

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

На правах рукописи

ЮДАНОВ НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ АМОРФНЫХ МИКРОПРОВОДОВ И
ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО
ПОЛЯ

Специальность 05.27.06 – технология и оборудование
для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
профессор Панина Л.В.

Москва 2016

Содержание

Введение.....	5
ГЛАВА 1 Литературный обзор: Технология производства аморфных микропроводов, их физические свойства и области применения. Особенности применения микропроводов в высокочувствительных датчиках.....	13
1.1 Аморфные материалы и их магнитные свойства.....	13
1.2 Технология изготовления аморфных микропроводов.....	16
1.3 Аморфный микропровод, его свойства и характерные особенности.....	22
1.3.1 Магнитная структура аморфного микропровода.....	22
1.3.2 Бистабильные микропровода и эффекты быстрого перемагничивания.....	25
1.3.3 Эффект магнитного импеданса.....	29
1.3.4 Температура Кюри и влияние температуры на магнитный импеданс.....	35
1.4 Перспективные области применения аморфных микропроводов.....	39
1.4.1 Датчики механических напряжений на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных сплавах.....	40
1.4.2 Высокочастотные акустические элементы.....	42
1.4.3 Магнитные метки.....	42
1.4.4 Бесконтактные температурные датчики на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных сплавах.....	43
1.5 Особенности (обзор) конструкции чувствительного элемента датчика.....	46
1.6 Обзор современных магнитных датчиков.....	50
1.7 Выводы и постановка задачи.....	55
ГЛАВА 2 Методы измерения и модификации параметров ферромагнитных микропроводов. Методы построения чувствительных элементов МИ датчика.....	59
2.1 Методики измерения статических магнитных свойств микропроводов	59
2.1.1 Индуктивный измеритель магнитных характеристик.....	59
2.1.2 Вибрационный магнитометр МВ-07 и его модернизация для проведения магнитного анализа.....	63

2.2 Экспериментальные методы исследования компонент тензора поверхностного импеданса.....	65
2.2.1 Физические принципы измерения тензора магнитного импеданса.....	65
2.2.2 Экспериментальный стенд для измерения тензора магнитоимпеданса.....	68
2.2.3 Магнитокомпенсационный измерительный стенд.....	71
2.3 Определение оптимальных параметров возбуждения магнитоимпедансных чувствительных элементов.....	74
2.4 Механические напряжения, термомагнитная и термомеханическая обработка аморфных микропроводов для контроля магнитной анизотропии.....	76
2.4.1 Напряжения в аморфном микропроводе.....	77
2.4.2 Влияние механических напряжений на магнитную структуру аморфного микропровода.....	80
2.4.3. Термомагнитная обработка.....	81
2.5 Методы построения чувствительных элементов магнитоимпедансных датчиков с применением микропроводов.....	83
2.5.1 Каркасная технология изготовления.....	84
2.5.2 Технология изготовления ЧЭ на микро каркасе.....	87
2.5.3 Бескаркасная технология ЧЭ.....	88
2.6 Выводы по главе.....	90
 ГЛАВА 3 Оптимизация магнитоимпедансных характеристик с помощью внешних полей смещения, частоты возбуждения и термомагнитной обработки.....	92
3.1 Результаты измерения статических магнитных свойств микропроводов.....	92
3.2 Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе и влияние постоянного тока....	94
3.3 Влияние полей смещения и сигнала возбуждения на полевую характеристику недиагонального импеданса в сенсорной конфигурации.....	97
3.4 Влияние температурной и термомагнитной обработки на магнитный импеданс в микропроводе.....	107
3.5 Влияние технологии изготовления чувствительного элемента на свойства микропровода. Магнитное взаимодействие в многопроводных ЧЭ.....	115
3.5.1 Каркасная технология изготовления.....	115
3.5.2 Технология сборки ЧЭ на микро каркасе, её особенности и свойства.....	118

3.5.3	Бескаркасная конструкция ЧЭ, её особенности и свойства.....	120	
3.6	Выводы по главе	121	
ГЛАВА 4 Технологические аспекты изготовления миниатюрных датчиков на основе МИ эффекта.....123			
4.1	Принципиальная конструкция чувствительного элемента для магнитоимпедансного датчика.....	123	
4.2	Особенности построения датчиков с применением магнитоимпедансных чувствительных элементов.....	125	
4.3	Выбор элементной базы для построения датчика.....	132	
4.3.1	Аналоговая часть датчика.....	132	
4.3.2	Цифровая часть датчика.....	135	
4.3.3	Организация питания.....	137	
4.4	Построение общей схемы, трассировка, технология изготовления.....	138	
4.5	Принципы и возможности интеллектуализации МИ датчиков.....	140	
4.6	Разработка программного обеспечения (ПО).....	142	
4.7	Работа МИ датчика.....	147	
4.8	Выводы по главе.....	149	
Заключение			150
Список сокращений.....			152
Список публикаций по теме диссертации.....			153
Список использованных источников.....			156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Перспективы развития магнитной сенсорной технологии для регистрации слабых магнитных полей обусловлены двумя основными тенденциями. Во-первых, однородно намагниченные или хорошо структурированные магнитные материалы характеризуются низким уровнем магнитных шумов. Во-вторых, имеется целый ряд физических явлений для получения эффективного и локального сигнала отклика от магнитного материала: гигантское магнетосопротивление, спин-туннельный эффект, магнитомодуляционный эффект и гигантский магнитный импеданс. Среди перечисленных методов магнитный импеданс (МИ) является одним из перспективных с точки зрения сохранения высокой чувствительности при уменьшении размеров, увеличения быстродействия и уменьшения энергетических затрат. Существует обширная литература по исследованиям МИ в различных ферромагнитных структурах, которые в основном направлены на увеличение относительного изменения импеданса под действием внешнего магнитного поля, однако вопросы построения МИ сенсоров мало разработаны.

Первые работы по МИ были опубликованы еще в 1935-1936 годах, где исследовалось изменение импеданса в NiFe проводах с высокой магнитной проницаемостью. Однако эти работы не получили дальнейшего развития из-за относительно небольшого эффекта (порядка 20%) и нестабильности результатов. В начале 90-х появились новые работы по МИ в аморфных ферромагнитных проводах и лентах, в которых было получено очень большое и повторяемое изменение импеданса на уровне 50-100%, что вызвало значительный интерес, обусловленный потенциалом его использования в различных сенсорных системах. После этого МИ исследовался в различных магнитомягких материалах: аморфных проводах со стеклянной оболочкой, нанокристаллических проводах, пленках и многослойных пленках. Так, в аморфных микропроводах на основе Fe и Co чувствительность изменения импеданса по отношению к магнитному полю была доведена до 600%/Э. Такое большое изменение импеданса в литературе называют эффектом гигантского магнитоимпеданса, или кратко, ГМИ-эффектом. Высокая чувствительность ГМИ-эффекта к внешним воздействиям магнитного поля открывает возможности для создания датчиков на его основе. Однако остаются нерешенными задачи увеличения чувствительности электронной подсистемы (то есть, выходного сигнала (В/Э)) и улучшения температурной стабильности. Первая задача связана с оптимизацией высокочастотного возбуждения и конструкции МИ

чувствительного элемента. Вторая задача связана с оптимизацией магнитных и структурных свойств ГМИ материалов.

ГМИ-датчики имеют потенциал для применений в самых различных областях: в медицине для регистрации магнитных полей от различных органов (магнитная кардиография), в дефектоскопии для неразрушающего контроля (проверка ж/д рельс, нефте- и газопроводов), в геодезии, авто, авиа и космической технике (сверхточные электронные компасы) и т.д. Миниатюрные ГМИ-элементы могут быть использованы для портативных устройств навигации или кардиографах-имплантатах. По сравнению с другими датчиками ГМИ-элементы имеют преимущества в сочетании ряда свойств: быстродействия, высокой чувствительности, миниатюрности, малого потребления энергии, себестоимости изготовления. Миниатюризация сенсоров на сегодняшний день позволяет получить диаметр чувствительного элемента менее 100 мкм, это открывает новые возможности применения таких сенсоров и получить сверхвысокие разрешения. Подобные разработки ведутся в ведущих научных центрах мира (в США, Японии, Китае).

Современный уровень техники требует применения датчиков, способных на что-то большее, чем выдача аналоговых данных или бита включения. В таких условиях начинает развиваться новое направление датчиков - интеллектуальные датчики, способные удовлетворить требования по их функциональности, надежности и условиям эксплуатации.

Использование интеллектуальных датчиков (ИД) дает возможность иначе подойти к распределению функций между основными частями электронной системы, в частности, отказаться от использования аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), освободить центральный процессор от обработки больших объемов первичной информации с обычных датчиков. Интеллектуальный датчик представляет собой электронное устройство, основанное на объединении чувствительных элементов (ЧЭ), схемы преобразования сигнала и микроконтроллера.

Интеллектуальный датчик способен самостоятельно подстраиваться под воздействующие условия эксплуатации и одновременно регулировать свои внутренние процессы для достижения максимальной эффективности работы. Интеллектом датчики обязаны современным микросистемным и микропроцессорным технологиям, а именно, новым микроконтроллерам. Микроконтроллер (система на кристалле) - это мозг датчика, он изучает внешние воздействия, принимает решения об изменениях режимов работы датчика, выполняет логические, математические и множество других вспомогательных операций, необходимых для работы датчика. При использовании МИ чувствительных

элементов, микроконтроллер может также выполнять функции высокочастотного возбуждения.

Весь логико-математический алгоритм работы содержится в программном обеспечении датчика, запрограммированном в микроконтроллер на этапе производства датчика. Использование микроконтроллеров в составе датчиков обеспечивает возможность улучшения метрологических, массогабаритных и эксплуатационных характеристик. Современные микроконтроллеры способны с высокой скоростью обрабатывать большие объемы информации, а постоянное снижение их себестоимости и стремительный рост их функциональных возможностей позволяют создавать недорогие интеллектуальные датчики с большими функциональными возможностями.

Таким образом, исследование магнитноимпеданса и построение интеллектуальных датчиков на его основе является актуальной задачей, как с точки зрения оптимизации ГМИ характеристик, разработки электронной схемы, а также развития направления интеллектуальных датчиков магнитных измерений.

Цели и задачи. Целью работы являлась разработка методов модификации свойств аморфных микропроводов для применений в качестве МИ элементов датчика, а также принципов и технологии изготовления высокочувствительных датчиков магнитного поля на основе МИ-эффекта.

Конкретные задачи работы заключались в следующем:

- Изучить влияние магнитной анизотропии, магнитных полей смещения, формы сигнала возбуждения на МГц частотах на зависимость импеданса аморфного провода в недиагональной конфигурации от измеряемого магнитного поля с целью увеличения чувствительности выходного сигнала напряжения (В/Э).
- Изучить влияние температурной и термомагнитной обработки на магнитный импеданс в микропроводе для последующего улучшения и изменения свойств датчиков.
- Изучить влияние воздействия температуры и механических напряжений на магнитный импеданс в аморфном проводе для стабилизации параметров датчика.
- Разработать конструкцию чувствительного элемента (ЧЭ) с использованием ГМИ микропроводов в недиагональной конфигурации для высокочувствительных датчиков магнитного поля и технологию его изготовления.
- Изучить влияние режима сигнала возбуждения на работу ЧЭ датчика. Выбрать оптимальный режим возбуждения ЧЭ датчика.

- Разработать электронную схему с источником возбуждения, приемником сигнала и блоком обработки данных.
- Определить основные принципы построения интеллектуальных датчиков с применением магнитоимпедансных чувствительных элементов. Разработать интеллектуальное программное обеспечение блока обработки данных.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложена термомагнитная обработка микропроводов для модификации их параметров в составе чувствительного элемента сенсора. Она позволяет существенно увеличить его чувствительность и улучшить температурную стабильность.
2. Разработана методика измерения температурных зависимостей импедансных характеристик ЧЭ для различных вариантов его конструкции, проведено исследование этих зависимостей и предложены варианты температурной компенсации.
3. Изучен недиагональный магнитный импеданс в проводах с наведенной геликоидальной анизотропией и предложен метод компенсации «offset», возникающий из-за асимметрии МИ характеристик. Метод позволяет корректировать полевую характеристику датчика для выполнения его калибровки.
4. Впервые предложен резонансный метод возбуждения, позволяющий рекордно повысить соотношение (вольт/Э) на один виток. Получен патент RU2549843. Увеличение чувствительности происходит за счет минимизации потерь энергии внутри детектирующего контура чувствительного элемента (ЧЭ), а минимизацию потерь энергии обеспечивает резонанс частоты внутреннего контура и частоты возбуждения ЧЭ.

Практическая значимость работы

1. Предложен много проводной недиагональный МИ-чувствительный элемент, позволяющий увеличить выходной сигнал при сохранении чувствительности и расширить динамический диапазон.
2. Предложен двухпроводной дифференциальный чувствительный элемент, получен патент RU2582488 на данную разработку. Дифференциальный чувствительный элемент компенсирует наведенные электромагнитные помехи, что позволяет значительно повысить соотношение сигнал/шум.
3. Предложена конструкция миниатюрного интеллектуального магнитоимпедансного сенсора. Получен патент RU2582488 на данную разработку. В основе конструкции лежит несколько дифференциальных чувствительных элементов, ВЧ усилитель-детектор и микроконтроллер с интеллектуальным ПО.

4. Предложена оригинальная технология изготовления чувствительного элемента методом намотки микропровода на микропровод, позволяющая уменьшить размер чувствительного элемента до 70 мкм при сохранении чувствительности, двухпроводная конструкция позволяет расширить диапазон измерений при сохранении чувствительности.
5. Разработан прототип МИ-датчика на основе микроконтроллера, который выполняет роль возбуждающей и контролирующей подсистемы с интеллектуальным программным обеспечением, то есть датчик обладает внутренними интеллектуальными свойствами.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методики термо- и термомагнитной обработки аморфного микропровода позволяют до 100% увеличить чувствительность МИ, «передвигать» операционный режим чувствительного элемента и до 50% улучшить температурную стабильность за счет релаксации внутренних напряжений.
2. Механизм резонансного возбуждения МИ-элемента в недиагональной конфигурации приводит к нелинейному возрастанию выходного сигнала и позволяет достичь рекордной чувствительности передаточной функции порядка 13мВ/(Э·виток).
3. Основы технологии получения интеллектуальных сенсоров на основе МИ-эффекта.

Структура и объем работы

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений, список используемой литературы. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 107 рисунков. Список используемой литературы включает 105 наименований.

ПЕРВАЯ глава содержит краткий литературный обзор, посвященный: аморфным микропроводам (технология получения, свойства и области применения), эффекту магнитного импеданса и сравнительному анализу электромагнитных датчиков слабых магнитных полей.

Во ВТОРОЙ главе рассмотрены основные методики измерения магнитных и магнитоимпедансных характеристик микропроводов, обсуждаются экспериментальные результаты по недиагональному МИ и методы оптимизации недиагонального МИ сенсора.

В ТРЕТЬЕЙ главе обсуждаются технологии управления свойствами микропровода и недиагонального МИ. Приведены результаты измерения статических и динамических магнитных характеристик микропроводов, а так же приведены данные о влиянии

температуры на магнитный импеданс. В конце главы обсуждается влияние различных режимов температурной обработки на МИ и на температурные зависимости МИ.

ЧЕТВЕРТАЯ глава посвящена устройству сенсоров и технологии их изготовления. Обсуждается выбор материалов и компонентов сенсора, электрическая схема и печатная плата датчика. Так же приведена структурная схема программного обеспечения и результаты измерения магнитных полей разработанным сенсором.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 20-я Международная конференция по магнетизму, Испания, Барселона 5-10 июля 2015 (ICM 2015). Международный семинар по магнитным микро и нано проводам, Ординия, Испания 2-4 июля (IWMW 2015). Московский международный симпозиум по магнетизму «MISM-2014» Москва. 29 июня - 3 июля 2014 г.; Шестая международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» Москва 26-28 мая 2015г. Международный симпозиум «Физика кристаллов» 2013. Москва 28 октября - 2 ноября 2013 г. 66-е дни науки студентов МИСиС: международная, межвузовская и институтская научно-техническая конференция. Москва. 12-20 апреля 2011г.; X-я Международная научно-практическая конференция «Физика и технология наноматериалов и структур». Курск. 20-22 ноября 2013 года; 67-е дни науки студентов МИСиС: международная, межвузовская и институтская научно-техническая конференция. Москва. 9-27 апреля, 2012г; X-я Международная конференция «Перспективные технологии оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов». Алмааты. 13-14 июня 2013г; 68-е дни науки студентов МИСиС: международная, межвузовская и институтская научно-техническая конференция. Москва. 4-19 апреля 2013г; 69-е дни науки студентов МИСиС: международная, межвузовская и институтская научно-техническая конференция. Москва. 15-18 апреля 2014г; 70-е дни науки студентов МИСиС 6-20 апреля 2015; 71-е дни науки студентов МИСиС 4-19 апреля 2016г; XI-я Международная научно-практическая конференция «Физика и технология наноматериалов и структур». Курск. 13-14 мая 2014 года;

Публикации:

Материалы данной диссертационной работы были также опубликованы в 17-и статьях реферируемых научных журналов, сборниках материалов и докладов

международных и всероссийских конференций, в том числе 3 статьи в зарубежных журналах, входящих в базу WOS, 4 статьи в журналах из базы Scopus и 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получено два патента на изобретение.

Результаты работы использовались при выполнении грантов: РФФИ грант № 13-08-01319 «Миниатюрные магнитоимпедансные сенсоры для регистрации слабых магнитных полей с высоким пространственным разрешением», 2013-2015.

ГЛАВА 1 Литературный обзор: Технология производства аморфных микропроводов, их физические свойства и области применения. Особенности применения микропроводов в высокочувствительных датчиках

1.1 Аморфные материалы и их магнитные свойства

Аморфные магнитные материалы (АММ) представляют собой ферромагнетики, у которых отсутствует дальний порядок в расположении атомов, но сохраняется дальний порядок в отношении ориентации магнитных моментов. Вообще говоря, ближний порядок характерен для жидкостей, но в отличие от аморфных материалов, в жидкостях происходит непрерывный обмен между соседними частицами, который затрудняется при увеличении их вязкости. Таким образом, твердое тело в аморфном состоянии можно рассматривать как переохлажденную жидкость большой вязкости. Поскольку в АММ, в отличие от кристаллических материалов, отсутствует периодичность в расположении атомов, то для них характерно отсутствие кристаллографической магнитной анизотропии и дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, границ зерен и блоков)[1].

Для АММ характерно метастабильное неравновесное термодинамическое состояние. Однако существует интервал температур, в котором перестройка их структуры происходит крайне медленно. Этот интервал определяется разностью температуры кристаллизации аморфной фазы ($T_{\text{кр}}$) и температуры стеклования ($T_{\text{ст}}$): $\Delta T = T_{\text{кр}} - T_{\text{ст}}$ [2].

Доказано, что чем больше интервал разницы температур ΔT , тем стабильнее аморфное состояние. Для сплавов на основе магния и железа $\Delta T = 61$ К, в сплавах с добавками лантанидов и палладия $\Delta T = 98$ К, а циркония $\Delta T = 127$ К [3]. В последнем случае ΔT является максимальным, известным на сегодняшний день значением области существования переохлажденной жидкости. При нагревании аморфных сплавов выше $T_{\text{кр}}$ они кристаллизуются. Для основных аморфных сплавов $T_{\text{кр}}$ лежит в пределах 600 - 800 К. Металлические стекла практически стабильны при $T_{\text{кр}} < 200$ К [4].

Магнитомягкие аморфные сплавы, как правило, состоят на 70–80 % из одного или нескольких переходных металлов (Fe, Co, Ni) и на 20-30 % из металлоидов (стеклообразователей). Введение металлоидов позволяет изменять физические свойства аморфных сплавов, а также получать материалы с заданными свойствами. Так, тантал и ванадий повышают температурную стабильность магнитных характеристик АММ, хром улучшает коррозионные, а молибден – частотные свойства. Кроме того, меняя состав аморфного сплава, можно оптимизировать константу магнитострикции, которая играет

определяющую роль в формировании магнитной анизотропии в АММ, изменить температуру Кюри, увеличить удельное сопротивление, прочность, пластичность.

Современные магнитомягкие АММ, как правило, имеют следующие свойства:

1. Широкий интервал существования переохлажденной жидкости перед кристаллизацией;
2. Высокую индукцию насыщения: $B_S = 4\pi M_S$;
3. Малое значение коэрцитивной силы H_C ;
4. Высокое значение начальной магнитной проницаемости μ ;
5. Высокое удельное сопротивление σ ;
6. Высокую прочность и твердость при великолепной пластичности.

Благодаря высокому значению B_S и малой коэрцитивной силе H_C для аморфных магнитных материалов характерны низкие потери на гистерезис, а благодаря высокому сопротивлению – низкие потери на вихревые токи. Дешевая технология получения, а также перечисленные выше особенности аморфных материалов, позволяют их эффективно внедрять в технику. Они используются для изготовления магнитопроводов магнитных головок, магнитных экранов, сердечников трансформаторов, магнитострикционных вибраторов, линий задержки, датчиков деформаций, магнитных сенсоров. Аморфные металлы и сплавы часто используются как материалы для припоев, как катализаторы и абсорбирующие материалы [5, 6].

Ферромагнетизм АММ обусловлен присутствием в них ферромагнитных переходных металлов (железа, кобальта и никеля) с незаполненной 3d-оболочкой. 3d-электроны этих металлов являются носителями локальных магнитных моментов в атоме. Обменное взаимодействие между локальными магнитными моментами приводит к появлению спонтанной намагниченности.

Важнейшими физическими величинами, определяющими различные магнитные свойства ферромагнетиков, являются средний атомный магнитный момент и температура Кюри (T_C). Сравнение этих величин для кристаллических и аморфных ферромагнетиков свидетельствует об уменьшении в аморфных материалах значений среднего атомного магнитного момента и T_C . Чтобы установить причины этого уменьшения, в работе [1] были рассмотрены вопросы о магнитной структуре АММ и роли аморфизации в формировании магнитного порядка. Авторы показали, что химический и структурный атомный беспорядок, характерный для аморфного вещества, приводит к возникновению флуктуаций обменного взаимодействия, магнитного момента и одноионной анизотропии. Подобные флуктуации являются следствием сильной зависимости интеграла обмена от расстояния между атомами и от конфигурации связей. Аморфизация оказывает

наибольшее влияние на магнитные моменты 3d-металлов из-за делокализации неспаренных электронов. Локальный магнитный момент при этом определяется не только положением, но типом и числом ближайших к нему соседних атомов. В случае редкоземельных элементов, у которых 4f-электроны экранированы сильнее, эффект флуктуаций локальных магнитных моментов значительно уменьшается [7].

Как и для кристаллических ферромагнетиков, для АММ характерно явление гистерезиса, магнитного насыщения и наличие доменной структуры. Величина спонтанной намагниченности уменьшается с ростом температуры и при температуре Кюри T_C становится равной нулю. При исследовании температурной зависимости спонтанной намагниченности аморфных сплавов было установлено, что низкотемпературные изменения намагниченности могут быть описаны в спин-волновом приближении [8], а при высоких температурах изменение намагниченности происходит слабее, чем по функции Бриллюэна. Причиной этого является наличие дисперсии локальной анизотропии и обменных взаимодействий [9, 10].

Специального анализа потребовала проблема магнитной анизотропии АММ. Магнитная анизотропия является структурно-чувствительным свойством материала и, следовательно, зная причину ее появления, можно получить новые сведения о структуре АММ. Кроме того, магнитная анизотропия определяет значения таких важных в практическом отношении величин, как коэрцитивная сила и начальная проницаемость. Изначально предполагалось, что магнитная анизотропия в АММ отсутствует. Первое доказательство существования магнитной анизотропии было получено для аморфного сплава Co-P [17]. В дальнейшем макроскопическая магнитная анизотропия была обнаружена во многих АММ. В случае одноосной магнитной анизотропии в аморфных ферромагнетиках основной вклад в энергию анизотропии записывается в виде: $U_K = -K_{\text{эфф}} \cdot \cos^2\theta$, а поле анизотропии: $H_K = 2K_{\text{эфф}}/M_S$, где $K_{\text{эфф}}$ – эффективная константа одноосной анизотропии, θ – угол между вектором намагниченности M и осью легкого намагничивания (ОЛН), M_S – намагниченность насыщения.

Работа Кронмюллера [11] была одной из первых, где были перечислены возможные причины магнитной анизотропии в АММ. Перечислим основные причины магнитной анизотропии в аморфных магнитомягких материалах.

1. Магнитоупругая энергия, возникающая благодаря магнитострикции при наличии внутренних механических напряжений;
2. Магнитное диполь-дипольное взаимодействие, с которым связаны анизотропия формы образца (обусловленная не только его формой, но и состоянием

поверхности), внутренняя анизотропия формы (обусловленная анизотропией формы внутренних неоднородностей) и анизотропия упорядочения атомов;

3. Спин-орбитальное взаимодействие, приводящее к одноионной анизотропии и анизотропии обменного взаимодействия.

Энергия магнитоупругой анизотропии определяется соотношением:

$$U_{me} = -\frac{3}{2M^2} \lambda_s (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{M})^2$$
, где λ_s – константа магнитострикции, $\boldsymbol{\sigma}$ – механические напряжения, \mathbf{M} – вектор намагниченности.

Магнитоупругая анизотропия существует во всех аморфных сплавах, полученных методом закалки расплава на быстровращающемся барабане, поскольку при этом способе изготовления всегда присутствуют значительные внутренние напряжения, обусловленные процессом затвердевания. Величина этих напряжений и, соответственно, энергия магнитоупругой анизотропии могут быть существенно уменьшены путем термической обработки материала, при которой происходит релаксация этих напряжений. Вместе с тем, усиление одноосной магнитной анизотропии может быть достигнуто при отжиге АММ в магнитном поле (термомагнитная обработка) и при воздействии на аморфные образцы механических напряжений. Основным механизмом такой наведенной магнитной анизотропии является парное упорядочение атомов. Первая модель направленного упорядочения атомов при рассмотрении наведенной магнитной анизотропии была предложена Ван Флеком в 1937 году. Позже японские ученые применили подобную модель для объяснения наведенной магнитной анизотропии в АММ. Подробное описание этой модели приведено в книге S. Chikazumi “Physics of Ferromagnetism”, Oxford University Press, Oxford, 1997. В соответствии с таким механизмом пары ближайших соседних атомов ориентируются в образце вдоль определенного направления, задаваемого приложенным внешним магнитным полем или механическим напряжением. Здесь следует отметить, что влияние анизотропии формы образца на результаты измерений, например, магнитных характеристик, можно полностью исключить, если использовать образцы определенной формы.

1.2 Технология изготовления аморфных микропроводов

В настоящее время основными методами получения аморфных сплавов в форме микропроводов, являются два метода [12 - 17].

Первый метод заключается в спининговании (выдавливании) струи расплава из кварцевой ампулы через калиброванное отверстие во вращающийся слой закалочной

жидкости. Таким методом получают быстро закаленные провода диаметром 50-180 мкм. Макет установки для получения микропровода показан на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Лабораторная установка по получению провода

Ограничение использования этого метода связано с необходимостью использовать дорогие высокочистые компоненты (класса High Purity) и нестабильностью геометрических параметров [12, 13]. Кроме того, взаимодействие железосодержащего расплава с водой может приводить к коррозии провода.

Вторым методом получения аморфных микропроводов является метод Улитовского-Тейлора [14]. В этом случае металлическое ядро плавится и одновременно покрывается стеклянной оболочкой толщиной вплоть до 15 мкм, а потом быстро охлаждается и вытягивается в проволоку диаметром от 3 до 60 мкм. В этом методе обеспечивается всестороннее охлаждение расплава, а наличие стеклянной оболочки способствует снижению скорости закалки за счет подавления скорости диффузионных процессов. Снижение скорости закалки позволяет использовать для получения провода дешевое исходное сырьё коммерческой чистоты.

Впервые тонкие металлические нити в стеклянной оболочке получил Тейлор в 1924 году [15, 16]. В 1940 году этот метод был усовершенствован Ф.Маковским. При использовании этого способа навеску металла помещают в горизонтально расположенную стеклянную трубку. Нагрев металла и стеклянной трубки осуществляется газовой горелкой. После расплавления металла и нагрева трубки до температуры размягчения стекла она быстро растягивается. Этот способ не получил промышленного применения из-за ограниченной длины получаемого микропровода (несколько метров). В 1948 году проф.

А. Улитовский предложил новый способ получения микропроводов в стеклянной оболочке [12]. Несколько граммов металла или сплава помещается в стеклянную трубку и вносится в поле высокочастотного индуктора. Под действием электромагнитного поля происходит разогрев, расплавление металла и образование из него капли. Часть стеклянной трубки, примыкающая к расплавленному металлу, размягчается, и из стекла формируется оболочка, обволакивающая каплю. Из размягченного стекла вытягивается стекловолокно, которое заводится и наматывается на катушку приёмного устройства. При определённых режимах вытяжки возникают условия затекания металла в образующийся стеклянный капилляр (см. рис. 1.2 а). На пути от индуктора к приёмной катушке микропровод проходит через струю охлаждающей жидкости (воду или масло). Таким образом, формируется микропровод, состоящий из центральной металлической жилы и сплошной стеклянной оболочки. Расход стекла в процессе получения микропровода компенсируется непрерывной подачей стеклотрубки в зону индуктора. Расход металла на формирование жилы микропровода ограничивается исходной массой капли.

Недостаток метода состоит в том, что процесс получения из капли расплава является нестационарным. В результате непрерывное изменение количества расплавляемого металла приводит к изменению температуры капли, положения капли в индукторе, положения оптимальной температурной зоны закалки в процессе литья. Оптимальное одновременное поддержание всех этих параметров является затруднительным. Вследствие чего наблюдаются различные виды неустойчивостей геометрических параметров и свойств микропровода.

С целью устранения выше указанных недостатков этот метод был модифицирован. Модификацией капельного метода является «непрерывный» метод литья микропровода [16]. В этом модернизированном (непрерывном) методе Улитовского – Тейлора уровень магнитомягких Fe-Co сплавов в капле (микрованне) непрерывно восстанавливается вводимым в неё стержнем исходного сплава (рисунок 1.2 б).

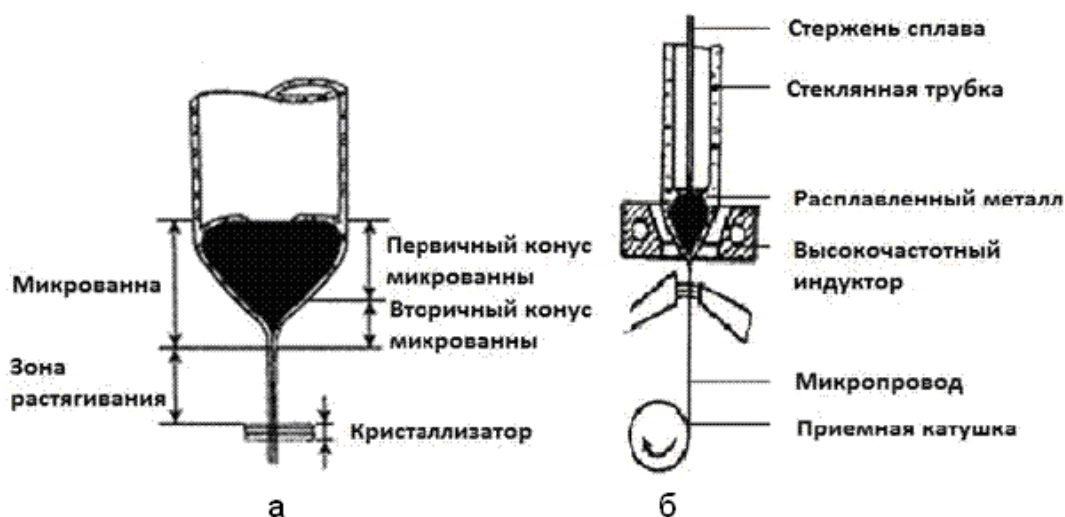


Рисунок 1.2 – Капельный метод получения металлического микропровода в стеклянной оболочке из жидкой фазы металлов по методу Улитовского (а) и «непрерывный» метод литья микропровода (б)

Модернизация метода состояла в следующем:

- Реализована комплексная металлургическая очистка расплава для получения прекурсоров;
- Разработано оборудование для непрерывного процесса получения микропровода, обеспечивающее контроль и управление параметрами процесса;
- Разработан метод раскладки микропроводов в катушки.

В дальнейшем с помощью этого метода был получен новый тип проводов, а именно «толстые» аморфные провода в стеклянной оболочке с диаметром металлической жилы от 50 до 200 мкм [17].

Модернизированный метод успешно применяется при промышленном производстве микропровода на одном из крупнейших предприятий Европы – MFTI Ltd (Micro-Fibre Technology Industry), которое было основано в 2002 году в г. Кишинёв.

Модернизированный метод обладает следующими преимуществами:

- повторение свойств микропровода в массовом производстве;
- широкий диапазон изменений параметров (геометрических и физических);
- производство микропровода большой длины до 10 000 м;
- контроль и изменения геометрических параметров (внутренний диаметр жилы и толщина стекла) во время процесса производства.



