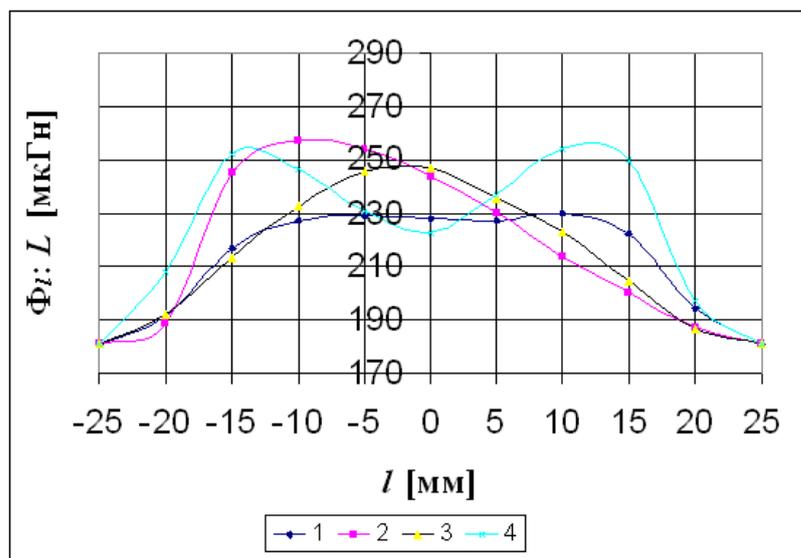


Рисунок 3.26– Результаты аттестации индуктивным методом МП различной формы, согласно рисунку 3.24.

1 – равномерный по ширине сердечник; 2 – треугольный сердечник; 3– уменьшение ширины на полюсах сердечника; 4 –уменьшение ширины в центре сердечника

ВЫВОДЫ

1. С целью сохранения у МП магнитных свойств, принадлежащих их сертифицированным исходным материалам АмС, необходимо применение предложенного способа изготовления и контроля ММС.

2. Изготавливать ММС из АмС по предложенному способу следует для обеспечения требуемой чистоты обрабатываемых поверхностей и расчетных размеров МП.

3. Для идентификации магнитных параметров ММС из АмС, критерий $a=b$ математической модели определен как достаточный, что подтверждает её адекватность по соответствию результатам метрологических исследований феррозондовых преобразователей.

4. Цель обеспечения заданных метрологических характеристик ФЗ при расширении функциональных возможностей магнитометров: полемер; ГрМ; ДФЗ; мультисенсорных, достигается на основе идентификации их ММС.

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИИ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПЛОСКИМИ МАГНИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ

Как следует из таблицы 1.3 главы 1, ФЗ является прецизионным многофункциональным датчиком магнитных воздействий. Поэтому на основе ФЗ целесообразно создавать как универсальные, так и специализированные высокоточные приборы, аттестационные стенды и измерительные технологии для применения в современных и перспективных областях науки и техники.

Функция преобразования ДФЗ представляет его как полемер (ПМ) – датчик, полностью определяющий параметры вектора измеряемого однородного поля: модуль; линию действия; направление (знак) [51; 52]. Вместе с тем, структура измерительной системы ДФЗ (рисунок 1.11 Глава 1) позволяет исключить вектор однородного поля H_0 из измеряемых параметров. Для этого необходимо обеспечить встречное направление магнитных H_0 потоков в полуэлементах сигнальной обмотки и ДФЗ приобретает свойства градиентомера (ГрМ) – датчика неоднородности магнитного поля [5]. В ДФЗ классического исполнения с параллельными полуэлементами, (рисунок 1.11 в) осуществить преобразование полемера в градиентомер без изменения конструкции датчика невозможно. Препятствием преобразования полемера в градиентомер также являются существенные отличия: электромагнитных параметров ОВ и СО ДФЗ; схем возбуждения и преобразования информационного сигнала; технологий изготовления, в частности, юстировки чувствительных элементов (ЧЭ) дифференциальных ПМ и ГрМ.

Совмещение и переключение функций ПМ и ГрМ в едином конструктивном исполнении магнитометра существенно расширяют возможности его применения, в частности, в комплексных (таблица 1.1) измерительных технологиях дефектоскопии (ГрМ) и геомагнитных исследований (ПМ).

Такого рода комплексные измерительные технологии традиционно реализуются методом технически сложного объединения мультисенсорных ГрМ и ПМ структур в общем модуле магнитометра.

В рамках данной диссертационной работы были получены практические результаты по созданию измерительной структуры ДФЗ, обеспечивающей совмещение и переключение функций ПМ и ГрМ в едином конструктивном исполнении [50; 90].

4.1. Однокомпонентный феррозондовый магнитометр с функциями полемера и градиентомера

Общим условием задач магнитных измерений в геопространстве является наличие магнитного поля Земли (МПЗ). Для наземных аэро- и глубинных измерений МПЗ представляется как однородное поле стабильной направленности с интенсивностью 50 мкТл и определяется как вектор НМПЗ – нормального МПЗ. Исходя из условия наличия НМПЗ основные задачи магнитометрии сводятся к обнаружению и измерению параметров исследуемых магнитных воздействий как вектора МА магнитных аномалий НМПЗ [96]. Взаимодействие силовых линий МА и НМПЗ формирует в области МА неоднородное магнитное поле, параметры которого определяются методами тензометрии – измерениями градиентов аномальных магнитных воздействий [53].

Следовательно, для решения задач магнитных измерений в геопространстве необходимо применять два типа датчиков: полемеры – для измерения параметров однородных полей и градиентомеры – для неоднородных [52].

Постановка задачи: проведение исследований с целью повышения чувствительности и расширения функциональных возможностей ДФЗ магнетометра за счет переключения режимов работы «полемер-градиентомер».

Поставленная задача решается тем, что ФЗ датчик представляет собой дифференциальный феррозондовый магнитометр, состоящий из двух полуэлементов с идентичными электромагнитными параметрами [84]. Полуэлементы выполнены из ферромагнитных тонкопленочных стержней,

размещенных внутри бифилярно намотанных в один ряд обмоток. Обмотки состоят из четырех секций, две из которых соединены согласно, а две встречно. При этом полуэлементы разнесены на заданное расстояние, а их обмотки подключены к источнику стабильного переменного тока и к схеме обработки информационного сигнала. Согласно результатам исследований, два вывода обмоток дифференциального магнитометра соединены с общим проводом электронной схемы, а два других подключены к четырем одновременно переключающимся коммутаторам с четными и нечетными номерами. Причем замкнутое и разомкнутое состояние четных и нечетных коммутаторов инверсно, что обеспечивает возможность одновременного переключения выводов обмоток дифференциального магнитометра со схемы возбуждения на схему обработки информационного сигнала и обратно. При этом управление переключением коммутаторов осуществляется микроконтроллером схемы обработки информационного сигнала, состоящей из последовательно соединенных разделительного конденсатора, избирательного фильтра, амплитудного детектора, микроконтроллера и индикатора.

Функциональная схема универсального магнитометра представлена на рисунке 4.1.

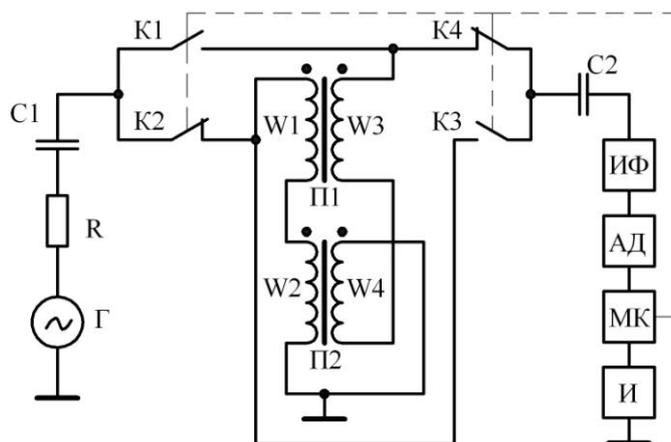


Рисунок 4.1 – Функциональная схема магнитометра с возможностью переключения режимов работы «полемер-градиентомер»

Предложенное устройство содержит генератор Γ возбуждения феррозондового магнитометра, подключенный посредством R и $C1$ элементов к

его обмоткам $W1-W4$ через коммутаторы $K1-K4$, управляемые микроконтроллером. Обмотки $W1, W3$ и $W2, W4$ охватывают соответствующие ферромагнитные сердечники и в совокупности с ними образуют полуэлементы $\Pi1, \Pi2$ дифференциального феррозондового магнитометра. Коммутатор $K1$ соединен со встречно включенными обмотками $W3$ и $W4$, а также с коммутатором $K4$. Коммутатор $K2$ соединен с коммутатором $K3$, а также с обмотками $W1$ и $W2$, включенными согласно. Выходы коммутаторов $K3$ и $K4$ соединены со входом избирательного фильтра 3 через разделительный конденсатор $C2$. Избирательный фильтр ИФ подключен ко входу цепи, состоящей из амплитудного детектора АД, микроконтроллера МК, индикатора И.

Устройство работает следующим образом. Идентичность электромагнитных параметров полуэлементов $\Pi1, \Pi2$ дифференциального феррозонда обеспечивает равенство токов его возбуждения в режимах градиентомера и полемера (определение модуля и направленности вектора магнитного воздействия). При этом режим полемера отличается большей чувствительностью. Режимы задаются вариантом подключения обмоток: $W1, W2$ либо $W3, W4$ к цепи G, R, C стабильного тока возбуждения. Переключение режимов осуществляется микроконтроллером МК, управляющим коммутаторами $K1-K4$ попарно синхронно: $K2, K4$ замкнуты, если $K1, K3$ разомкнуты; $K2, K4$ разомкнуты, если $K1, K3$ замкнуты. При этом также изменяются варианты подключения обмоток: $W1, W2$ либо $W3, W4$ ко входу схемы обработки информационного сигнала через $C2$. Вне зависимости от режима, информативным параметром магнитометра является уровень сигнала удвоенной частоты возбуждения, выделяемой фильтром ИФ. С выхода амплитудного детектора АД уровень информационного сигнала считывается микроконтроллером МК и результат измерения отображается на индикаторе И. Для подготовки к измерениям магнитометр включается в режиме полемера в условиях нормального магнитного поля Земли (НМПЗ). Значение максимума при ориентации его оси чувствительности коллинеарно вектору НМПЗ принимается в МК за «начало шкалы» для последующих измерений.

Искажение НМПЗ, в частности наличие магнитной аномалии вызывает отклонение показаний индикатора И полемера от числа, принятого за начало шкалы. После обнаружения магнитной аномалии магнитометр переключают в режим градиентомера. При этом НМПЗ (однородное магнитное поле) как фактор влияющий на измерительную систему градиентомера исключается, что обеспечивает однозначное определение местоположения источника аномального магнитного воздействия.

Внешний вид разработанного устройства представлен на рисунке 4.2. Области применения разработанного устройства согласно таблице 1.1 (Гл.1):

- метрологические задачи геомагнетизма;
- исследование техногенных магнитных явлений;
- контроль динамических объектов.

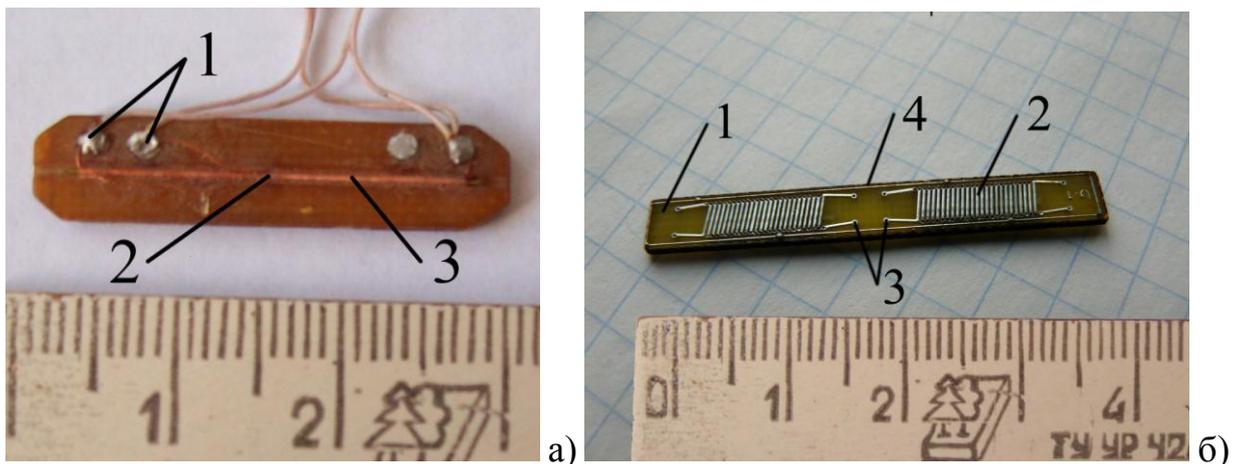


Рисунок 4.2 – Внешний вид датчиков с возможностью переключения режимов работы «полемер-градиентомер».

(а) – ДФЗ с обмотками ОВ и СО соленоидного типа: 1 – внешние выводы ОВ и СО; 2 – плоскость экваториального сечения ДФЗ; 3 – бифилярные обмотки ОВ и СО; (б) – ДФЗ с интегральными ОВ и СО: 1 – платформа ДФЗ; 2 – полуэлемент ДФЗ с интегральными ОВ и СО; 3 – клеммы для переключения режимов «полемер-градиентомер»

Устройство по рисунку 4.2 способно измерять как постоянные, так и знакопеременные магнитные воздействия, то есть является универсальным

средством магнитометрии. Дополнительные функциональные возможности разработанного ДФЗ получены за счет идентичности электромагнитных параметров переключаемых ОВ и СО. Идентичность полуэлементов ДФЗ обеспечивается как результат использования научных положений 2,3 данной диссертационной работы.

4.2. Феррозондовый датчик постоянных и переменных магнитных полей

Задачей исследований является расширение функциональных возможностей ФЗ датчика, предназначенного для обнаружения и измерения параметров как постоянных, так и знакопеременных магнитных аномалий НМПЗ.

Задача решается тем, что устройство для определения параметров магнитных аномалий содержит дифференциальный феррозондовый градиентомер, состоящий из двух полуэлементов. Ось чувствительности полуэлементов является общей и ориентирована по направлению вектора напряженности измеряемого магнитного поля. Полуэлементы разнесены на заданное расстояние Δr , а уровень информационного сигнала в схеме его обработки определяется количеством витков и длиной полуэлементов, расстоянием Δr и удаленностью градиентомера от источника магнитной аномалии. Согласно результатам исследований, в схеме обработки информационного сигнала выход избирательного фильтра удвоенной частоты возбуждения соединен, с возможностью переключения при помощи коммутатора, со входом одного из двух независимых каналов преобразования: постоянных и знакопеременных магнитных аномалий. При этом выход каждого канала соединен с микроконтроллером, к которому подключен индикатор для отображения величины и вида магнитной аномалии, а так же усилитель тока стабилизированной частоты возбуждения феррозондового градиентомера.

ФЗ датчик постоянных и переменных полей представлен на рисунках 4.3 - 4.5. Предложенное устройство содержит феррозондовый градиентомер 1 для обнаружения постоянных магнитных аномалий 2 и знакопеременных, в частности

в виде проводника 3 с переменным током $\sim I$ частоты 50 Гц. Магнитная аномалия 2 является источником постоянного \ominus магнитного поля напряженности $=H1$, а проводник 3 с током $\sim I$ - источником знакопеременного \odot магнитного поля напряженности $\sim H2$, причем режимы измерения определяются положением переключателя П. Измеряемые параметры \ominus , \odot воспринимаются чувствительным элементом градиентомера – феррозондовым дифференциальным датчиком ДФЗ, который запитывается от усилителя тока УТ возбуждения стабилизированной частоты f .