Рисунок 1.3 – Фотография установки для производства микропровода

Еще один вариант усовершенствования метода Улитовского – Тейлора описан патенте 427396 от 05-05-74, в котором авторы изобретения Т. Х. Чормоиов, Т, Акабаев, В, В. Михалев, В. С, Тюиьков и В. И, Филиппов предлагают следующее. Известны способы, получения микропровода в стеклянной изоляции по методу А.В, Улитовского, при которых на зону формирования микропровода воздействуют ультразвуковыми колебаниями одной частоты. При этом указанное воздействие осуществляют либо на расплав металла (через питающий стержень или через стеклянную трубку), либо на жилу микропровода в зоне ее кристаллизации через струю охлаждающей жидкости. Указанными способами, не представляется возможным получить микропровод с необходимыми физико-механическими характеристиками. Предлагаемым способом предусматривается воздействие на зону формирования микропровода двух колебаний с разными частотами. В частности, одним из указанных колебаний воздействуют на расплав металла через стеклянную трубку, а другим на жилу микропровода в зоне ее кристаллизации через струю охлаждающей жидкости. На рисунке 1.4 показано устройство, позволяющее реализовать рассматриваемый способ.

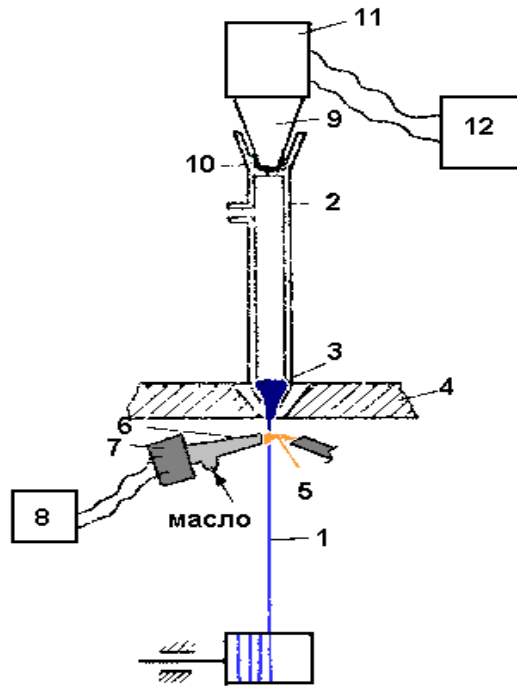


Рисунок 1.4 – Метод непрерывного литья микропровода. 1-микропровод, 2-стеклянная трубка, 3-расплавленный металл, 4-индуктор, 5-струя масла, 6-резервуар, 7-источник ультразвуковых колебаний, 8-генератор импульсный 20-30кГц

Микропровод 1 получают путем вытяжки капилляра из размягченного конца трубки 2 с жидким металлом 3, расплавленным токами высокой частоты, наводимыми индуктором 4. Ввод ультразвуковых колебаний одной частоты (более низкой, в частности 18-20 кГц) на жилу микропровода в зоне ее кристаллизации осуществляется через струю кристаллизующей жидкости 5, озвучиваемой излучателем 6, соединенным с источником ультразвуковых колебаний 7, питающимся от генератора ультразвуковых колебаний 8. В зону расплава металла ультразвуковые колебания другой частоты (более высокой, в частности 20- 30 кГц) подаются через стеклянную трубку 2, материал которой служит волноводом. Акустический контакт между излучателем 9 и стеклянной трубкой 2 осуществляется через слой масла 10. Источником ультразвуковых колебаний является магнитно-стрикционный преобразователь 11, питающийся от ультразвукового генератора 12. Облучение зоны формирования микропровода ультразвуковыми колебаниями двух частот одновременно позволяет получать мелкозернистую структуру металлической жилы, что повышает механическую прочность как микропровода, так и спая стекла с металлом. Это также повышает стабильность микропровода и понижает ТКС. Использование рассматриваемого способа литья микропровода в промышленности

является определенным шагом в направлении серийного изготовления микропроводов повышенных эксплуатационных и технических характеристик.

1.3 Аморфный микропровод, его свойства и характерные особенности

1.3.1 Магнитная структура аморфного микропровода

Известно, что доменная структура любого ферромагнетика определяется минимумом его свободной энергии, равной, как правило, сумме энергий магнитостатических полей рассеяния, магнитной анизотропии, магнитострикционной и обменной энергии.

Остановимся на более детальном описании доменных структур в аморфных проволоках. Согласно существующим представлениям, аморфные проволоки с положительной магнитострикцией ($\lambda_S > 0$) состоят из внутренней области с одноосной анизотропией, которая намагничивается в малых полях, и зигзагообразной мультидоменной внешней оболочки с радиальным направлением намагниченности. Аморфные проволоки с отрицательной магнитострикцией ($\lambda_S < 0$) также состоят из внутренней области с осевой намагниченностью, однако в отличие от проволок с $\lambda_S > 0$, ось легкого намагничивания во внешней оболочке имеет круговое направление (рисунок 1.5). Такую доменную структуру называют структурой типа "бамбук" [18, 19]. Вообще говоря, возникает вопрос о причинах появления круговой доменной структуры, так как не происходит образование магнитных полюсов. В работе [18] было показано, что распределение намагниченности в аморфных проволоках с $\lambda_S < 0$ обусловлено малыми возмущениями аксиальной симметрии проволоки. Оказалось, что, благодаря достаточно большой величине намагниченности насыщения, даже малое возмущение аксиальной симметрии может вызвать появление поверхностных или объемных магнитных зарядов заметной величины. Если такие возмущения медленно распространяются вдоль проволоки на расстояния много больше ее радиуса, магнитные заряды могут дать ощутимый вклад в магнитостатическую энергию аморфной проволоки. Доменная структура типа "бамбук" в проволоках с $\lambda_S < 0$ сводит к минимуму магнитостатическую энергию этих зарядов.

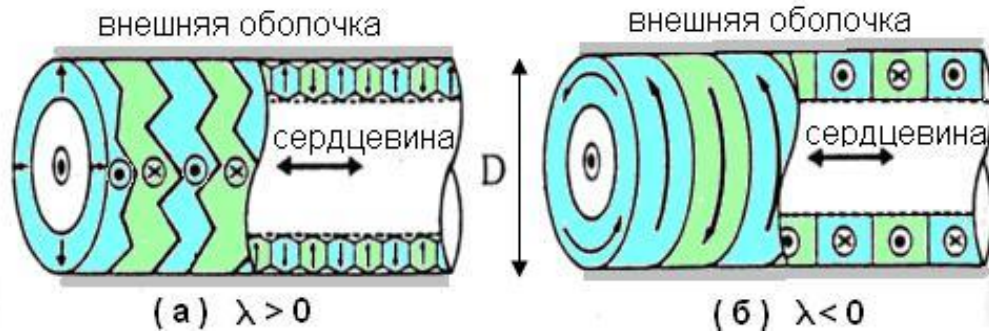


Рисунок 1.5 – Схематическое изображение доменной структуры, предложенной для проволок с положительным (а) и отрицательным (б) значением магнитострикции

Образование внутреннего стержня в проволоках с отрицательной магнитострикцией можно также объяснить с точки зрения обменной энергии [18]. Если бы во всем объеме аморфной проволоки с $\lambda_s < 0$ намагниченность имела бы круговое направление, то суммарная обменная энергия соседних спинов была бы очень велика при приближении к оси, так как эта энергия пропорциональна углу между соседними спинами, который растет по мере приближения к оси проволоки. Для уменьшения обменной энергии намагниченность в стержне должна быть направлена продольно, несмотря на то, что при этом увеличивается магнитостатическая энергия на концах проволоки. Влияние размагничивающего поля уменьшается за счет сужения внутреннего стержня к концам проволоки.

Микропроволоки с положительной магнитострикцией, покрытые стеклянной оболочкой, имеют такую же доменную структуру, как и обычные аморфные проволоки с $\lambda_s > 0$, но однородно намагниченная область занимает большую часть объема микропроволоки, о чем свидетельствует большая остаточная намагниченность M_R/M_S . После удаления стеклянной оболочки внутренние напряжения ослабевают, объем однородно намагниченной области уменьшается, о чем свидетельствует уменьшение отношения M_R/M_S [20].

Удаление стеклянной оболочки приводит к ослаблению действующих на микропровод напряжений и, следовательно, к уменьшению магнитоупругой энергии и неоднородному распределению осей анизотропии. Следствием этого является значительное уменьшение чувствительности процессов намагничивания и динамической магнитной проницаемости к магнитному полю. Хотя при этом по-прежнему сохраняется круговое направление намагниченности в поверхностном слое, чувствительность импеданса к магнитному полю ослабляется. Таким образом, наличие и целостность

стеклянной оболочки микропроволок имеют ключевую роль при построении высокочувствительных датчиков магнитного поля на аморфных микропроводах [20].

Поскольку доменная структура в значительной степени определяет характер намагничивания, коэрцитивность и другие характеристики, то рассмотрению доменных структур в аморфных сплавах было уделено должное внимание.

Попытка объяснить прямоугольную форму петель гистерезиса аморфных микропроволок с точки зрения их доменной структуры впервые была сделана Хэмфри [24]. Он предложил взять за основу модель доменной структуры, в которой аморфная ферромагнитная проволока состоит из двух областей с различной структурой доменов. При этом предполагалось, что внутренняя область однородно намагничена вдоль оси сердцевины проволоки, а внешняя оболочка имеет домены с круговым или радиальным направлением намагниченности. Размер внутреннего стержня, намагниченность которого параллельна оси проволоки, равен $D/\sqrt{2}$ в случае проволок с положительной магнитострикцией и $D/\sqrt{3}$ – в случае проволок с отрицательной магнитострикцией (D – диаметр проволоки) [21]. Прямоугольность петли гистерезиса обусловлена перемагничиванием внутренней части сердцевины проволоки. При приближении к насыщению происходит непрерывное уменьшение нормальной компоненты намагниченности во внешней оболочке.

Положительное радиальное напряжение Y_r в приповерхностном слое обуславливает радиальное направление легкой оси во внешней оболочке [22]. Продольная ориентация намагниченности во внутреннем объеме проволоки приводит к появлению на ее концах магнитных полюсов, а, следовательно, к росту магнитостатической энергии. Для ее уменьшения на обоих концах проволоки образуются замыкающие домены с противоположным направлением намагниченности. Размер замыкающих доменов зависит от приложенного магнитного поля и внешних напряжений. С ростом поля оба замыкающих домена увеличиваются несимметричным образом и схлопываются (collapse) [23]. Однако такое схлопывание спонтанно существует в коротких проволоках из-за больших размагничивающих полей. Кроме того, доменная структура аморфных проволок зависит от их диаметра D [24]. Так, с ростом D :

1. увеличивается магнитная анизотропия, что обуславливает увеличение наклона поверхностных доменов;
2. растет размагничивающее поле, а, следовательно, растет и критическая длина бистабильного состояния ЛКР, что приводит к увеличению размера обратных доменов на концах проволоки.

В работе [25] было показано, что перемагничивание аморфных проволок с положительной магнитоотрицательностью более корректно описывается механизмом движения незакрепленной доменной стенки (depinning mechanism), чем механизмом образования зародышей обратной фазы (nucleation mechanism). Процесс перемагничивания спонтанно начинается вблизи одного из концов проволоки. Закрепленная посредством большой величины магнитоэлектрической энергии стенка одного из обратных доменов, существующих на концах проволоки, отрывается под действием приложенного магнитного поля и распространяется по всей ее длине. Конец проволоки, с которого начинается перемагничивание, может меняться или оставаться неизменным после каждого акта перемагничивания (изменяющаяся или однонаправленная мода распространения стенки). Движение доменной стенки можно регистрировать высокочувствительными катушками, расположенными по длине проволоки. Форма регистрируемых этими катушками импульсов напряжения и время, прошедшее до появления следующего импульса, позволяют определять форму, размеры и скорость движения доменной стенки (метод Сикстуса-Тонкса) [26, 27]. Установлено, что в процессе распространения стенка сохраняет плоскую форму. Скорость движения стенки зависит от величины приложенного поля. Продольная компонента скорости достигает значения 2000 м/с в поле 30 А/м для FeSiB аморфных проволок диаметром 125 мкм и длиной 70 см. Минимальное поле, в котором начинается движение доменной стенки, составляет 3 А/м. Нормальная компонента скорости мала вследствие большой длины стенки. Длина стенки заметно увеличивается с ростом приложенного магнитного поля или скорости распространения. В поле $H \sim 30$ А/м она достигает 17 см. В больших полях зависимость продольной компоненты скорости распространения доменной стенки и ее длины от внешнего поля становится нелинейной [28].

1.3.2 Бистабильные микропровода и эффекты быстрого перемагничивания

Магнитная бистабильность – специфическое магнитное состояние, при котором существует только два устойчивых состояния намагниченности. Для микропроводов – это два противоположных направления вдоль его оси. Особенностью магнитобистабильных микропроводов является их способность перемагничиваться одним большим скачком Баркгаузена. [29] Соответственно, характерная гистерезисная петля имеет практически прямоугольную форму. Предполагается, что магнитная структура таких микропроводов состоит из внутренних протяженных цилиндрических доменов намагниченности которых

направлена вдоль оси провода и тонкого кольцевого слоя доменов на поверхности а также небольших замыкающих доменов на концах. [29]

Магнитная бистабильность наблюдается в микропроводах с положительной, нулевой и небольшой отрицательной магнострикцией ($\lambda > -1 \times 10^{-6}$). [38] Существует минимальная (критическая) длина микропровода, меньше которой бистабильность не проявляется. Согласно [30] критическая длина может быть снижена посредством термообработки, что дает возможность практического совершенствования и миниатюризации устройств, основанных на данном эффекте.

Бистабильные ферромагнетики нашли широкое применение в области устройств автоматики, измерительной техники и в качестве магнитных меток. Их типичным признаком является способность перемагничиваться большим скачком Баркгаузена [31], среди бистабильных материалов встречаются как поликристаллические, так и аморфные. Независимо от структуры формирование бистабильных свойств сводится к созданию в материале резко выраженного градиента магнитного потенциального рельефа, это возможного, при наличии одноосной магнитной анизотропии. Раньше бистабильные материалы из поликристаллических ферромагнетиков получали при помощи термической или механической обработки. Эта задача в аморфных материалах решается за счет особенностей технологии получения аморфных проволок. В проволоках создается необходимое сочетание магнитно- механических свойств.

Эксплуатационные характеристики бистабильных элементов определяются происходящими в них процессами перемагничивания, поэтому изучение последних позволяет выявить зависимость технических характеристик элементов: величины поля старта, времени срабатывания, амплитуды импульсов, стабильности характеристик от прочих факторов и режимов перемагничивания, наличия неоднородностей, химического состава сплава, и др. Среди всего перечисленного основной задачей является уменьшение флуктуаций поля старта. Существующие на сегодняшний день методы решения этой задачи очень сложны и требуют совершенствования.

Релаксационный механизм характеризуется импульсом с крутым фронтом нарастания и пологим спадом, а акселеративный – плавным нарастанием и резким спадом по второму фронту импульса [32].

Экспериментальные исследования процессов перемагничивания в аморфных микропроводах проведенные в работе [33] подтвердили наличие двух механизмов перемагничивания: релаксационного и акселеративного [31, 34]. Импульсы ЭДС на измерительных катушках, возникающие от скачков Баркгаузена, соответствующие этим механизмам, отличаются по форме, амплитуде и длительности. Релаксационный механизм

характеризуется импульсом с крутым фронтом нарастания и пологим спадом; акселеративный – плавным нарастанием и резким спадом по второму фронту импульса (рисунок 1.6, а также [34, 35]).

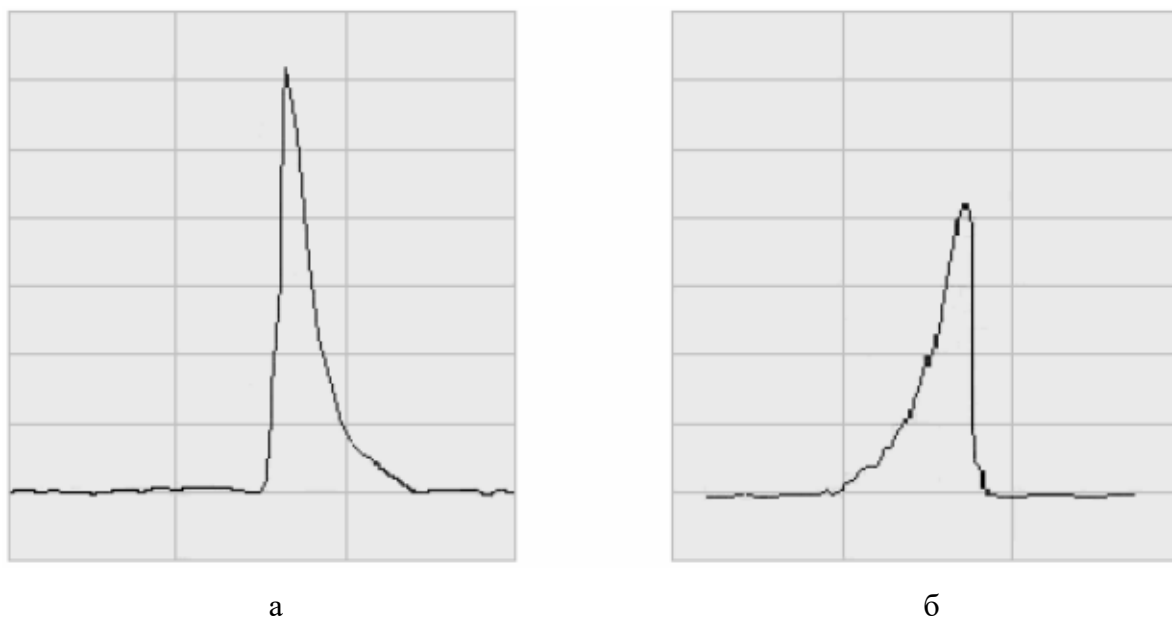


Рисунок 1.6. Формы импульсов ЭДС в аморфных проводах: а) релаксационная, б) акселеративная

Исследовались экспериментально регистрируемые параметры: поле старта H_s (обозначим теоретическое поле старта H_c , а экспериментальное – H_s), амплитуда наведенного в измерительной катушке импульса U_m и флуктуации поля старта ΣH_s . В работе [33] изучено влияние режимов перемагничивания от состояния стеклянного покрытия провода. В качестве основного и практически важного результата было обнаружено, что снятие стеклянной оболочки с торца провода путем стравливания раствором плавиковой кислоты приводит к уменьшению поля старта и его флуктуаций в 2–3 раза. [36]

Бистабильные микропровода при перемагничивании излучают короткий по времени импульс, но он довольно большой по амплитуде, это позволяет детектировать его на некотором расстоянии. В настоящее время достигнутое максимальное расстояние обнаружения импульса перемагничивания составляет 30 см.

Бистабильные провода могут использоваться в качестве магнитных меток, которые можно встроить в документы, купюры, электронные ключи и прочие вещи для защиты от подделок и автоматического машинного распознавания. Магнитная метка имеет код, который не может быть изменён, стёрт, уничтожен, за исключением механического

уничтожения вместе с предметом носителем. Состав и объём информации может быть различен и устанавливается при изготовлении метки или инсталляции метки в носитель.

Магнитной меткой является отрезок микропровода длиной от 3 до 50 мм. Такая метка имеет один бит информации (лог 1), если отрезок микропровода есть, или лог 0, если метки нет. Считыватель такой метки настраивается на частоту, соответствующую максимальной амплитуде для считываемого типа меток. Разложение спектра Фурье для бистабильных микропроводов имеет достаточно узкий диапазон, что позволяет уйти от ложных сигналов, попадающих в детектор [37].

Упрощённая структурная схема прибора для обнаружения магнитной метки представлена на рисунке 1.7.

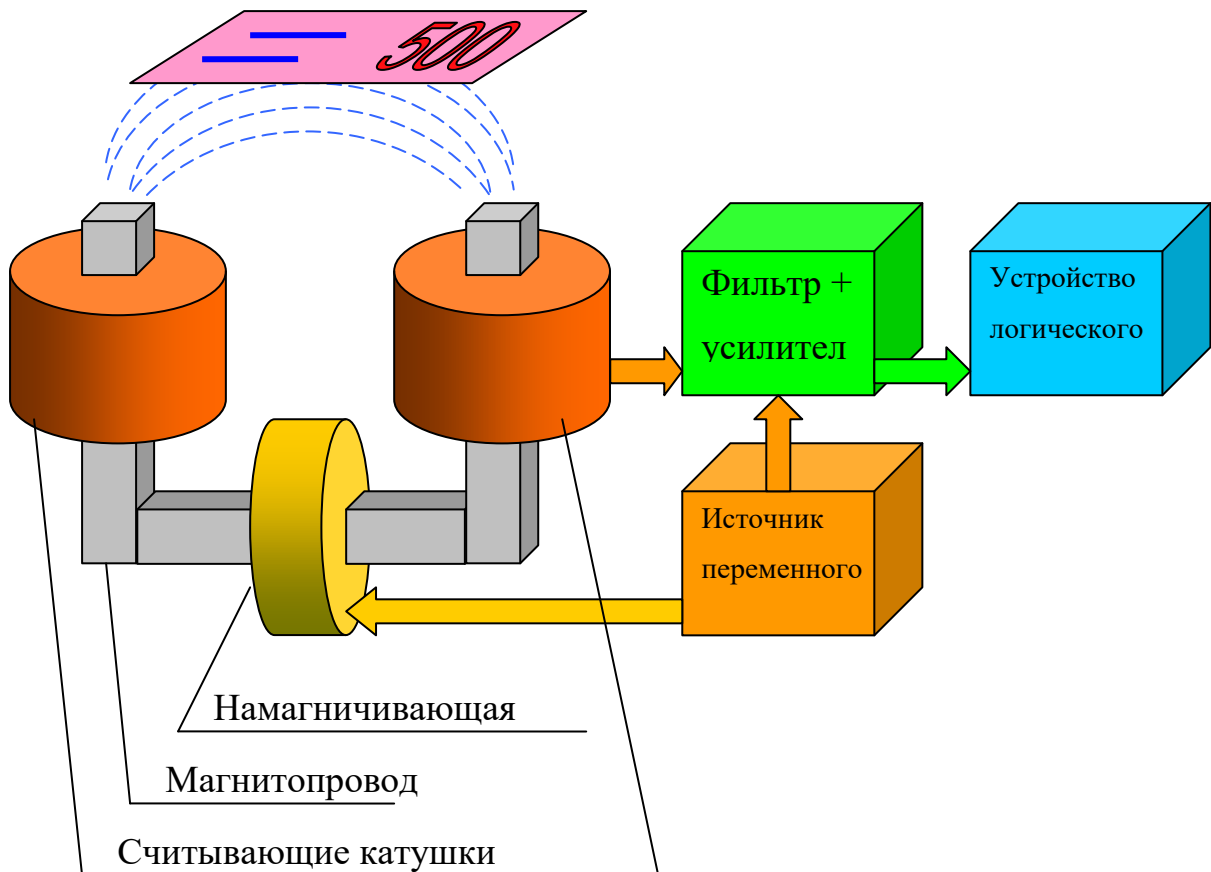


Рисунок 1.7 – Упрощённая структурная схема прибора

Считывающее устройство состоит из электромагнита, состоящего из магнитопровода, намагничивающей катушки и считывающих катушек. На намагничивающие катушки подаётся низкочастотный переменный ток, создающий между полюсами переменное магнитное поле. Это магнитное поле переманичивает

микропровод и в момент перемагничивания он излучает электромагнитный импульс. Импульс перемагничивания наводит в измерительной катушке довольно большое ЭДС самоиндукции, и после фильтрации низкочастотной составляющей попадает на вход усилителя. Усиленный сигнал передаётся на устройство логического контроля [38].

Основными достоинствами магнитных меток является их устойчивость к воздействиям внешней среды и магнитным полям, а так же низкая себестоимость, примитивная конструкция и простая технология. Магнитная метка устойчива в агрессивных средах, внешних электрических и магнитных полях, как постоянных так и в переменных.

Однако у бистабильного микропровода есть технологические возможности которые позволяют создать многобитовые магнитные метки. Многобитовые магнитные метки изготавливаются из нескольких вплотную расположенных микропроводов, с различными значениями величины H_c . При перемагничивании такая группа микропроводов излучает набор импульсов разделенных по времени, что позволяет кодировать информацию группируя её побайтно.

1.3.3 Эффект магнитного импеданса

Явление магнитного импеданса было описано в работах Е.П. Харрисона с соавторами более 75 лет назад, работы велись на проволоках из железо-никелевого сплава. Эффект магнитного импеданса заключается в сильном изменении полного сопротивления проводника переменному току во внешнем магнитном поле. При этом термин «магнитный импеданс» еще не использовался. Сам термин «магнитный импеданс» (МИ) появляется значительно позже, в работах К. Мори с соавторами, которые, по сути, заново открыли в 1994 г. явление магнитоимпеданса. Первые эксперименты, в которых наблюдалось изменение импеданса пермаллоевых проволок при приложении внешнего поля, были объяснены на основе классического скин-эффекта и зависимости глубины скин-слоя от величины эффективной магнитной проницаемости. Позднее появились более совершенные технологии производства материалов с высокой магнитной проницаемостью, которые обеспечили повторяемость результатов МИ-исследований и возможность контролируемой разработки МИ-материалов.[39]

МИ-образцы разрабатываются различными методами в виде проволок, лент, тонких пленок, многослойных пленочных структур и т.д. Можно выделить четыре группы магнитных материалов, в которых может наблюдаться магнитоимпеданс: аморфные сплавы с малым значением константы анизотропии; нанокристаллические материалы типа

Fe-Cu-Nb-Si-B; кристаллические сплавы типа пермаллой (сплав никеля и железа) с высокой концентрацией никеля и с добавками Mo, Re, Ti; нанокomпозиты, состоящие из смеси однофазных частиц (системы на основе Fe-B-N и Co-Cr-O) [40].

Для определения относительной величины эффекта обычно используют следующее соотношение (1.1).

$$\left| \frac{\Delta Z}{Z} \right| = \frac{Z(H) - Z(H = H_{\text{нас}})}{Z(H = H_{\text{нас}})} \quad (1.1)$$

где $Z(H)$ – импеданс образца в магнитном поле H , $Z(H=H_{\text{нас}})$ – импеданс образца в магнитном поле насыщения, за которое принимается величина максимального внешнего поля, приложенного к образцу, $\Delta Z/Z$ –МИ-отношение, может достигать значений, больших, чем 100 %.

Так же в литературе можно встретить МИ-отношение другого вида, в соответствии с формулой (1.2).

$$\left| \frac{\Delta Z}{Z} \right| = \frac{Z(H) - Z(H = 0)}{Z(H = 0)} \quad (1.2)$$

где $Z(H=0)$ – величина импеданса образца в отсутствии внешнего магнитного поля.

При таком рассмотрении величина МИ-отношения может быть не только положительной, но и отрицательной.

По физическим свойствам различают два вида магнитоимпеданса: продольный и поперечный [41]. Продольным обычно называют эффект, возникающий при приложении внешнего магнитного поля параллельно направлению протекающего электрического тока. А поперечным эффектом принято называть эффект магнитоимпеданса, возникающий, когда внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно направлению протекания электрического тока.

Магнитоимпеданс обусловлен влиянием внешнего магнитного поля на распределение плотности переменного тока по сечению проводника, что связано с проявлением скин-эффекта. Толщина скин-слоя δ , или, глубина проникновения переменного тока в объем проводника, определяется по формуле (1.3).

$$\delta = \sqrt{\frac{c^2}{2\pi\omega\mu\gamma}} \quad (1.3)$$

где c – скорость света в вакууме, γ – удельная проводимость, ω – циклическая частота переменного тока, μ – эффективная магнитная проницаемость по отношению к круговому переменному полю.

Величина эффективной магнитной проницаемости и ее частотная дисперсия определяются типом магнитной анизотропии, доменной структурой и динамическими процессами перемангничивания. Внешнее постоянное магнитное поле H , приложенное к проводнику, вызывает в нем процессы перестройки доменной структуры и статической намагниченности, а также влияет на магнитную динамику, и, следовательно, изменяет величину магнитной проницаемости μ . Это приводит к изменению глубины скин-слоя проводника, по которому протекает высокочастотный электрический ток, что в свою очередь приводит к изменению импеданса ферромагнитного образца Z . В случае сильного скин-эффекта когда толщина скин-слоя δ намного меньше некоторого характерного размера проводника (радиус проволоки, толщина ленты) связь между импедансом образца Z и его эффективной магнитной проницаемостью может быть представлена в виде формулы (1.4).

$$Z \approx (\mu_i f)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

На низких частотах, когда скин-эффект мал и плотность распределения тока практически одинакова по всему сечению проводника, изменение импеданса в магнитном поле связывают с магнитоиндуктивным эффектом. Данный эффект обусловлен внутренней индуктивностью проводника $L_i(\mu_i)$, которая, как и толщина скин-слоя, зависит от эффективной магнитной проницаемости ($\sim \mu_i$). Импеданс проводника, определяемый магнитоиндуктивным эффектом, записывается в виде (сгс система) формулы (1.5).

$$Z = R_{dc} - \left(\frac{j\omega}{c^2} \right) L_i(\mu_i) \quad (1.5)$$

На высоких частотах, когда скин-эффект существенен, обе части импеданса (резистивная и индуктивная) начинают зависеть от величины скин-слоя, то есть полный импеданс выражается соотношением (1.4).

Таким образом, для наблюдения магнитоимпеданса необходимы достаточно высокие частоты, а также, чтобы поперечная магнитная проницаемость сохраняла достаточно большую величину и значительно изменялась во внешнем магнитном поле. Для выполнения этих условий необходимо сочетание магнитомягких свойств и определенной магнитной анизотропии (например, циркулярной анизотропии в цилиндрическом магнетике)[42].

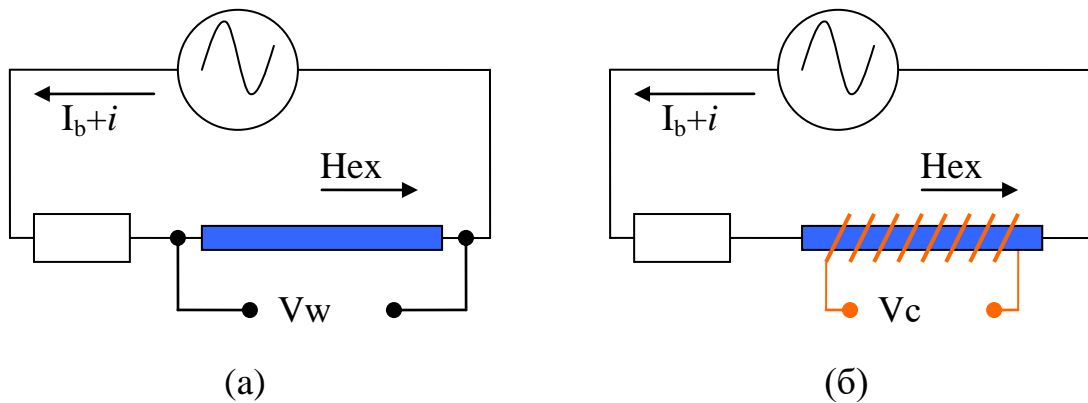


Рисунок 1.8 – Высокочастотный сигнал индуцированный переменным током и внешним магнитным полем может измеряться на концах проводника (а) или в катушке (б). При определенных условиях, индуцированное напряжение оказывается чувствительным к внешним статическим воздействиям (постоянное магнитное поле или постоянный ток).

Рассмотрим магнитный проводник в виде тонкого провода. В качестве внешнего возбуждения может рассматриваться переменный электрический ток $i = i_0 \exp(-j\omega t)$ совместно с внешним переменным магнитным полем \mathbf{h} . В общем случае индуцированное напряжение может рассматриваться как разность потенциалов на магнитном проводнике V_w или как наведенная во вторичной катушке э.д.с. V_c (рисунок 1.8).

Напряжение на проводе определяется потерями энергии внутри провода и описывается формулой (1.6).

$$iV_w = \frac{c}{4\pi} \int_S (\mathbf{e} \times \mathbf{h}) \mathbf{ds} \quad (1.6)$$

где интегрирование выполняется по поверхности провода.

Э.д.с., наведенная в катушке, определяется интегрированием электрического поля вдоль витков катушки и может быть записана в виде формулы (1.7).

$$V_c = \oint \mathbf{e} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.7)$$

Соотношения (1.6) и (1.7) демонстрируют, что индуцированные сигналы напряжения определяются через тангенциальные компоненты электромагнитного поля $\bar{\mathbf{e}}_t$, $\bar{\mathbf{h}}_t$ на поверхности проводника.

Эти компоненты связаны тензором поверхностного импеданса $\hat{\zeta}$, что показано в формул (1.8).

$$\bar{\mathbf{e}}_t = \hat{\zeta}(\hat{\mathbf{h}}_t \times \mathbf{n}) \quad (1.8)$$

где \mathbf{n} - единичный вектор, направленный внутрь проводника.

Значение магнитного поля $\bar{\mathbf{h}}_t$ задается внешним возбуждением и может быть записано в виде формулы (1.9).

$$h_\varphi(a) = \bar{h}_\varphi = 2i/ca, \quad h_z(a) = h \quad (1.9)$$

где a радиус провода.

Тогда электрическое поле на поверхности полностью определяется через тензор поверхностного импеданса $\hat{\zeta}$ (1.8). При этих условиях оказывается, что $\hat{\zeta}$ полностью определяет наведенный внешним магнитным полем сигнал, при этом происхождение поля \mathbf{h} не имеет значения.

Предположим, что провод имеет однородные электромагнитные свойства и статическую намагниченность, направленную по спирали с углом θ , касательно к поверхности. В этом случае тензор $\hat{\zeta}$ ($\hat{\zeta} = \begin{pmatrix} \zeta_{zz} & \zeta_{z\varphi} \\ \zeta_{\varphi z} & \zeta_{\varphi\varphi} \end{pmatrix}$) постоянен на поверхности и все его компоненты в цилиндрической системе координат могут быть отличны от нуля.

Запишем выражения (1.10) для индуцированных напряжений в координатном представлении (в цилиндрической системе с осью z вдоль оси провода)

$$\begin{aligned} \bar{e}_\varphi &= -\zeta_{\varphi\varphi} \bar{h}_z + \zeta_{\varphi z} \bar{h}_\varphi \\ \bar{e}_z &= -\zeta_{z\varphi} \bar{h}_z + \zeta_{zz} \bar{h}_\varphi \end{aligned} \quad (1.10)$$

где $\zeta_{z\varphi} = \zeta_{\varphi z}$.

Подставляя (1.10) в (1.6) и (1.7), получим:

$$V = e_z(a)l = (\zeta_{zz} \frac{2i}{ca} - \zeta_{z\varphi} h_{ex})l \quad (1.11)$$

$$V_c = \bar{e}_\varphi 2\pi a n l = (-\zeta_{\varphi\varphi} h_{ex} + \zeta_{\varphi z} \frac{2i}{ca}) 2\pi a n l \quad (1.12)$$

где l - длина провода и n число витков в катушке на единицу длины.

В приближении сильного скин-эффекта, тензор поверхностного импеданса имеет вид в соответствии с формулой (1.13).

$$\hat{\zeta} = \begin{pmatrix} \zeta_{zz} & \zeta_{z\varphi} \\ \zeta_{\varphi z} & \zeta_{\varphi\varphi} \end{pmatrix} = \frac{c(1-j)}{4\pi\sigma\delta} \begin{pmatrix} \sqrt{\tilde{\mu}} \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) & (\sqrt{\tilde{\mu}} - 1) \sin(\theta) \cos(\theta) \\ (\sqrt{\tilde{\mu}} - 1) \sin(\theta) \cos(\theta) & \cos^2(\theta) + \sqrt{\tilde{\mu}} \sin^2(\theta) \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

где σ -проводимость, c -скорость света, δ -толщина скин-слоя для немагнитного провода.

Величина магнитной проницаемости $\tilde{\mu}$ составлена из компонент тензора динамической магнитной проницаемости и соответствует циркулярной проницаемости по отношению к направлению статической намагниченности.

Из выражения (1.13) следует, что при высоких частотах импеданс зависит как от угла статической намагниченности θ , так и от динамической проницаемости. В микропроводах с циркулярной доменной структурой импеданс имеет только диагональные компоненты, так как произведение $\sin(\theta)\cos(\theta)$ после усреднения по доменам обращается в ноль. Зависимость продольного импеданса от внешнего поля обусловлена динамикой круговых доменных стенок. При частотах, выше характерных релаксационных частот смещения доменных стенок, зависимость динамической магнитной проницаемости, обусловленной смещением границ, от магнитного поля становится несущественной и основной вклад в зависимость импеданса от магнитного поля дают динамические процессы вращения намагниченности. В таком случае происходит изменение формы характеристики чувствительности МИ микропровода, она приобретает форму с двумя симметричными пиками, возникающих при полях, порядка поля анизотропии (рисунок 1.9).

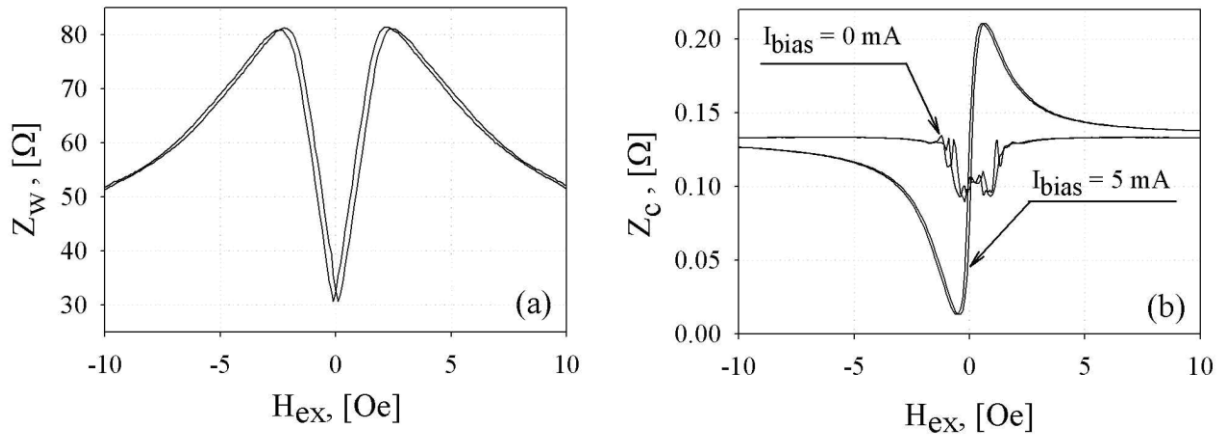


Рисунок 1.9 – Зависимости диагональной и недиагональной компонент импеданса от магнитного поля на частоте 56 МГц. Недиagonalная компонента измеряется в присутствии постоянного тока (5 мА), который необходим для устранения доменной структуры [43]

В отсутствии доменной структуры нужно рассматривать полную матрицу импеданса. Для циркулярной анизотропии продольный импеданс имеет два симметричных пика, возникающих при полях анизотропии. Недиagonalный импеданс оказывается антисимметричным по отношению к внешнему осевому полю и имеет практически линейный участок в пределах полей анизотропии. Сравнение уравнений (1.11), (1.12) и (1.13) показывают, что благодаря зависимости импеданса от магнитных параметров при сильном скин-эффекте, появляется возможность управления индуцированным сигналом при намагничивании проводника. Такое поведение можно использовать для разработки высокочувствительных магнитных сенсоров.

1.3.4 Температура Кюри и влияние температуры на магнитный импеданс

Температура Кюри (T_c) аморфных сплавов на основе переходных металлов располагается значительно ниже чистых кристаллических переходных металлов. Уменьшение T_c определяется во многом химическим составом. Степень зависимости T_c от содержания металлоида изменяется при переходе от сплавов на основе Со к сплавам на основе Fe. Для первого наблюдается почти линейное снижение T_c при увеличении содержания металлоида. Аморфные сплавы металл металлоид на основе железа имеют значительно более слабую зависимость T_c от содержания металлоида, и температуры Кюри для этих сплавов лежат значительно ниже, чем, например, для кристаллических сплавов Fe-Al и Fe-Si. На температуру Кюри некоторых аморфных сплавов переходный

металл-металлоид заметное влияние оказывает отжиг ниже температуры начала кристаллизации. Рост температуры Кюри при отжиге приписывают влиянию структурной релаксации, хотя фактическое влияние этих отжигов на химическое и структурное упорядочение еще не установлено [44].

Согласно магнитометрическим исследованиям, намагниченность микропроводов обоих составов имеют различные температуры Кюри. Для сплава $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ температура Кюри находится вблизи 250 С (рис. 1.10 а), а для сплава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ — вблизи 380 С (рис. 1.10 б). Таким образом, варьируя незначительно состав сплава, можно в широких пределах изменять его температуру Кюри.

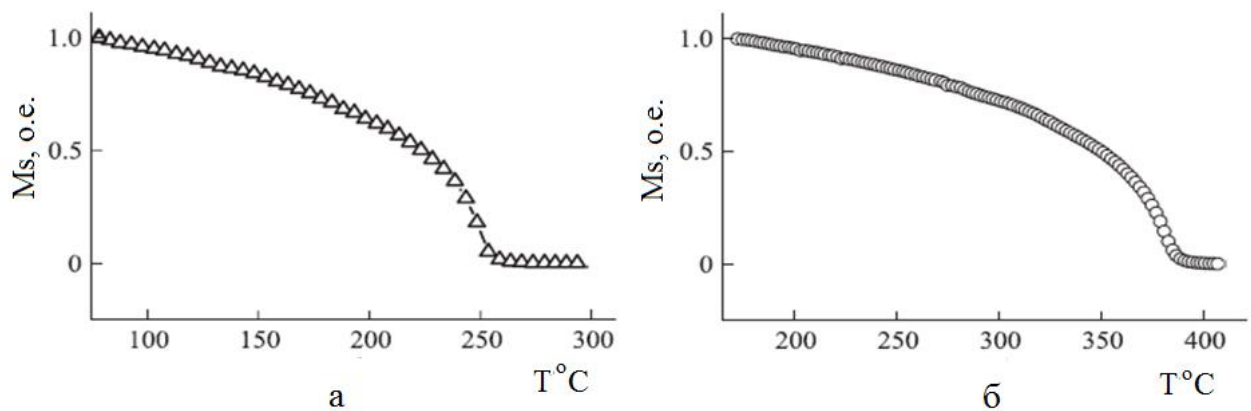


Рисунок 1.10 – Температурная зависимость намагнитченности в относительных единицах

Для многих технических приложений необходимо сохранять стабильные магнитные свойства микропроводов в диапазоне температуры до 200 °С. С другой стороны, есть потребность использовать микропровода для контроля температуры, например, в процессе формирования композиционных материалов и сплавов. Магнитные свойства испытывают значительные изменения непосредственно вблизи температуры Кюри. Как обсуждалось ранее температура Кюри ферромагнитных сплавов 3d металлов относительно велика (около 300-400 °С). Такие провода могут использоваться для применений, где необходима температурная стабильность. Между тем, в аморфных сплавах Co/Fe температура Кюри может быть понижена с помощью добавок Ni и Cr [45]. При этом провода сохраняют нужные магнитные свойства (например, бистабильность) вплоть до T_c . На Рисунке 11 представлены кривые намагниченности микропроводов с температурой Кюри от 75 до 120 С. Видно, что среди них есть как бистабильные, так и наклонные линейные петли. Если использовать микропровода как встроенные сенсоры

температуры, то наибольший интерес представляют провода с аксиальной анизотропией и кривыми намагничивания прямоугольного типа (образцы 1, 5). [45]

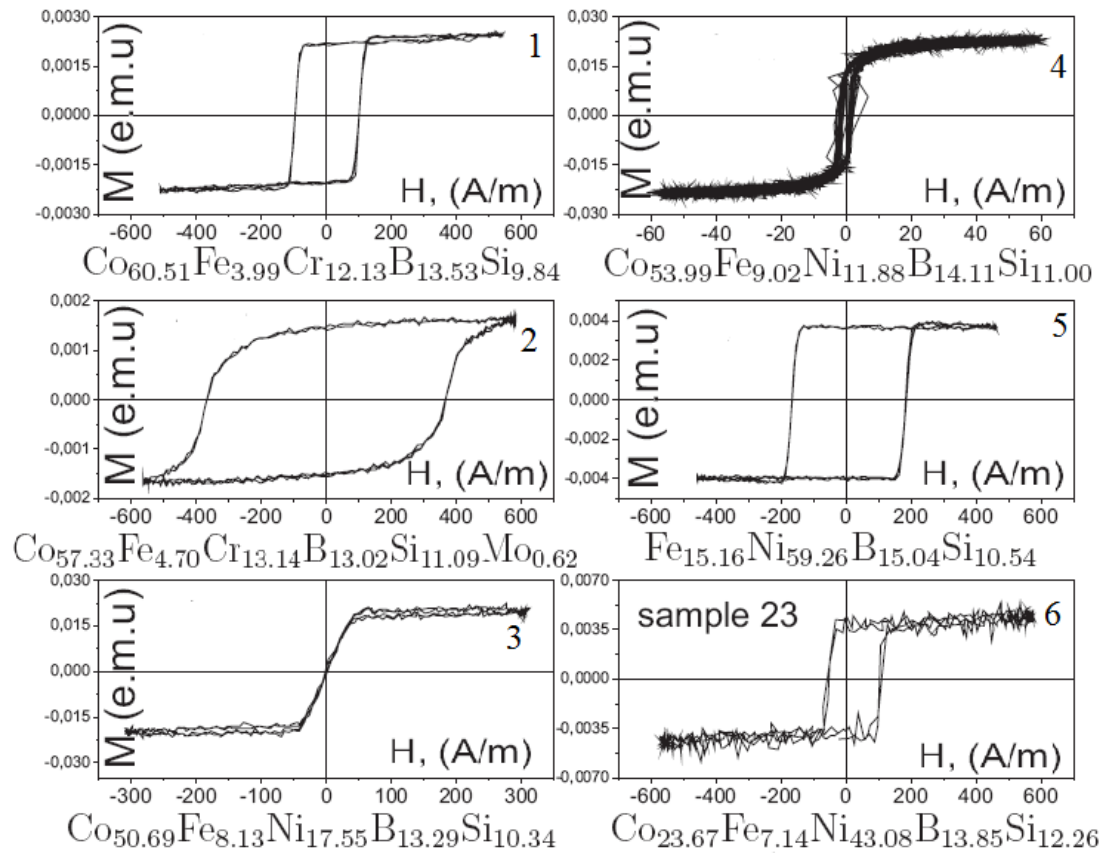


Рисунок 1.11 – Кривые намагничивания микропроводов, содержащих хром (1, 7) и никель (13-23), которые имеют низкую температуру Кюри

В аморфных проводах существует дополнительный механизм зависимости магнитных свойств от температуры, что связано с распределением внутренних напряжений, возникающих при затвердевании из расплава. В аморфных сплавах кристаллическая анизотропия отсутствует, и магнитная анизотропия определяется в основном магнитострикцией. Если напряжения зависят от температуры, то и эффективное поле анизотропии будет испытывать сильную зависимость от температуры даже вдали от температуры Кюри, как представлено на рисунке 1.12 а. Однако после нагревания в цикле охлаждения эта зависимость устраняется, хотя поле анизотропии уменьшилось (рис. 1.12 б). Значительная зависимость от температуры проявляется только вблизи температуры Кюри [46].

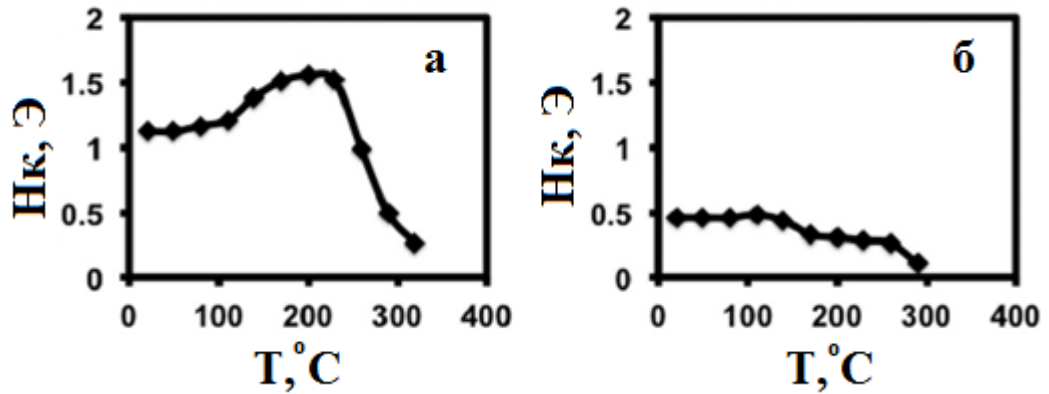


Рисунок 1.12 - Температурная зависимость магнитной анизотропии микропроводов состава $Co_{64}Fe_3Cr_3Si_{15}B_{15}$, при нагревании (а), при остывании (б).

Подобная тенденция проявляется и в поведении магнитоимпеданса этих микропроводов, зависимость которого от температуры показана на рисунке 1.13, поскольку магнитоимпеданс зависит от анизотропии [46].

Таким образом, температурная нестабильность поведения магнитных параметров и импеданса в этих системах легко может быть скомпенсирована высокотемпературным отжигом при температуре чуть ниже температуры кристаллизации (рис.1.13б) [46]. Однако при этом происходит уменьшение МИ отношения.

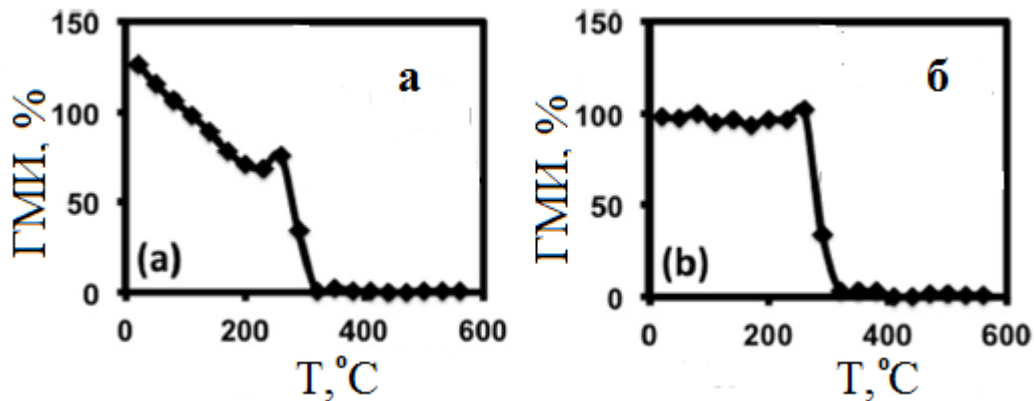


Рисунок 1.13 - Температурная зависимость магнитного импеданса на частоте 100 МГц, при нагревании (а), при остывании (б).

В случае проводов со стеклянной оболочкой напряжения, связанные с различными коэффициентами теплового расширения стекла и металла, значительно более сложно скомпенсировать. Эта проблема была одной из основных, решаемых в данной работе.

1.4 Перспективные области применения аморфных микропроводов

Аморфные ферромагнитные сплавы являются удобным объектом для исследования физических свойств магнитомягких ферромагнетиков ввиду их способности приобретать заданные магнитные свойства под влиянием термической и термомагнитной обработки. Различные физические эффекты в ферромагнитных материалах известны уже давно и нашли самое широкое применение в науке и технике, в том числе при разработке и создании разнообразных датчиков и преобразователей физических величин.

По некоторым магнитным параметрам к аморфным сплавам приближаются нанокристаллические ферромагнитные сплавы, которые могут иметь значительно большую, чем аморфные сплавы, рабочую температуру.

Применение аморфных и нанокристаллических ферромагнетиков позволяет не только улучшить существующие датчики магнитных величин, но и создавать принципиально новые измерительные датчики и преобразователи.

Разработка и создание более совершенных датчиков и преобразователей магнитного поля остается важной задачей современной науки. Автоматизация процессов производства, развитие технической базы научных исследований, создание современных технологий требуют более совершенных методов контроля и измерения различных параметров, в том числе магнитных и механических. В геофизике, для обнаружения и измерения слабых магнитных полей естественного и искусственного происхождения, требуются высокочувствительные датчики магнитного поля, способные измерять одновременно три компоненты магнитного поля и работать в широком интервале температур. В низкочастотной радиосвязи существует проблема создания малогабаритных параметрических антенн с узкой диаграммой направленности. В биологии и медицине требуются миниатюрные датчики сверхслабых магнитных полей, длительное время работающие при нормальных условиях [47].

Уникальные магнитные и механические характеристики ферромагнетиков позволяют создавать на их основе высокочувствительные датчики и преобразователи слабого магнитного поля, а также разнообразные датчики механических величин.

Высокая магнитная проницаемость и малые потери на перемагничивание позволяют с помощью различных методов преобразования получить экстремально низкий порог чувствительности датчиков магнитного поля, выполненных на основе аморфных ферромагнитных сплавов, расширить диапазон частот измеряемого магнитного поля. На основе применения аморфных ферромагнетиков возможно улучшение параметров

аппаратуры считывания информации с магнитных носителей, позволяющее в несколько раз увеличить разрешающую способность и количество записываемой информации.

Механические датчики на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных и нанокристаллических сплавах отличаются более высокой чувствительностью и долговечностью.

Миниатюрные магнитные датчики магнитного поля на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных сплавах могут служить базовым элементом для создания приборов магнитной дефектоскопии и различных устройств автоматики и робототехники. Как и датчики Холла, они могут иметь размеры около 1мм и не содержат катушек индуктивности. При соответствующем выборе аморфного сплава и при его термомагнитной или термомеханической обработке перекрываемый с помощью магнитоимпедансного датчика диапазон постоянного или низкочастотного магнитного поля может достигать 100Э [48].

В то же время магнитоимпедансный датчик магнитного поля выгодно отличается от датчика Холла высокой температурной стабильностью, поэтому приборы на его основе не требуют никаких схем температурной компенсации или стабилизации. Более того, магнитоимпедансный датчик имеет всего два контакта и его подключение к электрической схеме прибора осуществляется всего двумя проводами, а не четырьмя, как в датчике Холла, что значительно проще и надежнее в случае исполнения выносного варианта датчика.

1.4.1 Датчики механических напряжений на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных сплавах

Вследствие магнитострикционного происхождения анизотропии в аморфных материалах внешние напряжения могут приводить к изменению магнитной структуры магнитомягкого проводника и существенно влиять на эффект МИ. Изменение зависимости импеданса от поля в присутствии растягивающих напряжений было подробно изучено для аморфных проволок с положительной магнитострикцией [49], с малой отрицательной магнитострикцией [50,49,51] для микропроволок в стеклянной оболочке [52] и для аморфных лент [53]. Влияние скручивающих напряжений на МИ исследовалось в аморфных проволоках на основе железа [54], в аморфных проволоках на основе кобальта а также в аморфных и нанокристаллических лентах [55].

Внутренние напряжения могут быть наведены не только в процессе затвердевания расплава, но и в последствии путем отжига при механическом растяжении или

скручивании микропровода. Приложение к аморфному микропроводу растягивающих напряжений приводит к существенному изменению зависимости импеданса от внешнего магнитного поля. Значение внешнего поля, соответствующего максимуму импеданса, возрастает, и величина МИ эффекта уменьшается с увеличением растягивающих напряжений [49-51]. Было обнаружено также, что зависимость величины МИ эффекта от скручивающих напряжений в аморфных проволоках с отрицательной магнитострикцией имеет асимметричный характер [56-58]. При этом отжиг проволок в поле постоянного тока приводит к уменьшению асимметрии [58, 59]. Кроме того, было показано, что приложение скручивающих напряжений вызывает изменение импеданса проволоки в отсутствие внешнего магнитного поля [56, 57].

Сильная зависимость импеданса аморфного ферромагнитного проводника от приложенного к нему механического напряжения позволяет создать малогабаритные датчики механических напряжений, которые не содержат катушек индуктивности (рисунок 1.14). Чувствительность к внешним факторам (механическим, температурным) в основном обусловлена тем, что величина энергии анизотропии в основном определяется магнитоупругими взаимодействиями.

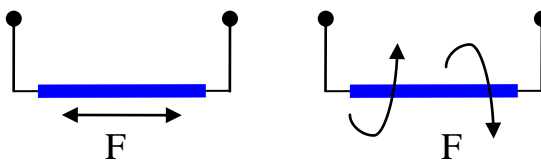


Рисунок 1.14 – Варианты механических воздействий на аморфный микропроводник

На определенных частотах наблюдается сильная зависимость полевой характеристики МИ от приложенного внешнего механического воздействия. Такие свойства могут стать новой идеей применения микропроводов в качестве бесконтактных сенсорных элементов механических напряжений. Но для получения высокой чувствительности микропровода к механическим напряжениям, он должен находиться под влиянием магнитного поля. Таким образом, достигается максимальное изменение выходного сигнала, как показано на рисунке 1.15. Импеданс имеет минимум при нулевом поле, что характерно для систем с осевой анизотропией, а чувствительность по отношению к внешнему полю довольно велика, более 100% / Э. Если перемещать магнитное поле вдоль длинного микропровода, то есть создавать локальные области высокой чувствительности к механическим напряжениям, то можно получить данные о

распределении напряжений в исследуемом образце. При этом в материал можно одновременно поместить несколько проводов на различной глубине, каждый из которых будет отдельно измерен. В результате чего получаем бесконтактный трехмерных сенсор с очень малой себестоимостью. Если такие бесконтактные сенсорные элементы затем встраивать в элементы строительных конструкций, то становится возможным осуществлять мониторинг состояния инженерных сооружений.

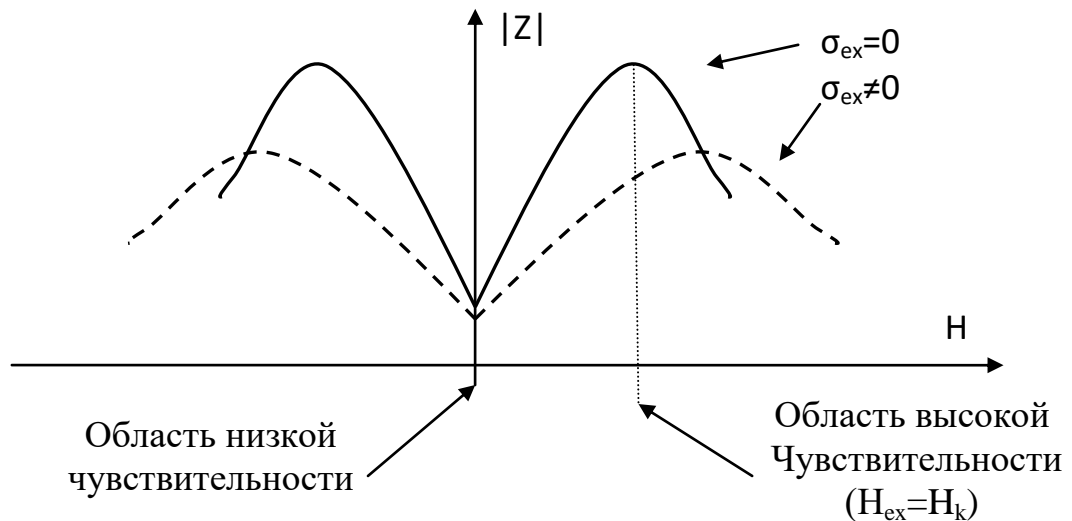


Рисунок 1.15 – Полевая характеристика ГМИ

1.4.2 Высокочастотные акустические элементы

На базе магнитоимпедансного акустического приемо-передающего устройства, выполненного на основе аморфных ферромагнитных лент или пленок, могут быть созданы адаптивные высокочастотные приемники и излучатели упругих волн с управляемой диаграммой направленности и хорошим согласованием с акустической средой.

Возбуждение высокочастотных упругих колебаний в аморфных ферромагнитных лентах и пленках при магнитоимпедансном эффекте позволяет создать акусто-оптические модуляторы и дефлекторы для систем оптической обработки информации. При работе на отражение в поляризованном свете такие акусто-оптические элементы могут одновременно выполнять функцию поворота плоскости поляризации отраженного света.

1.4.3 Магнитные метки

В век хорошо развитых технологий каждый сталкивался с подделкой купленного товара, при этом подделывают не только денежные купюры, но и медикаменты, одежду и даже сложные микросхемы и микропроцессоры. В таком случае хорошей защитой от подделки может стать установка в предмет носитель магнитной метки. В качестве таких

магнитных меток могут использоваться Бистабильные провода, о которых рассказывалось ранее. Их можно встроить в документы, купюры, электронные ключи и прочие вещи для защиты от подделок и автоматического машинного распознавания. Бистабильные проводники имеют малый диаметр от 10 до 50 мкм, за счет чего не утяжеляют предмет носитель и, находясь в нём, они визуалью незаметны. Магнитная метка имеет код, который не может быть изменён, стёрт, уничтожен, за исключением механического уничтожения вместе с предметом носителем. Состав и объём информации может быть различен и устанавливается при изготовлении метки или инсталляции метки в носитель [60].

Устройство для считывания магнитной метки довольно простое, обладает небольшими габаритами и может быть встроено в банкоматы, кассовые аппараты и прочую технику. Распознавание самой метки может происходить на расстоянии до 30 см, это обеспечивает удобство контроля меток. Простота изготовления, низкая себестоимость и удобный контроль могут дать большую популярность повсеместного применения магнитной метки.

1.4.4 Бесконтактные температурные датчики на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных сплавах.

В настоящее время есть значительный интерес к миниатюрным температурным сенсорам, которые можно было бы установить или встраивать во внутрь материалов, изделий, организмов, с целью бесконтактного мониторинга их состояния. Такие сенсоры востребованы в самых разных областях техники: машиностроении, биологии, строительстве, авиакосмических областях и др.

Подобного рода задача может быть решена за счет применения бистабильных аморфных и нанокристаллических ферромагнитных проводов с заданной температурой Кюри в качестве встраиваемых микро сенсоров для мониторинга температуры. При помощи таких сенсоров можно удаленно контролировать температуру в диапазоне от 50С до 700С. Данный способ контроля температуры весьма удобен для контроля температуры охлаждения расплава при переходе его в твёрдую фазу.

Принцип работы состоит в следующем: в зону контроля и измерения температуры помещаются набор бистабильных ферромагнитных проводов, а на расстоянии до 20 см располагается устройство контроля. Набор бистабильных ферромагнитных проводов состоит из проводников различного диаметра, длины и температуры Кюри. Количество проводников определяет число контролируемых точек термограммы, диаметр проводников выбирается в диапазоне от 10 до 60 мкм, при этом длина и диаметр

пропорциональны температуре Кюри. Устройство контроля состоит из намагничивающих и детектирующих катушек, а также схемой управления и контроля (рисунок 1.16).

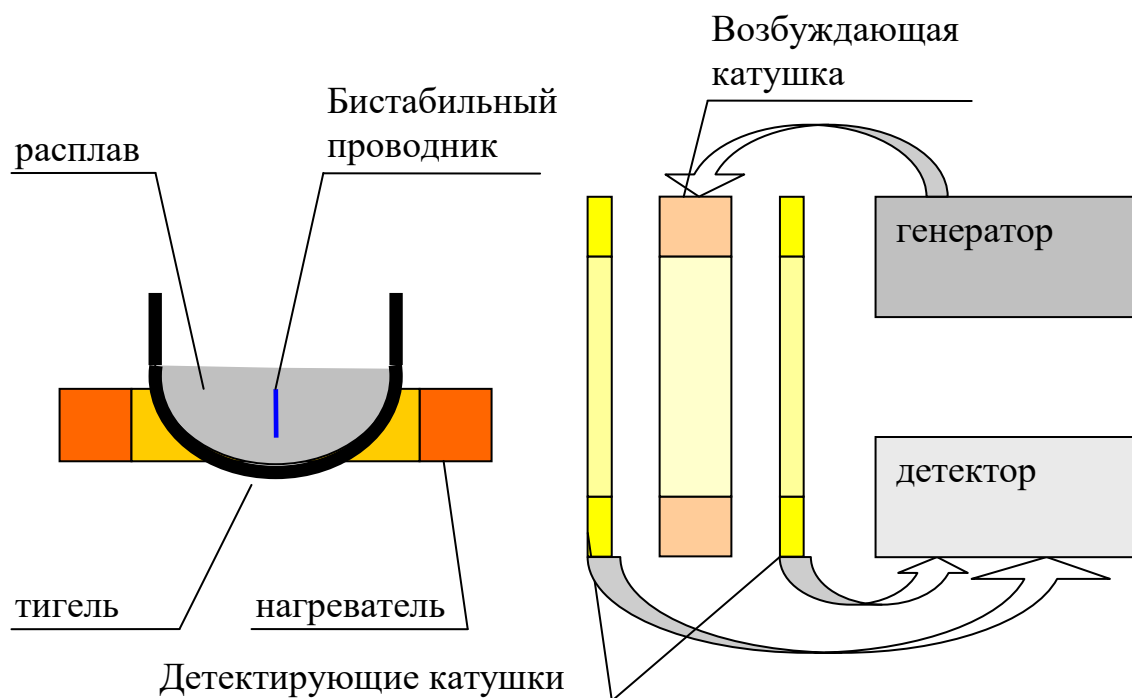


Рисунок 1.16 – Структурная схема бесконтактного измерителя температуры

При нагреве или остывании расплава детектор будет фиксировать каждый из бистабильных проводников, который перешёл через точку Кюри в ту или иную сторону.

1.4.5 Датчики магнитного поля на основе магнитного импеданса.

Значительное падение напряжения на аморфных и нанокристаллических проводниках под действием магнитного поля при прохождении по проводнику переменного или импульсного электрического тока позволяет применить магнитоимпедансный эффект в разнообразных датчиках магнитного поля.