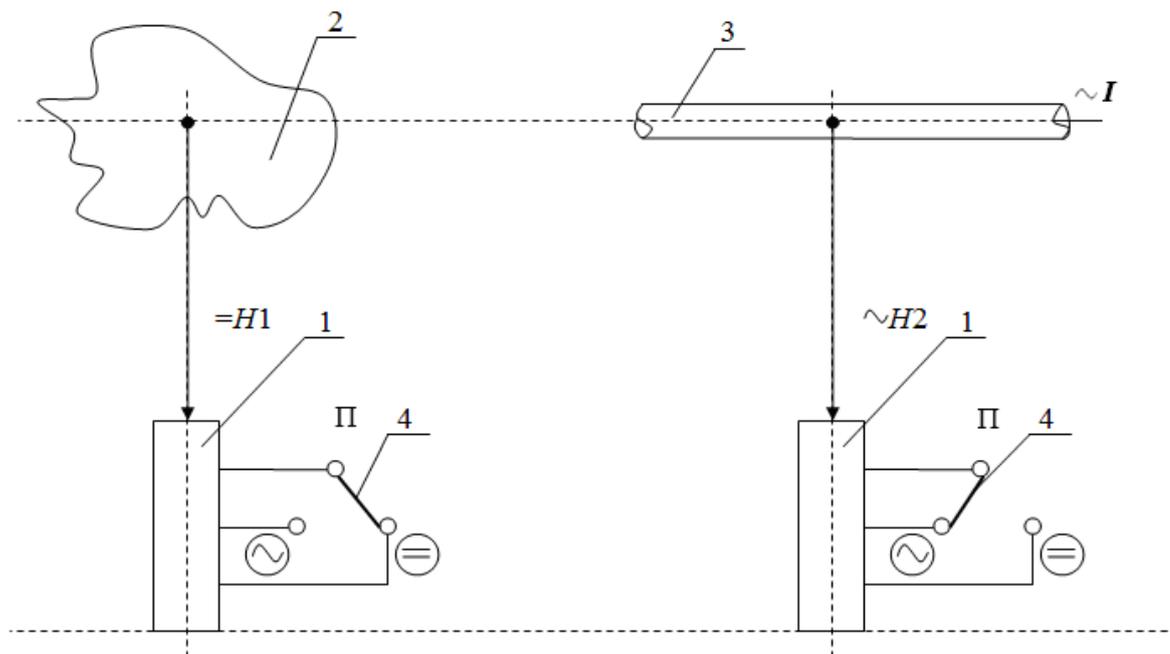


Рисунок 4.3 – Режимы измерения параметров постоянных и знакопеременных магнитных полей

Информационный сигнал датчика ДФЗ удвоенной f – частоты воспринимается избирательным фильтром ИФ1 частоты $2f$. В режиме измерения \ominus , задаваемом переключателем П, уровень сигнала $2f$ поступает на вход цепи последовательно соединенных первого амплитудного детектора АД1, фильтра низких частот ФНЧ1 граничной частоты $2f$ и микроконтроллера МК. В режиме измерения \odot , задаваемом переключателем П, уровень сигнала $2f$ поступает на вход

избирательного фильтра ИФ2 частоты 50 Гц, в котором выделяется уровень модулирующего сигнала частоты 50 Гц, пропорциональный $\sim H_2$. Данный сигнал поступает на вход цепи последовательно соединенных второго амплитудного детектора АД2, фильтра низких частот ФНЧ2 граничной частоты 50 Гц и микроконтроллера МК. К микроконтроллеру МК, как к источнику стабильной частоты f подключен усилитель УТ тока возбуждения, а так же индикатор И, отображающий результаты измерений.

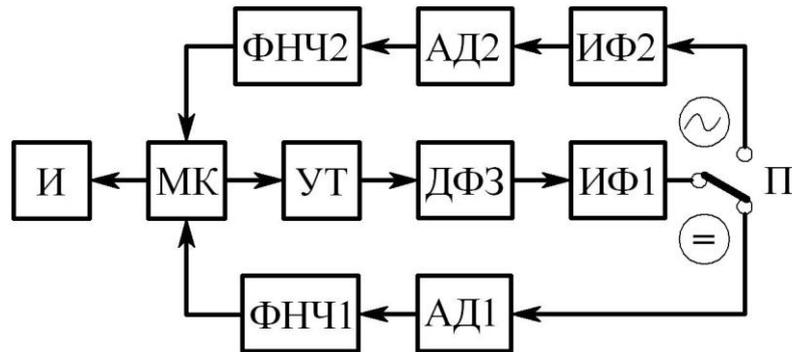


Рисунок 4.4 – Функциональная схема магнитометра

Универсальный магнитометр работает следующим образом.

Переключатель П устанавливается в положение \ominus , что в отсутствии магнитных аномалий приводит измеренное феррозондовым датчиком ДФЗ значение в микроконтроллере МК и на индикаторе И к минимуму. Данное значение принимается за нулевой уровень магнитных аномалий. Затем переключатель П устанавливается в положение \sim для подтверждения нулевого уровня знакопеременных магнитных воздействий. Величина магнитной аномалии характеризуется разностью текущего показания индикатора И и принятого за нулевой уровень. Разделение посредством переключателя П измерительной информации феррозондового датчика ДФЗ по каналам \ominus и \sim позволяет определить по показаниям индикатора И $\sim H_1$ и $\sim H_2$ как компоненты их суммарного магнитного воздействия на градиентомер 1.

Внешний вид разработанного устройства представлен на рисунке 4.5.

Области применения разработанного устройства согласно таблице 1.1 (Гл.1):

– исследование техногенных магнитных явлений;

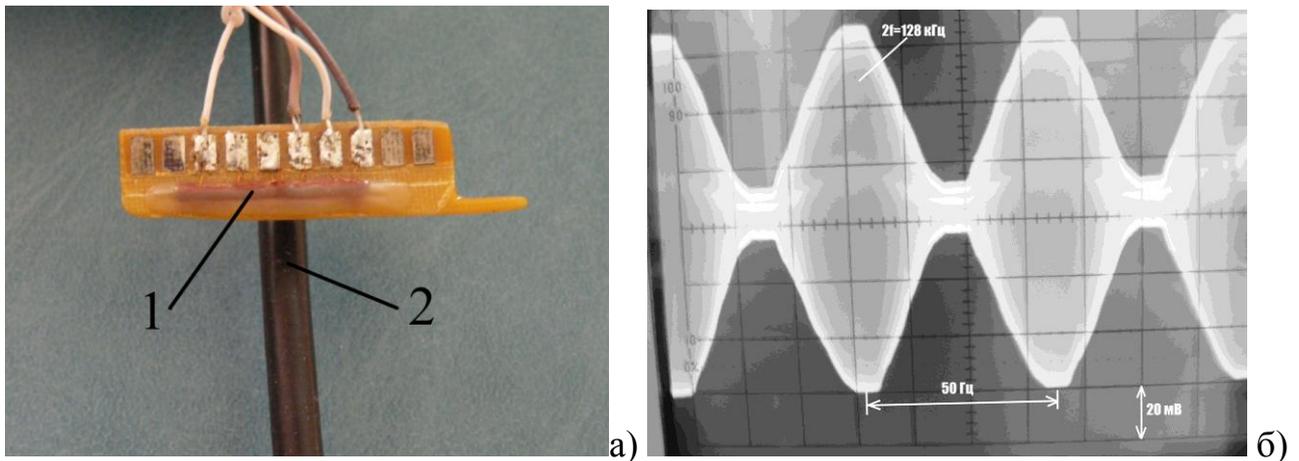


Рисунок 4.5 – ГрМ в режиме измерения переменного ~ 50 Гц магнитного поля.
 (а) – макет измерительной технологии; (б) – осциллограмма сигнала СО ГрМ;
 1 – ГрМ; 2- провод с переменным током 50 Гц

4.3. Комплексный прибор для обнаружения подземных магнитных аномалий

Постановка задачи: проведение исследований с целью повышения чувствительности и улучшения направленности ФЗ магнитометра.

Для определения параметров подземных магнитных аномалий (МА) необходимо: повышение точности, достоверности и быстродействия измерений за счет оптимизации конструкции феррозондового преобразователя, упрощения измерительного процесса и применения электронного индикатора вертикали.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в устройстве [85] для обнаружения подземных магнитных аномалий [54], состоящего из ориентированного вертикально феррозондового дифференциального датчика с обмоткой возбуждения, сигнальной обмоткой и дополнительной обмоткой компенсации, соединенных с электронной схемой преобразователя, построенной на ферросодержащих элементах, согласно результатам исследований ДФЗ датчик расположен в общем корпусе с платой электронного преобразователя, содержащей микроконтроллер с индикатором, жидкостный гравитационный коммутатор, блок питания и регулятор тока. Причем ДФЗ датчик состоит из двух соосно расположенных полуэлементов, разнесенных на заданное расстояние, определяющее чувствительность датчика, охваченных общей для обоих

полуэлементов обмоткой компенсации, магнитный поток которой задают постоянным в области измерений, для которой $Z_T = const$ при помощи блока питания и регулятора тока, что компенсирует суммарное магнитное воздействие поля Z_T и поля ферросодержащих компонентов электронного преобразователя. При этом показание индикатора принимают за первоначально установленные данные, причем жидкостной гравитационный коммутатор в своем вертикальном положении задает моменты измерений, результаты которых последовательно выводятся на цифровой индикатор, где по различию данных выявляют наличие магнитной аномалии, а ее точное местоположение определяют по наибольшему отклонению данных от первоначально установленных, причем Z_T – вертикальная составляющая магнитного поля Земли [57; 78].

Особенность создаваемого измерительного устройства состоит в том, что основное и постоянно действующее фоновое магнитное воздействие Z_T – вертикальная составляющая поля Земли, является константой $Z_T = const$ на Земной поверхности радиусом в 10 километров. Источником постоянно действующего фонового магнитного воздействия является также размещенная в корпусе феррозондового датчика плата электронного преобразователя, состоящая в общем случае из ферросодержащих компонентов. Неизменный и постоянно действующий уровень суммарного фонового магнитного воздействия дает возможность компенсации данного воздействия постоянным током, уровень которого в компенсационной обмотке (ОК) феррозонда устанавливается постоянным в вертикальном положении прибора и в заданном 10 км радиусе измерений. Компенсация суммарного фонового магнитного воздействия также дает возможность размещения феррозонда и электронного преобразователя в общем корпусе без уменьшения чувствительности прибора. Расстояние, между соосно расположенными полуэлементами ДФЗ позволяет организовать общую для них обмотку компенсации. Действие на феррозонд только вертикальной составляющей магнитного поля Земли (МПЗ) обеспечивается электронным индикатором вертикали, выполненным в виде немагнитного жидкостного гравитационного коммутатора (ЖГК). Он задает для электронной схемы моменты

измерения, соответствующие своему строго вертикальному положению с отклонением не более $1,0^{\circ}$.

Комплексный прибор представлен чертежом феррозондового датчика (рисунок 4.6) и функциональной схемой устройства (рисунок 4.7).

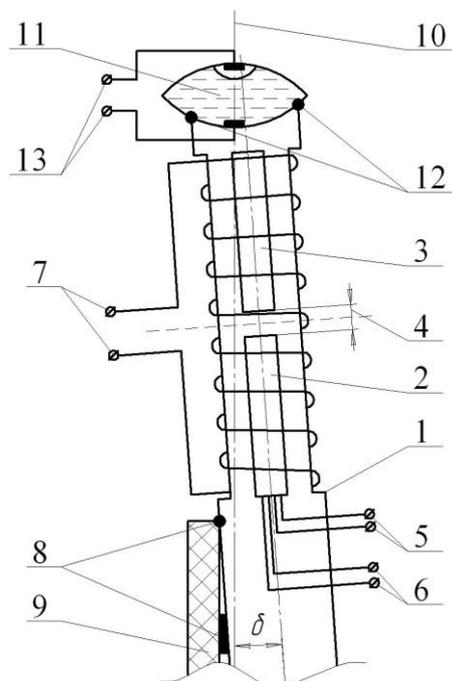


Рисунок 4.6 – Чертеж ФЗ датчика комплексного прибора для обнаружения подземных магнитных аномалий

Датчик по рисунку 4.6 состоит из корпуса 1 на котором соосно закреплены идентичные полуэлементы 2,3 дифференциального стержневого феррозонда (ФЗ), разнесенные на заданное расстояние 4 и состоящие каждый из ферромагнитного сердечника с полуобмотками, образующими обмотку (ОВ) возбуждения 5 и (СО) сигнала 6, причем полуобмотки ОВ электрически соединены встречно по магнитному потоку, а полуобмотки СО – согласно. При этом оба полуэлемента дифференциального феррозонда охвачены общей обмоткой ОК компенсации 7. На корпусе 1 при помощи неразъемных соединений 8 закреплена плата электронного преобразователя 9, состоящая в общем случае из ферросодержащих компонентов, что в совокупности смещает физическую ось чувствительности дифференциального феррозонда относительно вертикали 10 на угол δ случайной величины. На корпусе 1 также размещена капсула 11 ЖГК, жесткое крепление 12

которой к корпусу производится в процессе настройки прибора - по минимальному значению информационного сигнала феррозонда при установлении оптимального значения тока обмотки ОК компенсации в вертикальном положении ЖГК. Клеммы электродов 13 ЖГК разомкнуты в его вертикальном положении, так как пузырек воздуха изолирует верхний электрод от токопроводящей жидкости, а, следовательно, от нижнего электрода.

Функциональная схема устройства по рисунку 4.7 состоит из генератора Г возбуждения феррозонда ФЗ с обмотками: возбуждения ОВ, сигнальной СО и компенсации ОК. СО феррозонда подключена ко входу измерительного ИП преобразователя, формирующего на выходе уровень напряжения, пропорциональный уровню информационного сигнала СО (уровню U_{2f} второй гармонической составляющей U_f сигнала возбуждения). Уровень напряжения с выхода ИП 16 подается на вход АЦП, который формирует код, соответствующий этому уровню в момент совпадения оси ЖГК с вертикалью 10. Данное совпадение приводит к срабатыванию компаратора К, сигнал которого является разрешающим для формирования кода АЦП, который как результат измерения ФЗ-зондом магнитного воздействия отображается индикатором И. Функциональные блоки АЦП, К являются частью структуры микроконтроллера МК, выполняющего функции тактирования, управления индикацией и комплексным прибором в целом. Блок БП питания устройства является источником энергии для всех активных функциональных блоков комплексного прибора, а так же выполняет функцию источника для цепочки РТ - регулятора тока в обмотке компенсации ОК феррозонда. Все функциональные блоки рисунок 4.7 конструктивно объединены в общем корпусе прибора.

Настройка электронной части комплексного прибора состоит в установлении тока в ОК, посредством регулирования РТ, обеспечивающего наименьший уровень информационного сигнала СО ФЗ в вертикальном положении ЖГК. При этом также компенсируется воздействие на ФЗ ферросодержащих компонентов электронного преобразователя 9.

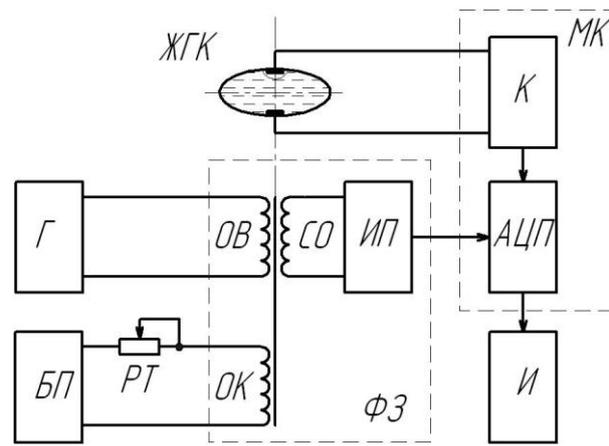


Рисунок 4.7 – Функциональная схема комплексного прибора для обнаружения подземных магнитных аномалий

Работа устройства заключается в следующем. Феррозондовый датчик ФЗ устанавливается в вертикальное положение вблизи поверхности Земли на участке с наименьшим значением магнитных аномалий. В данном положении измерительная часть ФЗ воспринимает только вертикальную Z_T составляющую нормального магнитного поля Земли (НМПЗ) и постоянно действующее магнитное поле ферросодержащих элементов (МПФЭ) электронного преобразователя (суммарное фоновое магнитное воздействие СФМВ). Регулятор тока устанавливается оператором в положение, при котором индикатор показывает наименьшее значение, что означает компенсацию суммарного СФМВ фонового магнитного воздействия магнитным полем ОК, образованным током цепи БП – РТ – ОК. Измерение возможно только в вертикальном 10 положении ЖГК, когда один из его контактов изолирован от токопроводящей жидкости пузырьком воздуха, что приводит к срабатыванию компаратора, инициирующего своим выходным сигналом начало цикла АЦП-преобразования и индикации, длительность которого составляет 3 – 10 секунд. Полученное наименьшее значение, отображенное на индикаторе, является в случае НМПЗ константой в радиусе 10 км от места измерения. Оператор начинает перемещение в направлении возможного залегания под землей магнитной аномалии (МА). При этом, каждое последующее измерение подтверждается наличием данных на индикаторе. Если данные отсутствуют (не вертикальное положение ЖГК 11),

оператору необходимо совершить прибором эволюции вблизи его вертикального положения 10 до появления на индикаторе следующего результата измерения. Если очередной результат измерения отличается от предыдущего, соответствующего уровню суммарного СФМВ фонового магнитного воздействия, это означает, что ФЗ попал в зону действия поля МА. Для определения точного местоположения МА оператору необходимо найти оптимальное направление движения в зоне МА, которое соответствует дальнейшему отклонению данных на индикаторе от значения, эквивалентного СФМВ. Точное местоположение МА под землей соответствует максимальному отклонению данных на индикаторе от значения эквивалентного СФМВ.

ЖГК является прецизионным исполнительным элементом магнитометра, исключаяющим в условиях НМПЗ воздействие горизонтальной его составляющей на ОЧ ФМ, что обеспечивает в момент измерения строгое равенство поля компенсации ФМ значению $Z=const$, т.е. обнаружение МА на уровне порога чувствительности ФМ.

Таким образом, сочетание в разработанном комплексном приборе: компенсационной схемы ФМ, прецизионного исполнительного элемента ЖГК и метода, основанного на свойстве НМПЗ $Z=const$ в области заданного радиуса, обеспечивает совокупность позитивных, по сравнению с аналогами, функциональных признаков:

- измерение производится в момент 100-процентной компенсации ФМ, т.е. в режиме его наибольшей чувствительности к МА;

- уровень поля компенсации ФМ, эквивалентный $Z=const$, остается в цикле измерений неизменным, что повышает стабильность, быстродействие, технологичность измерительного процесса;

- совмещение по вертикали осей чувствительности прецизионных ФМ и ЖГК с погрешностью не хуже 12 угл. мин. обеспечивает минимизацию радиуса обнаружения подземной МА.

Создан макетный образец комплексного прибора, проведены стендовые испытания по обнаружению МА, подтверждающие устойчивость результатов

измерений в условиях вибрационных помех, а также высокую чувствительность компенсационной схемы феррозондового магнитометра.

Результаты исследований

1. Разработан феррозондовый магнитометрический прибор, обладающий свойством идентификации параметров, поскольку среди металлосодержащих предметов чувствителен только к ферромагнетикам.

2. Диаграмма направленности феррозондового магнитометра в сочетании с жидкостным прецизионным индикатором вертикали обеспечивает повышенную точность определения местоположения скрытого подземного объекта.

3. Совмещение в моменты измерений оси чувствительности магнитометрического датчика с вертикалью обеспечивает его компенсацию полем неизменного уровня, что в цикле поисковых операций повышает стабильность, быстродействие, технологичность измерительного процесса.

Таким образом, разработанный комплексный прибор представляет собой конструктивно целостный, малогабаритный переносной модуль, что повышает достоверность, удобство и производительность измерений, в целом – совершенствует измерительную технологию поиска подземных магнитных аномалий.

Области применения разработанного устройства согласно таблице 1.1. (Гл.1):

- метрологические задачи геомагнетизма;
- исследование техногенных магнитных явлений.

4.4. Многофункциональный трехкомпонентный феррозондовый магнитометр

Магниточувствительные преобразователи феррозондового типа являются типичными представителями класса «*smart sensor*», то есть выполняют в измерительных приборах и системах функции интеллектуальных датчиков (ИД) [52]. Информационный сигнал феррозонда (ФЗ) содержит 4 информативных

составляющих: амплитуду U_{2f} ; фазу; частоту $2f$; знак (+), (-) вектора магнитного воздействия. Следовательно, ФЗ как чувствительный элемент (ЧЭ) уже представляет собой многофункциональный преобразователь. Расширение спектра функций ФЗ для решения комплексных задач – алгоритмических и вычислительных – обеспечивается организацией мультисенсорных структур феррозондовых ИД, когда два и более ФЗ, размещенные в общем корпусе, образуют единый измерительный модуль.

Многофункциональным является 3-х компонентный ФЗ ИД, в котором оси чувствительности трёх ЧЭ ортогональны [32]. В частности, функция вычисления модуля полного вектора \vec{T} магнитного воздействия нормального поля Земли (НМПЗ), решается по формуле:

$$|\vec{T}| = \sqrt{|\vec{X}|^2 + |\vec{Y}|^2 + |\vec{Z}|^2}, \quad (4.1)$$

где \vec{X} , \vec{Y} , \vec{Z} – ортогональные составляющие вектора \vec{T} .

Функция выполняется микропроцессорным (МП) вычислителем в архитектуре ИД вне зависимости от ориентации модуля трехкомпонентного ФЗ в пространстве.

Функция вычисления модуля $|\vec{A}|$ – аномалии вектора НМПЗ решается трёхкомпонентным ФЗ по формуле:

$$|\vec{A}| = |\vec{T}| - |\vec{T}_0|, \quad (4.2)$$

где $|\vec{T}_0| = const$ – эквивалент, соответствующий уровню НМПЗ, содержащийся в памяти МП; $|\vec{T}|$ – текущее значение измеряемого магнитного поля.

Вектор \vec{A} раскладывается ортогональной системой осей чувствительности датчика на составляющие \vec{X} , \vec{Y} , \vec{Z} , что деформирует правильную по рисунку 4.8 пространственную диаграмму направленности 3-х компонентного ФЗ в однородном магнитном поле \vec{T}_0 .

Деформация диаграммы направленности датчика [16] затрудняет определение направления вектора \vec{A} , так как требует заданных вспомогательных

угловых перемещений магнитометрического модуля ФЗ относительно начала координат O по рисунку 4.8. Задача определения направления вектора магнитной аномалии \vec{A} решается трехкомпонентным ФЗ ИД с введением дополнительной функции [17; 48] – переключением в режим измерения осевого чувствительного элемента \vec{Z} по рисунку 4.8 без опроса микропроцессорным вычислителем элементов \vec{X} , \vec{Y} .

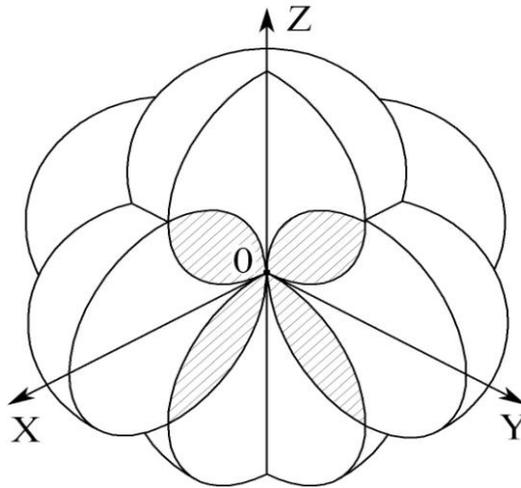


Рисунок 4.8 – Объемная диаграмма направленности 3-х компонентного ФЗ

Данная совокупность функций ФЗ ИД реализована в автономном универсальном магнитометре [30] по рисунку 4.9. Это прибор, предназначенный для контроля магнитных полей малого ≤ 70 мкТл уровня. Особенностью прибора является возможность обнаружения слабых магнитных аномалий на фоне больших и постоянно действующих магнитных полей, в частности, на фоне НМПЗ. Данная возможность обеспечивается алгоритмической микропроцессорной обработкой параметров (рисунку 4.10), измеренных 3-х компонентным феррозондовым датчиком, а так же работой прибора в 2-х режимах: «Контроль» и «Пеленг».

Прибор предназначен для эксплуатации как в стационарном, так и в переносном полевом вариантах. Каких-либо дополнительных внешних соединений не требуется. Для начала измерений тумблер режимов работы переводится в положение «КОНТРОЛЬ», тумблер «ВКЛ.» - в верхнее положение. При этом начинается подготовка к работе микропроцессора и электронной схемы,

которая продолжается 30 сек. По окончании подготовки, что определяется устойчивостью показаний индикатора, капсула датчика приводится оператором в

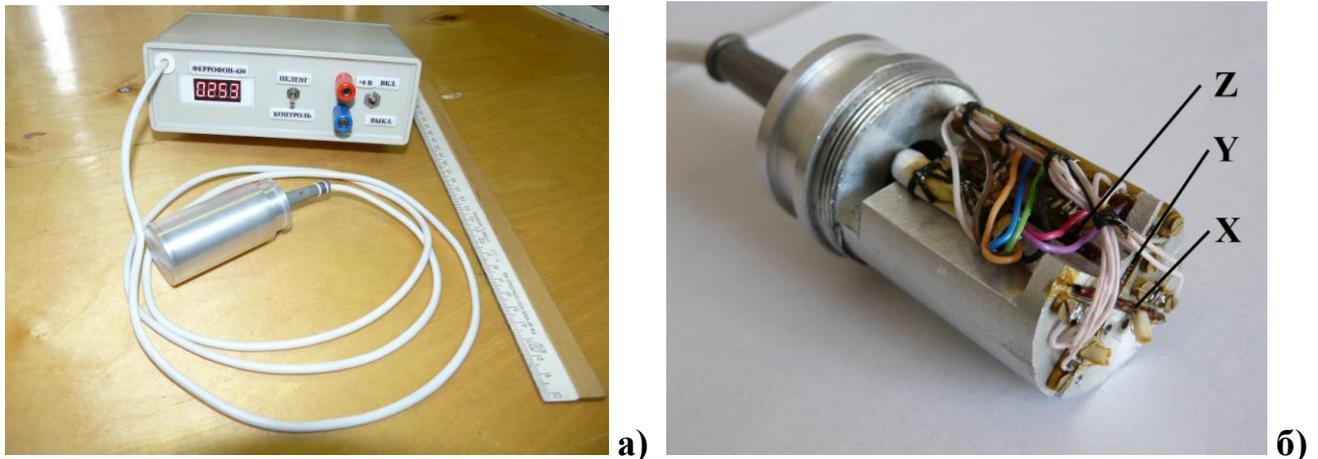


Рисунок 4.9 – Многофункциональный 3-х компонентный феррозондовый магнитометр.

(а) - внешний вид магнитометра; (б) – трехкомпонентный феррозондовый датчик

неподвижное состояние. Предпочтительное положение капсулы в режиме «КОНТРОЛЬ» - вертикальное. Измерения необходимо начинать, удерживая капсулу датчика на возможно большем расстоянии от ферромагнитных объектов, то есть в условиях НМПЗ. Данные условия характеризуются неизменными показаниями цифрового индикатора при угловых эволюциях капсулы относительно центра O осей чувствительности ФЗ по рисунку 4.8. Следует учитывать, что *нормальное* магнитное поле Земли, то есть полное отсутствие его аномалий, можно наблюдать только в особых условиях – вне зоны ферросодержащих геологических образований, промышленных сооружений, коммуникаций, *полевых* воздействий силовых агрегатов. Установившееся в условиях НМПЗ на индикаторе прибора число, принимается за «начало шкалы» для определения наличия и характера магнитной аномалии. Наличие аномалии деформирует правильную пространственную диаграмму направленности 3-х компонентного ФЗ по рисунку 4.8, что согласно (4.2) вызывает отклонение показаний индикатора прибора от числа, принятого за начало шкалы. После обнаружения магнитной аномалии производится уточнение ее параметров, в частности, направление действия.

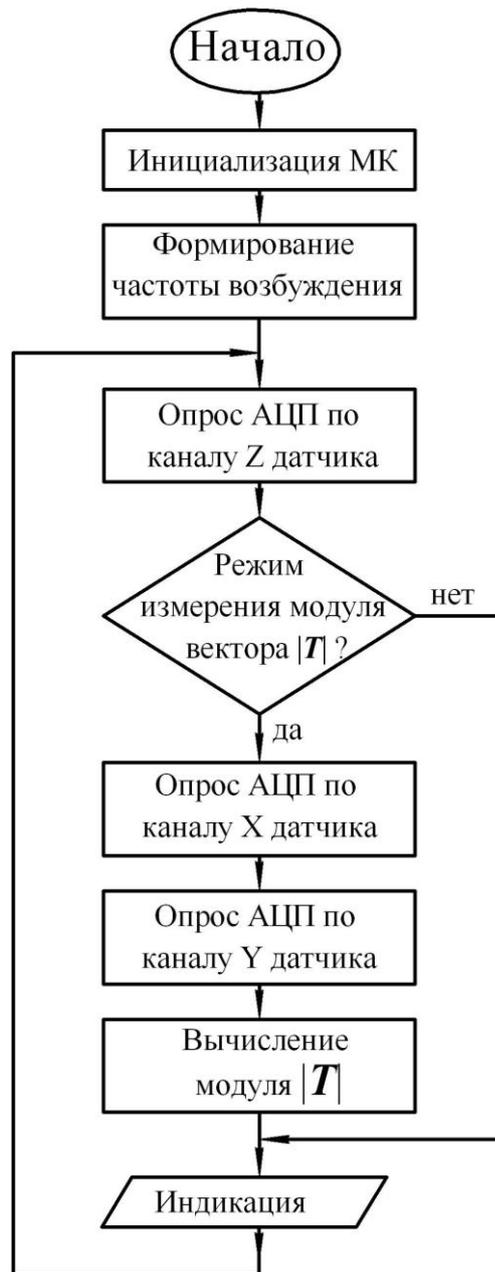


Рисунок 4.10 – Алгоритм программы трехкомпонентного феррозондового магнитометра

Для определения параметров обнаруженной магнитной аномалии, тумблер режима работы переключается в положение «ПЕЛЕНГ». В данном режиме магнитометр выполняет функцию магнитной указки, то есть задает направление поиска источника магнитной аномалии по оси направленности Z -феррозонда 3-компонентного датчика (рисунок 4.8). Это направление будет соответствовать продольной Z -оси цилиндрической капсулы по рисунку 4.9 в том ее

пространственном положении, в котором цифровой индикатор прибора покажет наибольшее отклонение от числа «начало шкалы».

Технические характеристики прибора:

1. Габариты капсулы датчика: $\varnothing 34\text{мм} \times 72\text{мм}$;
2. Масса датчика: 175г;
3. Габариты корпуса прибора: $16,5\text{мм} \times 12,8\text{мм} \times 5,2\text{мм}$;
4. Масса прибора: 350г;
5. Длина соединительного кабеля: 1,5м;
6. Напряжение питания: $6\text{В} \pm 3\%$;
7. Ток потребления датчика: 27мА;
8. Суммарный ток потребления прибора: 110 мА.

Дополнительные функции прибора данного исполнения могут быть реализованы без дополнительных аппаратных затрат - достаточно перепрограммировать процессор в соответствии с новыми требованиями технических заданий, в частности:

- обнаружение проводников и силовых кабелей, как с постоянным током, так и с переменным током 50 Гц;
- геофизические исследования на Земной поверхности, в частности, определение *Fe*-содержания отвалов шахтных и скважинных пород;
- функции датчика пространственного положения либо перемещений подвижных объектов;
- функции счётчика перемещающихся ферромагнитных объектов (автомобили, вагоны поездов, конвейерные изделия и т.д.);
- определение скорости либо числа оборотов вращающихся объектов.

Области применения разработанного устройства согласно таблице 1.1. (Гл.1):

- метрологические задачи геомагнетизма;
- исследование техногенных магнитных явлений.