При работе в качестве датчиков магнитного поля целесообразно выводить начальную рабочую точку на середину линейного участка характеристики, для чего требуется продольное магнитное поле смещения. Оно может быть создано как катушкой или постоянным магнитом, так и созданием магнитного поля анизотропии при изготовлении или термомеханической обработке аморфного сердечника датчика, или при приложении к нему механического напряжения. Когда аморфный ферромагнетик выводится на участок максимального импеданса при помощи механического растягивающего напряжения, внешнее магнитное поле уменьшает импеданс на участке с отрицательной крутизной. При этом вернуться на участок с положительной крутизной с помощью внешнего постоянного магнитного поля не удастся [61].

Дифференциальный коэффициент преобразования лучших магнитоимпедансных датчиков составляет 0,5-2,0 мкВ/нТл на узком участке возрастающей ветви характеристики при подходе к максимуму изменения импеданса. На спадающей ветви характеристики чувствительности значительно, на один - два порядка, ниже. Чувствительность на участке возрастания импеданса зависит от размеров датчика.

К недостаткам датчика магнитного поля на основе магнитоимпедансного эффекта относятся: чувствительность к механическим воздействиям, большая величина гистерезиса, необходимость в магнитном поле смещения или соответствующем механическом напряжении.

К положительным моментам можно отнести возможность создания датчика без использования катушек индуктивности, относительную простоту датчика. Магнитоимпедансные датчики магнитного поля могут найти достойное применение в различных технических устройства при работе в диапазоне сверх малых магнитных полей от 0,01 Э до 10 Э [62].

1.5 Особенности (обзор) конструкции чувствительного элемента датчика

В настоящее время оформлено множество патентов на конструкции чувствительных элементов для магнитоимпедансных датчиков. При этом каждая из конструкций имеет свои достоинства и недостатки. Для их оценки необходимо учитывать множество технических и технологических параметров ЧЭ.

Технические параметры:

А) Магнитная восприимчивость (чувствительность) – один из основных параметров ЧЭ;

Б) Диапазон измерительной шкалы

В) Линейность;

Г) Скорость работы (запаздывание изменения электрического сигнала относительно изменения магнитного поля);

Д) Безгистерезисность;

Е) Температурная стабильность;

Технологические параметры:

А) Воспроизводимость технических параметров;

Б) Процент выхода годных;

В) Технологическая простота изготовления (в промышленном масштабе);

Г) Себестоимость изготовления;

Одна из конструкций датчика, наиболее похожего на разрабатываемый, описана в аналоге (Патент US 8,587,300B2, от 19.11.2013 г, Магнитоимпедансный элемент и метод его промышленного производства) [63]. В указанном патенте рассматриваются однопроводной и многопроводной варианты конструкции сенсора с различными способами расположения магнитоимпедансных проводников. Наиболее интересным является вариант с применением нескольких магнитоимпедансных проводников в одной детектирующей катушке. При этом такая конструкция имеет как преимущества, так и недостатки по сравнению с другими техническими решениями. Из преимуществ можно отметить высокую амплитуду выходного сигнала, из недостатков – меньшая чувствительность, сложность конструкции чувствительного элемента и низкая воспроизводимость характеристик от элемента к элементу.

Многопроводная конструкция, описанная в указанном патенте, работает следующим образом: через МИ проводники пропускают высокочастотный импульсный ток (возбуждающий сигнал); внешнее магнитное поле, воздействующее на МИ проводник, изменяет его поверхностный импеданс, при этом происходит разворот вектора намагниченности в скин-слое, вследствие чего на детектирующей катушке возникает наведенный сигнал. Поскольку амплитуда сигнала очень мала, её необходимо усилить при помощи операционного усилителя.

Конструкция выше описанного датчика собрана на подложке с предварительно нанесенными токопроводящими проводниками и площадками. На подложку последовательно установлены МИ проводники, пространство между проводником и подложкой заполнено эпоксидной смолой как показано на рисунке 1.17, сверху на эту конструкцию происходит напыление ещё одного проводникового слоя, таким образом, чтобы первый и второй напылённые слои образовали катушку вокруг МИ проводника. из двух закрепленных параллельно МИ проводников и детектирующей катушки, намотанной поверх них. Для уменьшения шумов и помех установка и расположение катушек происходит различными способами, приведенными в патенте. Катушки и МИ проводники коммутируются при помощи проводников и контактных площадок подложки.

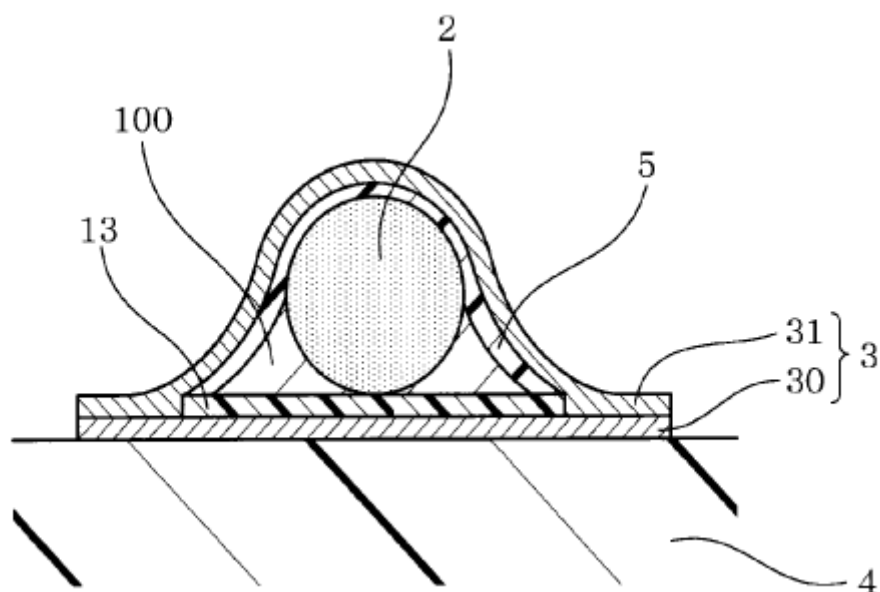


Рисунок 1.17 - Чувствительный элемент датчика описанный в патенте US 8,587,300B2 [63]

Достоинствами данной конструкции являются простота промышленного изготовления, миниатюрность, высокая точность, хорошая чувствительность сенсоров изготовленных данным методом.

Недостатком описанной разработки является зависимость чувствительности и линейности от температуры, из-за разницы коэффициентов температурного расширения МИ проводника и эпоксидной смолы возникают механические напряжения в МИ проводнике. В результате, показания датчика сильно искажаются с изменением температуры.

В журнале «Открытия в физике материалов и химии» в сентябре 2013г была опубликована статья [64] двухосевой магнитоимпедансный сенсор. В статье описана конструкция чувствительного элемента датчика содержащего две спирали для измерения магнитных полей в двух направлениях. Для уменьшения габаритов датчика катушки встроены одна в другую (рисунок 1.18). В таком случае при ширине проводника 50мкм и зазоре в 10 мкм площадь ЧЭ занимаемая на подложке не превышает 1 мм². Так же в статье приведена подробная технология изготовления чувствительного элемента (рисунок 1.19). Он собирается на кремниевой подложке с предварительно нанесенными на неё подслоями оксида кремния и меди. В качестве чувствительного проводника использован аморфный Fe-Ni.

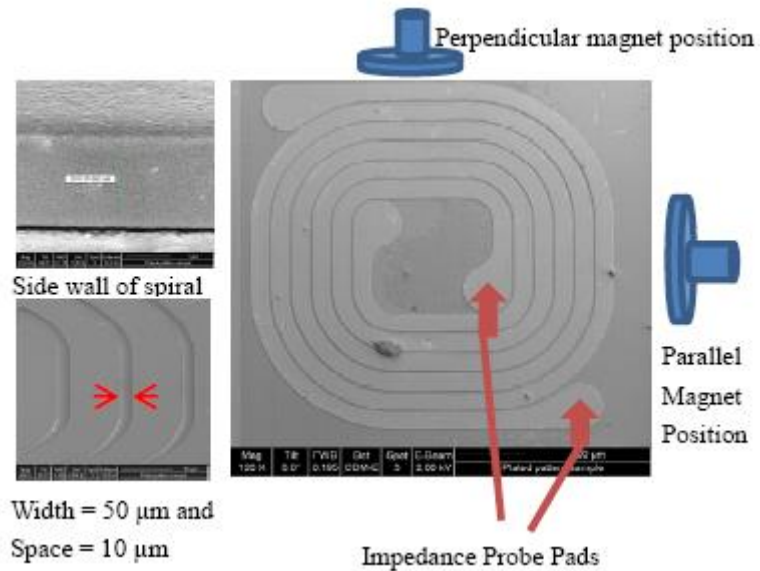


Рисунок 1.18 – внешний вид чувствительного элемента описанного в статье [64]

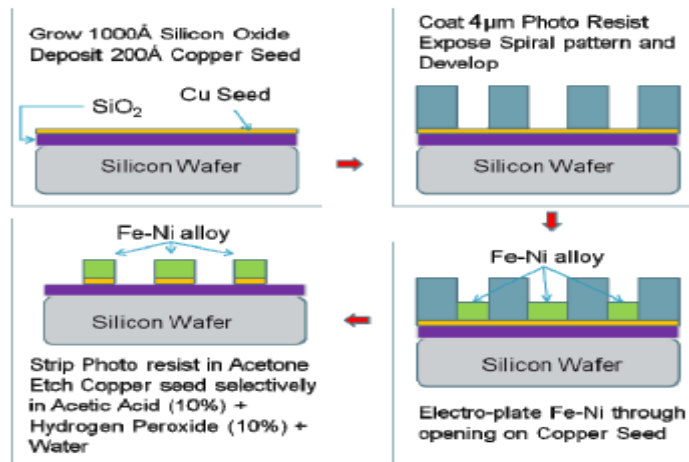


Рисунок 1.19 – поэтапная сборка чувствительного элемента описанного в статье [64]

Авторами были изучены характеристики чувствительности разработанного датчика на частоте 500кГц в магнитных полях до 35Э (рисунок 1.20). Максимальная чувствительность на начальном участке кривой составила 50Э/Ом. Так же авторами была наглядно проиллюстрирована зависимость скин-эффекта от величины поля и частоты возбуждения, показанная на рисунке 1.21.

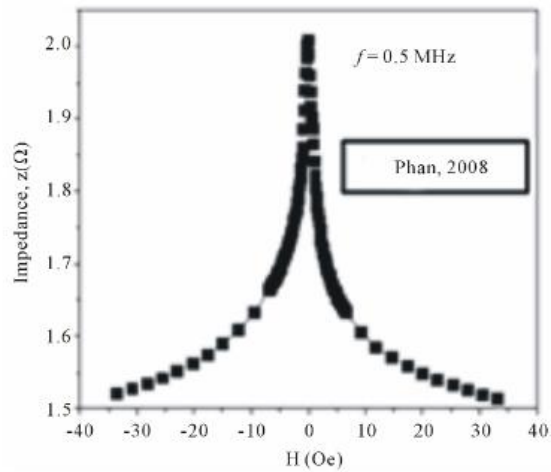


Рисунок 1.20 – Характеристика чувствительности описанная в статье

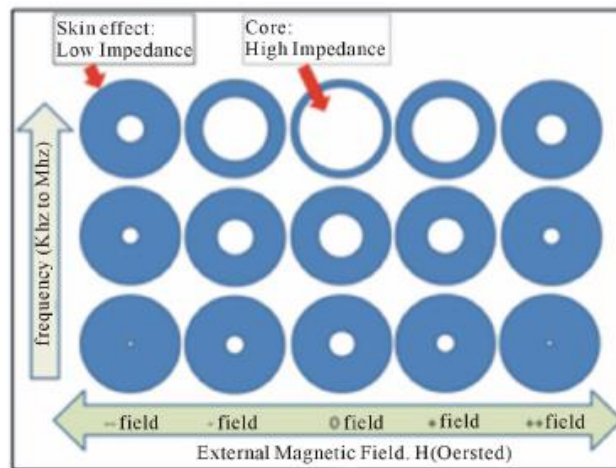


Рисунок 1.21 – Проявление скин-эффекта описанное в статье

Данная конструкция обладает следующими достоинствами: простая интеграция в технологию изготовления полупроводниковых ИМС, простота изготовления, малые габариты, малая себестоимость. Так же можно отметить следующие недостатки: взаимовлияние катушек друг на друга, относительно не высокая чувствительность, нелинейная зависимость чувствительности к магнитному полю [64].

1.6 Обзор современных магнитных датчиков

В 2011 году на рынке электроники начинают появляться первые МИ-сенсоры основанные на ГМИ эффекте. К концу 2011 года корпорация AISHI STEEL (Япония) выпускает первый миниатюрный трехосный электронный компас-акселерометр построенный на 6-и МИ-элементах. Устройство в своем составе содержит МИ-элементы,

усилители, 12-и битный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер серии 8032, его блок схема приведена на рисунке 1.22.

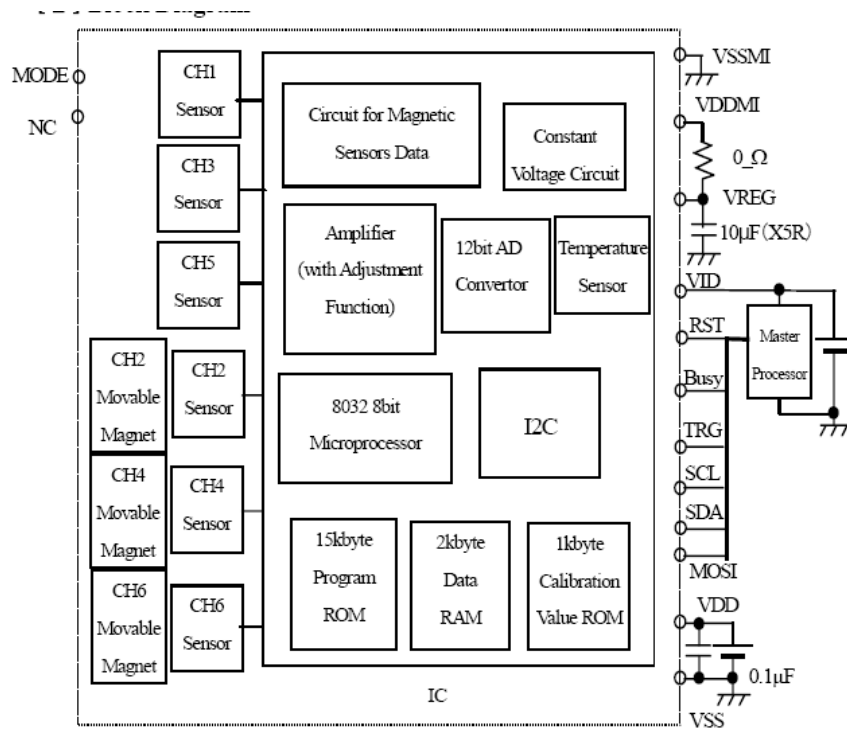


Рисунок 1.22 - Устройство сенсора

Акселерометр выполнен на таких же МИ-элементах с подвесом на постоянном магните. Данное устройство поставляется в малогабаритном корпусе 6x5,2x1,57 мм, интерфейс обмена данными I2C. Основные технические данные приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1 - Основные технические данные

Параметр	значение	Ед. измер
Предел измерения поля	$\pm 0,3$	мТ
Чувствительность	10	Бит/мкТ
Напряжение питания	2,8...3,6	В
Нелинейность	4	%
Измерение переменных полей	До 1	кГц
Рабочий интервал температур	-20...+85	С

В феврале 2013 года другой производитель датчиков и интегральных микросхем Honeywell анонсировал новый трехосевой магнитный датчик для поверхностного монтажа - HMC5883L. Этот многофункциональный миниатюрный модуль измеряет слабые магнитные поля в диапазоне 0,1-10Э имеет цифровой интерфейс и может быть

применен в мобильных устройствах, электронных компасах, измерителях магнитной индукции, системах навигации. HMC5883L построен на основе трех мигниторезистивных элементов HMC118X, содержит мультиплексор, регулируемый усилитель, 12-битный АЦП и микроконтроллер. Последовательный интерфейс I2C позволяет легко управлять датчиком и получать от него данные. HMC5883L изготавливается в 16-ти выводном LCC корпусе для поверхностного монтажа, его габариты 3.0x3.0x0.9mm. В основе чувствительного элемента датчика лежит анизотропная магниторезистивная технология, это даёт датчику ряд преимуществ, которые позволяют проводить измерение слабых магнитных полей с высокой точностью. Основные технические данные приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Основные технические данные

Параметр	значение	Ед. измер
Предел измерения поля	± 8	Гаусс
Чувствительность	230...1370	Ед/Гаусс
Шум (по среднему значению 100 измерений)	0,002	Гаусс
Нелинейность	0,1	%
Гистерезис	25	ppm
Частота выборки (измерений)	0.75...75	Гц
Рабочий интервал температур	-30...+85	С

Применение магниторезистивного элемента вместо МИ-элемента позволило существенно сократить габариты и себестоимость изготовления датчика, но несколько ухудшило его чувствительность. Данное изделие позиционируется как электронный компас, и его вполне разрешения хватает для регистрации магнитного поля земли.

Honeywell так же выпускает и линейку полностью аналоговых высокочувствительных датчиков HMC1001...HMC1024. Датчики для поверхностного монтажа в малогабаритных корпусах SOIC. Этот миниатюрный модуль снабжен одним или двумя измерителями, которые измеряют слабые магнитные поля в диапазоне до 2Э. Датчик имеет аналоговый интерфейс и предназначен для работы в системах навигации. HMC1001 построен на основе мигниторезистивных элементов, включенных мостом, так же в состав датчика входит размагничивающий элемент. В описании на датчик приведена рекомендованная схема включения. Датчик совсем прост и не содержит в своем составе усилителей, ключей и устройств аналогово-цифрового преобразования, за счет этого он

получает широкий рабочий интервал температур и высокую точность измерений. Основные технические данные приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Основные технические данные

Параметр	значение	Ед. измер
Предел измерения поля	± 2	Гаусс
Чувствительность	3,2	мВ/Гаусс
Шум	29	нВ/Гаусс
Нелинейность	0,1	%
Гистерезис	0,05	%
Полоса частот	До 5,0	МГц
Рабочий интервал температур	-55...+150	С

Melexis — компания № 5 в пятерке рейтинга IHS iSuppli с доходностью в \$107 млн. Ее сфера интересов — автомобильные применения. Но Melexis также поставляет обычные датчики Холла для сотовых телефонов. Triaxis — это торговая марка Melexis, название которой выражает суть инновационной технологии магнитных датчиков, способной выполнять 3х осевые измерения магнитных полей от одиночного датчика. Посредством технологии Triaxis возможны высокоточные измерения положения магнита — углового, линейного и 3D-перемещения, а также бесконтактные измерения тока по магнитному полю. Технология основана на эффекте Холла с дополнением интегрированных магнитных концентраторов (ИМК, ИМС), формируемых посредством депонирования магнитной пленки на поверхность ИС. Стандартные датчики Холла, размещенные под ИМК, чувствительны только к Z-компонентам поля, но ИМК физически преобразует X- и Y-компоненты в Z. Поэтому с применением определенной математической формулы посредством одного датчика можно измерять три компонента (X, Y и Z) приложенной плотности магнитного потока. Измерительные схемы, в которых реализуется технология Melexis Triaxis, допускают значительное не выравнивание магнита, упрощая клиентскую сборку. Полная программируемость дает клиентам свободу использовать практически любых изделиях и производить различные модификации датчика посредством внесения изменений в ПО.

Датчики Triaxis являются интеллектуальными (smart) устройствами и включают самодиагностическую функциональность. MLX90360 и MLX90363 это новые продукты на основе той же технологии Triaxis, но уже следующего поколения. Обе микросхемы доступны в версиях для автомобильного рабочего диапазона температур (-40...+150 °C).

На основе наработок шести прошлых лет (в 2005 году была выпущена первая микросхема на основе технологии Triaxis MLX90316) компания Melexis разработала микросхемы для линейного, углового и 3D бесконтактного измерения положения. Устройства реализованы как в одиночном, так и в двухкристальном избыточном исполнении. Типичным применением датчика MLX90360 является детектирование линейного положения, а также угловое детектирование положения в соответствующем исполнении. Микросхема обеспечивает аналоговый или ШИМ-выход с возможностями полного программирования, что упрощает разработку устройств с их применением. Линейное или угловое детектирование положения осуществляется при непосредственном подключении к контрольной электронике и программировании через соединитель. На рисунке 1.23 показаны структурные блок-схемы датчиков.

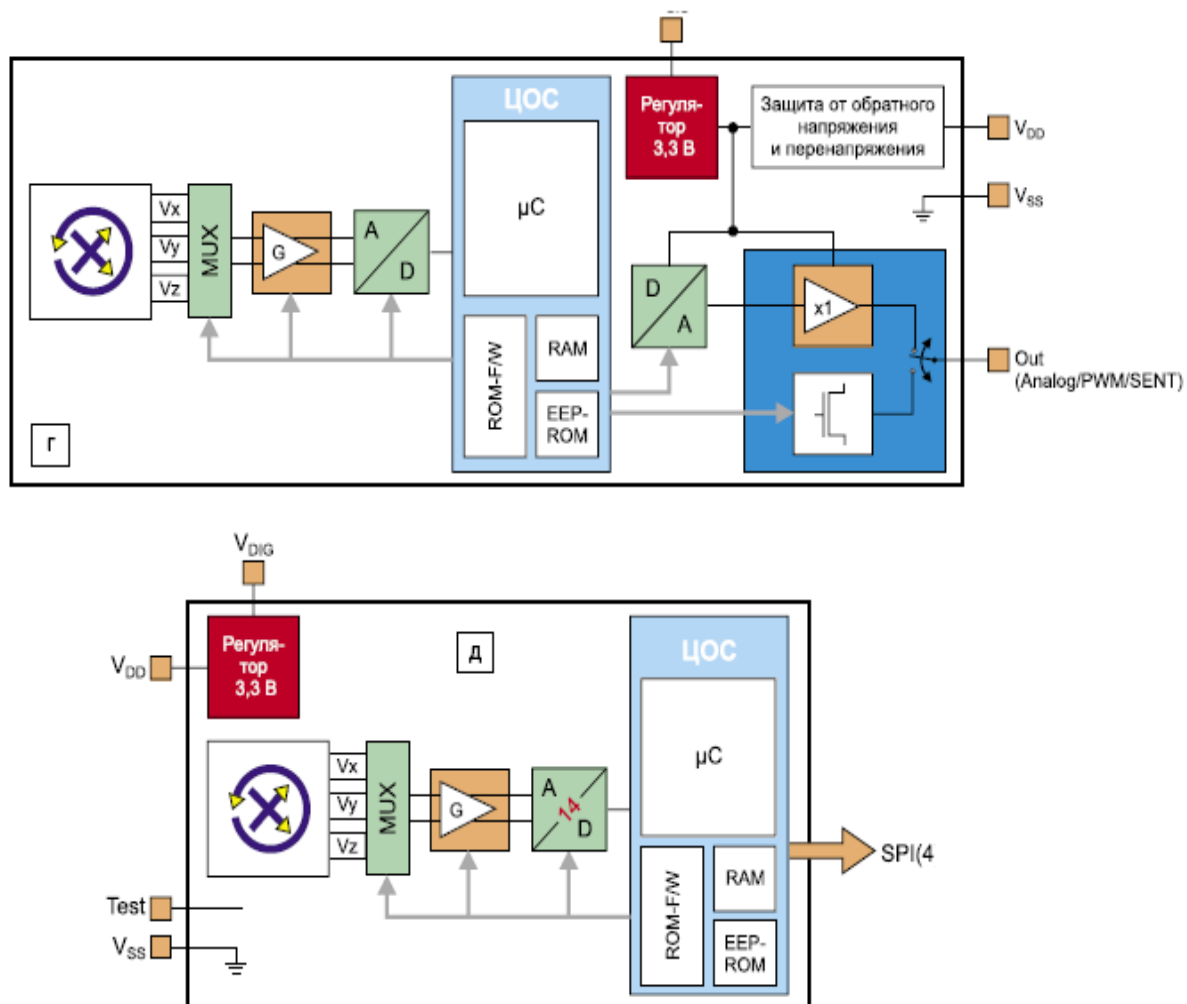


Рисунок 1.23 – Структурные схемы датчиков, верхняя - MLX90360, нижняя - MLX90363

Три векторных компонента плотности магнитного потока (B_X , B_Y и B_Z), приложенные к ИС, обнаруживаются элементами Холла, они передают соответствующие сигналы напряжения (V_X , V_Y и V_Z), которые затем усиливаются. Обработанные аналоговые сигналы преобразуются посредством АЦП (15 бит) и направляются в блок ЦОС для дальнейшей обработки. Ступень ЦОС основана на 16-ти битном RISC-микроконтроллере, первичная функция которого состоит в извлечении положения из двух (двух из трех) строковых сигналов (получаемых после так называемых шагов front-end компенсации), с применением математической функции MLX90363 это следующая новая микросхема от Melexis, созданная для подключения к микроконтроллеру, её особенностью является выход SPI, который предоставляет максимальную гибкость при разработке приложений в неограниченном диапазоне применений. 3D, угловое, линейное и даже различные смешанные типы движения могут детектироваться посредством ПО, встроенного в клиентский микроконтроллер. Внутренние строковые и обработанные сигналы датчика, содержащие информацию B_X , B_Y и B_Z для обработки микроконтроллером, передаются через интерфейс SPI. Данные от однокристалльного датчика температуры и данные диагностики кристалла также могут передаваться цифровым способом. Тот же самый канал SPI используется и для программирования.

Основные технические данные датчиков приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Основные технические данные

Параметр	значение	Ед. измер
Предел измерения поля	130	mT
Чувствительность	3276	Ед/mT
Шум	0,75	%от питания
Нелинейность	0,3	%
Гистерезис	-	%
Частота выборки (измерений)	До 130	Гц
Рабочий интервал температур	-40...+150	С

1.7 Выводы и постановка задачи

Обзор литературы дает основания полагать, что эффект магнитного импеданса в аморфных микропроводах может быть очень перспективным для применений в различных датчиках. Используя зависимость высокочастотного импеданса от магнитной структуры, которая в аморфных микропроводах может быть очень чувствительна к внешним

факторам появляется возможность сформировать нужную передаточную функцию. Большое число публикаций в научных журналах, связанных с эффектом магнитного импеданса, подтверждает как фундаментальный, так и практический интерес к данной тематике.

В данной главе был проведен обзор перспективных областей применения аморфных микропроводов, который насчитывал пять основных направлений применения.

Особое внимание стоит обратить на разработку датчиков магнитного поля на основе магнитного импеданса, т.к. эффект магнитного импеданса обладают большей чувствительностью по отношению к магниторезистивному эффекту. Однако, рассмотренные методы и подходы по изучению свойств микропроводов могут быть применены и для других направлений использования микропроводов.

При изучении свойств аморфных микропроводов можно выделить несколько основных подходов:

- Определение оптимальных параметров возбуждения при измерении магнитного импеданса;
- Изучение влияния воздействия температуры на магнитный импеданс в аморфном проводе;
- Изучение влияния термо и термомагнитной обработки на магнитный импеданс в микропроводе;
- Изучение влияния технологии изготовления датчика на свойства МИ проводника;
- Настройка и модернизация оборудования для проведения работ по изучению свойств микропроводов.

Методы построения высокочувствительных датчиков на основе магнитного импеданса содержат несколько подходов и сформулированных правил:

- Выбор материалов для построения магнитоимпедансного датчика;
- Выбор технологии и методов получения микропроводов, для высокочувствительных датчиков магнитного поля;
- Изучение влияния внешних факторов (температуры, электрических и магнитных полей) на магнитоимпедансный датчик;
- Выбор технологии получения и конструкции чувствительного элемента для магнитоимпедансного датчика;
- Определение основных принципов построения интеллектуальных датчиков с применением магнитоимпедансных чувствительных элементов.

Специфика контроля свойств микропроводов напрямую связана с большим количеством экспериментов, а следовательно, аналитического оборудования, соответственно, приходится анализировать целый спектр свойств, т.е. комбинацию параметров (состав, размер, форма, удельное сопротивление, намагниченность, температурная и механическая восприимчивость и др.). Учитывая стоимость аналитического оборудования (электронные микроскопы (ЭМ), магнитометры, магнитные измерительные системы и др.) для исследования характеристик микропроводов, данный параметр порой играет немаловажную роль. Соответственно разработка и адаптация методик прогнозируемого измерения свойств микропроводов является ключевой при внедрении технологии.

Также стоит отметить, что технология магнитоимпедансных датчиков является относительно «молодой» и на многих этапах получения как материалов так и самих датчиков ещё не пришла к совершенству. Тот факт, что в настоящее время многие научные группы занимаются исследованием магнитного импеданса в микропроводах, оформляется большое количество патентов подтверждает большой научный и практический интерес к этой теме.

Исходя из анализа исследований в области технических применений МИ и определив их общий тренд, поставлены конкретные цели и задачи данной работы.

- Изучить влияние магнитной анизотропии, магнитных полей смещения, формы сигнала возбуждения на МГц частотах на зависимость импеданса аморфного провода в недиагональной конфигурации от измеряемого магнитного поля с целью увеличения чувствительности выходного сигнала напряжения (В/Э);
- Изучить влияние термо- и термомагнитной обработки на магнитный импеданс в микропроводе для последующего улучшения и модифицирования свойств датчиков;
- Изучить влияние воздействия температуры и механических напряжений на магнитный импеданс в аморфном проводе для стабилизации параметров датчика;
- Разработать конструкцию чувствительного элемента (ЧЭ) с использованием МИ микропроводов в недиагональной конфигурации для высокочувствительных датчиков магнитного поля и технологию его изготовления;
- Изучить влияние режима сигнала возбуждения на работу ЧЭ датчика. Выбрать оптимальный режим возбуждения ЧЭ датчика;
- Разработать электронную схему с источником возбуждения, приемником сигнала и блоком обработки данных;

- Определить основные принципы построения интеллектуальных датчиков с применением магнитоимпедансных чувствительных элементов. Разработать интеллектуальное программное обеспечение блока обработки данных.

ГЛАВА 2 Методы измерения и модификации параметров ферромагнитных микропроводов. Методы построения чувствительных элементов МИ датчика

В данной главе обсуждаются используемые методы измерения статических магнитных свойств, тензора импеданса при воздействии внешнего магнитного поля и температуры, технология модификации магнитных свойств ферромагнитных микропроводов. Также рассматриваются принципы и методы построения чувствительных элементов МИ датчиков. Полученные экспериментальные результаты обсуждаются в следующей главе. Измерительные методики основаны на стандартном оборудовании, однако для реализации функций управления, автоматизации и контроля были разработаны оригинальные измерительные стенды и программное обеспечение.

2.1 Методики измерения статических магнитных свойств микропроводов

2.1.1 Индуктивный измеритель магнитных характеристик

Петля гистерезиса ферромагнитного образца является основной его характеристикой и может быть получена индукционным методом. При исследовании микропроводов, когда образец занимает малую часть поперечного сечения катушки, поток от внешнего поля может оказать влияния на процесс измерения. Тогда необходимо принимать во внимание существование магнитного потока, исходящего как из образца, намагниченностью M , так и от внешнего магнитного поля H [65]. Уравнение магнитного потока может быть вычислено по формуле (2.1).

$$\Phi = \mu_0 [(A_C - A_S)H + A_S(H + M)] = \mu_0 [A_C H - A_S M] \quad (2.1)$$

где A_C и A_S – площади поперечных сечений катушки и провода, соответственно.

ЭДС индуцированного напряжения катушки содержит две компоненты и может быть отображено формулой (2.2).

$$\varepsilon = -\mu_0 N \frac{d(A_C H + A_S M)}{dt} = -\mu_0 N \left[A_C \frac{dH}{dt} + A_S \frac{dM}{dt} \right] \quad (2.2)$$

где N - число витков измерительной катушки.

Для устранения переменной составляющей $A_C(dH/dt)$, возникающей от внешнего магнитного поля, используется компенсационная катушка. Эта катушка идентична измерительной катушке, но включена последовательно и встречно относительно измерительной катушки. Тогда измерительная система сама себя компенсирует, индуцированное в катушки ЭДС зависит только от скорости изменения намагниченности образца и равно нулю в отсутствие образца. Данная зависимость показана в формуле (2.3).

$$\varepsilon = -\mu_0 N A_s \frac{dM}{dt} \quad (2.3)$$

Намагниченность образца получается путем интегрирования по времени наведенного сигнала напряжения можно рассчитать по формуле (2.4).

$$M = \frac{1}{\mu_0 N A_s} \int \varepsilon dt \quad (2.4)$$

Классическая установка для измерения петли гистерезиса индукционным способом состоит из двух частей: катушек Гельмгольца (или соленоида) для генерации магнитного поля, и измерительной системы, состоящей из детектирующих катушек и измерительных приборов (интегратор, осциллограф). Её функциональная схема показана на рисунке 2.1.

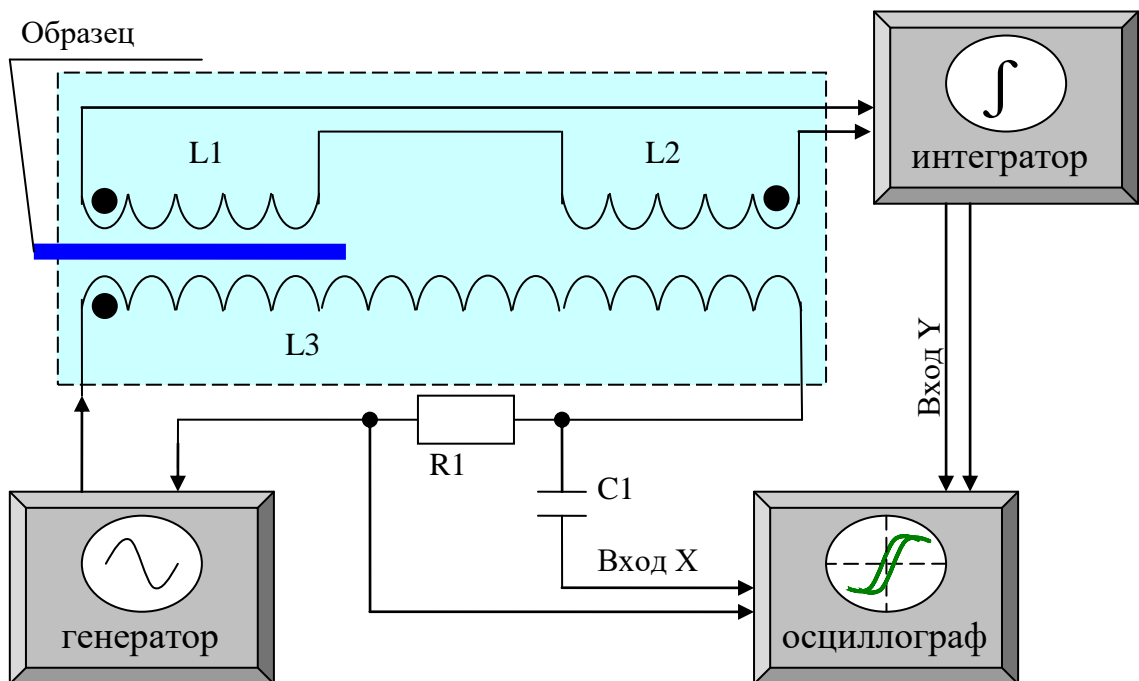


Рисунок 2.1 – Установка измерения петли гистерезиса

Переменный ток проходит через катушку L3 и создает переменное магнитное поле. Под воздействием магнитного поля, в образце происходит перемагничивание и индуцируется электродвижущая сила (ЭДС) в катушках L1 и L2. Здесь катушка L2 является компенсационной. Для измерения наведенного магнитного потока обычно используется аналоговый интегратор или веберметр. Для того, чтобы наблюдать петлю гистерезиса на экране осциллографа, к первому входу необходимо подключить сигнал, пропорциональный магнитному полю, а ко второму сигнал от аналогового интегратора или веберметра. Сигнал, пропорциональный магнитному полю, можно получить, подключив последовательно с возбуждающей катушкой резистор R1 с эталонным сопротивлением, напряжение на котором и будет пропорционально величине поля. В случае настроек генератора в режим с постоянным смещением для добавления подмагничивания, последовательно перед входом X осциллографа необходимо установить фильтрующий конденсатор.

При измерении тонких аморфных микропроводов, индуцированная ЭДС очень мала и может быть подавлена шумом. В таком случае, классическая измерительная схема становится не эффективной.

Для измерения петли гистерезиса микропроводов на основе классического метода была разработана специализированная измерительная установка, обладающая следующими отличительными признаками:

1. Измерительные катушки с маленьким внутренним диаметром (до 2 мм) и большим числом витков (более 2000) позволяют увеличить чувствительность и уменьшить уровень шумов;
2. Цифровая обработка, позволяющая в автоматическом режиме измерять петли, коэрцитивность, диаметр (при проведении предварительной калибровки на образце-свидетеле);
3. Применение встроенного цифрового низкочастотного генератора позволяет быстро настраивать оборудование и быстро и точно проводить измерения (время измерения менее 10 с).

Модифицированная установка для регистрации петель гистерезиса показана на рисунке 2.2. Она включает в свой состав следующие компоненты: измерительный блок с детектором (1), блок питания (2) и персональный компьютер с управляющей программой (3). Блок питания вынесен отдельно с целью уменьшения уровня сетевых помех. Связь между компьютером и измерительной системой осуществляется посредством USB интерфейса, интерфейс гальванически развязан так же для уменьшения уровня помех. Образец (4) помещается в детектор расположенный на измерительном блоке.

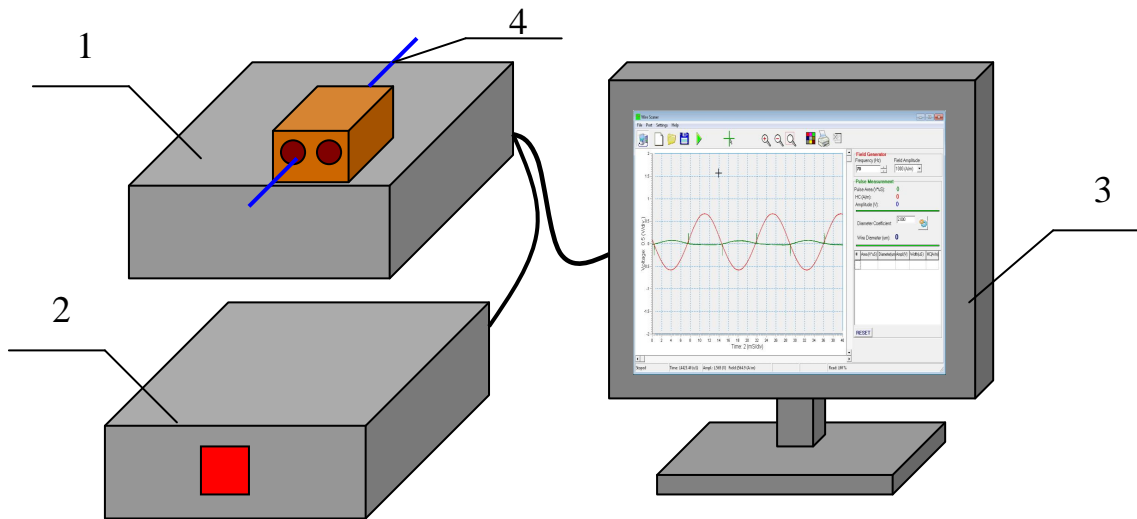


Рисунок 2.2 – Измерительная установка

Основные технические данные установки:

- Частота переменного магнитного поля: 70 Гц-500 Гц;
- Величина магнитного поля: 100 А/м-1000 А/м;
- Геометрия измеряемых образцов определяется параметрами катушки;
- Потребляемая мощность от сети 220 В (без ПК): не более 10 Вт

Измерительная система работает следующим образом. В детектор, состоящий из двух детектирующих и одной возбуждающей катушек, помещается образец. Для компенсации помех детектирующие катушки включены встречно. На возбуждающую катушку подаётся переменное синусоидальное напряжение для генерации переменного магнитного поля. Параметры сигнала возбуждения устанавливаются в программе на ПК. Сигнал с детектирующих катушек поступает в измерительный блок, функциональная схема которого показана на рисунке 2.3. В измерительном блоке сигнал усиливается, оцифруется, проходит математическую обработку в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) и через USB контроллер передается на ПК. Программа, установленная на ПК, по полученным данным строит графики и проводит расчет значений коэрцитивной силы и диаметра провода. Окно программы показано на рисунке 2.4.

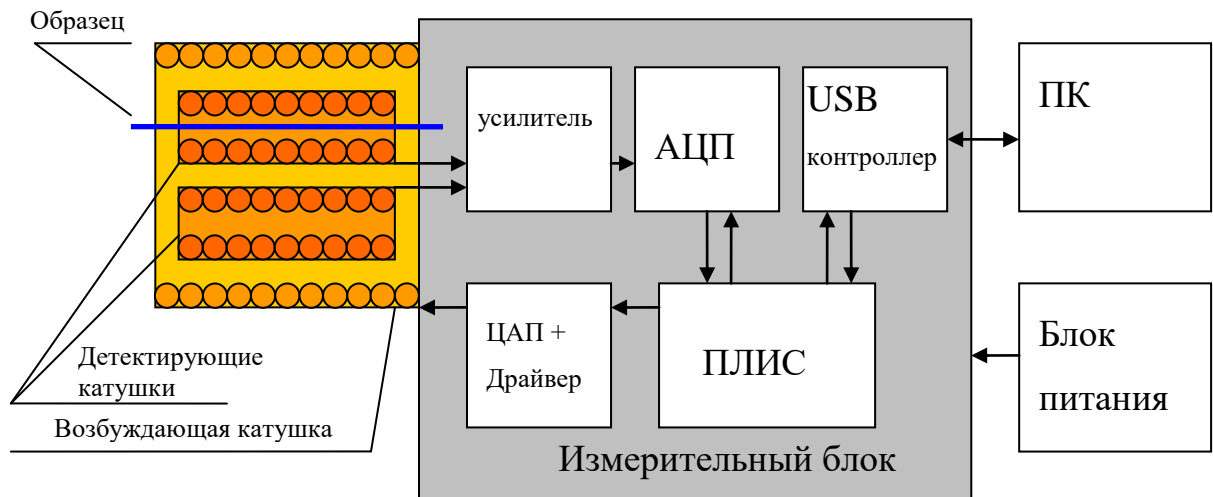


Рисунок 2.3 – Функциональная схема

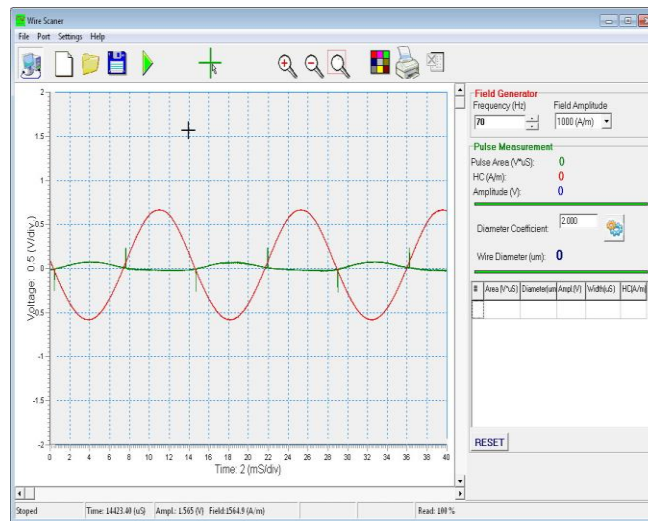


Рисунок 2.4 – Окно программы

Кроме численного интегрирования, программа может выполнять и другие операции, такие как фильтрация или усреднение по нескольким измерениям. Для построения петли магнитного гистерезиса программа создает Excel файл, в котором происходит построение петли по полученным данным. Результаты измерений приведены в главе 3. Основными преимуществами модифицированной системы являются:

- увеличение чувствительности, уменьшение шумов;
- возможность автоматизированной или удаленной работы на установке.

2.1.2 Вибрационный магнитометр МВ-07 и его модернизация для проведения магнитного анализа

Стандартным методом изучения магнитных свойств как ферромагнетиков, так и парамагнетиков является магнитный анализ при помощи вибромагнитометра. Принцип работы вибромагнитометра заключается в следующем. Образец в кювете помещается в постоянное магнитное поле, кювета колеблется с частотой, отличной от сетевой частоты (например, 60 Гц). В детектирующих катушках, расположенных вблизи образца, наводится ЭДС за счет изменения ориентации магнитного момента в пространстве. Далее, петля намагниченности восстанавливается по наведённому сигналу при известной величине постоянного магнитного поля.

Установка МВ-07 была спроектирована для измерения зависимостей намагниченности от напряженности магнитного поля. В управляющем блоке присутствуют только аналоговые линии ввода/вывода. Для полной автоматизации возникла необходимость модернизации вибромагнитометра.

В ходе модернизации двухкоординатный самописец был заменен на электронный регистратор сигналов и персональный компьютер. Сбор и регистрация информации производится по нескольким каналам: температура образца, напряженность магнитного поля, амплитуда вибраций, усиленный сигнал с измерительных катушек. Программа сбора и регистрации данных позволяет не только отображать, но и производить обработку информации по определённому алгоритму. При этом значения аппаратной функции задаются в настройках программы вручную один раз и затем сохраняются в её памяти до тех пор, пока не возникнет необходимость смены схемы эксперимента. Для уменьшения влияния помех, исходящих от компьютера, электронный регистратор сигналов содержит в своем составе гальваническую развязку. Новый регистратор построен на базе микроконтроллера STM32F100 и имеет в своем составе 12 битный АЦП, 10 аналоговых и 16 цифровых входов.

Был разработан селективный усилитель, состоящий из двух блоков, блока предварительного усиления и основного блока. Для уменьшения уровня помех блок предварительного усиления располагается как можно ближе к измерительным катушкам.

Модернизированный вибромагнитометр, блок-схема которого представлена на рисунке 2.5, работает следующим образом. В кювету (9) загружается образец, на встроенном в усилитель (4) источнике питания виброблока устанавливается необходимая амплитуда вибраций виброблока (5), на стойке питания (2) запускается «кольцевой» режим питания электромагнита (1). Сигнал с измерительных катушек (3) поступает в блок

предварительного усиления, а затем усиленный сигнал попадает на основной блок селективного усилителя (4), который выделяет нужную частоту сигнала, зависящую от частоты вибраций виброблока, отсекая тем самым шумы, усиливает сигнал, выпрямляет и синхронизирует фазу, затем преобразованный сигнал подаётся на электронный регистратор сигналов (8), туда же попадают сигналы об амплитуде вибрации и о температуре образца. Сигнал с датчика Холла (6), проходя через свой усилитель (7), так же попадает на электронный регистратор сигналов (8). Электронный регистратор сигналов фиксирует и передает на компьютер (11) следующие параметры: величина поля и амплитуда сигнала с измерительных катушек, величина вибрации, температура образца. В окне программы, вид которого отображен на рисунке 2.6, на ПК отображаются полученные данные в виде графиков. Модернизированный магнитометр работает через виртуальный COM – USB порт, на скорости 115200 бит/с. Программа позволяет строить петлевые графики, сохраняя результаты экспериментов на ПК.

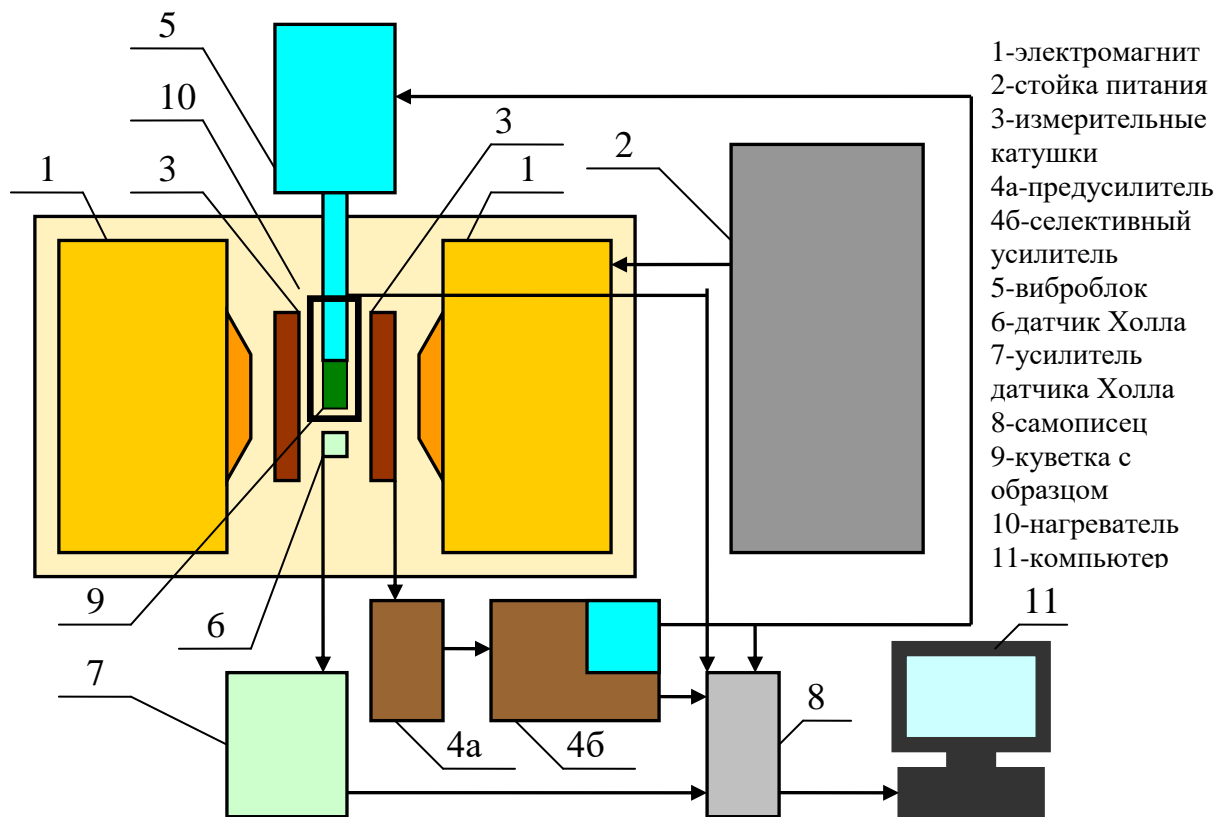


Рисунок 2.5 – Блок-схема модернизированного магнитометра

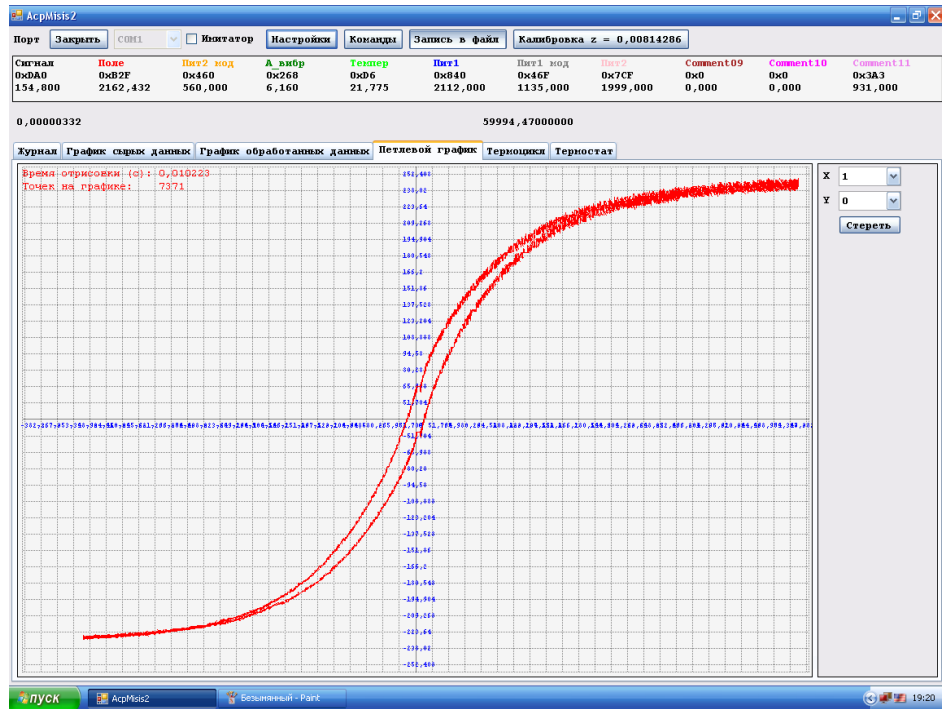


Рисунок 2.6 – Окно программы

Произведенная модернизация оборудования МВ-07 позволила обеспечить измерение магнитных характеристик коротких микропроводов.

2.2 Экспериментальные методы исследования компонент тензора поверхностного импеданса

2.2.1 Физические принципы измерения тензора магнитного импеданса

На высоких частотах электромагнитные характеристики ферромагнитных проводов наиболее последовательно описываются в рамках тензора поверхностного импеданса $\hat{\zeta}$, который определяется как коэффициент пропорциональности в векторном соотношении между тангенциальными составляющими электрического \mathbf{e} и магнитного \mathbf{h} полей на поверхности проводника. Данная зависимость отображена в формуле (2.5).

$$\bar{e}_i = \hat{\zeta}(\bar{h}_i \times \mathbf{n}) \quad (2.5)$$

где \bar{e}_i и \bar{h}_i - касательные вектора электрического и магнитного полей на поверхности, соответственно, \mathbf{n} – единичный вектор нормали, направленный внутрь поверхности.

В качестве внешнего возбуждения может рассматриваться переменный электрический ток $i_w = i_0 \exp(-j\omega t)$ совместно с внешним переменным магнитным полем h_{ex} .

Напряжение V на МИ элементе определяется внутренними потерями энергии и рассчитывается, исходя из формулы (2.6).

$$i_w V = \frac{c}{4\pi} \int_S (\mathbf{e} \times \mathbf{h}) \mathbf{ds} \quad (2.6)$$

где интегрирование выполняется по поверхности проводника.

Соотношение (2.6) демонстрируют, что индуцированные сигналы напряжения определяются через тангенциальные компоненты электромагнитного поля \bar{e}_t , \bar{h}_t на поверхности проводника. Если рассматривается квазистатический случай (размеры проводника меньше длины волны), то распределение электромагнитного поля вне проводника соответствует статическому, тогда как внешнее возбуждение задает граничные условия, например, для магнитного поля \bar{h}_t . В случае однородного цилиндрического проводника, эти условия имеют вид (в цилиндрической системе координат) в соответствии с формулой (2.7).

$$h_\varphi(a) = \bar{h}_\varphi = 2i_w / ca, \quad h_z(a) = h_{ex} \quad (2.7)$$

где a - радиус микропровода.

Тогда электрическое поле на поверхности определяется через тензор поверхностного импеданса $\hat{\zeta}$, в соответствии с формулой (2.5). При этих условиях оказывается, что $\hat{\zeta}$ полностью определяет наведенный внешним переменным магнитным полем сигнал, а происхождение поля \mathbf{h} не имеет значения [66].

Поскольку поверхностный импеданс имеет тензорную форму, переменный ток i_w в магнитном проводнике индуцирует сигнал напряжения как на концах проводника V_w , так и в катушке V_C , намотанной на проводник. Аналогично, ток в катушке i_C , намотанной на магнитный проводник, индуцирует напряжение как во вторичной катушке, так и на концах проводника. То есть для магнитного проводника можно обобщить закон Ома для переменного тока и ввести понятие тензора импеданса, и записать в виде формул (2.8) и (2.9).

$$\bar{V} = \hat{Z}\bar{i} \quad (2.8)$$

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} V_w \\ V_c \end{pmatrix}, \quad \hat{Z} = \begin{pmatrix} Z_{zz} & Z_{\varphi z} \\ Z_{z\varphi} & Z_{\varphi\varphi} \end{pmatrix}, \quad \bar{i} = \begin{pmatrix} i_w \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Компоненты тензора \hat{Z} пропорциональны соответствующим компонентам тензора поверхностного импеданса и могут быть записаны в виде формулы (2.10).

$$Z_{zz} = \frac{2l}{ca} \zeta_{zz} \quad (2.10)$$

На рисунке 2.7 представлена схема измерения компонент тензора импеданса, в которой используется соответствующая пара: сигнал возбуждения и выходной сигнал. Такой подход для измерения тензора поверхностного импеданса при различных условиях рассматривался в ряде работ [67-70].

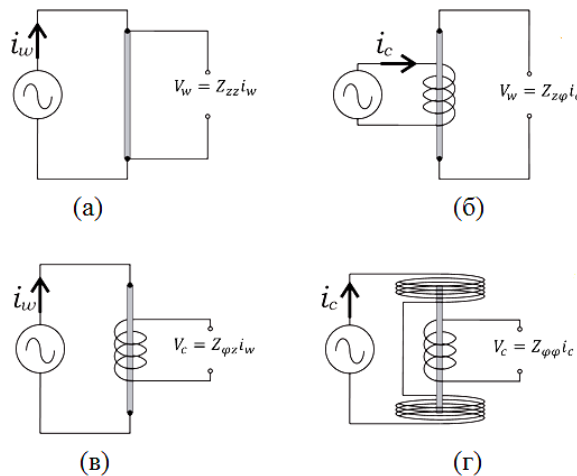


Рисунок 2.7 – Схема измерения компонент тензора импеданса

Для измерения продольной диагональной компоненты импеданса на провод подается напряжение, и сигнал снимается также с провода (рис. 2.7 а). Для измерения недиагональной компоненты сигнал снимается с катушки, намотанной на провод, а напряжение подается на провод (рис. 2.7 в), или сигнал снимается с провода, а напряжение подается на катушку (рис. 2.7 б). Диагональная циркулярная компонента

измеряется с использованием двух катушек - катушки возбуждения и детектирующей (рис. 2.7 г).

Соответственно, тензор поверхностного импеданса определяется через измеряемые величины и записывается формулами (2.11)-(2.14).

$$\zeta_{zz} = \frac{V_w}{h_\phi l} = \frac{ca}{2l} \frac{V_w}{i_w} \quad (2.11)$$

$$\zeta_{\phi z} = \frac{V_c}{h_\phi (2\pi a N_1)} = \frac{c}{4\pi N_2} \frac{V_c}{i_w} \quad (2.12)$$

$$\zeta_{z\phi} = \frac{V_w}{h_z l} = \frac{c}{4\pi N_1} \frac{V_w}{i_c} \quad (2.13)$$

$$\zeta_{\phi\phi} = \frac{V_c}{h_\phi 2\pi N_1 a} = \frac{c}{a(4\pi)^2 N_1 N_2} \frac{V_c}{i_c} \quad (2.14)$$

где N_1 , N_2 число витков на единицу длины в возбуждающей (первичной) и детектирующей(вторичной) катушках, соответственно.

В главе 1 обсуждалось, что тензор импеданса зависит как от магнитной проницаемости, так и от ориентации постоянной намагниченности, то есть появляется возможность управления индуцированным сигналом при намагничивании проводника. Этот процесс оказывается значительно более чувствительным к внешнему постоянному магнитному полю, чем изменение магнитной проницаемости. Именно эта ситуация реализуется при использовании магнитного импеданса в сенсорных элементах. Следует отметить, что недиагональная компонента тензора импеданса обусловлена исключительно магнитными свойствами. При этом недиагональная компонента изменяет знак при изменении направления либо циркулярной, либо осевой проекции статической намагниченности. Такое поведение позволяет реализовать линейность сигнала напряжения по отношению к измеряемому магнитному полю [70].

2.2.2 Экспериментальный стенд для измерения тензора магнитоимпеданса

Для исследования тензора магнитного импеданса в микропроводах была собрана измерительная система, показанная на рисунке 2.8. В её основе лежит двухпортовый анализатор (в нашем случае-HP 8753E), который управляется при помощи программы на ПК, который также принимает поток данных от анализатора и управляет импульсным генератором (Agilent 33120A). Импульсный генератор формирует уровень постоянного

напряжения для возбуждения постоянного магнитного поля в соленоиде. Поскольку, импульсный генератор не способен обеспечить необходимую величину тока, в схему добавлены операционный усилитель и источник питания. Измерительная ячейка с образцом размещена внутри соленоида и подключена ВЧ кабелями к анализатору. Дополнительный источник питания необходим для подачи в измерительную ячейку постоянной составляющей тока. Все измерения проходят в автоматическом режиме, для чего была разработана программа в среде National Instruments [71].

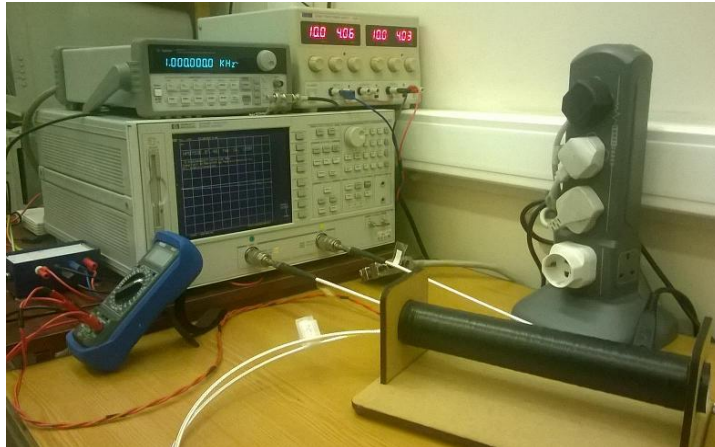
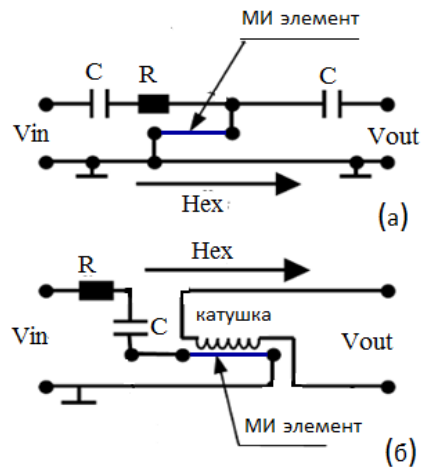


Рисунок 2.8 – Фотография стенда для измерения тензора магнитного импеданса

Для измерений были разработаны специальные ячейки, электрические схемы которых показаны на рисунке 2.9. Ячейки подсоединяются к приемо-передающим портам с помощью SMA соединителей. Фрагмент микропровода длиной до 2 см устанавливается в ячейку с помощью припаивания на контактные площадки ячейки. В общем случае по микропроводу может протекать постоянный ток смещения. Тогда, необходимо использовать фильтрующий конденсатор C , который отсекает попадание постоянного тока в анализатор. Любая компонента импеданса может определяться по измерению параметра S_{21} (прямая трансмиссия). Он определяется отношением $S_{21} = V_{out}/V_s$, где V_s соответствует сигналу возбуждения, а V_{out} выходному сигналу.



а – для продольного диагонального импеданса;

б – для недиагонального импеданса (схема рис. 2.7 в).

Рисунок 2.9 – Схема измерительных ячеек

Частота переменного сигнала фиксируется, а величина магнитного поля H_{ex} циклически изменяется от измерения к измерению, при помощи изменения постоянного напряжения на катушке – генераторе магнитного поля. Амплитуда тока высокочастотного возбуждающего сигнала берется меньше 1 мА, при этом нелинейные динамические процессы, связанные с вращением намагниченности или с необратимым смещением доменных границ, исключаются.

Для исследования влияния постоянного тока в электрическую схему добавлены катушки индуктивности (фильтры L1, L2), которая представлена на рисунке 2.10. Для защиты анализатора от постоянной составляющей в схеме имеются согласующие конденсаторы (C1, C4). Ограничение силы тока постоянной составляющей осуществляется при помощи входного резистора R1.

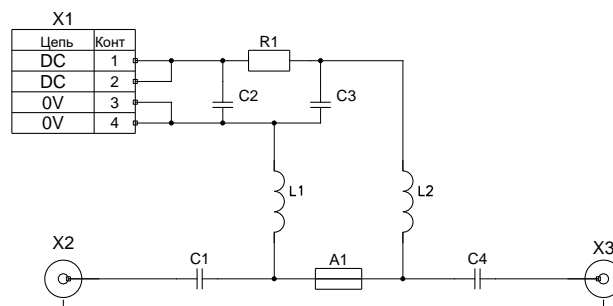


Рисунок 2.10 – Электрическая схема измерительной ячейки для диагонального импеданса

Для измерения недиагонального магнитного импеданса при помощи детектирующей катушки через аморфный микропровод в любом случае необходимо

пропустить ВЧ ток с некоторой постоянной составляющей. Отличие данной ячейки состоит в том, что в данном варианте включения необходимо правильно согласовать схему включения детектирующей катушки. Схема измерительной ячейки показана на рисунке 2.11.

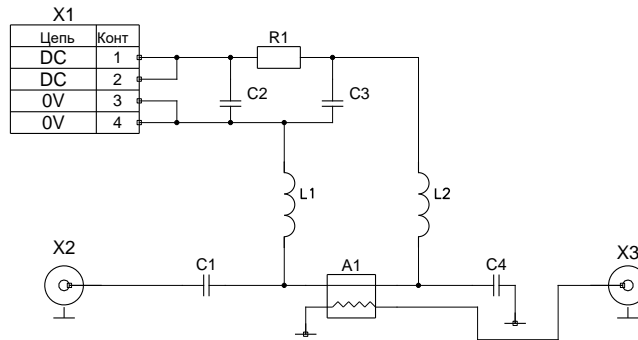


Рисунок 2.11 – Электрическая схема измерительной ячейки для недиагонального импеданса (выходной сигнал снимается с катушки)

2.2.3 Магнитокомпенсационный измерительный стенд

Для компенсации влияния внешних магнитных полей и контроля величины измеряемого магнитного поля и температуры был разработан и изготовлен специальный измерительный стенд, внешний вид которого показан на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Фотография магнитокомпенсационного стенда

Он позволяет компенсировать внешние магнитные поля по трем осям, устанавливать магнитные поля величиной до 10 Э в любых двух направлениях, и изменять температуру ЧЭ до 200 °С. Его блок-схема изображена на рисунке 2.13. Стенд состоит из

системы электромагнитных катушек, силового блока с компьютером для управления магнитной системой, электропечи для нагревания исследуемого датчика и стандартной измерительной аппаратуры (генератора, осциллографа, источника питания) управления и контроля параметров исследуемого датчика. Стенд позволяет проводить исследования датчиков при совместных влияниях всех факторов.