4.5. Комплексный прибор для вычисления магнитного курса

Элементами архитектуры ФЗ- измерительного модуля могут быть, дополнительные функциональные блоки, функции которых составляют неотъемлемую часть алгоритмической обработки информационных сигналов феррозондовых ЧЭ [56]. Так, по схеме рисунка 4.11 решается задача вычисления магнитного азимута (2-х компонентный ФЗ-компас). Для выполнения функции $Z = 0$ применяется жидкостной гравитационный коммутатор. При этом ИД решает систему уравнений:

$$\begin{cases} \vec{Z} = 0; \\ X = U_{2f}^{\sin} \cdot \cos \alpha; \\ Y = U_{2f}^{\cos} \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (4.3)$$

где \vec{Z} – вертикальная составляющая МПЗ; U_{2f}^{\sin} ; U_{2f}^{\cos} – информационные сигналы ортогональных ФЗ, размещённых на горизонтальной ($\vec{Z} = 0$) платформе; α – угол магнитного азимута; X , Y – горизонтальные составляющие МПЗ [7].

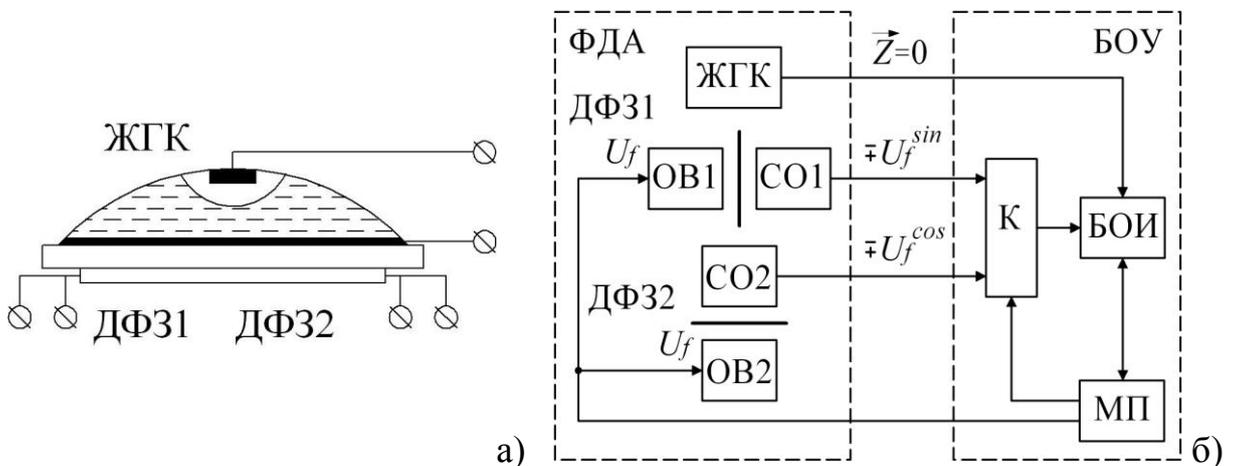


Рисунок 4.11 – Комплексный прибор для вычисления магнитного курса.

(а) – чертеж 2-х компонентного ФЗ компаса: ЖГК – жидкостной гравитационный коммутатор; ДФЗ – дифференциальный феррозонд; (б) – функциональная схема 2-х компонентного ФЗ компаса: U_f – напряжение возбуждения ФЗ с частотой “ f ”; ОВ – обмотка возбуждения ДФЗ; СО – сигнальная обмотка ДФЗ; МП – микропроцессор; БОИ – блок обработки и индикации; БОУ – блок обработки и управления; ФДА – феррозондовый датчик азимута; К – коммутатор аналоговых сигналов; $\pm U_{2f}^{\sin}$, $\pm U_{2f}^{\cos}$ – информационные сигналы ДФЗ

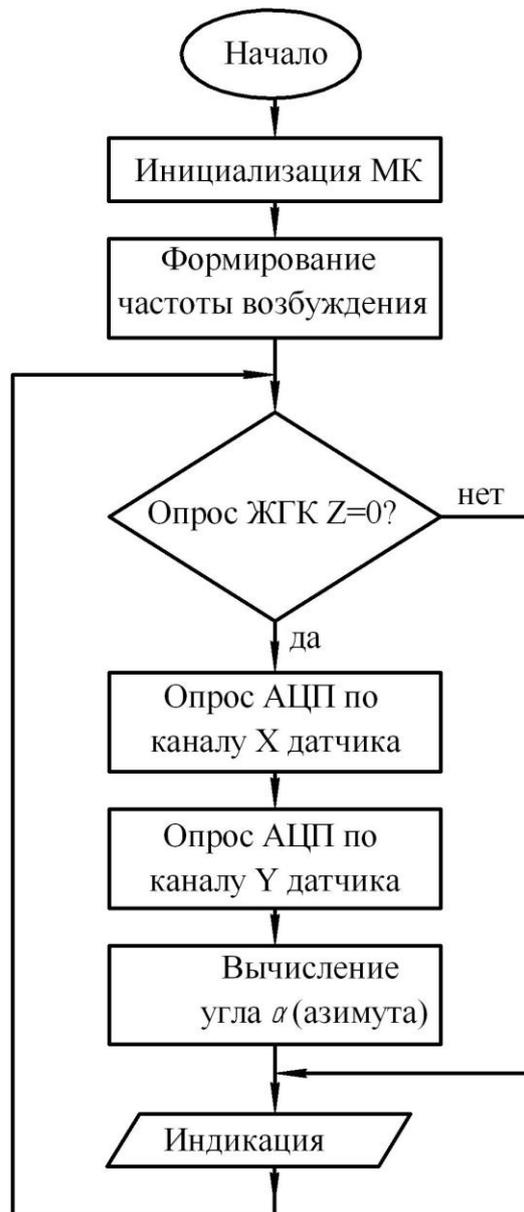


Рисунок 4.12 – Алгоритм программы вычисления магнитного курса

4.6. Применение трехкомпонентного феррозондового датчика в САУ компенсации магнитных аномалий

В естественных условиях одним из основных факторов, воздействующих на организм человека, является нормальное магнитное поле Земли (НМПЗ), уровень которого составляет 50 мкТл. При наличии магнитных аномалий (МА) состояние человека ухудшается вне зависимости от характера их воздействия: МА могут быть постоянными, знакопеременными и аperiодическими. Направление вектора МА случайно и его величина, как правило, находится в диапазоне 5÷600 нТл. Наиболее уязвимым объектом (ОВ) воздействия МА является ослабленный

организм человека, вынужденного находиться в условиях постельного режима. Поэтому для комфортного его расположения объем НМПЗ должен быть не менее $2 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$ [61].

Система «Комната магнитной тишины» (КМТ) предназначена для поддержания НМПЗ в заданном объеме. Работа КМТ основана на формировании воздействия, противоположного вектору МА. Воздействие формируется системой колец Гельмгольца (КГ), состоящей из трех пар плоских катушек, оси которых ортогональны.

Известные устройства, выполненные по традиционной схеме, создают рабочие объемы: основной (компенсации) и дополнительный (измерения) посредством основных и дополнительных КГ. Каждая катушка основного рабочего объема соединена с соответствующей катушкой дополнительного объема. Магнитометр в системе выполнен феррозондовым трехкомпонентным и размещен в дополнительном объеме измерения с ориентацией каждой из трех осей чувствительности вдоль соответствующей оси пары КГ. Феррозонды (ФЗ) формируют управляющие воздействия на собственные пары КГ. Таким образом, воздействия каждой из трех пар КГ в совокупности компенсируют МА как по уровню, так и по направлению [87].

Недостатком такого устройства является размещение магнитометра в дополнительном объеме измерения, что создает недостоверность информационных сигналов ФЗ о величине и направлении МА и ограничивает возможность полного компенсирования магнитных возмущений. Кроме того, объем нормализованного магнитного поля Земли не может быть большим, так как при увеличении размеров КГ дополнительный объем удаляется от центра объема НМПЗ, что увеличивает разность между воздействиями МА в рабочем объеме и в объеме размещения ФЗ.

Разработанная при непосредственном участии автора [59; 62; 63; 64] система КМТ обеспечивает более высокую точность измерения магнитных возмущений с последующей их компенсацией в рабочем объеме. Система содержит три пары КГ, трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, каждый

выход которого присоединен к включенным последовательно преобразователю информационного сигнала и соответствующей паре КГ, согласно рисунку 4.13. Феррозонды магнитометра выполнены стержневыми дифференциальными с соосно расположенными полуэлементами, а три пары КГ – образующими трехосную ортогональную систему, центр которой совпадает с точкой пересечения осей чувствительности ФЗ (Рисунок 4.14). В предлагаемой системе, по сравнению с аналогами [87], существенно увеличен объем КМТ, что обеспечивается размещением КГ по образующим стен комнаты, а также структурой дифференциальных стержневых феррозондов, полуэлементы которых разнесены по осям относительно центра системы настолько, что расстояние между ними соизмеримо с антропометрическими данными и достаточно для комфортного расположения человека в объеме созданного НМПЗ [88].

На рисунке 4.13 изображена схема одного из каналов системы КМТ, в

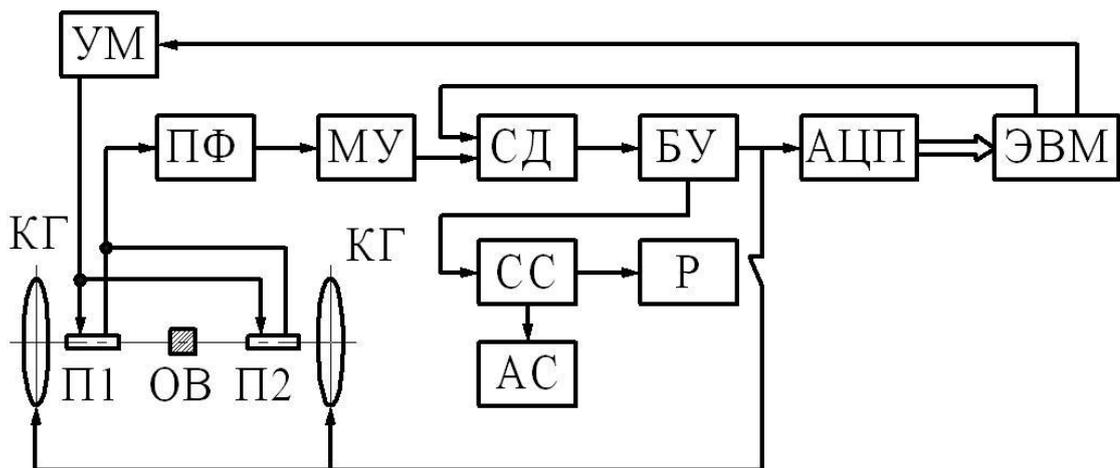


Рисунок 4.13 – Схема канала преобразования системы КМТ

которой дифференциальный стержневой феррозонд состоит из полуэлементов П1 и П2, разнесенных таким образом, что объект ОВ воздействия МА находится в центре объема НМПЗ, то есть в зоне наибольшей однородности магнитного поля. Схема управления ЭВМ, усилитель мощности УМ, полосовой фильтр ПФ, масштабный усилитель МУ и синхронный детектор СД образуют измерительно-преобразовательный модуль системы. Данный модуль осуществляет преобразование одной из ортогональных составляющих внешнего для КМТ

магнитного поля по каждой из осей трехмерного пространства. В данном модуле ПФ работает по второй гармонике феррозондового преобразователя, что обеспечивает повышенную $1 \div 5$ нТл чувствительность магнитометра к МА. МУ усиливает информационный сигнал до уровня уверенного срабатывания СД. Применение СД обеспечивает возможность изменения знака вектора магнитной компенсации каждой пары КГ. С выхода СД сигналы поступают в блок усилителей БУ, где доводятся до уровня, необходимого для создания компенсирующего магнитного поля. Усиленные электрические сигналы поступают на пары КГ. Схема сравнения СС обеспечивает срабатывание аварийной сигнализации АС и реле Р, прекращающего работу КГ при отсутствии компенсации или ошибочных режимах системы в течение заданного интервала времени. Сигналы, подводимые к КГ, обрабатываются также аналого-цифровым преобразователем АЦП, информация с которого поступает в ЭВМ.

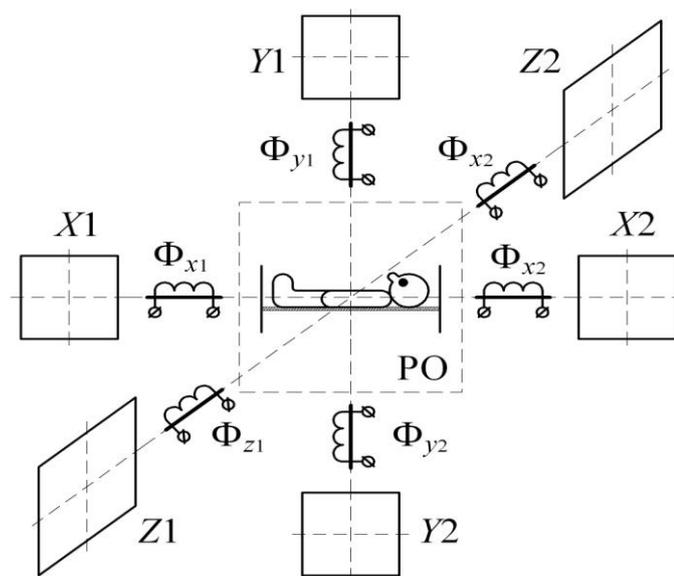


Рисунок 4.14 – Система стабилизации геомагнитного поля в заданном объеме

В настоящее время системы подобные КМТ находят применение не только в реабилитационной медицине. Известны разработки систем контроля, стабилизации, генерации, обнуления магнитных полей в заданных объемах. Так, на Сибирском ядерном реакторе ИРТ-Т для получения заданной мощности излучения осуществлена стабилизация магнитного поля в объеме $\varnothing 37\text{мм} \times 100\text{мм}$ с неоднородностью $\leq 0,1\%$ [69]. В [20] определены зависимости свойств

химических соединений от уровня окружающего магнитного поля, а в [3] выявлены структурные изменения клеток бактерий при содержании их в «магнитном вакууме» - глубоко скомпенсированном поле до уровня $5 \cdot 10^{-4}$ Э 3-х компонентной системой катушек Гельмгольца обсерватории Геомагнетизма Института физики Земли РАН. В [36] обоснована необходимость высокой степени стабилизации магнитного поля в заданном объеме при создании магнитных линз. В [135] «магнитный вакуум» чистоты $H \leq 10^{-3}$ Гс был обеспечен в требуемом рабочем объеме для создания пленочных наноструктур квантовой электроники.

Таким образом, разработка и исследование систем управления магнитным полем в заданном объеме (в частности - стабилизации) является крупной научно-технической задачей, актуальность решения которой постоянно повышается с расширением областей применения систем, подобных рассмотренной КМТ.

Главными отличительными признаками системы КМТ являются:

1) эффективность подавления МА вследствие достоверного её контроля и воздействия КГ в *едином* объеме;

2) возможность подавления различных МА: постоянного уровня, знакопеременных, апериодических;

3) наибольшая однородность НМПЗ в области расположения ОВ вследствие *соосного* расположения системы КГ и трехкомпонентного магнитометра в *едином* объеме;

4) работоспособность системы вне зависимости от её географического расположения, а также от величины, направления и характера МА.

Области применения разработанного устройства согласно таблице 1.1. (Гл.1):

– метрологические задачи геомагнетизма.

4.7. Феррозондовые датчики в режиме контроля динамических объектов

ФЗ датчики на аморфных сплавах (АмС) являются высокочастотными $f_{\text{об}} \leq 10$ МГц преобразователями. Поэтому при использовании данного фактора в сочетании с высокой чувствительностью и острой направленностью, ФЗ датчики успешно применяются для дистанционного контроля динамических объектов при изменении их магнитных параметров во временных интервалах $\tau \geq 10^{-5}$ с.

Постановка задачи: проведение исследований с целью повышения разрешающей способности и достоверности дистанционного считывания сигнала с вращающейся турбинки потокового расходомера.