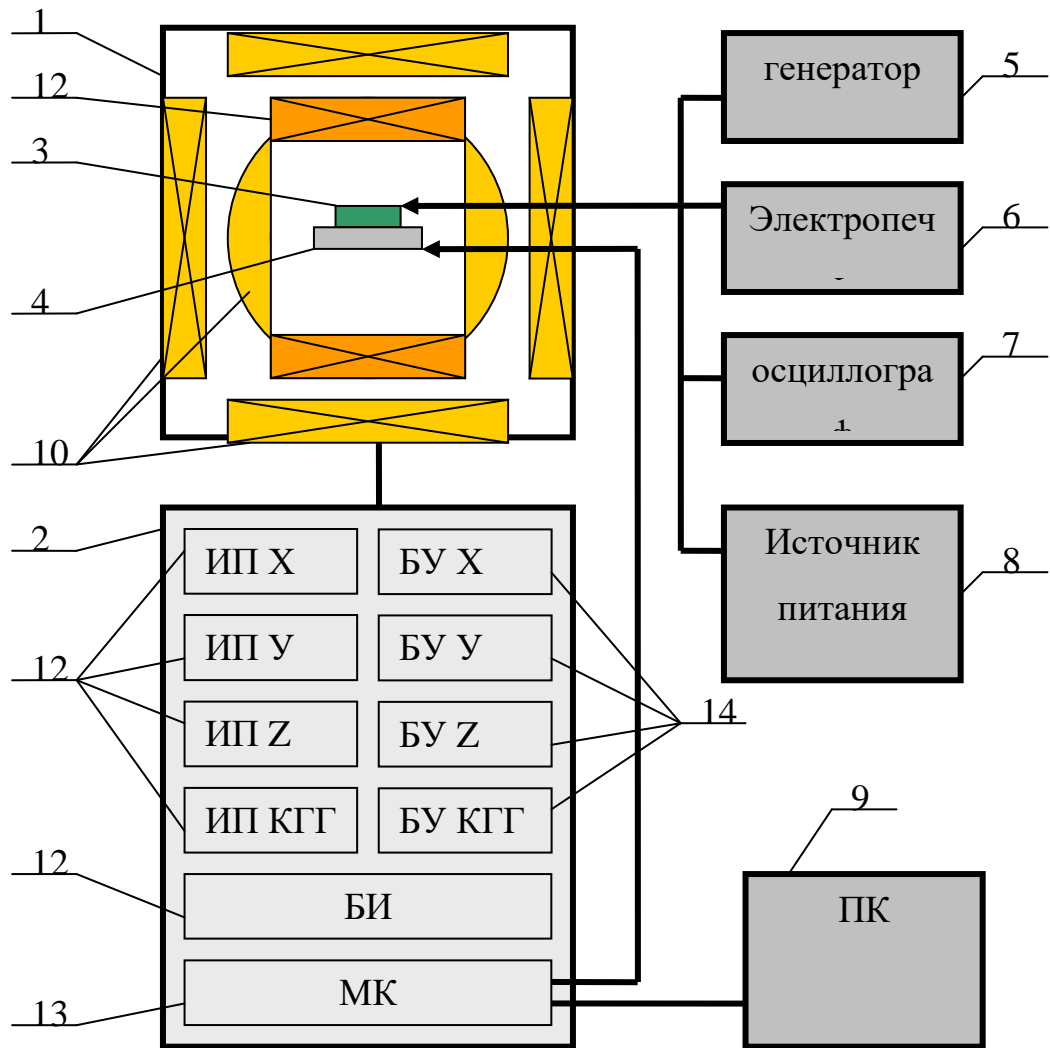


Рисунок 2.13 – Блок-схема магнитокомпенсационного стенда: 1 – система магнитных катушек; 2 – блок управления, 3 – исследуемый образец (датчик); 4 – трехосный измеритель магнитной индукции; 5 – генератор; 6 – электропечь с контролем температуры; 7 – осциллограф, 8 – источник питания; 9 – компьютер, 10 – три пары компенсационных катушек Гельмгольца; 11 – кольца Гельмгольца задающие магнитное поле; 12 – источники питания компенсационных катушек осей X, Y, Z и катушек Гельмгольца, задающих поле; 13 – блок измерения, 14 – микроконтроллер; 15 – блоки управления компенсационными катушками осей X, Y, Z и катушками Гельмгольца, задающих поле.

Система магнитных катушек состоит из трех ортогональных пар компенсационных катушек для компенсации внешних магнитных полей, катушек Гельмгольца для формирования магнитного поля заданной величины и трехосного датчика индукции магнитного поля. Трехосный датчик индукции магнитного поля расположен рядом с исследуемым датчиком, он передает на микроконтроллер, расположенный в силовом блоке, данные о величинах магнитных полей по трем осям. Микроконтроллер формирует пакет данных и передает его на компьютер через USB-порт. Компьютер пересчитывает магнитные поля в заданные единицы измерения и выводит значения на экран.

Силовой блок состоит из четырех источников питания для всех групп катушек, блоков управления для установки и стабилизации токов через катушки, блока индикации для вывода информации на корпусе прибора о токах и напряжениях на магнитных катушках, микроконтроллера для обработки данных трехосного датчика индукции магнитного поля. При этом питание микроконтроллера осуществляется от ПК через USB порт.

В составе стенда применено стандартное оборудование: генератор, осциллограф, источник питания, электропечь, компьютер. Генератор формирует возбуждающий сигнал для работы исследуемого датчика. Характеристики генератора: частотный диапазон до 20 МГц, формы сигнала – синусоидальная, импульсная с возможностью добавления постоянного смещения амплитуды. Осциллограф принимает сигнал с исследуемого датчика. Полоса частот – до 40 МГц, два канала. Источник питания задаёт смещение предела измерительной шкалы датчика. Установленная рядом электропечь через воздухопровод позволяет нагревать исследуемый датчик до 200 °С. Дополнительной термопарой проводится контроль температуры исследуемого датчика. На компьютере в программе «Магнитометр» отображаются величины полей по трём осям, измеренные измерителем магнитной индукции. Основное окно программы измерения магнитных полей показано на рисунке 2.14

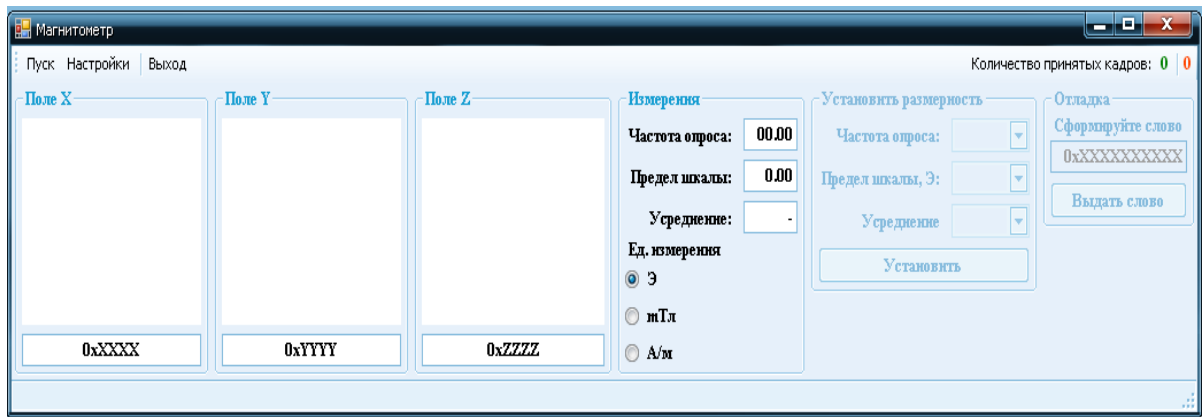


Рисунок 2.14 – Окно программы измерения магнитных полей

2.3 Определение оптимальных параметров возбуждения магнитоимпедансных чувствительных элементов

Для получения максимальной эффективности работы сенсора необходимо правильно оценить необходимые режимы возбуждения чувствительного элемента (ЧЭ). Для изучения влияния различных режимов возбуждения ЧЭ на выходной сигнал была собрана схема, показанная на рисунке 2.15

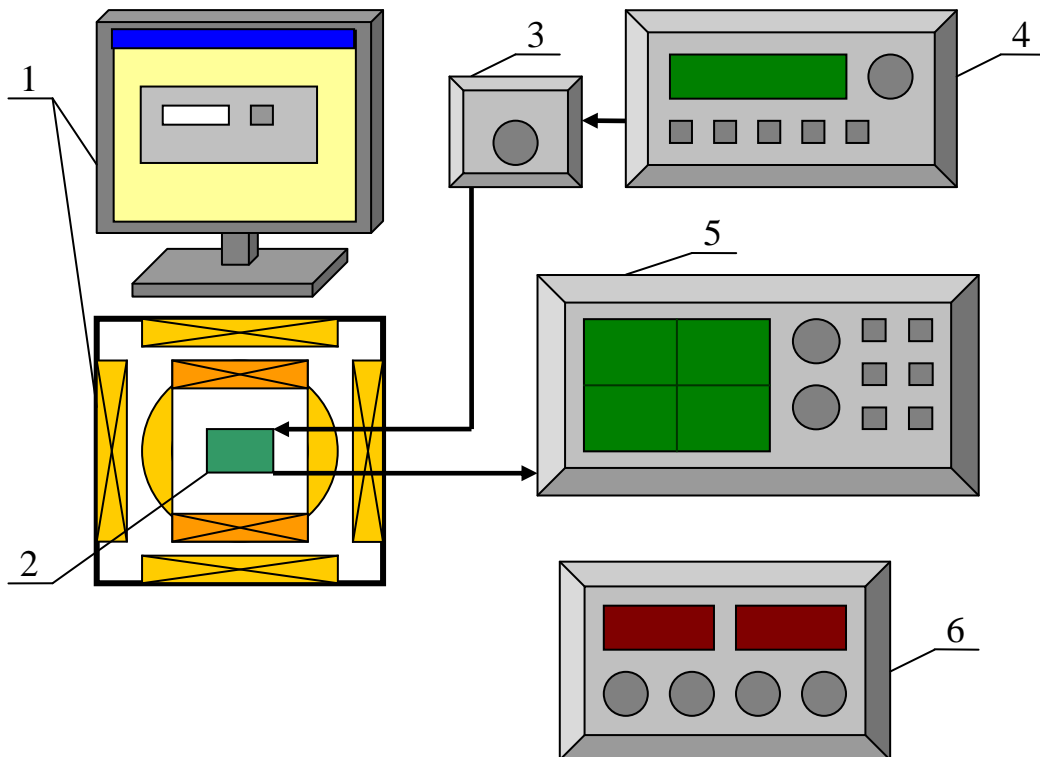


Рисунок 2.15 – Схема включения ЧЭ. Обозначения: 1 – магнитокомпенсационный стенд (МКС), 2 – ЧЭ, 3 – ограничитель тока, 4 – генератор импульсный, 5 – осциллограф, 6 – источник питания

ЧЭ (2) помещается в магнитокомпенсационный стенд (1), его возбуждение осуществляется от импульсного генератора (4) через регулируемый ограничитель тока (3). Выходной сигнал ЧЭ контролируется на осциллографе. При помощи данной схемы включения опытным путем определяются оптимальные условия возбуждения ЧЭ (частота возбуждения, величина тока возбуждения, уровень постоянной составляющей возбуждения), а также снимается амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ЧЭ.

При измерении зависимости импеданса от магнитного поля обязательно проводится размагничивание образца микропровода в магнитокомпенсационном стенде (плавно увеличивается и уменьшается магнитное поле в обоих направлениях).

Оптимальная частота возбуждения определяется по максимальному пику на амплитудно-частотной характеристике ЧЭ при определенном постоянном магнитном поле (разумно использовать поле максимума МИ характеристик). Для недиагонального импеданса выходной сигнал пропорционален числу витков детектирующей катушки и при низких частотах наблюдается линейная зависимость. Однако на частоте, соответствующей резонансу детектирующей катушки (LC-резонанс), наблюдается резкий пик. Поэтому важно определить эту частоту.

С практической точки зрения важно исследовать воздействие импульсного тока на полевую характеристику ЧЭ. При помощи оптимизации данного параметра возможно максимально снизить потребление тока ЧЭ без снижения чувствительности. Кроме того, импульсный сигнал уже содержит низкочастотные компоненты, но величина импульса и частота их повторений должны соответствовать оптимальной величине тока смещения (достаточного для устранения доменной структуры, но не приводящего к значительному увеличению магнитной жесткости).

Для осуществления обратной связи или смещения рабочей точки важно исследовать влияние обратного подмагничивания на полевую характеристику ЧЭ. Под обратным подмагничиванием понимается генерация постоянного магнитного поля детектирующей катушкой при пропускании через неё постоянного тока. Схема измерений показана на рисунке 2.16. Источник питания задает необходимую величину тока подмагничивания. Резистор и конденсатор устанавливаются в непосредственной близости к ЧЭ (МИ-элементу). Резистор ограничивает силу тока подмагничивания. Сопротивление резистора должно быть значительно больше, чем сопротивление катушки (порядка 1-2 Ом). Для удобства подсчетов сопротивление резистора выбирается равным 1 кОм, то на 1В напряжения источника питания получается величина тока 1 мА. Конденсатор отсекает постоянную составляющую и помехи по сети 50 Гц. Учитывая высокую частоту (> 8 МГц) ёмкость конденсатора выбрана равной 0,01 мкФ.

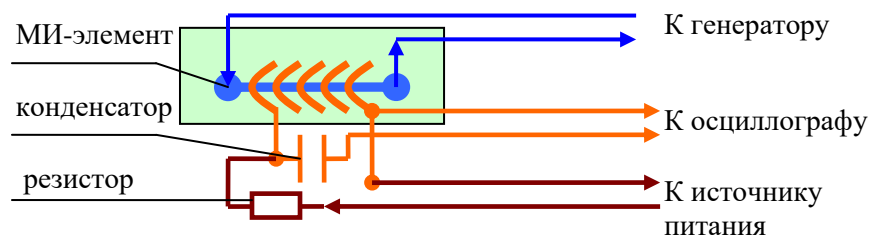


Рисунок 2.16 – Электрическая схема для обратного подмагничивания ЧЭ

Далее при различных токах подмагничивания (от 0 до 5 мА) измеряется полевая характеристика ЧЭ.

2.4 Механические напряжения, термомагнитная и термомеханическая обработка аморфных микропроводов для контроля магнитной анизотропии

Очевидно, что свойства аморфных сплавов (аморфных микропроводов), зависят от их структуры. Не смотря на имеющееся изотропное распределение атомов, в аморфных сплавах наблюдается локальная анизотропия свойств и структуры. Такая анизотропия возникает из-за неоднородного движение атомов в процессе затвердевания при быстром охлаждении жидкости. Поэтому характеристики атомного распределения в аморфном сплаве, его химический состав, плотность, внутренние напряжения имеют локальные различия в зависимости от способа и условий производства[72].

Для улучшения температурной стабильности и свойств аморфных сплавов применяют различные виды термообработки: термический отжиг, отжиг в магнитном поле, отжиг при механическом напряжении.

Структура аморфных сплавов после получения может быть неравновесной. При нагреве в аморфной фазе происходят структурные изменения. Обычно сюда относят: значительное изменение свободных промежутков в структуре, изменение геометрического ближнего порядка, химического ближнего порядка. Процессы изменения свободного объема и релаксации остаточных напряжений обычно называют структурной релаксацией[73].

Изменение химического ближнего порядка и топологического ближнего порядка предшествуют процессу кристаллизации. Данные процессы обычно протекают накладываясь друг на друга, и их характерные параметры (температура и время) и зависят от состава сплава.

На первом этапе при медленном нагреве в области температуры стеклования, структура аморфного сплава становится более стабильной. За счет небольших атомных смещений происходит изменение нестабильных атомных конфигураций. За счет чего и уменьшается свободный объем и, соответственно, уменьшается общий объем. В процессе структурной релаксации атомные смещения меньше межатомных, а происходят они в локальных областях.

При увеличении температуры нагрева сплава появляется возможность для перемещения атомов на большие расстояния (диффузия). С этого момента и начинается кристаллизация. При этом объем очень быстро снижается. В большей части аморфных сплавов кристаллизация начинается ниже температуры стеклования, но аморфное состояние еще стабильно, так как заканчивается кристаллизация.

При увеличении продолжительности релаксационного отжига аморфных сплавов в них начинается фазовое расслоение и кристаллизация. Протекание таких процессов зависит не только от химического состава, но и от скорости нагревания при их отжиге.

Аморфные сплавы кристаллизуются при помощи процесса зарождения и роста. Их движущей силой является разница свободных энергий между аморфной фазой и соответствующей ей кристаллической фазой (или несколькими фазами)[72].

2.4.1 Напряжения в аморфном микропроводе

При изготовлении микропроводов, в момент его затвердевания, создаются остаточные напряжения. Остаточные напряжения возникают из-за следующих процессов: закалки (закалочные напряжения, за счет быстрого охлаждения); вытягивания и смотки на каркас катушки; и при затвердевании из-за разницы коэффициентов температурного расширения металла и стекла [74]. Соответственно, их величина и их характер распределения внутри металлической сердцевинки и оболочки из стекла после получения зависят от параметров процесса вытягивания и закалки (соотношения диаметра металлической жилы и толщины оболочки из стекла, скорости охлаждения и смотки на каркас катушки); коэффициентов температурного расширения металлической жилы и стекла, а так же химического состава [75].

Внутри металлической сердцевинки основной вклад составляют растягивающие напряжения, направленные вдоль оси провода. На поверхности металлической жилы, за счет контакта металла со стеклянной оболочкой образуется переходный слой, где основную роль играют напряжения, наведенные за счет разницы коэффициентов температурного расширения металла и стекла. Однако процесс вытягивания при

производстве индуцирует большие осевые растягивающие напряжения, так что результирующая остаточных напряжений может быть направлена вдоль оси микропровода.

В работах [76] [77] показано, что по сечению провода составляющие напряжения (в цилиндрических координатах – радиальная, осевая и тангенциальная (рисунок 2.17)) внутри металлической сердцевинки положительны, а их величины возрастают от центра провода к поверхности по радиусу. Однако, у поверхности провода есть небольшая переходная область для значений компонент остаточных напряжений, где наблюдается максимумы значений, и затем резкое снижение.

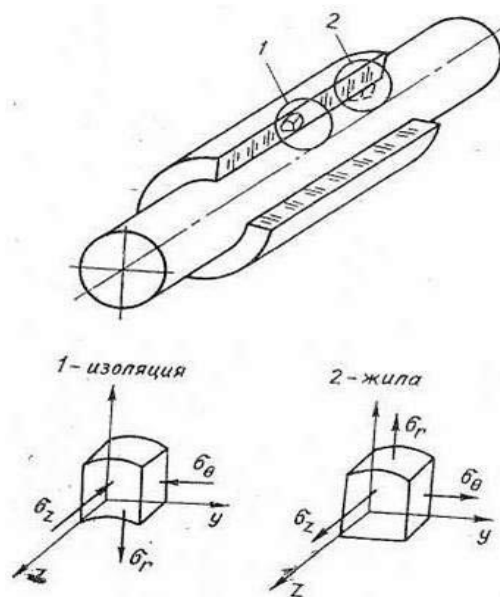


Рисунок 2.17 - Обозначение направлений компонент остаточных напряжений в цилиндрической системе координат [42]

При этом в этой небольшой переходной области осевая и тангенциальная (касательная) компоненты могут менять знак.

Как было упомянуто ранее, внутренние напряжения в аморфных металлических сплавах, в свою очередь, в совокупности с магнитоупругим эффектом приводят к возникновению сильной магнитоупругой анизотропии.

Магнитоупругость зависит от состава металлической сердцевинки. Соответственно, магнитная анизотропия внутри металлической жилы микропроводов будет определяться характером распределения остаточных напряжений.

На основании расчетов уровня остаточных напряжений и минимизации магнитоупругой энергии выделяют три области внутри металлической жилы микропровода [74]:

1) $r \in (0, R_c)$, где сильная магнитострикция в совокупности с большим положительным значением осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_{zz}(r)$ по отношению к тангенциальной и радиальной приводят к одноосной магнитной анизотропии с осью легкого намагничивания вдоль оси провода;

2) $r \in (R_c, R_0z)$, где, в зависимости от знака магнитострикции компоненты $\sigma_{rr}(r)$ (положительная) и $\sigma_{\theta\theta}(r)$ (отрицательная) приводят к появлению радиальной либо тангенциальной магнитной анизотропии, то есть возникают оси трудного намагничивания радиальная или тангенциальная соответственно;

3) $r \in (R_0z, R_m)$, где две отрицательные компоненты $\sigma_{zz}(r)$ и $\sigma_{\theta\theta}(r)$ дают две оси трудного намагничивания вдоль оси провода и в направлении вращения; а также положительная компонента $\sigma_{rr}(r)$ в совокупности с магнитострикцией дает третью ось легкого намагничивания вдоль радиуса.

Магнитная анизотропия, а в случае аморфного материала это магнитоупругая анизотропия, формирует неоднородную магнитную структуру жилы микропровода, которая и определяет его магнитные свойства.

Очевидно, что при изменении структуры при нагреве изменяются их свойства. В большей степени это относится к магнитным и механическим свойствам, а поскольку большинство из них являются структурно - чувствительными. В магнитомягких аморфных ферромагнетиках, где остаточные напряжения формируют магнитную анизотропию, и являются стопорами при движении границ доменов, то правильно подобранный режим термической обработки позволяет улучшить их магнитные свойства.

Так наблюдается снижение остаточной намагниченности, коэрцитивной силы H_c и др. Для улучшения свойств магнитомягких сплавов обычно применяют изотермический отжиг либо отжиг в постоянном магнитном поле. При обычном отжиге ниже температуры кристаллизации (характерной для каждого состава сплава) значительно уменьшается магнитная анизотропия и закрепление границ доменов. При этом не для всех аморфных сплавов этот способ является эффективным. Отжиг в магнитном поле дает возможность оказывать влияние на характер магнитной анизотропии в направлении прикладываемого постоянного магнитного поля. Такой метод является эффективным для сплавов с одноосной магнитной анизотропией. А отжиг как в магнитомягких, так и в магнито жестких материалах приближает форму петли гистерезиса к прямоугольной [73].

В настоящее время интерес для многих ученых представляют нанокристаллические ферромагнитные сплавы, которые в ряде случаев проявляют новые свойства. Одним из способов их получения является термообработка аморфных сплавов, но приводящая лишь к частичной их кристаллизации [78-80].

В ферромагнитных сплавах аморфных микропроводов также удается с помощью термообработки влиять на их магнитные свойства. А если рассматривать вариант бистабильных микропроводов то в некоторых случаях может быть уменьшена коэрцитивная сила или уменьшена критическая длина, на которой сохраняется бистабильность, [81-83].

2.4.2 Влияние механических напряжений на магнитную структуру аморфного микропровода

Магнитная структура аморфных микропроводов может быть модифицирована с помощью внешних или внутренних механических напряжений, а также под действием внешних магнитных полей и высокой температуры. Эта особенность имеет большое практическое значение как для увеличения чувствительности магнитоимпеданса по отношению к другим внешним воздействиям, так и для разработки точных высокочувствительных сенсоров магнитных полей.

Источник внутренних напряжений связан с различием коэффициентов теплового расширения стекла и металла, процессами затвердевания, которые сильно зависят от соотношения диаметра металла и толщины стеклянной оболочки. Дополнительные внутренние напряжения также могут образоваться в результате различных тепловых или механических обработок. Внутренние напряжения могут изменяться в пределах 100-1000 МПа, при этом предел эластичности соответствует 2-2.5 GPa. Как правило, осевые растягивающие напряжения преобладают. Тогда для сплавов с положительной магнитострикцией на основе железа характерны прямоугольные петли гистерезиса, а для сплавов с отрицательной магнитострикцией (на основе кобальта) характерны наклонные петли.

В общем случае ситуация оказывается более сложной, так как константа магнитострикции также может зависеть от напряжений. В случае положительной магнитострикции воздействие растягивающих напряжений уменьшает ее значение, при этом может даже произойти смена знака. Экспериментально было найдено, что в аморфных лентах с почти нулевой магнитострикцией справедливо соотношение (2.15).

$$\lambda(\sigma_a) = \lambda(0) - B\sigma_a \quad (2.15)$$

где σ_a -осевое напряжение. Параметр $B = 10^{-10} \text{MPa}^{-1}$.

Если $\lambda(0)$ оказывается порядка 10^{-7} , то внутренние напряжения порядка GPa могут изменить знак магнитострикции и, соответственно, характер кривых намагничивания. Такие напряжения могут быть индуцированы в процессе затвердевания в результате значительной разницы коэффициентов теплового расширения.

Для некоторых технических приложений требуется изменение магнитной анизотропии и магнитной структуры при сохранении знака магнитострикции. Например, существование анизотропии близкой к осевой в проводах с отрицательной магнитострикцией значительно увеличивает чувствительность импеданса к растягивающим напряжениям на высоких частотах. Такая анизотропия, которую часто называют «обратной», может быть наведена с помощью специального отжига в присутствии напряжений. При этом влияние растягивающих внешних напряжений может значительно уменьшить остаточную намагниченность, то есть анизотропия может стать близкой к циркулярной. Это возможно только, если знак магнитострикции остается отрицательным. Таким образом, магнитная структура провода оказывается очень чувствительной к внешним механическим воздействиям, что необходимо учитывать при разработке высокочувствительных магнитных сенсоров.

2.4.3. Термомагнитная обработка

Существование геликоидальной анизотропии является негативным фактором при построении магнитоимпедансных сенсоров, поскольку геликоидальность вносит асимметрию показаний датчика в полях с противоположенными направлениями. Для получения датчика с симметричной характеристикой чувствительности МИ проводник должен обладать циркулярной анизотропией. Как было отмечено ранее геликоидальная анизотропия может появиться в МИ проводнике вследствие механических воздействий на него, например, в процессе сборки датчика [84]. А значит появляется необходимость в методах компенсации наведенной механическими напряжениями геликоидальности уже в собранном сенсоре или в его чувствительном элементе. Существует два основных метода: термомагнитная обработка и термомеханическая обработка. Термомагнитная обработка является наиболее удобной, поскольку, она не требует изменений в конструкции сенсора и может проводиться на уже собранном сенсоре или на его чувствительном элементе [85].

Термомагнитная обработка заключается в нагревании ЧЭ до определенной температуры в присутствии внешнего магнитного поля, как показано на рисунке 2.18. Внешнее воздействующее магнитное поле должно быть направлено навстречу продольной геликоидальной составляющей, а величина поля зависит от величины продольной

геликоидальной составляющей МИ проводника. На рисунке 2.19 показан примененный термомагнитный профиль.

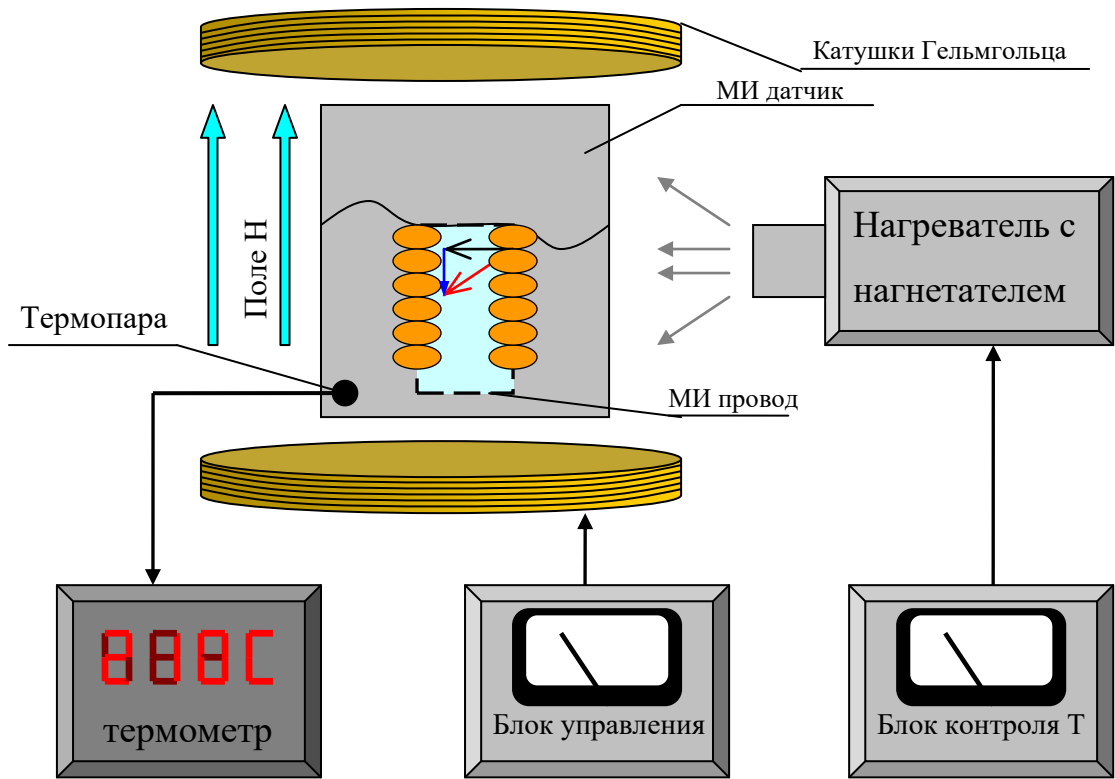


Рисунок 2.18 – Установка для термомагнитной обработки

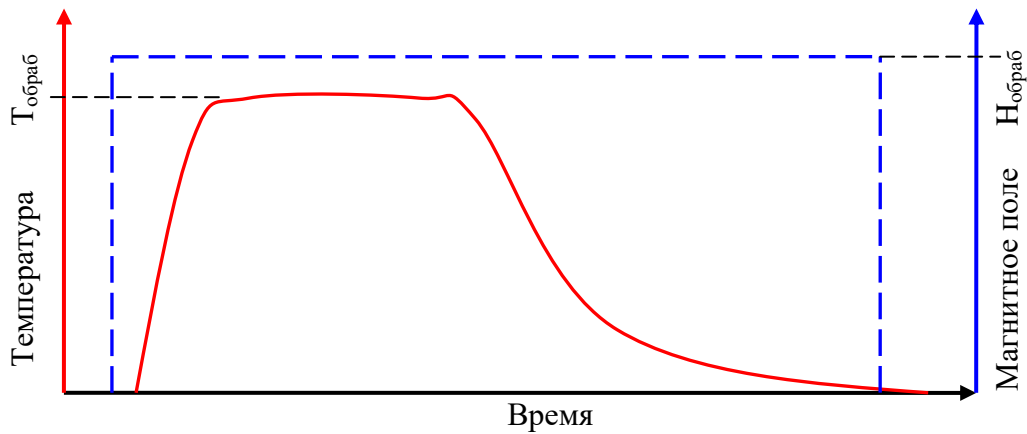


Рисунок 2.19 – Термомагнитный профиль

При осуществлении термической обработки большое значение имеет время проведения обработки, а также кратность циклов нагрева-охлаждения.

2.5 Методы построения чувствительных элементов магнитоимпедансных датчиков с применением микропроводов

Большое изменение импеданса аморфных и нанокристаллических проводников на основе соединений Fe-Co при изменении внешнего магнитного поля позволяет применять магнитоимпедансный эффект в различных датчиках магнитного поля. Чувствительные элементы датчиков, построенные на эффекте магнитного импеданса, обладают не только высокой чувствительностью, но и быстродействием, энергоэффективностью, миниатюрностью и низкой себестоимостью. Все эти факторы обуславливают большой практический интерес к разработке таких сенсоров.

Наиболее перспективным для сенсорных приложений является недиагональный импеданс, несмотря на кажущуюся сложность конструкции с использованием детектирующей катушки (по сравнению с диагональным импедансом). Это связано с тем, что недиагональный импеданс может иметь линейные характеристики вблизи нулевого поля, зависит от направления поля, позволяет оптимизировать отношение выходной сигнал/шум за счет резонанса в детектирующей схеме.

На сегодняшний день дифференциальный коэффициент преобразования магнитоимпедансных датчиков не превышает 2,0 мкВ/нТл на определенном участке ветви характеристики при подходе к максимуму изменения импеданса. У некоторых датчиков на спадающей ветви характеристики чувствительность может значительно (на один-два порядка) снижаться. Чувствительность импеданса датчика обычно зависит от его размеров, геометрии построения и рабочей частоты.

При построении датчиков на основе магнитоимпедансных чувствительных элементах в конструкциях датчиков применяют разнообразные схемы возбуждения ЧЭ, стабилизации и компенсации характеристик чувствительности. Выбор и особенности схем определяет примененный в датчике ЧЭ, его кривая чувствительности, зависимость чувствительности от температуры, необходимые параметры сигнала возбуждения и амплитуды выходного сигнала необходимо.