Среди всего многообразия датчиков расхода в потоке (ДРП) наиболее универсальными являются турбинные расходомеры как обеспечивающие в трубопроводах измерение текущих объемов веществ вне зависимости от их природы: жидкости, газа, пара. Точность преобразования является основным достоинством турбинных расходомеров, так как у альтернативных ДРП погрешность измерения в потоке превышает 1.0%, что приводит к значительным энергетическим, экологическим, экономическим потерям. Погрешность не более 0.5% обеспечивается турбинными расходомерами лишь в случае прецизионного преобразования частоты вращения турбинки в электрический сигнал [91].

Для формирования стабильной амплитудной характеристики электронных преобразователей турбинных расходомеров в их конструкции встраивается постоянный магнит, закрепленный на одной из движущихся частей тела вращения для воздействия на магнитометрическую систему датчика. Однако при этом невозможен контроль движущихся по трубопроводу магнитосодержащих, в частности, загрязненных сред: происходит осаждение магнитных частиц на поверхности устройства, что приводит к заклиниванию тела вращения [83].

Во многих конструкциях турбинка является элементом тахометрических преобразователей. Основным недостатком устройств данного типа является сложность измерения малых расходов – при низких частотах вращения турбинки, когда тахометрические преобразователи становятся малоэффективными.

Понижение точности происходит также вследствие тормозящего действия магнитного потока тахометра, замыкающегося через тело вращения [24; 34].

Таким образом, существует задача разработки магнитометрического турбинного расходомера со следующими функциональными возможностями:

1) использование в качестве тела вращения аксиальной турбинки с регламентированным уровнем собственной намагниченности 5–100 нТл и малым собственным моментом инерции;

2) размещение датчика частоты вращения турбинки в пазу стенки трубопровода без проникновения в канал протока, с целью сокращения габаритов расходомера;

3) отсутствие тормозящего воздействия магнитометрического датчика на малоинерционную турбинку;

4) исключение из ряда измеряемых величин посторонних магнитных полей, в частности поля Земли, для устранения зависимости информационного сигнала от пространственного положения расходомера;

5) измерение частоты вращения турбинки методом оценки ее углового положения, что обеспечивает идентичность статических и динамических амплитудных характеристик преобразователя, то есть – точность измерений вне зависимости от скорости протока;

6) возможность измерения высоких угловых скоростей – до 10^5 рад/с.

Данным требованиям отвечает расходомер с малогабаритным ФЗ преобразователем угловых перемещений 4-х лопастной аксиальной турбинки [55; 128], схематически представленный на рисунке 4.15,а. На рисунке 4.15,б показаны характерные угловые положения лопастей аксиальной турбинки относительно стержневого ФЗ. На рисунке 4.16 представлена функциональная схема расходомера, формы сигналов в характерных точках которой показаны на рисунке 4.17.

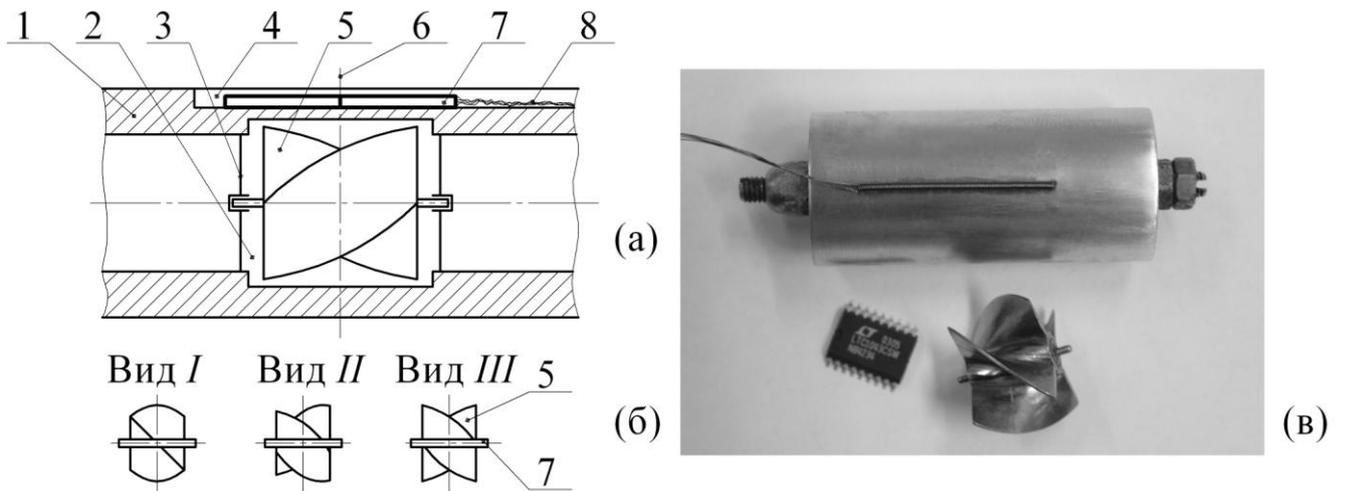


Рисунок 4.15 – Магнитометрический турбинный расходомер. (а) Вид общий: 1 – корпус датчика; 2 – калиброванный канал протока жидкости; 3 – обтекатель с узлом подвеса турбинки; 4 – продольный паз; 5 – аксиальная турбинка; 6 – общая плоскость симметрии турбинки и градиентомера; 7 – феррозондовый градиентомер; 8 – кабель. (б) Характерные угловые положения лопастей турбинки относительно градиентомера. (в) Лабораторный образец

В корпусе прибора 1 (рисунок 4.15,а) с калиброванным каналом протока жидкости 2, обтекателем 3 и пазом 4 продольно симметрично относительно плоскости 6 поперечного сечения канала трубопровода установлен феррозондовый градиентомер 7, расположенный над турбинкой 5. Градиентомер представляет собой прямой жесткий магниточувствительный сердечник, размещенный с минимальным зазором внутри однорядовых (соленоидных) обмоток феррозонда – сигнальной и возбуждения. Сигнальная обмотка (рисунок 4.16) состоит из двух половин, одна из которых намотана встречно другой (режим градиентомера). Обмотки возбуждения 1 и сигнальная 4 соединены с электронным преобразователем, информация которого отображается на регистрирующем устройстве 10.

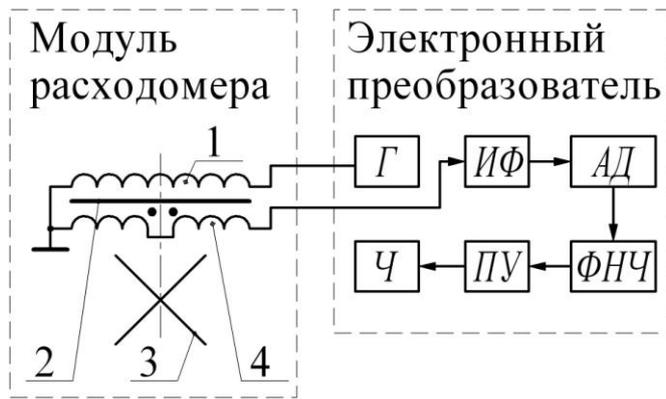


Рисунок 4.16 – Функциональная схема магнитометрического расходомера. 1 – обмотки возбуждения ФЗ; 2 – сердечник ФЗ; 3 – турбинка; 4 – сигнальная обмотка ФЗ; 5 – генератор возбуждения; 6 – избирательный фильтр частоты $2f$; 7 – амплитудный детектор; 8 – фильтр низкой частоты; 9 – преобразователь уровня; 10 – регистрирующее устройство (частотомер)

В процессе измерения вектор магнитного поля малого градиента, каким является поле Земли, действует на магнитную систему градиентомера так, что устанавливается неизменный по длине сердечника уровень магнитной проницаемости, который определяется положением оси чувствительности ФЗ в пространстве. Неизменность по длине сердечника магнитной проницаемости обеспечивает равенство ЭДС в сигнальных полуобмотках, каждая из которых также равномерно распределена по длине сердечника при одинаковом количестве витков полуобмоток. Направление намотки полуобмоток – противоположное по магнитному потоку в сердечнике, что определяет равенство нулю суммарной ЭДС сигнальной обмотки при любом пространственном положении градиентомера в равномерном поле.

Для нарушения такого состояния равновесия ЭДС необходимо магнитное поле большого градиента, изменяющее проницаемость сердечника асимметрично относительно середины его магнитной оси. Крыльчатка расходомера сложной конфигурации с нормированным уровнем намагниченности 5–100 нТл является источником такого поля (рисунок 4.15,б).

Поток жидкости в калиброванном канале 2 корпуса 1 вращает установленную в опорах обтекателя 3 малоинерционную турбинку 5 с угловой

скоростью ω , пропорциональной скорости потока. При этом на магнитную систему градиентомера. воздействует поле турбинки большого градиента, обусловленного ярко выраженной неравномерностью распределения магнитного потенциала по поверхностям крыльчатки из-за сложности ее геометрической формы.

Обмотка возбуждения 1 ФЗ (рисунок 4.16) подключена к генератору повышенной (0,1–0,5 МГц) частоты f , вследствие чего поле возбуждения воздействует на магнитную систему сердечника 2 совместно с периодически T_ω изменяющимся полем турбинки (рисунок 4.17), причем, частота вращения ω значительно меньше частоты f возбуждения, поэтому поле турбинки является

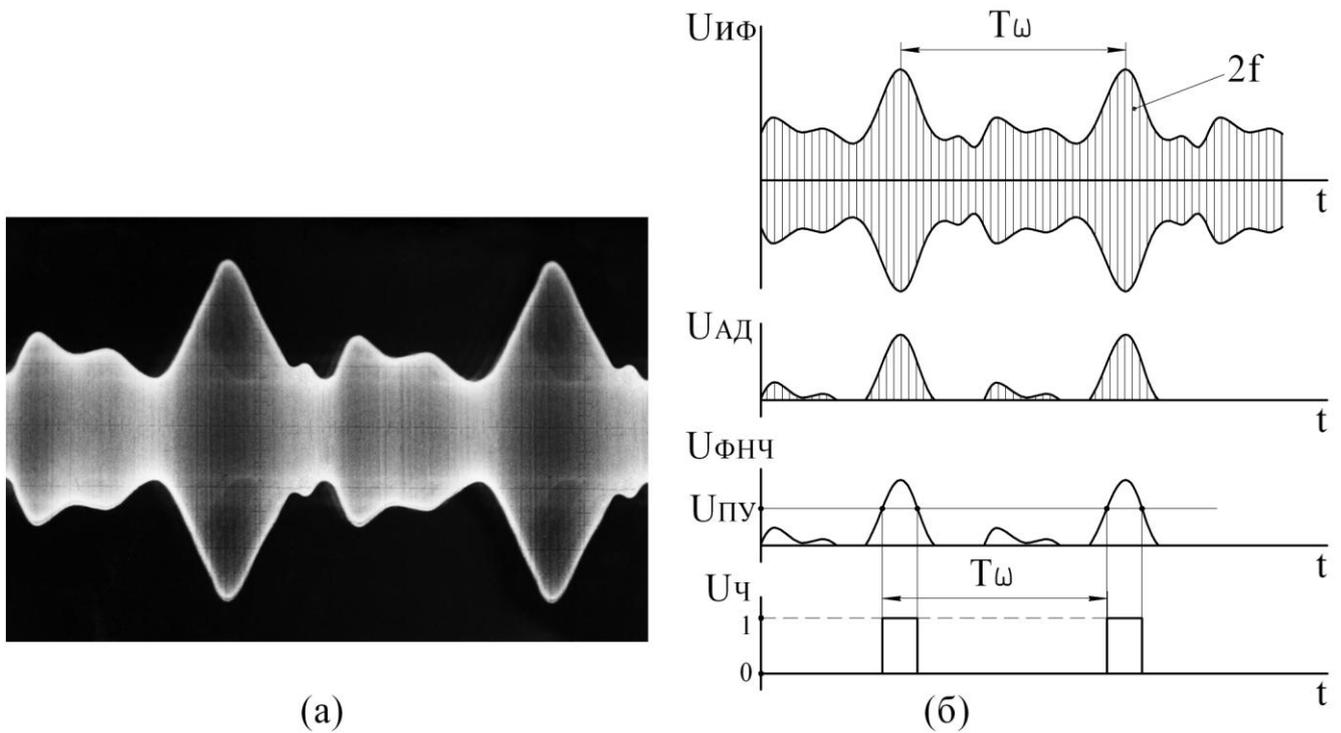


Рисунок 4.17 – Формы сигналов электронного преобразователя по рисунку 4.16.

(а): осциллограмма сигнала на выходе полосового фильтра ПФ. (б): графики сигналов: $U_{ПФ}$ – сигнал на выходе полосового фильтра; $U_{АД}$ – сигнал на выходе амплитудного детектора; $U_{НЧ}$ – сигнал на выходе фильтра низкой частоты; $U_{ПУ}$ – опорный сигнал преобразователя уровня; $U_{Ч}$ – сигнал на входе частотомера; $2f$ – несущая частота полосового фильтра; T_ω – период вращения турбинки; А, Б, В, Г – уровни выходного сигнала датчика, соответствующие виду В по рисунку 4.15(б)

модулирующим. Сигнальная обмотка 4 ф.п. подключена к избирательному фильтру *ИФ* (рисунок 4.16), который выделяет частоту $2f$ информационного сигнала ФЗ, модулированного полем вращающейся турбинки по амплитуде (рисунок 4.17). В амплитудном детекторе *АД* происходит демодуляция сигнала, после чего несущая $2f$ погашается фильтром низкой частоты *ФНЧ*, а сигнал с частотой $1/T_{\omega}$ в преобразователе *ПУ* приводится к цифровому уровню для передачи на регистрирующее устройство (частотомер) *Ч*.

На рисунке 4.15,б (Вид *I*) показано угловое положение крыльчатки (за полный оборот таких (положений для 4-лопастной турбинки – четыре), когда линия лопасти по её цилиндрической образующей расположена симметрично относительно середины оси чувствительности градиентомера, что соответствует минимуму его информационного сигнала. Любые другие угловые положения турбинки (виды *II*, *III*) характеризуются разностью магнитного воздействия лопастей по длине сердечника, что нарушает равновесие ЭДС сигнальных полуобмоток и приводит к повышению уровня информационного сигнала градиентомера.

При вращении турбинки информационный сигнал преобразователя изменяется по периодическому закону с четырьмя минимумами за период (рисунок 4.17), причем длительность периода T_{ω} определяется частотой вращения турбинки ω и, следовательно, скоростью потока жидкости.

Поскольку составляющие поля Земли и уровень магнитной индукции турбинки могут иметь один порядок, разделение помехи и измеряемой величины чувствительным элементом возможно лишь при взаимной ориентации конструктивных элементов расходомера (ось вращения крыльчатки – паз корпуса – обмотки ФЗ – сердечник) с высокой степенью точности, так как эта точность лежит в основе принципиальной работоспособности устройства: вращающаяся крыльчатка, расположенная в общих плоскостях симметрии с осью чувствительности градиентомера не нарушает его статической балансировки – компенсации сигнала сигнальной обмотки по магнитному воздействию поля Земли.

Существенный эффект – минимум сигнала при максимальном сближении лопасти турбинки с точкой наибольшей чувствительности градиентомера. (вид I на рисунке 4.15,б) – обусловлен специально организованной взаимной пространственной ориентацией магнитных силовых линий крыльчатки сложной формы и плоскостей симметрии градиентомера.

С применением феррозондового преобразователя пополнился ряд функциональных возможностей турбинных расходомеров:

- устранена тормозящая сила потокосцепления малоинерционной турбинки с магниточувствительным преобразователем ее углового положения;
- расширен диапазон измеряемых скоростей протока;
- повышена прочность корпуса расходомера за счет малых габаритов датчика.

Кроме того, обеспечена оперативность замен расходомеров, так как их корпуса представляют собой модули, конструктивно совместимые с трубопроводами (рисунок 4.15). Эта функциональная возможность повышает надежность эксплуатации в осложненных условиях, как, например, в скважинной аппаратуре, компоновка которой производится многократно – на каждый рейс к забою [71; 83].

При использовании универсального расходомера (рисунки 4.15-4.17) в приборах и системах разнообразных областей техники были получены следующие преимущества магнитометрических д.р.п.:

- 1) оптимизация контроля динамических потоков путем уменьшения момента инерции тела вращения;
- 2) повышение достоверности контроля магнитозагрязненных сред за счет получения отношения сигнал/шум магнитометрической системы не хуже 10–20 дБ;
- 3) возможность измерения расходов реверсивных потоков;
- 4) возможность определения угловых положений турбинки с разрешением 0,25 оборота, что повышает точность измерения малых расходов.

Это последнее свойство получено при изготовлении турбинки из композитных материалов (рисунок 4.18), обеспечивающих минимум ее момента инерции и нулевой уровень намагниченности [79].

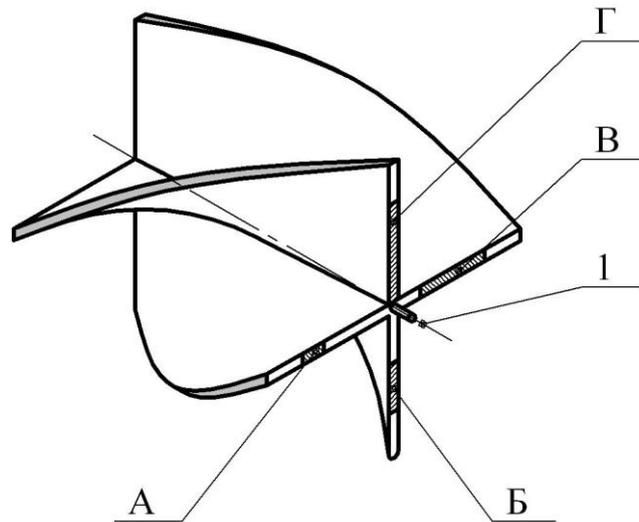


Рисунок 4.18 – Общий вид аксиальной трубки. 1 – полуось подвески турбинки. А, Б, В, Г – магнитные метки

На торцевых поверхностях лопастей размещены метки с четырьмя малыми различными *А, Б, В, Г* уровнями магнитной индукции. В остальном конструкция расходомера подобна приведенной на рисунке 4.15. Осциллограммы, отображающие характер взаимодействия магнитных меток турбинки и градиентомера, приведены на рисунке 4.18. Поскольку магнитные метки нанесены только на одну торцевую поверхность турбинки, уровень информационного сигнала ф.п. зависит только от ее углового положения относительно одного из полуэлементов дифференциального магнитометрического преобразователя.

Так, согласно рисунку 4.15,б (вид *I*) любая из магнитных меток по рисунку 4.18 равноудалена от оси градиентомера, чему соответствует минимум его информационного сигнала – уровень шума $U_{ш}$ по рисунку 4.16. Максимумы информационного сигнала U_{2f} формируются при соответствии углового положения турбинки виду *II* (рисунок 4.19,б), когда магнитные метки

максимально приближены к полуэлементу дифференциального магнитометрического преобразователя.

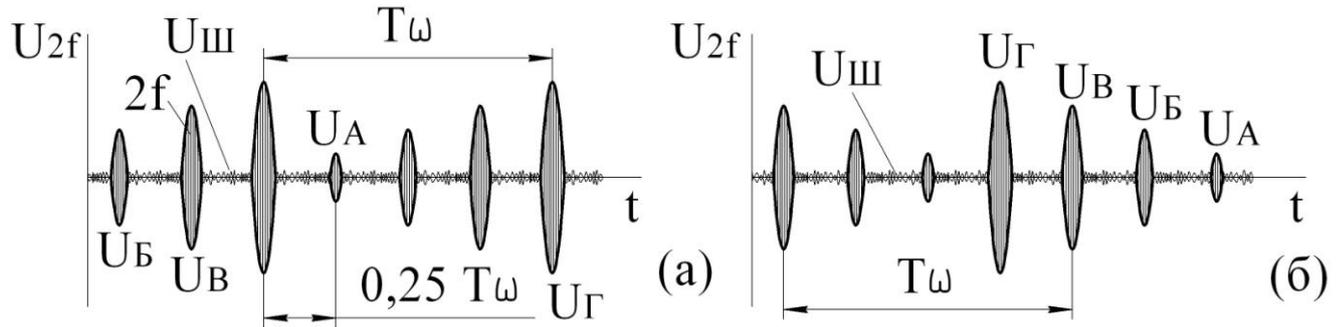


Рисунок 4.19 – Временные диаграммы: **а** – нарастающие за период T_ω уровни сигнала датчика по меткам А, Б, В, Г (вращение по часовой стрелке); **б** – отображение датчиком вращения турбинки против часовой стрелки; $U_{ш}$ – уровень шума на выходе полосового фильтра при угловом положении турбинки по виду А; $2f$ – несущая частота полосового фильтра

Уровни намагниченности меток рассчитаны таким образом, чтобы различия соседних по осциллограмме рисунок 4.19 уровней U_A , U_B , U_B , U_G информационного сигнала градиентомера составляли 25%. Данные различия уровней обеспечивают наибольшую помехоустойчивость расходомера при определении электронной схемой информационных сигналов U_A , U_B , U_B , U_G , а также идентификацию наименьшего из них U_A на уровне шума $U_{ш}$.

Представленные на рисунке 4.19 особенности преобразования информационного сигнала градиентомера позволяют считывать угловые положения турбинки с разрешением до четверти оборота, что повышает точность контроля быстро изменяющихся потоков, а также малых расходов жидкостей и газов. Существует возможность измерения расхода реверсивных потоков: достаточно определять характер последовательности изменения уровней информационного сигнала, как нарастание (рисунок 4.19,а) или убывание (рисунок 4.19,б). Данная функциональная возможность необходима, например, при использовании расходомера в системах контроля динамических параметров

дыхательной системы человека, в частности для определения моментов начала вдоха, выдоха.

В гидро- и газодинамических системах реверс потока необходимо выявлять как несанкционированный, либо аварийный режим их работы [82; 86].

Представленный магнитометрический турбинный расходомер нашел применение в скважинных системах измерения и контроля [66], в медицинской технике, при исследовании гидро- и газодинамических процессов в магистральных трубопроводах.

Результаты исследований:

1. В многофункциональном турбинном расходомере метод магнитометрии наиболее эффективно обеспечивает невозмущающий дистанционный контроль угловых положений и частоты вращения аксиальной турбинки, что дополняет ряд конструктивных, метрологических и технологических преимуществ данного ДРП.

2. Высокие метрологические и эксплуатационные характеристики турбинных расходомеров обеспечиваются применением магнитометрических градиентомеров феррозондового типа, отвечающих наиболее полной совокупности технических требований к расходомерам, прежде всего по оптимальному соотношению чувствительность/помехоустойчивость, что необходимо для достоверности контроля сред, движущихся в трубопроводах, вне зависимости от их природы: жидкости, газа, пара.

Результаты исследований в п.4.7. определяют следующие заключения:

1. Высокое быстродействие ДФЗ при достижимых частотах возбуждения $f_{\text{возб}} \leq 10$ МГц обеспечивает контроль динамических магнитных объектов в малых временных интервалах $\tau \geq 10^{-5}$ с.

2. Градиентомеры на основы ДФЗ обеспечивают невозмущающий дистанционный контроль динамических объектов в частности сквозь замкнутые поверхности корпусов и экранов, что является их преимуществом по сравнению с датчиками иных типов, например с оптическими.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В соответствии с теоретическими положениями диссертации были получены следующие практические результаты:

1. На основе идентификации полуэлементов многофункциональных ДФЗ получен полный функциональный ряд измерительных структур магнитометров: полемер, градиентомер, мультисенсорные.

2. Разработанный способ изготовления ММС из АмС обеспечивает повторяемость метрологических характеристик прецизионных ДФЗ, что дает возможность их изготовления по перспективным технологиям, в частности гибридным и интегральным.

3. Разработанные способ изготовления и методика контроля ММС из АмС являются основой совершенствования ДФЗ, как многофункциональных датчиков магнитных воздействий, по главным направлениям: миниатюризация; технологичность производства; снижение энергопотребления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполнения диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе произведенного анализа способ электроэрозионной резки определен как оптимальный при изготовлении малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов.

2. Разработана математическая модель дифференциального феррозонда, связывающая его основной информативный параметр – уровень второй гармонической составляющей тока возбуждения с разделенными по группам параметрами его электромагнитной системы, в частности – с параметрами магнитопровода.

Форма математической модели позволяет задавать параметры дифференциального феррозонда и магнитопровода непосредственно – в виде их численных значений.

Математическая модель универсальна: предназначена для определения параметров дифференциального феррозонда как со стержневыми, так и с замкнутыми магнитопроводами.

3. Разработана математическая модель идентификации малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов по ограниченному ряду их геометрических параметров. Модель связывает информационный сигнал дифференциального феррозонда с отклонением формы стержневого сердечника от заданной. Изготовлен стенд метрологического контроля стержневых сердечников. Методика контроля позволяет определять неравномерность площади сечения сердечников с погрешностью $S \leq 0,1\%$. Способ изготовления в сочетании с методикой контроля обеспечили сокращение отбраковки сердечников в рамках производимой партии с 60% до 15%.

4. Разработаны способ изготовления и методика контроля малогабаритных магниточувствительных сердечников из тонкопленочных аморфных сплавов. Способ обеспечивает заданную точность геометрических параметров с сохранением магнитных свойств исходного материала малогабаритных

магниточувствительных сердечников за счет устранения температурных, механических воздействий на тонкопленочный аморфный сплав.

По разработанному способу изготовлены сердечники с параметрами: толщина: $\delta = (32 \pm 6)$ мкм; длина: $l = (3 \div 60)$ мм; ширина: $b = (0,2 \div 2,0)$ мм. Неравномерность площади сечения сердечников по длине $\Delta S \leq (0,1 \div 0,3)\%$.

5. На основе экспериментальных исследований дифференциальных феррозондов с вновь полученными малогабаритными магниточувствительными сердечниками разработан ряд макетных образцов и магнитометрических приборов, в частности мультисенсорных.

Разработана измерительная структура дифференциального феррозонда с соосными полуэлементами и возможностью переключения режимов работы «полемер - градиентомер» (патент № 108638). Дифференциальный феррозонд выполнен на основе идентификации L - C - R параметров обмоток возбуждения и сигнала. Чувствительность дифференциального феррозонда: $G = 0,05$ мВ/γ; ток потребления: $I_{\text{возб}} \geq 5$ мА; мощность потребления: $P_{\text{возб}} \geq 2,5$ мВт; габариты чувствительного элемента дифференциального феррозонда: $l = (3 \div 60)$ мм; $d = (0,3 \div 3,0)$ мм; частотный диапазон: $f_{\text{возб}} = (2 \div 500)$ кГц.

Разработан многофункциональный 3-х компонентный феррозондовый магнитометр «Феррофон-430» обеспечивающий по созданной программе микропроцессора вычисления: полного вектора магнитного воздействия, определение линии действия, знака вектора, его градиента. Спроектированы и смонтированы электронные схемы преобразователей возбуждения и сигнала дифференциальных феррозондов.

Разработан контрольно-измерительный прибор «Феррозондовый градиентомер». Один из вариантов прибора выполнен мультисенсорным: с гравитационным жидкостным датчиком вертикали (Патент № 2448350).

Разработанные способы изготовления и методика идентификации малогабаритных магниточувствительных сердечников из плоских магнитных пленок является перспективной в плане организации производства магнитометрических датчиков различного назначения.

Список сокращений и условных обозначений

АмС – аморфный сплав

ГДФ – гибридный дифференциальный феррозонд

ГрМ – градиентомер

ДСФ – дифференциальный стержневой феррозонд

ДФЗ – дифференциальный феррозонд

ЖГК – жидкостной гравитационный коммутатор

КГ – кольца Гельмгольца

КП – кривая перемагничивания

МА – магнитная аномалия

ММС – малогабаритные магниточувствительные сердечники

МП – магнитопровод

МПЗ – магнитное поле Земли

НМПЗ – нормальное магнитное поле Земли

ОВ – обмотка возбуждения

ОЧ – ось чувствительности

ПГ – петля гистерезиса

ПМ – полемер

ПМП – плоская магнитная пленка

СО – сигнальная обмотка

ФЗ – феррозонд

ФЗД – феррозондовый датчик

ФЗМ – феррозондовый магнитометр

ЧЭ – чувствительный элемент

ЭР – электроэрозионная резка

Список литературы

1. Абрагам, А. Ядерный магнетизм / А. Абрагам; под ред. Г. В. Скроцкого. – М.: Иностранная литература, 1961. – 538 с.
2. Аморфные металлические сплавы / Под ред. Ф. Е. Люборского. – М.: Металлургия, 1987. – 582 с.
3. Анисимов, С. В. Экспериментальное исследование влияния магнитного поля на удельную скорость ассимиляции карбонатного углерода у бактерий *Pseudomonas fluorescens* / С. В. Анисимов. // Биология внутренних вод. – Москва, 2005, № 2. – С. 21–28.
4. 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, 1979. – 320 с.
5. Афанасьев, Ю. В. Феррозонды / Ю. В. Афанасьев. – Л.: Энергия, 1969. – 168 с.
6. Афанасьев, Ю. В. Феррозондовые приборы / Ю. В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.
7. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника: в 2-х т. Том 1. / М. Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
8. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника: в 2-х т. Том 2. / М. Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 691 с.
9. Борисов, А. Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей / А. Борисов // Компоненты и технологии. – 2006. – № 7. – С.56-60.
10. Бронзов, А. С. Турбинное бурение скважин / А. С. Бронзов, Ю. С. Васильев, Г. А. Шетлер. – М., 1965. – 144 с.
11. Буккель, В. Сверхпроводимость. Основы и приложения / В. Буккель; пер. с нем. Ю. А. Башкирова. – М.: Мир, 1975. – 366с.
12. Викулин, И. М. Гальваномагнитные приборы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1983. – 104с.

13. Власкин, К. И. Графо-аналитический метод определения характеристик феррозондовых магнитопроводов из аморфных сплавов / К. И. Власкин, С. К. Прищепов. // Международный научно-исследовательский журнал: Сборник по результатам XXI заочной научной конференции Research Journal of International Studies. – Выпуск 11 Часть 2. – Екатеринбург: МНИЖ, 2013. – С. 79 – 81.

14. Власкин, К. И. Теория и практика идентификации параметров тонкопленочных магниточувствительных сердечников / К. И. Власкин, С. К. Прищепов. // Международный научно-исследовательский журнал: Сборник по результатам XXI заочной научной конференции Research Journal of International Studies. – Выпуск 11 Часть 2. – Екатеринбург: МНИЖ, 2013. – С. 81 – 84.

15. Власкин, К. И. Технологии изготовления магниточувствительных элементов феррозондовых датчиков / С. К. Прищепов, К. И. Власкин. // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2012, № 4. – С. 43 – 46.

16. Власкин, К. И. Трехкомпонентный феррозондовый микропроцессорный магнитометр / К. И. Власкин, С. К. Прищепов, Г. В. Миловзоров // Международный научно-исследовательский журнал: Сборник по результатам VII заочной научной конференции Research Journal of International Studies. – Выпуск 7 Часть 2. – Екатеринбург: МНИЖ, 2013. – С. 11 – 12.

17. Власкин, К. И. Феррозондовый микропроцессорный магнитометр / К. И. Власкин, С. К. Прищепов, В. С. Фетисов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Том 2. Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 146 – 147.

18. Власкин, К. И. Прищепов С. К. Электроэрозионный способ обработки аморфных сплавов при изготовлении сердечников феррозондов / К.И. Власкин, С.К. Прищепов // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011, том XIX, № 4. – С. 36–39.

19. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда; пер. с англ. И. Ю. Шкадиной. – М.: Техносфера, 2008. – 518 с.

20.Глаголевский, Ю. В. О зависимости химических аномалий в СР-звездах от величины их магнитного поля / Ю. В. Глаголевский // *Астрофизический бюллетень*. – Нижний Архыз, 2007, Т.62, №3. – С. 260 – 272.