В некоторых случаях в работе датчиков целесообразно выводить начальную рабочую точку на середину линейного участка характеристики, для этого необходимо создать дополнительное продольное магнитное поле смещения. Когда аморфный МИ проводник выводится на участок максимального импеданса при помощи механического растягивающего напряжения, внешнее магнитное поле уменьшает импеданс на участке с отрицательной крутизной. В таком случае возврат на участок с положительной крутизной с помощью внешнего магнитного поля не удастся.

Разработка технологии изготовления чувствительного элемента. При разработке технологии изготовления и конструкции чувствительного элемента необходимо добиваться не только высоких технических показателей, таких как чувствительность, энергопотребление, линейность, но и хороших технологических (простота массового производства, большой процент выхода годных) и экономических (низкая себестоимость) показателей.

При использовании недиагонального МИ задача построения ЧЭ состоит в изготовлении детектирующей катушки вокруг МИ проводника и пропускании тока через МИ проводник, соответственно, с ним необходимо обеспечить электрический контакт. В главе 1 был проведен обзор патентов по изготовлению магнитоимпедансных ЧЭ, однако, все патенты основаны на одной технологии изготовления, в основе которой лежит приклеивание МИ проводника и напыление детектирующей катушки в два этапа. Как было отмечено ранее датчики при такой технологии изготовления обладают большой температурной нестабильностью из-за разницы температурных коэффициентов расширения используемых материалов, эту особенность необходимо учитывать при разработке новой технологии изготовления.

2.5.1 Каркасная технология изготовления

Данная конструкция ЧЭ собиралась на керамической или текстолитовой подложке размера 1206 (3,2x1,6x0,5мм). Со стороны установки МИ проводника подложка имеет токопроводящие проводники и контактные площадки из немагнитного материала (электротехническая медь). Сверху на подложку припаиваются или приклеиваются электропроводным клеем края МИ проводника. А поверх подложки с МИ проводником наматывается медный провод ПЭВ-1 сечением 40-60мкм в лаковой изоляции в количестве порядка 40 витков. Далее закрепляются или припаиваются выводы катушки и вся конструкция заливается эластичным компаундом. Для правильной и наиболее точной работы датчика необходимо располагать отрезок МИ проводника максимально параллельно подложке, а измерительную катушку наматывать строго перпендикулярно относительно МИ проводника, намотку вести виток к витку. Точность позиционирования МИ проводника и катушки прямо пропорционально влияют на точность измерения полученного датчика. Для выявления наиболее оптимальной технологии изготовления было собрано несколько ЧЭ различными способами: 1) припаиванием МИ проводника при температуре 300°C припоем ПОС-61; 2) припаиванием МИ проводника при температуре 100°C сплавом Розе; 3) приклеиванием МИ проводника электропроводным

клеем. Измеренные характеристики данных датчиков чувствительность, предел измерительной шкалы приведены в главе 3.

Для расширения диапазона измерения в данную конструкцию был добавлен ещё один МИ-проводник, включенный параллельно первому (рис. 2.20). При таком включении было замечено, что существует зависимость чувствительности от расстояния между МИ проводниками.

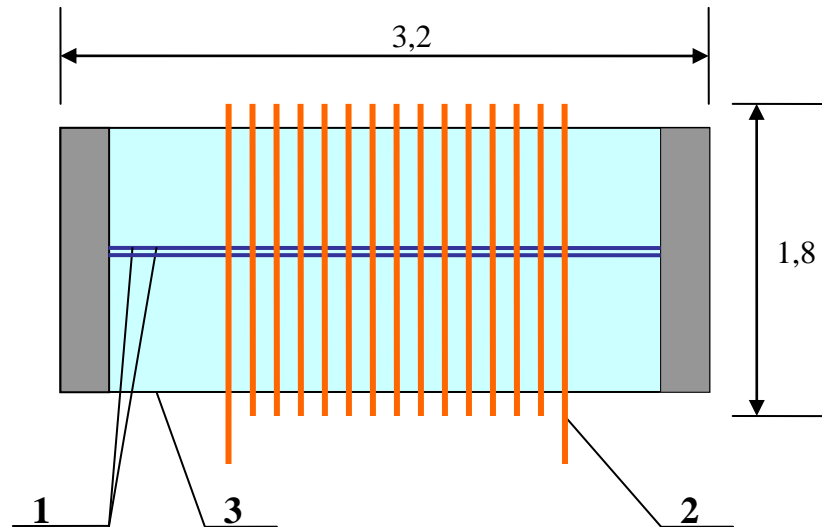


Рисунок 2.20 – Конструкция двухпроводного датчика на подложке

Данный эффект является основным недостатком описанной разработки, поскольку крайне сложно обеспечить точность их установки на уровне нескольких микрометров. В результате затрудняется промышленный выпуск датчиков с идентичными параметрами чувствительности и линейности.

Компенсация указанного недостатка достигается следующим образом. Была предложена конструкция ЧЭ с двумя или несколькими МИ проводниками, склеенными между собой на этапе их производства. МИ проводники соединяются параллельно друг другу клеем типа марки БФ на одном из технологических этапов их производства, таким образом достигается строго фиксированное расстояние между проводниками, не превышающее 5 мкм. Клей БФ по механическим свойствам эластичный, следовательно, не создает дополнительных механических напряжений в МИ проводниках. Исследованные зависимости выходного сигнала сенсора от расстояния между МИ проводниками приведены в главе 3 и подтверждают преимущества предложенной конструкции сенсорного элемента.

Другой вариант конструкции много-проводниковых МИ элементов, полученный путем перекрещивания МИ проводников под минимальным углом изображен на рисунке 2.21. Перекрещивание МИ проводников обеспечивает как повторяемость характеристик от датчика к датчику, так и увеличение чувствительности и амплитуды сигнала за счет уменьшения расстояния между МИ проводниками и его фиксацию в рабочей области магниточувствительного элемента. Фото ЧЭ собранного по данной технологии показано на рис.2.22.

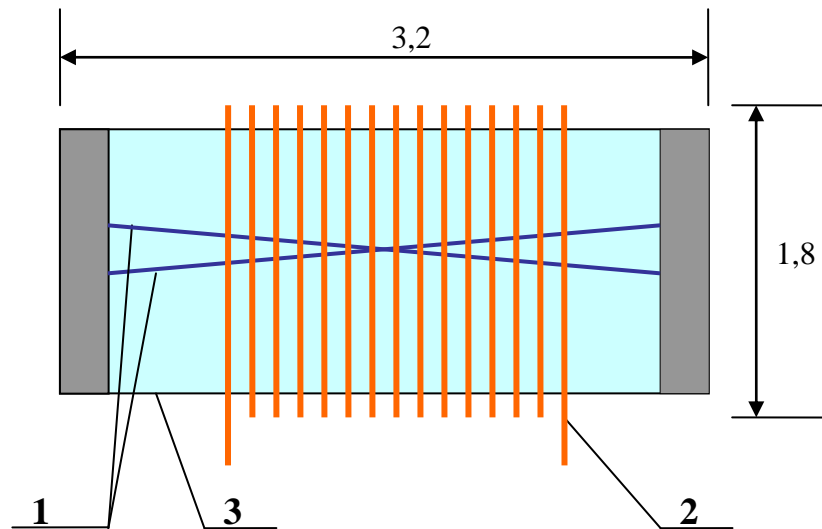


Рисунок 2.21 – Конструкция двухпроводного датчика с перекрещенными МИ проводниками

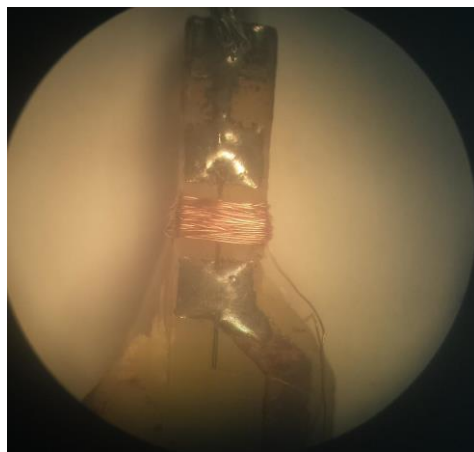


Рисунок 2.23 – Фотография ЧЭ на подложке, сделанная под микроскопом

2.5.2 Технология изготовления ЧЭ на микро каркасе

Для уменьшения размеров, увеличения чувствительности и расширения диапазона измерительной шкалы ЧЭ первая конструкция была видоизменена и доработана ниже описанным способом (рисунок 2.24).

Сборка ЧЭ начинается с намотки детектирующей катушки на специальном каркасе диаметром 250 мкм. Намотка ведется виток к витку проводом ПЭВ-1 диаметром 40 мкм, наматывается 40 витков в один слой, катушка фиксируется клеем БФ. Далее каркас удаляется и в катушку помещается подготовленный отрезок (с очищенными от стекла краями) МИ проводника, следом заготовка распаивается на подложке. После чего происходит выравнивание и подклейка детектирующей катушки к подложке клеем марки БФ. Выравнивание детектирующей катушки это один из важнейших этапов сборки, от точности выравнивания будет зависеть точность работы ЧЭ и его характеристика чувствительности. Фото ЧЭ собранного по данной технологии показано на рис.2.25.

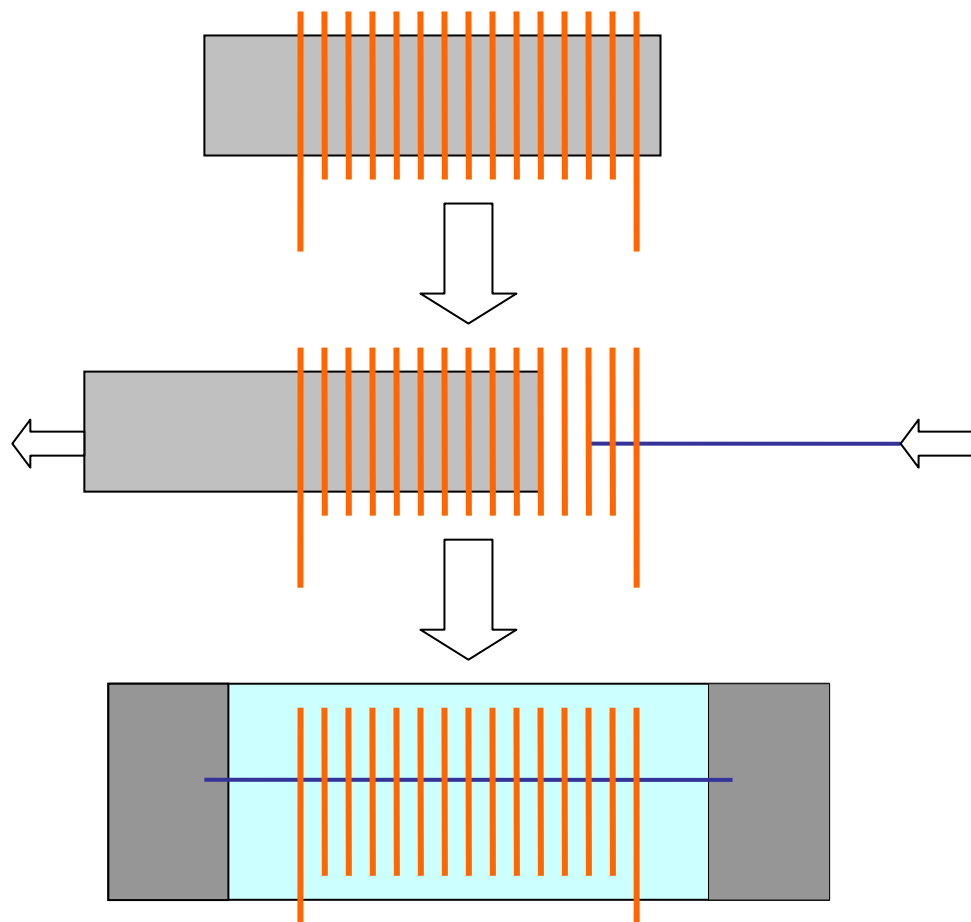


Рисунок 2.24 – Поэтапная сборка ЧЭ на микро каркасе

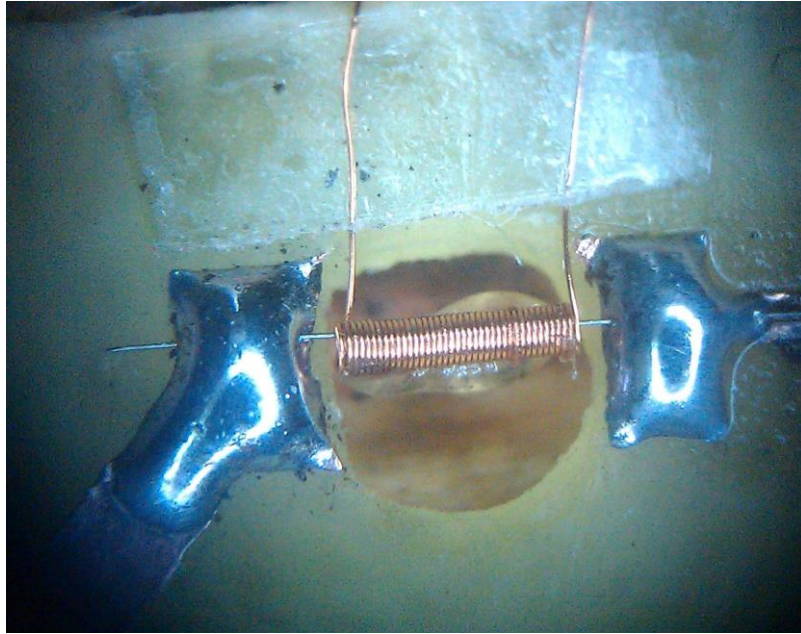


Рисунок 2.25 – Фотография ЧЭ на микро каркасе, сделанная под микроскопом

Недостатком вышеописанной конструкции является сложность точного позиционирования детектирующей катушки, а значит, затрудняется промышленное производство таких ЧЭ, при этом снижается и точность измерений ЧЭ. Данный недостаток можно исключить переходом к бескаркасной конструкции ЧЭ датчика.

2.5.3 Бескаркасная технология ЧЭ.

Бескаркасная технология ЧЭ лишена недостатков, имеющих в конструкции на микро каркасе, и обладает минимальными габаритами среди рассмотренных конструкций. По своей сути она является очередной модификацией описанной выше конструкции.

Бескаркасная конструкция собирается следующим образом. Детектирующая катушка наматывается непосредственно на МИ-проводник при помощи специальной намоточной установки. В установку на держателях закрепляется отрезок МИ-проводника, заправляется барабан обмоточным проводом, настраивается величина усилия, с которым ведется намотка. Фото установки показано на рисунке 2.26. Намотка ведется виток к витку проводом ПЭВ-1 диаметром 40 мкм с минимальным натяжением провода, обеспечивающим плотное прилегание детектирующей катушки к МИ проводнику. После осуществления намотки края МИ проводника зачищаются и данная конструкция устанавливается на подложку.

Представленная установка (показанная на рисунке 2.26) была разработана и собрана на кафедре специально для изготовления бескаркасных магнитоимпедансных ЧЭ.

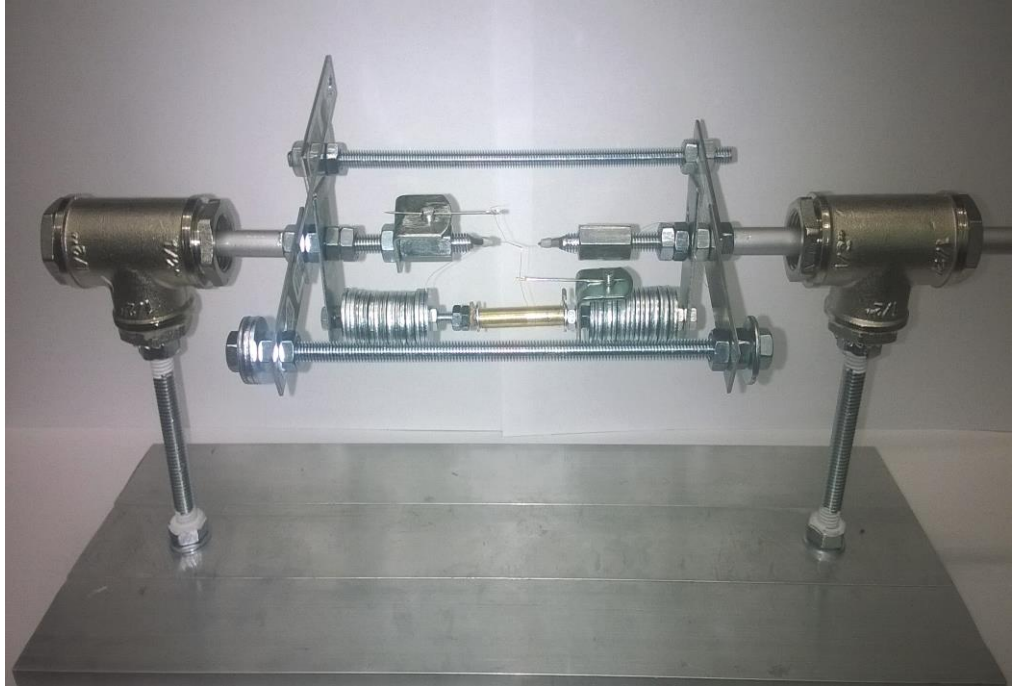


Рисунок 2.26 – фотография намоточной установки.

При таком процессе сборки очень важно настроить натяжение обмоточного провода так, чтобы в процессе сборки стекло, покрывающее МИ проводник, не получило повреждений, а все витки имели одинаковый радиус и плотно прилегали к МИ проводнику. При этом скорость намотки не должна превышать 0,5 витков/с. На рисунке 2.27 представлено фото бескаркасного ЧЭ.

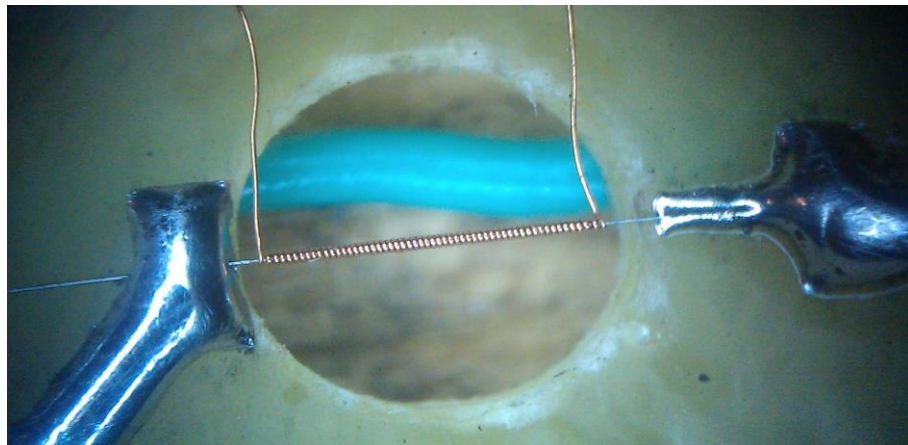


Рисунок 2.27 - фотография датчика, сделанная под микроскопом.

Для расширения пределов измерительной шкалы и увеличения чувствительности последняя конструкция может быть дополнена вторым МИ проводником. В таком случае перекрещивание или предварительное склеивание МИ проводников не требуется.

Наматываемая детектирующая катушка сама обеспечит минимальный зазор между проводниками.

Было замечено, что намотка детектирующей катушки вызывает повреждение стеклянной оболочки микропровода даже при минимальном натяжении медного проводника. Повреждения возникают при физическом соприкосновении проводников. Для снижения величины повреждений оболочки МИ проводника перед намоткой катушки на его поверхность наносится тонкий слой ($\approx 5\text{ мкм}$) защитной маски, которая исключает возникновение трения между проводниками. Защитная маска сделана на полиуретановой основе, обладает высокой эластичностью, не обладает магнитными свойствами и электропроводностью. Сушка маски проводится под ИК нагревателем при температуре $+40\dots+60\text{ С}$. Схематическое изображение ЧЭ с маской показано на рисунке 2.28.

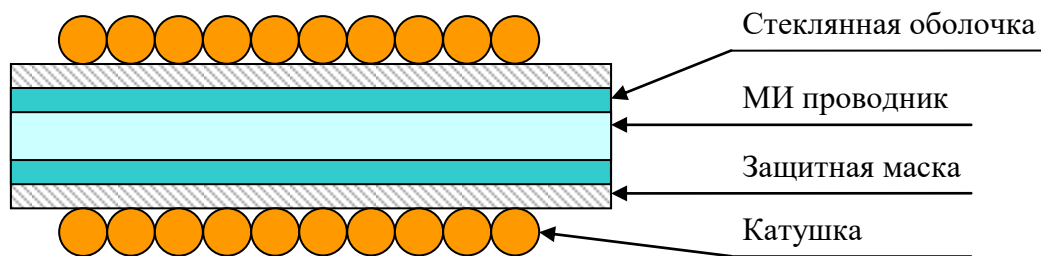


Рисунок 2.28 – МИ проводник с маской и катушкой

2.6 Выводы по главе

В данной главе были рассмотрены методы измерения статических магнитных свойств, тензора импеданса при воздействии внешнего магнитного поля и температуры, технология модификации магнитных свойств ферромагнитных микропроводов. Также были рассмотрены принципы и методы построения чувствительных элементов МИ датчиков, были разработаны оригинальные стенды и программное обеспечение для проведения измерений.

Для построения петли гистерезиса ферромагнитных микропроводов был использован индукционный метод. После модификации измерительной установки, удалось осуществить измерения зависимости намагниченности от внешнего поля для коротких микропроводов. Измерение тензора магнитного импеданса осуществлялось при помощи векторного анализатора цепей и вспомогательного оборудования. Так же был разработан и изготовлен специальный магнитокомпенсационный измерительный стенд, который позволяет определять основные параметры чувствительного элемента, такие как

резонансная частота детектирующего контура ЧЭ, и проводить температурные испытания как в отсутствии так и в присутствии внешних магнитных полей. Были рассмотрены теоретические данные о влиянии механических напряжений, термомеханической и термомагнитной обработки на свойства аморфных микропроводов. Также были освещены разные методы построения чувствительных элементов магнитоимпедансных датчиков с применением микропроводов, для изготовления ЧЭ было разработано специализированное оборудование.

ГЛАВА 3 Оптимизация магнитоимпедансных характеристик с помощью внешних полей смещения, частоты возбуждения и термомагнитной обработки

3.1 Результаты измерения статических магнитных свойств микропроводов

Магнитоимпедансные характеристики в значительной степени определяются статической магнитной структурой, информация о которой может быть получена из кривых намагничивания. В главе 2 рассмотрены принципы измерения кривых намагничивания. Для магнитомягких материалов наиболее подходит индуктивный метод измерений. Кривые намагничивания для микропровода с составом: $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$ и диаметром жилы 40 мкм приведены на рисунке 3.1.

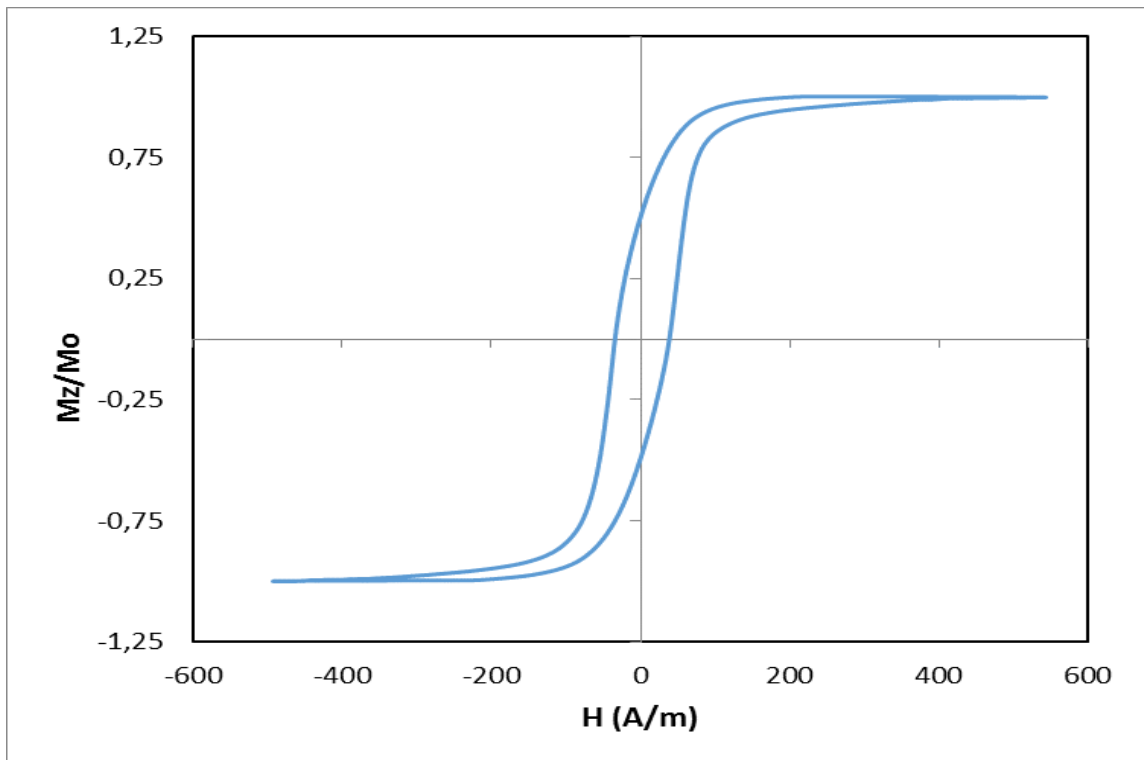


Рисунок 3.1 – Кривые намагничивания для магнитомягкого микропровода состава $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$ и диаметром жилы 40 мкм.

Так как индукционный измерительный стенд не оказывает собственных механических воздействий на измеряемый образец, то этот метод измерения весьма удобен при исследовании влияния внешних механических напряжений на магнитное состояние провода.

В главе 2 отмечалось, что воздействие внешних растягивающих напряжений может уменьшить остаточную намагниченность в проводе с отрицательной магнитострикцией,

так как такая нагрузка усиливает циркулярную анизотропию в случае отрицательной магнитострикции. Следовательно, магнитная структура провода с отрицательной магнитострикцией оказывается весьма чувствительной к внешним механическим воздействиям, что необходимо учитывать при разработке высокочувствительных магнитных сенсоров. Это продемонстрировано на рисунке 3.2, где представлена петля магнитного гистерезиса для того же микропровода, но с приложенным растягивающим напряжением 390 МПа. Как видно, остаточная намагничённость уменьшилась с 50% до 20% (по отношению к намагничённости насыщения), но эффективная анизотропия увеличилась с 120 А/м до 500 А/м.

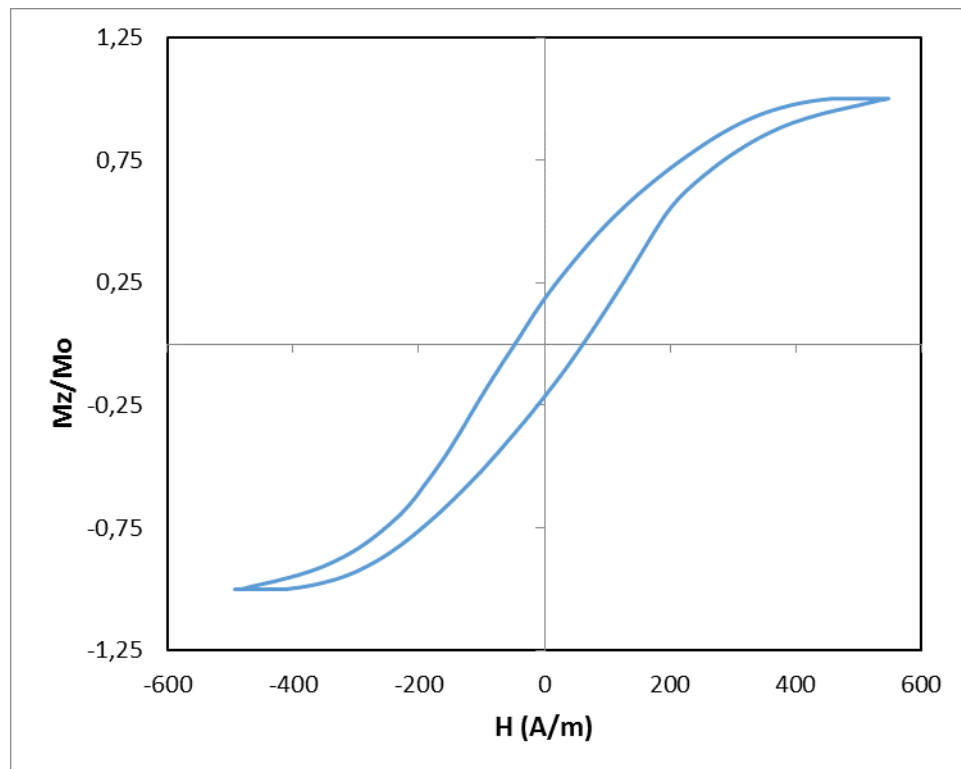


Рисунок 3.2 – Кривая намагничивания для микропровода с составом: $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм и с приложенным растягивающим напряжением 390 МПа

Классическим методом изучения магнитных свойств является магнитный анализ при помощи вибромагнитометра. Принцип работы вибромагнитометра рассмотрен в главе 2. Результаты измерения микропровода с составом: $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$ и диаметром жилы 40 мкм при помощи вибромагнетометра приведены на рисунке 3.3. Форма кривой практически идентична полученной индукционным методом.

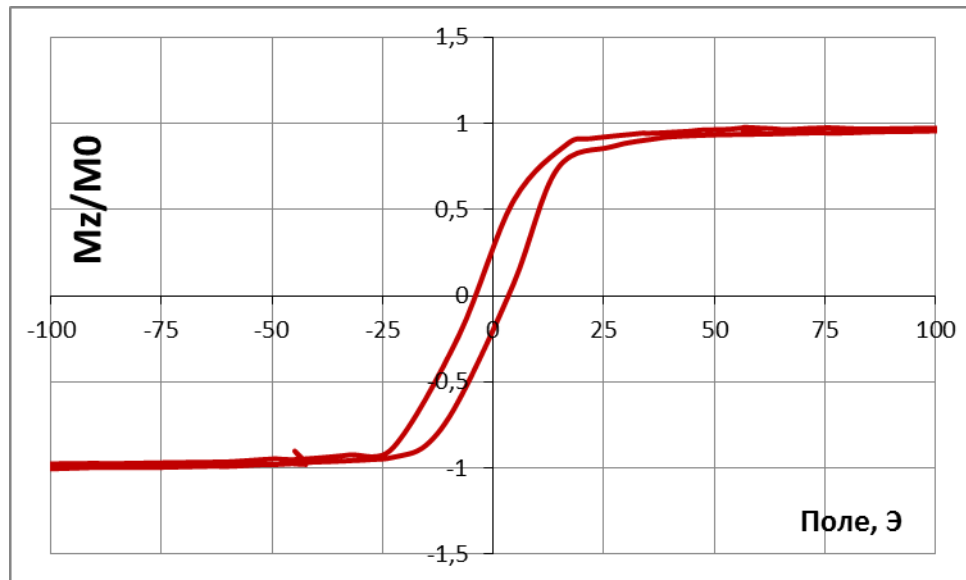


Рисунок 3.3 – Кривая намагничивания для микропровода с составом: $Co_{66,94} Fe_{3,83} Ni_{1,44} B_{11,57} Si_{14,59} Mo_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, измеренная методом вибрационного магнетометра

3.2 Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе и влияние постоянного тока

Для наших целей, основным параметром микропровода является его магнитоимпедансная характеристика. Диагональный импеданс измерялся с помощью векторного анализатора цепей, как описано в главе 2. Он позволяет исследовать электродинамические характеристики провода в строго линейном режиме, что дает информацию о влиянии статической магнитной структуры. Результаты измерений диагонального магнитного импеданса при различных постоянных токах, создающих круговое магнитное поле смещения, приведены на рисунках 3.4 - 3.7. Измерения проводились на микропроводе состава $Co_{66,94} Fe_{3,83} Ni_{1,44} B_{11,57} Si_{14,59} Mo_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, на частоте 30МГц.