21.Гордин, В. М. Очерки по истории геомагнитных измерений / В. М. Гордин. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – 162 с.

22.ГОСТ 24151-87 Инклинометры. Типы. Основные параметры и общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 11с.

23.ГОСТ 29004-91 Сердечники для катушек индуктивности и трансформаторов, используемых в аппаратуре дальней связи. Часть 1. Методы измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 51с.

24.Датчик турбинного расходомера [Текст]: а.с. 1114884 СССР: МКИЗ G 01 F 1/12/ В. И. Бар-Слива, В. М. Буткин, А. Д. Бухонов, Л. А. Камышев. – № 3599951/18-10; заявл. 03.06.83; опубл. 23.09.84, Бюл. №35.

25.Датчики Холла и магниторезисторы /Пер. с польск. В. И. Тихонова и К. Б. Макидонского; под ред. О. К. Хомерики. – М.: Энергия, 1971. – 352. с.

26.Заруцкий, А. А. Лазерные технологии при изготовлении феррозондовых датчиков магнитного поля / А. А. Заруцкий, А. З. Обидин, Т. А. Малинский // *Компоненты и технологии*. – 2009, №4. – С. 168–171.

27.Исаченко, В. Х. Инклинометрия скважин / В. Х. Исаченко. – М.: Недра, 1987. –216 с.

28.Карцев, В. П. Магнит за три тысячелетия / В. П. Карцев; Под ред. Е. Я. Казовского. – М.: Атомиздат, 1972. – 160с.

29.Коваленко, А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами / А. П. Коваленко. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с.

30.Ковшов, Г. Н. Автономный микропроцессорный магнитометр / Г. Н. Ковшов, С. К. Прищепов, К. И. Власкин, С. В. Жернаков, Е. Ю. Кипелова // *Электроника, автоматика и измерительная техника: межвузовский сборник научных трудов с международным участием*. Уфа: УГАТУ, 2011. – С.52 – 55.

31.Ковшов, Г. Н. Инклинометры. Основы теории и проектирования / Г. Н. Ковшов, Р. И. Алимбеков, А. В. Жибер; РАН, Уфимский науч. центр, Ин-т механики. – Уфа: Гилем, 1998. – 380 с.

32.Ковшов, Г. Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловертнов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 228с.

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

34.Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник / П. П. Кремлевский; под общ. ред. и при участии Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2002. – 410 с.

35. Крылов, А. Н. Собрание трудов академика А. Н. Крылова / А. Н. Крылов; АН СССР. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. - Т. 2.Ч.2.: Земной магнетизм и компасное дело. – 1947. – 263 с.

36.Магнитные линзы – стабилизация дуги [Электронный ресурс] // Все о работе с металлом. URL: <http://www.chipmaker.ru/topic/54243/> (дата обращения: 15.12.2013).

37.Маргелов, А. Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell / А. Маргелов // CHIP NEWS. –2005. – №3. – С.52 – 56.

38.Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм: учеб.пособие для физ.спец вузов / А. Н. Матвеев. – М. : Высш.школа, 1983. – 463с.

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

40.Молчанов, А. А. Геофизические исследования горизонтальных нефтегазовых скважин: учебное пособие / А. А. Молчанов, Э. Е. Лукьянов, В. А. Рапин. – СПб.: МАНЭБ, 2001. – 298 с.

41.Немилов, Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов / Е. Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с.

42.Носкова, Н. И. Магнитные свойства и микроструктура нанокристаллических магнитомягких сплавов / Н. И. Носкова, В. В. Шулика, А. П. Потапов // Физика металлов и металловедение. – 2006, т.102, №5. – С. 532 – 544.

43.Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси и др.; под ред. Т. Окоси; пер. с яп. Г. Н. Горбунова. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 255 с.

44.ООО "НПО ЭНТ", Отделение средств магнитометрии. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.nvlaboratory.spb.ru>: (дата обращения: 9.12.2013).

45.Никитин, С. А. Гигантское магнитосопротивление / С. А. Никитин // Соросовский образовательный журнал. – 2004, Том 8. – №2 – С. 92 – 98.

46.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.

47.Пономарев, Ю. Ф. Обобщенный анализ характеристик трубчатых феррозондов с поперечным возбуждением. Физические основы. / Ю. Ф. Пономарев // Дефектоскопия. – 1997. №4. – С. 23 – 34.

48.Прищепов, С. К. Автономный микропроцессорный феррозондовый магнитометр / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, С. В. Жернаков. // Проектирование и технология электронных средств. – 2010, №3. – С. 24 – 26.

49.Прищепов, С. К. Гибридные технологии производства ПМП феррозондов / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, Ю. С. Жолобов, В. Ф. Исаев // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвузовский сборник научных трудов с международным участием. Уфа: УГАТУ, 2011. – С.189 – 193.

50.Прищепов, С. К. Интегральные и гибридные технологии производства феррозондовых датчиков / С. К. Прищепов, К. И. Власкин // Нано- и микросистемная техника. – 2011, № 9. – С. 2–4.

51.Прищепов, С. К. Интеллектуальные датчики магнитомодуляционного типа / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, Е. Ю. Кипелова // Межвузовский сборник научных трудов «Электроника, автоматика и измерительные системы». Уфа: УГАТУ, 2009. – С.61 – 68.

52. Прищепов, С. К. Интеллектуальные датчики феррозондового типа / С. К. Прищепов, К. И. Власкин. // Научное приборостроение. – 2011, том 21, №4. – С.151 –153.

53. Прищепов, С. К. Комплексный прибор для определения магнитных аномалий / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, // Межвузовский сборник научных трудов «Электронные устройства и системы». Уфа: УГАТУ, 2010. – С.109 – 112.

54. Прищепов, С. К. Магнитометрический прибор для обнаружения скрытых подземных объектов / С. К. Прищепов, К. И. Власкин // Известия Томского политехнического университета. – 2012, том 320, №1. – С. 111 – 113.

55. Прищепов, С. К. Многофункциональный магнитометрический турбинный расходомер / С. К. Прищепов, К. И. Власкин. // Приборы и техника эксперимента. – 2011, №6. – С. 117 –121.

56. Прищепов, С. К. Мультисенсорный прибор для вычисления магнитного курса / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, Крув А. В. // Материалы 16-й Международной НТК «ИКИ-2015». Барнаул: АлтГТУ, 2015, Т.2. – С.123 – 127.

57. Прищепов, С. К. Однокомпонентный феррозондовый магнитометр / С. К. Прищепов, Е. А. Тимофеев, К. И. Власкин // Материалы 10-й Международной НТК «ИКИ-2009». Барнаул: АлтГТУ, 2009. – С.76 – 81.

58. Прищепов, С. К. Определение погрешностей направленности дифференциальных феррозондов / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, Ю. Г. Кудряшов // Материалы 8 Международной НТК «ИКИ-2007». Барнаул: АлтГТУ, 2007. – С.83 – 85.

59. Прищепов, С. К. Организация системы «магнитный ноль» в заданном объеме / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, З. М. Ямилева. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012, т. 78, № 09. – С. 45–46.

60. Прищепов, С. К. Преобразователи физических величин на основе аморфных сплавов / С.К. Прищепов, Ю.Н. Кочемасов // Материалы VIII международной НТК «Датчик-96». – Гурзуф, 1996, т.2. – С.263–265.

61. Прищепов, С. К. Система «комната магнитной тишины» / С. К. Прищепов, З. М. Ямилева // Сб. науч. тр. «Естествознание и гуманизм». – Томск, 2004, Т.1, №2. – С. 104 – 105.

62. Прищепов, С. К. Система стабилизации геомагнитного поля в заданном объеме / С. К. Прищепов, Г. В. Миловзоров, К. И. Власкин, З. М. Ямилева // Международный научно-исследовательский журнал: Сборник по результатам VII заочной научной конференции Research Journal of International Studies. – Выпуск 7 Часть 2. – Екатеринбург: МНИЖ, 2013. – С. 13 – 15.

63. Прищепов С. К. Система стабилизации геомагнитного поля в заданном объеме / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, З. М. Ямилева // Экологические системы и приборы. – 2013, №3. – С. 54 – 59.

64. Прищепов, С. К. Система стабилизации магнитного поля в заданном объеме / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, С. В. Жернаков, З. М. Ямилева // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвузовский сборник научных трудов с международным участием. Уфа: УГАТУ, 2011. – С.104 – 106.

65. Прищепов, С. К. Стержневые феррозонды с плоскими магнитными плёнками / С. К. Прищепов // Новые методы, технические средства и технологии получения измерительной информации. Материалы всероссийской НТК. – Уфа: УГАТУ, 1997. – С.35.

66. Прищепов, С. К. Функциональные элементы современных MWD – систем / С. К. Прищепов, Ю. Г. Кудряшов, К. И. Власкин, Ю. Г. Кудряшов // Материалы 8 Международной НТК «ИКИ-2007». Барнаул: АлтГТУ, 2007. – С.119 – 121.

67. Реутов, Ю. Я. Разделение технологических факторов обуславливающих влияние однородного поля на точность феррозондового градиентомера / Ю. Я. Реутов, В. И. Пудов // Дефектоскопия. – 1998. №1. – С. 28 – 33.

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

69. Рябчиков, А. И. Ускорители заряженных частиц и другие излучательные установки НИИЯФ и их использование в науке и технологиях / А. И. Рябчиков //

Известия Томского политехнического университета. – 2000. Т. 303, № 1. – С.17–43.

70.Сергеев, А. Н. Исследование и разработка феррозондовых преобразователей азимута для систем управления буровым инструментом: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 05.13.05 / А. Н. Сергеев. – Уфа: УАИ, 1982. – 242 с.

71.Скважинный расходомер [Текст]: а.с. 1578479 СССР: МКИЗ G 01 F 1/075, E 21 B47/02/ Г. Н. Ковшов, Н. И. Филин, С. К. Прищепов, С. С. Александров. – № 4243366/24-10; заявл. 12.05.87; опубл. 15.07.90, Бюл. №26.

72.Сликтер, Ч. П. Основы теории магнитного резонанса / Ч.П. Сликтер; пер. Н. Н. Корста; под ред. Г. В. Скродского . – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Мир, 1981. – 448с.

73.Способ измерения тока и устройство для его осуществления [Текст]: пат. 2252422 РФ: МПК G01R19/00/ С. К. Прищепов, Е. С. Морозова, А. Н. Алмаева, В. М. Амиров. – №2004101188/28; заявл. 13.01.2004; опубл. 20.05.2005, Бюл. №16.

74.Сысоева, С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 1. Потенциометры и датчики Холла / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 2. – С.52–59

75.Сысоева, С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 2. Технологии, схмотехника, программирование и монтаж интегральных датчиков Холла / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3. – С. 32–42.

76.Сысоева, С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 3. Физические основы и коммерческие перспективы технологий полупроводниковых и пермалловых магниторезистивных датчиков / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 4. – С.52–62.

77.Сысоева, С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 4. Новые перспективы автомобильных

датчиков – технологии магниторезисторов ГМР и КМР / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С.60–68.

78. Тимофеев, Е. А. Однокомпонентный феррозондовый магнитометр / Е. А. Тимофеев, К. И. Власкин // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Том 2. Уфа: УГАТУ, 2009. – С.123 – 124.

79. Турбинный расходомер [Текст]: пат. 2182660 РФ: МПК E21B47/10, G01F1/075/ С.К. Прищепов, К.В. Будилов, К.Н.Ефремов. – 2000116813/03; заявл. 26.06.2000; опубл. 20.05.2002, Бюл. № 14. – С. 259 с.

80. Убизский, С. Б. Моделирование вращательного перемагничивания монокристаллической феррогранатовой пленки в качестве сердечника преобразователя магнитного поля / С. Б. Убизский, Л. П. Павлык, Е. Христофороу // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «Физика». – 2006, т.19, №1. – С. 68 – 75.

81. Успехи СССР в исследовании космического пространства. – М.: Наука, 1968. – 557с.

82. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Книга 1. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. / Под общ. ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1973. – 671с.

83. Устройство для исследования скважин [Текст]: а.с. 883367 СССР: МКИЗ E 21 B 47/00/ Н. И. Филин, А. В. Кисилев, С. С. Александров, И. И. Середнев, С. Ф. Михайлов, Е. А. Ястребов. – № 2743099/22-03; заявл. 29.03.79; опубл. 23.11.81, Бюл. №43.

84. Устройство для обнаружения магнитных аномалий [Текст]: пат. 109568 РФ: МПК G01R19/00/ С. К. Прищепов, С. А. Стрижев, К. И. Власкин. – №2011123594/28; заявл. 09.06.2011; опубл. 20.10.2011, Бюл. №29.

85. Устройство для обнаружения подземных магнитных аномалий [Текст]: пат. 2448350 РФ: МПК G01V3/00/ С. К. Прищепов, К. И. Власкин, Е. А. Тимофеев. – № 2010129742/28; заявл. 15.07.2010; опубл. 20.04.2012, Бюл. №11.

86. Устройство для определения направления потока в трубопроводе [Текст]: а.с. 1307342 СССР: МКИЗ G 01 P 5/06/ В. С. Корольков. – №3782758/24-10; заявл. 22.08.84; опубл. 30.04.87, Бюл. №16.

87. Устройство для стабилизации геомагнитного поля в рабочем объеме [Текст]: а.с. 913290 СССР: МКИЗ G 01 R 33/02/ Г. Г. Гурули. – № 2959783/18-21; заявл. 10.07.80; опубл. 15.03.82, Бюл. №10. – 4с.

88. Устройство стабилизации геомагнитного поля в рабочем объеме [Текст]: пат. 2274870 РФ, МПК G 01 R 33/02 / С. К. Прищепов, З. М. Ямилева, О. П. Андреев, И. Ф. Маннанов, Е. С. Морозова. – №2004106165/28; заявл. 02.03.2004; опубл. 20.04.2006; Бюл. №11 – 7с.

89. Федынский, В. В. Разведочная геофизика / В. В. Федынский. – М.:Недра, 1964. – 677 с.

90. Феррозондовый магнитометр [Текст]: пат. 108638 РФ: МПК G01R33/02/ С. К. Прищепов, К. И. Власкин. – № 2011121985/28; заявл. 31.05.2011; опубл. 20.09.2011, Бюл. №26.

91. Хансуваров, К. И. Техника измерения давления расхода количества и уровня жидкости газа и пара. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 283с.

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

93. Чечурина, Е. Н. Приборы для измерения магнитных величин / Е. Н. Чечурина. – М.: Энергия, 1969. – 168с.

94. Электрические измерения. Средства и методы измерений. Общий курс: учебное пособие для энергетических и электротехнических высших учебных заведений / под ред. Е. Г. Шрамкова. – М.: Высшая школа, 1972. – 519 с.

95. Яновский, Б. М. Земной магнетизм: учеб. пособие / Б. М. Яновский; под общ. ред. В. В. Металловой. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Изд-во Ленинградского ун-та, 1978. – 592 с.

96. Яновский, Б. М. Земной магнетизм II. Теоретические основы магнитометрического метода исследования земной коры и геомагнитные измерения / Б. М. Яновский. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1963. – 462 с.

97. Agustin, L. Resonant Magnetic Field Sensors Based On MEMS Technology / L. Agustin, Herrera-May, A. Luz, Aguilera-Cortes, J. Pedro, Garcia-Ramirez, E. Manjarrez // *Sensors*. – 2009, № 9. – P. 7785-7813.

98. Ando, B. Multilayer based technology to build RTD fluxgate magnetometer / B. Ando, S. Baglio, V. Caruso, V. Sacco, A. Bulsara // *Sensors & Transducers*. – 2006, vol. 65, №3. – P. 509 – 514.

99. Applied Physics Systems [Электронный ресурс] // URL: <http://www.appliedphysics.com>: (дата обращения: 9.12.2013).

100. Bartington Instruments [Электронный ресурс] // URL: <http://www.bartington.com/>: (дата обращения: 9.12.2013).

101. Beach, R. S. Sensitive field – and frequency –dependent impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon / R. S. Beach, A. E. Berkowitz // *J. Appl. Phys.* – 1994, № 76. P.6209 – 6213.

102. Chiesi, L. CMOS planar 2D micro-fluxgate sensor / L. Chiesi, P. Kejik, B. Janossy, R. S. Popovic // *Sensors and Actuators A*. – 2000, vol. 82. – P.174 – 180.

103. Choi, S. O. An integrated micro fluxgate magnetic sensor / S. O. Choi, S. Kawahito, K. Takahashi, Y. Matsumoto, M. Ishida, Y. Tadokoro. // *Sensors and Actuators A*. – 1996, vol. 55. – P.121 – 126.

104. Chong, L. MEMS micro fluxgate sensors with mutual vertical excitation coils and detection coils / L. Chong, R. Wang, Y. Zhou, Z. Zhou. // *Microsystem Technologies*. – 2009, vol. 15, №7. – P. 969–972.

105. Cornea, F. M. Influence of chemical composition on the mechanical properties of amorphous alloys produced in ribbons form / F. M. Cornea, V. A. Serban, C. Codrean, D. Buzdugan // 21st International Conference on Metallurgy and Materials May 23rd - 25th 2012 Hotel Voronez I, Brno, Czech Republic, EU. – 2012, vol. 5. – P. 23 – 25.

106. 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.

107. Dezuari, O. A new hybrid technology for planar fluxgate sensor fabrication / O. Dezuari, E. Belloy, S. E. Gilbert, M. A. M. Gijs // IEEE Transactions on magnetics. – 1999, vol.35, № 4. – P.2111–2117.

108. Diaz-Michelena, M. Small Magnetic Sensors for Space Applications / M. Diaz-Michelena // Sensors. – 2009, №9. – P. 2271–2288.

109. Fluxgate sensors having CoNbZr magnetic core and fabrication method thereof [Text]: pat. 0085535A1 US: Int.Cl. G01R33/04/ K. Na, J. Yuan, S. Choi – 2005-98597; priority data. 19.10.2005; pub. date 19.04.2007.

110. Glass, J. M. Laser cutting of amorphous alloy ribbon and powercore consolidated metal strip / J. M. Glass, H. P. Groger, R. J. Churchill, E. M. Norin // Journal of Materials Engineering. – 1990, vol. 12, №1. – P. 59 – 68.

111. Gottfried, R. A miniaturized magnetic-field sensor system consisting of a planar fluxgate sensor and a CMOS readout circuitry / R. Gottfried, W. Budde, R. Jahne, H. Kuck, B. Sauer, S. Ulbricht, U. Wende // Sensors and Actuators A. – 1996, vol. 54. – P. 443 – 447.

112. High Temperature Three-Axis Fluxgate Probes [Электронный ресурс] // Bartington Instruments. URL: http://www.bartington.com/Literaturepdf/Datasheets/DS2756%20Mag610_Mag611.pdf (дата обращения: 28.01.2014).

113. Hinnrichs, C. Noise and linearity of a fluxgate magnetometer in racetrack geometry / C. Hinnrichs, C. Pels, and M. Schilling. // Journal of applied physics. – 2000, vol. 87, №9. – P. 7085 – 7087.

114. Jian, L. Analysis and comparison of the performance of MEMS fluxgate sensors with permalloy magnetic cores of different structures / L. Jian, L. Chong, Z.Yong // Measurement. – 2013, vol. 46. – P. 710 – 715.

115. Jian, L. Micro fluxgate sensor using solenoid coils fabricated by MEMS technology / L. Jian, L. Chong, Z. Yong // Measurement science review. – 2012, vol. 12, №6. – P. 286 – 289.

116. Kang, C. L. Electroplating a magnetic core for micro fluxgate sensor / C.L. Kang, G. Liu, J.Z. Yang, L.H. Liu, Y. Xiong, Y. C. Tian // Microsystem Technologies. – 2009, vol. 15. – P.413 – 419.

117. Kawahito, S. High-resolution micro-fluxgate sensing elements using closely coupled coil structures / S. Kawahito, H. Satoh, M. Sutoh, Y. Tadokoro // *Sensors and Actuators A*. – 1996, vol. 54. – P. 612 – 617.

118. Kejik, P. A new compact 2D planar fluxgate sensor with amorphous metal core / P. Kejik, L. Chiesi, B. Janossy, R. S. Popovic // *Sensors and Actuators A*. – 2000, vol. 81. – P.180 – 183.

119. Kirchhoff, M.R. MEMS fluxgate magnetometer for parallel robot application / M. R. Kirchhoff, S. Buttgenbach // *Microsystem Technologies*. – 2010, vol. 16. – P. 787 – 790.

120. Kubik, J. Low-Power Printed Circuit Board Fluxgate Sensor / J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka // *IEEE sensors journal*. – 2007, vol. 7. – P. 179 – 183.

121. Kubik, J. Magnetometr with pulse-excited miniature fluxgate sensor / J. Kubik, M. Janosek, P. Ripka // *Journal of electrical engineering*. – 2006, vol. 57. – P. 80 – 83.

122. Kubik, J. PCB racetrack fluxgate sensor with improved temperature stability / J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka // *Sensors and Actuators A*. – 2006, vol. 120 – 131. – P. 184 – 188.

123. Laboratory for electromagnetic innovation [Электронный ресурс] // URL: <http://www.lemisensors.com>: (дата обращения: 9.12.2013).

124. Lenz, J. Magnetic sensors and their applications /J. Lenz, A. S. Edelstein // *IEEE Sensors J*. – 2006. – № 6. – P. 631–649.

125. Magson GmbH. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.magson.de>: (дата обращения: 9.12.2013).

126. 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.

127. Nielsen, O. V. Development, construction and analysis of the ‘OErsted’ fluxgate magnetometer / O. V. Nielsen, J. R. Petersen, F. Primdahl, P. Brauer, B.

Hernando, A. Fernandez, J. M. G. Merayo, P. Ripka // Measurement Science and Technology. – 1995, vol. 6. – P.1099 – 1115.

128. Prishchepov, S. K. A Multifunction Magnetometric Turbine Flowmeter / S. K. Prishchepov, K. I. Vlaskin. // Instruments and Experimental Techniques. – 2011, vol. 54, №6. – C. 857 – 861.

129. Ripka, P. Advances in fluxgate sensors / P. Ripka // Sensors and Actuators A. – 2003, vol. 106. – P.8 – 14.

130. Ripka, P. Excitation efficiency of fluxgate sensors / P. Ripka, W.G. Hurley // Sensors and Actuators A. – 2006, vol. 129. – P.75 – 79.

131. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers / P. Ripka. – Artech House Inc.: Norwood, MA, USA, 2001. – 494 p.

132. Schneider, M. High sensitivity CMOS microfluxgate sensor / M. Schneider, S. Kawahito, Y. Tadokoro, H. Baltes // Proceedings of the IEDM 97 Conference, IEEE. – 1997. – P. 907 – 910.

133. Shaobin, Wu. Fabrication of MEMS-based Micro-fluxgate Sensor with Runway-shaped Co-based Amorphous Alloy Core / Shaobin Wu, Shi Chen¹, Jun Ouyang, Chao Zuo, Lei Yu and Xiaofei Yang Journal of Physics: Conference Series. – 2011, vol. 263.

134. Tumanski, S. Induction Coil Sensors – a Review [Электронный ресурс] / S. Tumanski // URL: <http://www.tumanski.x.pl/coil.pdf>: (дата обращения: 9.12.2013).

135. Ustinov, A. V. Quantum computing using superconductors. / A. V. Ustinov // Nanoelectronics and information technology, advanced electronic materials and novel devices. – Berlin, 2003. – P. 461-472.

136. Vallon GmbH. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.vallon.de>: (дата обращения: 9.12.2013).

137. Yoon, J. B. Monolithic fabrication of electroplated solenoid inductors using three-dimensional photolithography of a thick photoresist / J. B. Yoon, C. H. Han, E. Yoon, C. K. Kim, H. Satoh, M. Sutoh, Y. Tadokoro // Japanese Journal of Applied Physics. – 1998, vol. 37. – P. 7081 – 7085.

138. Zhang, D. Design of a silicon magnetodiodes array with selfcompensation for temperature drift: International Conference on Information Acquisition / D. Zhang, D. Kong, Y. Tao. June 27 - July 3, 2005, Hong Kong and Macau, China. [Электронный ресурс] // URL: <http://ieeexplore.ieee.org>: (дата обращения: 9.12.2013).

Приложение А
(справочное)
Документы
Роспатента

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2448350

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ
МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ**

Патентообладатель(ли): **Прищепов Сергей Константинович (RU)**

Автор(ы): **Прищепов Сергей Константинович (RU), Власкин
Константин Игоревич (RU), Тимофеев Евгений Андреевич
(RU)**

Заявка № 2010129742

Приоритет изобретения **15 июля 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **20 апреля 2012 г.**

Срок действия патента истекает **15 июля 2030 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 108638

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

Патентообладатель(ли): *Прищепов Сергей Константинович (RU)*

Автор(ы): *Прищепов Сергей Константинович (RU), Власкин Константин Игоревич (RU)*

Заявка № 2011121985

Приоритет полезной модели **31 мая 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **20 сентября 2011 г.**

Срок действия патента истекает **31 мая 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 109568**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ**Патентообладатель(ли): *Прищепов Сергей Константинович (RU)*Автор(ы): *Прищепов Сергей Константинович (RU), Стрижов Сергей Андреевич (RU), Власкин Константин Игоревич (RU)*

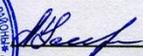
Заявка № 2011123594

Приоритет полезной модели **09 июня 2011 г.**Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **20 октября 2011 г.**Срок действия патента истекает **09 июня 2021 г.***Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*

Б.П. Симонов

Приложение Б (справочное)

Акты об использовании результатов работы

<p style="text-align: center;"><u>УТВЕРЖДАЮ</u></p> <p>Проректор УГАТУ по НИИД Бадамшин Р.А. </p> <p>« 1 » 07 2011 г.</p> 	<p style="text-align: center;"><u>УТВЕРЖДАЮ</u></p> <p>Директор ООО «СитиТрейд» Усманов А.М. </p> <p>« 07 » 2011 г.</p> 
--	---

А К Т

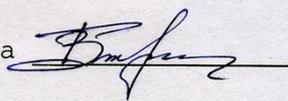
внедрения и практического использования результатов
диссертационной работы Власкина К.И. в рамках договора
кафедры ИИТ УГАТУ АП-ИТ-24-10ХК от 01.10.2010 г.

В соответствии с техническим заданием договора АП-ИТ-24-10ХК от 01.10.2010 г. для проведения контроля металлоконструкций, обеспечивающих производственные циклы фирмы «СитиТрейд» на кафедре ИИТ УГАТУ была произведена разработка магнитометрического градиентомера.

В указанной разработке использованы научные результаты диссертационной работы Власкина К.И., касающиеся: повышения чувствительности, помехоустойчивости магнитометрического преобразователя. Были достигнуты: повышение эффективности и упрощение схемы электронного преобразователя; оптимизация конструкции, обеспечивающая технологичность проведения магнитометрического контроля металлоконструкций.

На основании научных результатов диссертационной работы Власкина К.И. был создан и передан в производство действующий макетный образец «Феррозондовый градиентомер», отвечающий требованиям ТЗ проекта.

Данная разработка решает важную и актуальную задачу эффективности и сокращения сроков контроля производственных металлоконструкций.

Начальник производства  Г.Р. Вершинин

УТВЕРЖДАЮ
Проректор УГАТУ
Бадамшин Р.А. 2.06.09

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Квазар»
Жолдосов Ю.С. 2.06.09

А К Т

лабораторных испытаний 3-х компонентного
феррозондового микропроцессорного магнитометра,
разработанного в рамках договора
АП-ИТ-16-09ХК от 20.04.2009 г.

Испытания проводились 9 июля 2009 г. в лаборатории
1-430 кафедры ИИТ УГАТУ.

Цель испытаний: определение функциональных возможно-
стей и технических характеристик 3-х компонентного ферро-
зондового магнитометра с микропроцессорным блоком
управления, обработки данных и индикации.

Приборы и оборудование: автономный блок батарейного
питания 6В=4*1,5В; осциллограф С1-65; немагнитная плат-
форма 25*30*50 [см]; 3-х компонентный феррозондовый
магнитометр, состоящий из: датчика, блока преобразования
информационных сигналов, микропроцессорного блока
управления, обработки данных и индикации.

Состав комиссии: зам.директора ООО«Квазар» В.Ф.Исаев;
нач.н.т.ц.УГАТУ Ю.М.Смирнов; доцент каф.ИИТ С.К.Прищепов;
дипл.спец.каф.ИИТ К.И.Власкин.

Результаты испытаний:

1. Автономный блок батарейного питания обеспечивает рабочий режим магнитометра.
2. Магнитометр измеряет полный вектор магнитного воздействия, т.е. решает функцию $T = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$, где X, Y, Z ортогональные компоненты вектора T.
3. Магнитометр обладает чувствительностью к МА-магнитным аномалиям на фоне НМПЗ – нормального магнитного поля Земли ($50 \cdot 10^3$ нТл).
4. Уровень чувствительности магнитометра к МА соизмерим с чувствительностью однокомпонентного феррозонда (5 нТл).
5. Магнитометр позволяет определить направление полного вектора магнитного воздействия.

зам.директора ООО«Квазар» В.Ф.Исаев
нач.н.т.ц.УГАТУ Ю.М.Смирнов
доцент каф.ИИТ С.К.Прищепов
дипл.спец.каф.ИИТ К.И.Власкин

9.06.09

9.06.09

9.06.09

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Уфимский государственный
авиационный технический
университет (ФГБОУ ВПО «УГАТУ»)
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12
ИНН 0274023747 КПП 027401001
Получатель УФК по Республике Башкортостан
(ФГБОУ ВПО «УГАТУ», УГАТУ л/сч 20016U95940)
Банк получателя в ГРКЦ НБ Респ. Башкортостан Банка
России г.Уфа
Расчетный счет 40501810500002000002
БИК 048073001

ООО «Хисап»
450019, г. Уфа, ул. Благоварская, 4
ИНН/КПП 0276076568/027501001

Акт № 22

Сдачи-приемки научно-технической продукции
по договору № АП-ИТ-19-11-ХК от 01.10.2011г.

доп. соглашение № 1 от 12.12.2011г.

составлен 15.02.2012г.

НИР «Разработка и исследование феррозондового дефектоскопа».

Мы, нижеподписавшиеся, представитель **ИСПОЛНИТЕЛЯ** – проректор ФГБОУ ВПО «УГАТУ» по научной и инновационной деятельности Р.А. Бадамшин с одной стороны, и представитель **ЗАКАЗЧИКА** – директор ООО «Хисап» С.А. Макаров, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что научно-техническая продукция соответствует ТЗ и календарному плану и в надлежащем порядке оформлена.



Работу принял:
Проректор ФГБОУ ВПО «УГАТУ»
по ИИД

Р.А. Бадамшин

Работу принял:
Директор ООО «Хисап»



С.А. Макаров

Приложение В

Таблица сопоставления технических характеристик предложенных феррозондовых преобразователей - с существующими

Технические характеристики	Предложенные ДФЗ	ИД-6 (РФ)	FGM-3 «Speake & Co. Llanfapley» (Великобритания)	LEMI-019 «KMS Technologies» (США)	НВ0391.2-20 «НПО ЭНТ» (РФ)	Mag670 «Bartington» (Великобритания)
Порог чувствительности, нТл	1	1	10	1	2	10
Диапазон измерений, мкТл	±100	±80	±50	±60	±100	±100
Чувствительность, мВ/нТл	0,01÷0,05	0,01	–	0,05	0,01	0,01
Частота возбуждения, кГц	2÷500	4,5	50÷120	12÷16	12,5÷80	16
Потребляемая мощность, мВт	2,5	42	65	30	105	68
Габаритные размеры, мм	30x2 (ЧЭ)	42x8 (ЧЭ)	61x14,5	60x17	20 x 9 (20x4,5 ЧЭ)	80x35x15
Масса ЧЭ, г	1,2	8	–	–	4	–
Возможность переключения режимов Полемер-Градиентомер	+	–	–	–	–	–