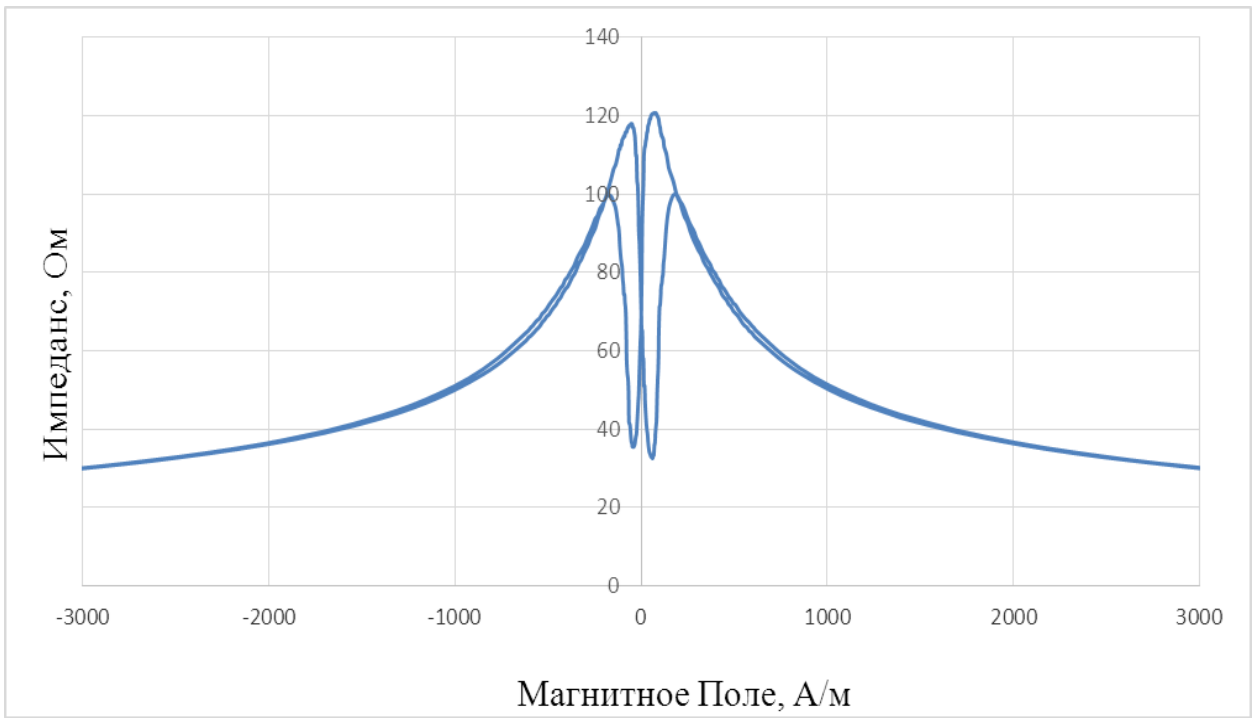


Рисунок 3.4 – Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе состава: $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, на частоте 30 МГц при отсутствии постоянного тока

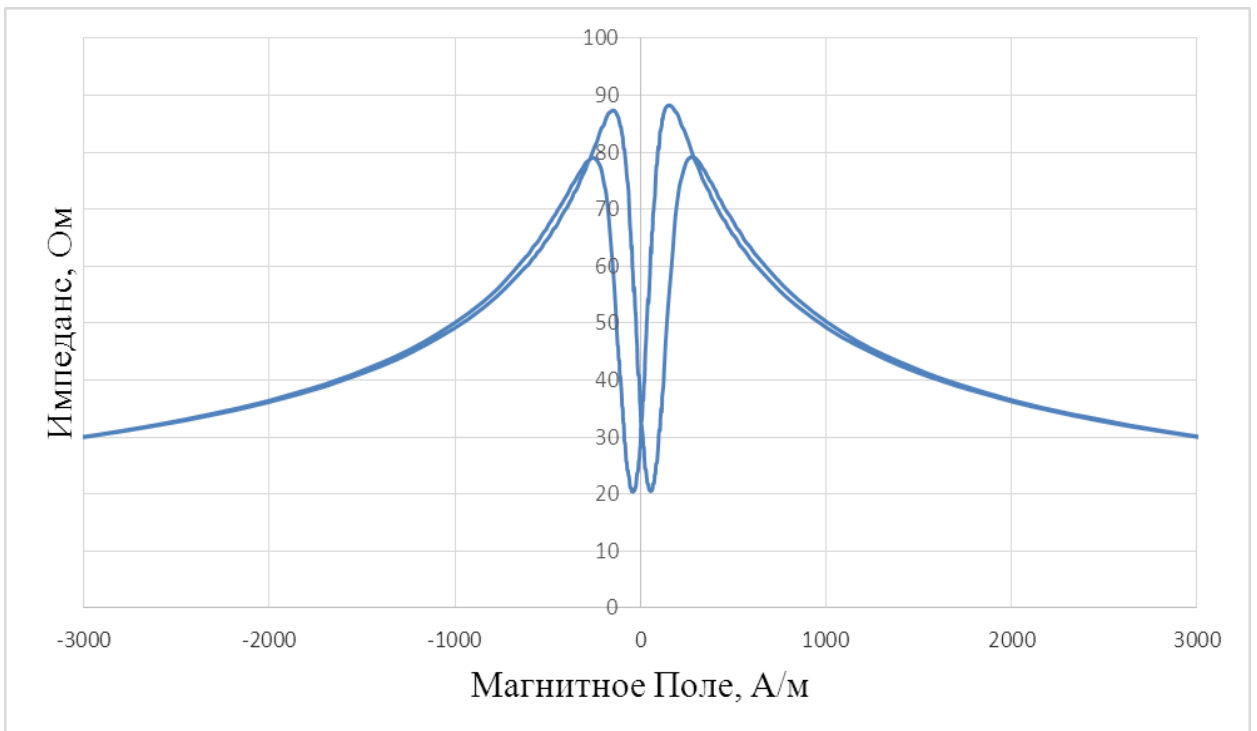


Рисунок 3.5 – Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе состава: $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, на частоте 30 МГц при воздействии постоянного тока 5 мА

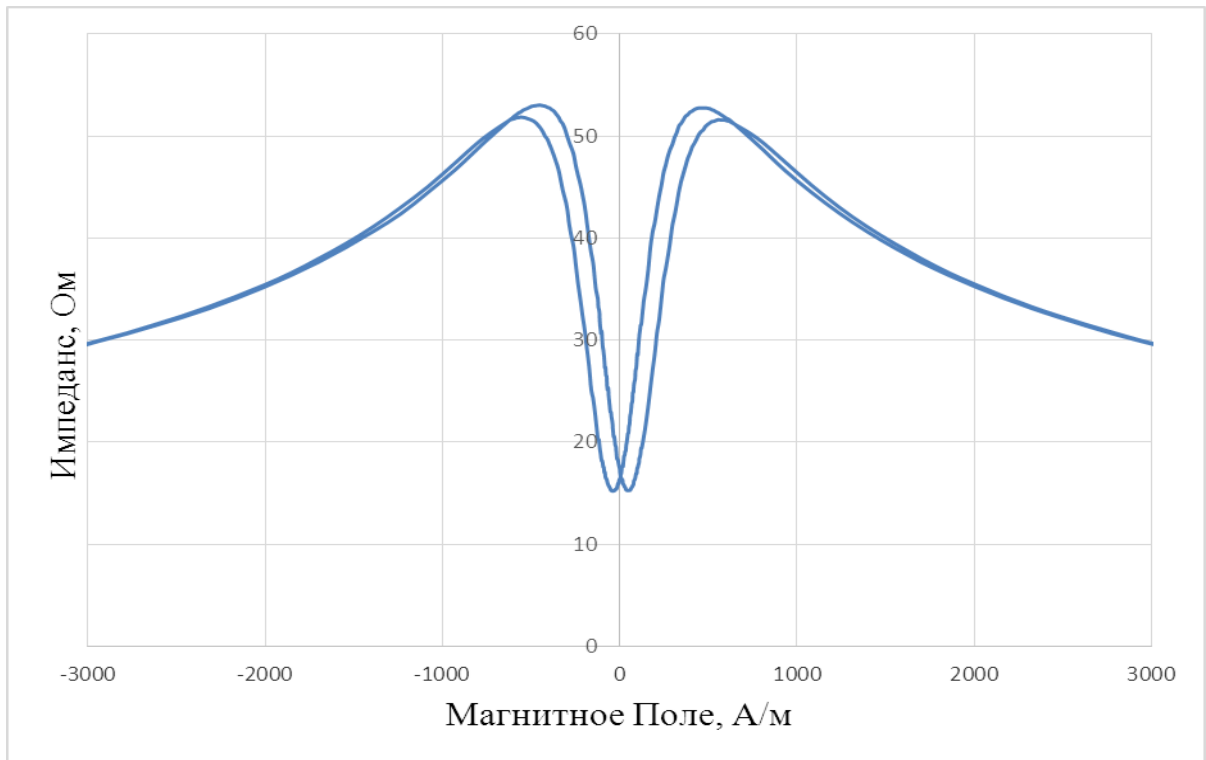


Рисунок 3.6 – Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе состава: $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, на частоте 30МГц при воздействии постоянного тока 25 мА

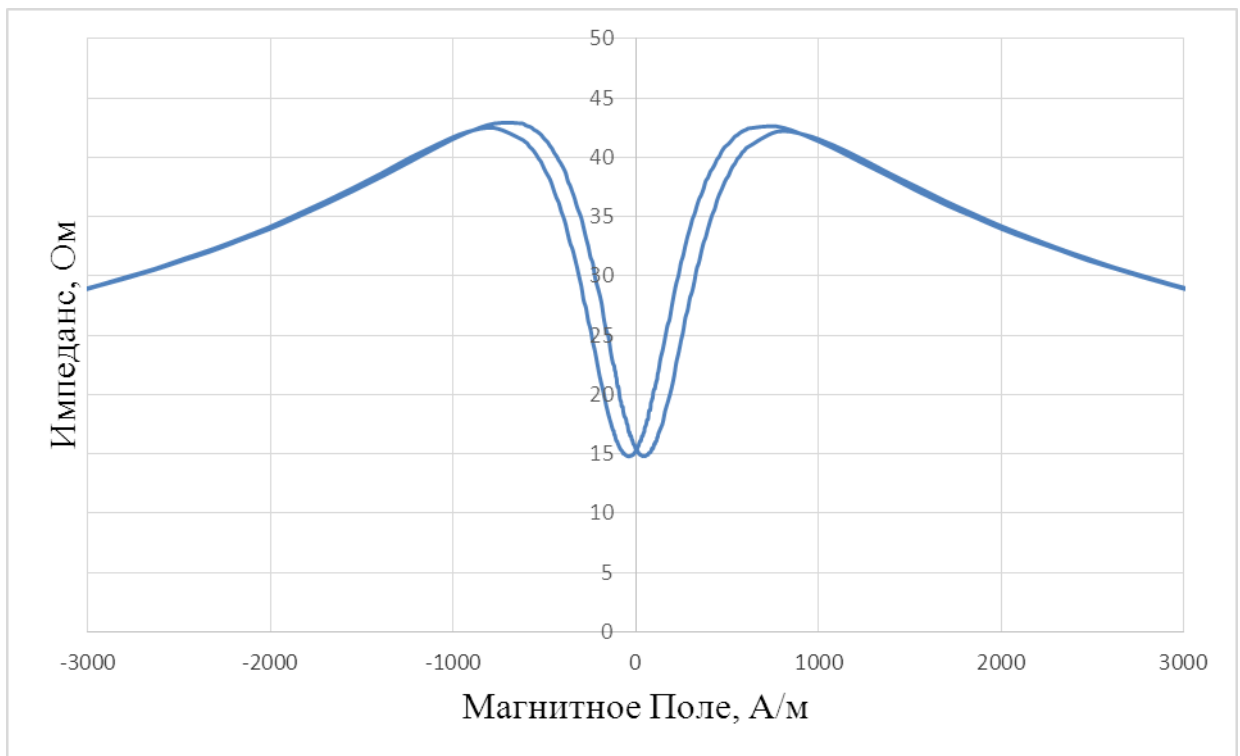


Рисунок 3.7 – Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе состава: $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, на частоте 30МГц при воздействии постоянного тока 45 мА

Приведенные исследования (Рисунки 3.4-3.7) показывают, что воздействие постоянного тока приводит к существенному уменьшению гистерезиса, что должно быть связано с практическим устранением доменной структуры. Также, минимум импеданса в нулевом поле уменьшается, так как смещение доменных границ не дает вклада в циркулярную магнитную проницаемость. Максимум импеданса приходится на более высокие поля, так как круговое магнитное поле увеличивает жесткость в циркулярном направлении, и чувствительность может уменьшаться.

3.3 Влияние полей смещения и сигнала возбуждения на полевую характеристику недиагонального импеданса в сенсорной конфигурации

Разрабатываемые сенсоры основаны на недиагональной компоненте импеданса-провод возбуждается высокочастотным током, а сигнал напряжения снимается с катушки. Для получения максимальной эффективности работы сенсора необходимо правильно определить оптимальные режимы возбуждения с учетом детектирующей системы. В этом смысле микропровод с катушкой рассматривается как единый чувствительный элемент (ЧЭ). Микропровод может быть размещен на подложке, тогда детектирующая катушка наматывается на подложку. Для изучения влияния различных режимов возбуждения ЧЭ на выходной сигнал напряжения (недиагональный импеданс) был проведен ряд экспериментов, в которых изменялись частоты возбуждения, амплитуды переменного тока и постоянный ток смещения [86].

ЧЭ помещался в магнитокомпенсационный стенд, его возбуждение осуществлялось от импульсного генератора через регулируемый ограничитель тока. Выходной сигнал ЧЭ контролировался на осциллографе (см. Главу 2). Было отобрано 5 образцов на подложке и 5 бескаркасных образцов ЧЭ. Использовался провод с составом: $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{V}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$, диаметром жилы 40 мкм, общим диаметром 44 микрона и длиной 3 мм. Для образцов на каркасе (подложке) детектирующая катушки содержат 40 витков с сечением каркаса 1,6x0,6 мм, а катушки бескаркасных образцов содержат 50-65 витков с сечением катушки 40 мкм. Такая геометрия, как будет показано далее, обеспечивает соответствие резонансной частоты детектирующей схемы и чувствительности импеданса провода.

Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) датчика показал, что LC-резонанс сенсорного элемента указанных размеров, собранного на подложке, наблюдается на частоте около 8 МГц. Как видно из рисунка 3.8, при синусоидальном или импульсном возбуждении этой частоте соответствует наибольшее значение выходного сигнала напряжения. Заметим, что имеется еще один резонанс, обладающий вдвое меньшим

значением пикового уровня сигнала, он соответствует младшей гармонике на частоте 4 МГц [87].

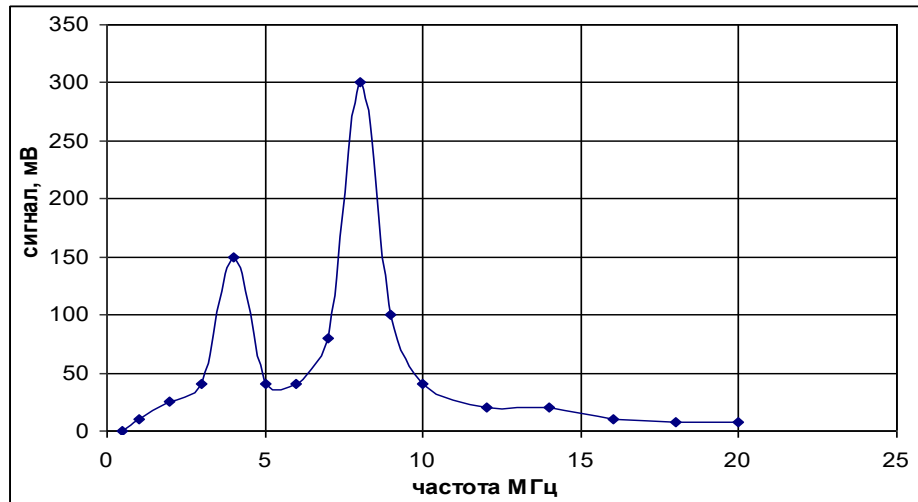


Рисунок 3.8 – Амплитудно-частотная характеристика выходного сигнала ЧЭ на подложке (40 витков) во внешнем поле напряженностью 1,5 Э в отсутствие постоянной составляющей тока смещения

АЧХ также снималось с бескаркасной конструкции ЧЭ. Поскольку радиус катушки детектирующей катушки бескаркасного ЧЭ составляет всего 10-40 мкм, то есть значительно меньше в сравнении с конструкцией на подложке, соответствующий LC-резонанс проявляется на более высоких частотах при том же числе витков. При необходимости частоту резонанса можно уменьшить путем увеличения числа витков. На рисунках 3.9 и 3.10 показаны АЧХ бескаркасного ЧЭ с 65 и 50 витками детектирующей катушки, соответственно. На них хорошо видны частоты, соответствующие резонансу, для которых наблюдается максимум сигнала. Заметим, что в некоторых случаях, как на рис. 3.9, наблюдается только один резонансный пик. При уменьшении числа витков с 65 до 50 основная резонансная частота увеличивается с 20 до 22 МГц. На рисунке 3.11 приведены осциллограммы выходного сигнала бескаркасного ЧЭ с 50 витками при пропускании переменного тока с частотой 22 МГц (а) и на 18 МГц (б). В дальнейшем, измерения будут проводиться на основных резонансных частотах.

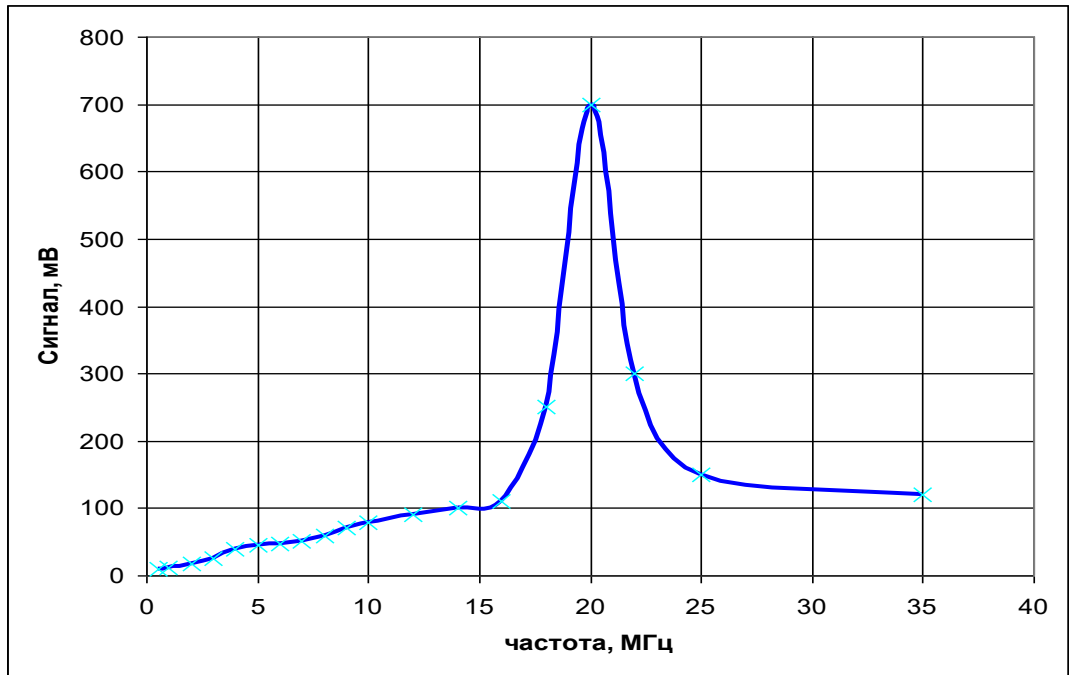


Рисунок 3.9 – Амплитудно-частотная характеристика выходного сигнала бескарасного ЧЭ с катушкой 65 витков во внешнем поле напряженностью 1,5 Э.

Постоянная составляющая тока на проводе- 7,5 мА

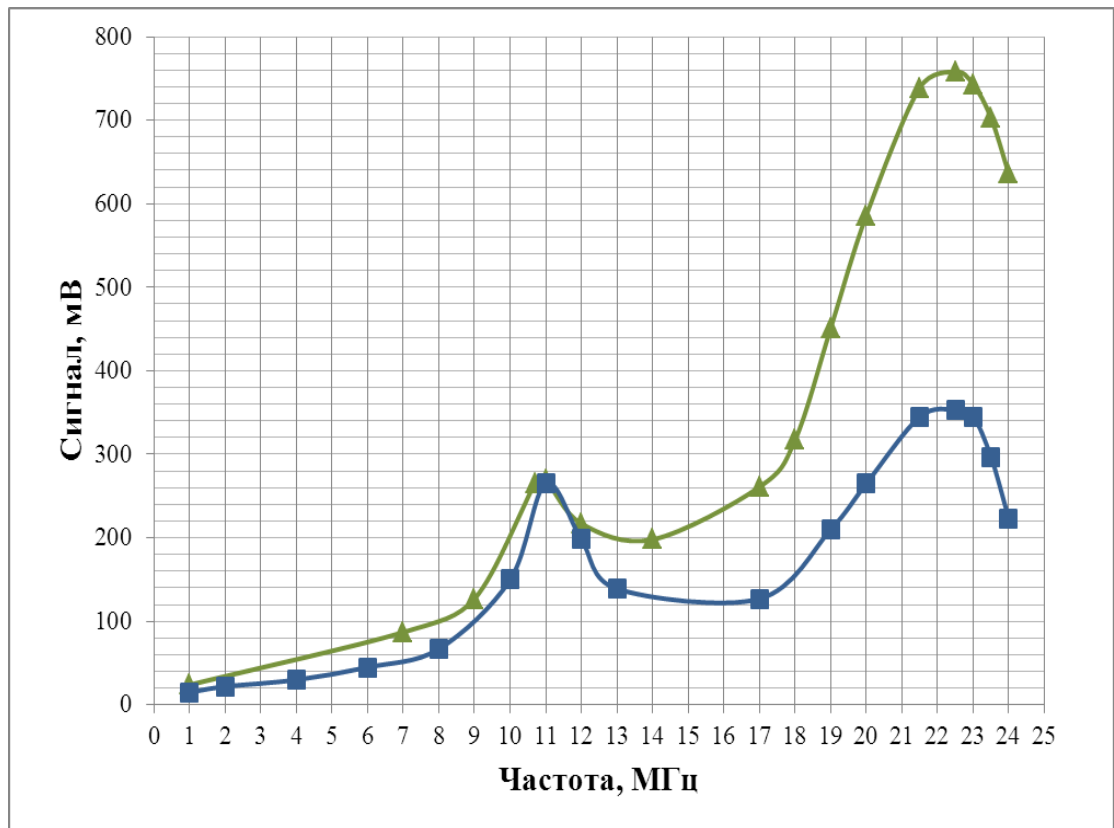


Рисунок 3.10 – Амплитудно-частотная характеристика выходного сигнала бескарасного ЧЭ с катушкой 50 витков: ▲-постоянный ток на проводе- 7.5 мА; ■- без постоянной составляющей

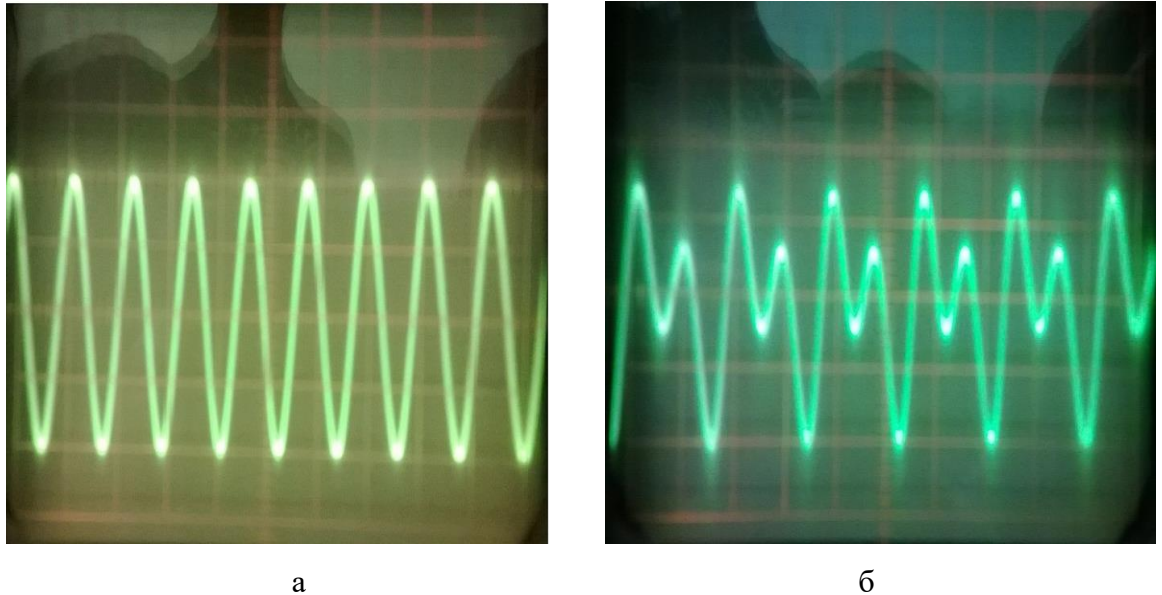


Рисунок 3.11 – Осциллограмма выходного сигнала бескаркасного ЧЭ с 50 витками в магнитном поле 1,5Т. а) на частоте резонанса 22 МГц (200мВ/кл), б) на частоте 18МГц (100мВ/кл)

Как видно из рисунка 3.10, наличие постоянного тока смещения значительно увеличивает выходное напряжение. При идеальной циркулярной доменной структуре недиагональный импеданс должен был бы обращаться в ноль в отсутствии тока смещения. Наличие достаточно большого сигнала даже при отсутствии тока смещения говорит о частичном устранении доменной структуры, что может быть обусловлено переманчиванием провода током возбуждения, амплитуда которого равняется или превышает 7.5 мА.

Полевая характеристика ЧЭ сильно зависит не только от частоты сигнала возбуждения, но и от амплитуды возбуждения. На рисунках 3.12 и 3.13 показаны полевые характеристики ЧЭ на подложке и бескаркасного ЧЭ, соответственно, в зависимости от амплитуды синусоидального сигнала возбуждения. Варьирование амплитуды тока в проводе осуществляется с помощью изменения сопротивления токового ограничения: 130 Ом- 7,5 мА («1»), 65 Ом-15 мА («2»), 43 Ом - 23 мА («3»). Частота возбуждения ЧЭ на подложке – 8МГц, бескаркасного ЧЭ – 20МГц.

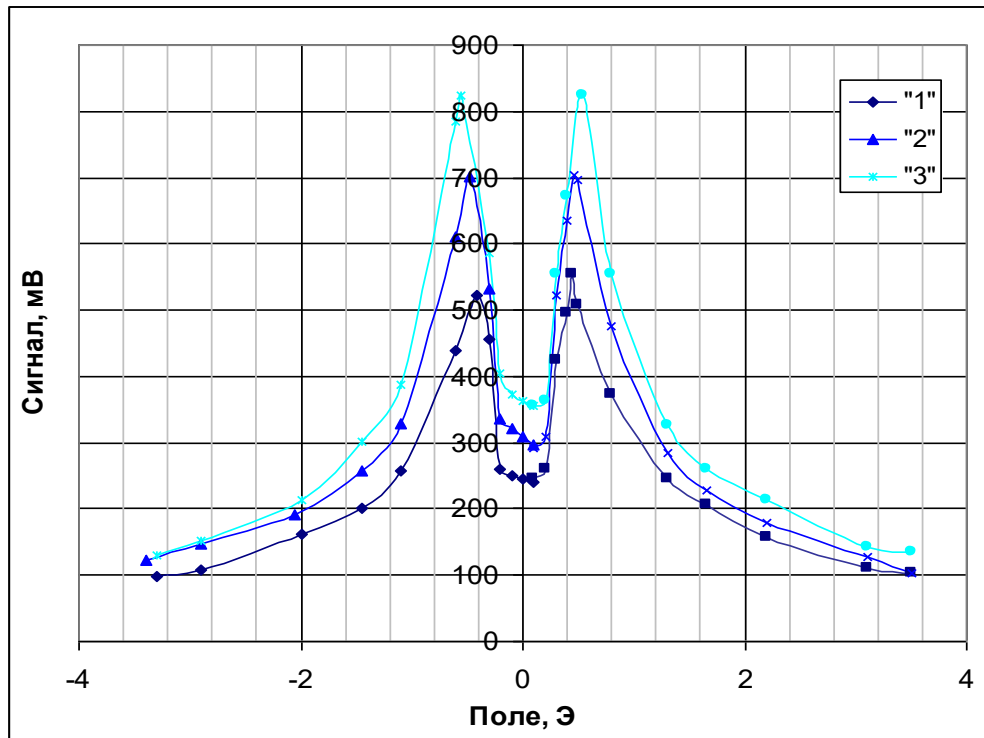


Рисунок 3.12 – Полевые характеристики ЧЭ на подложке при трех значениях амплитуды тока (1 - 7,5 мА; 2 - 15 мА; 3 - 23 мА). Частота возбуждения- 8 МГц. Постоянный ток отсутствует

Диаграммы, представленные на рисунках, демонстрируют хорошую симметрию по отношению к направлению магнитного поля. При увеличении амплитуды тока увеличивается максимум амплитуды выходного сигнала, который наблюдается также в более высоких полях. Чувствительность самого элемента почти не изменяется. Для элемента на подложке увеличивается также выходной сигнал в нулевом поле, что нежелательно для сенсорного элемента. Форма сигнала возбуждения показана на рисунке 3.14а.

При добавлении постоянной составляющей в синусоидальный сигнал возбуждения по методике, описанной в главе 2, максимум выходного сигнала соответствует большим полям, а сигнал в нулевом поле уменьшается, как показано на рис. 3.15. Здесь приведены полевые характеристики для трех различных амплитуд возбуждающего тока, причем во всех случаях постоянный ток равнялся половине амплитуды тока. Еще одной особенностью полевой характеристики при добавлении постоянной составляющей в сигнал возбуждения является расширение линейного участка области измерения [88].

Постоянный ток оказывает влияние на доменную структуры проводанамагничивает провод в циркулярном направлении, что увеличивает недиагональный импеданс, но и приводит к некоторой асимметрии, если анизотропия отличается от

циркулярной. Также, постоянный ток увеличивает магнитную жесткость. Однако при оптимальных условиях наличие постоянного тока улучшает характеристики ЧЭ.

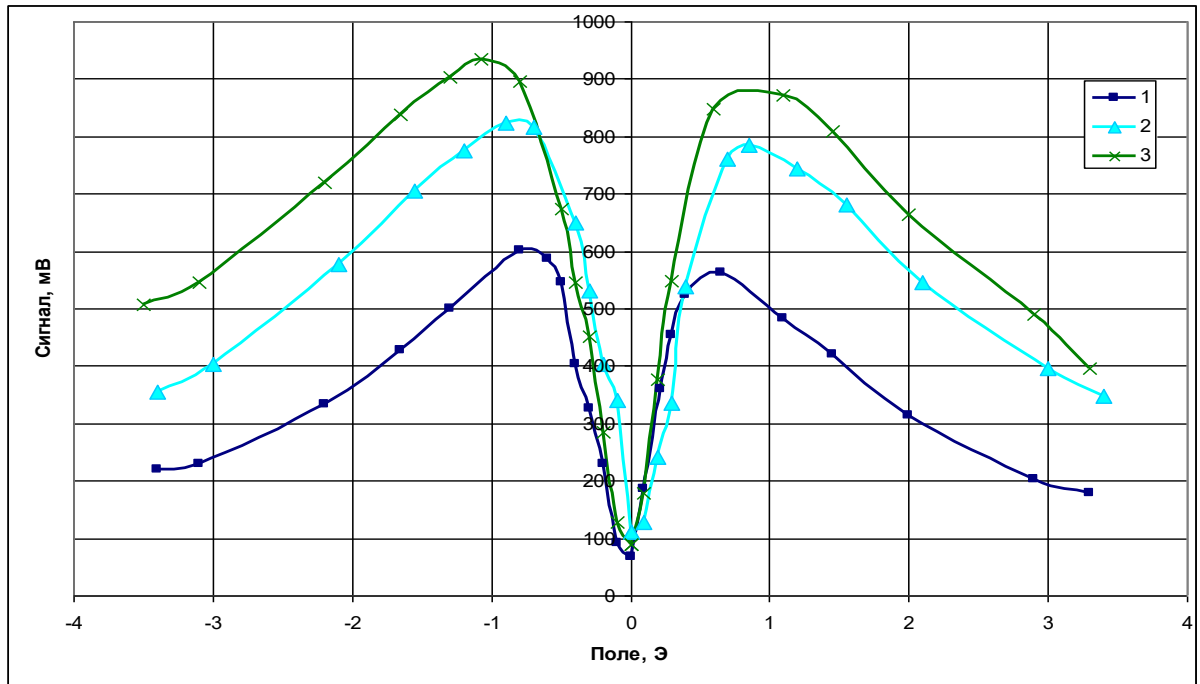
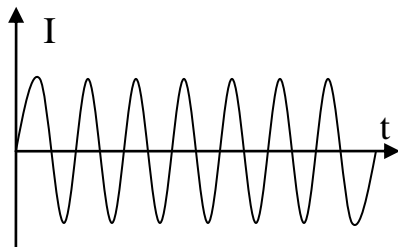
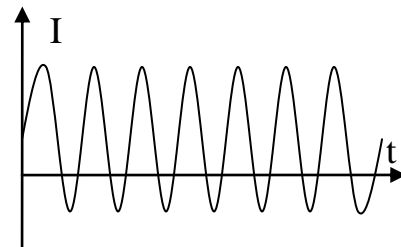


Рисунок 3.13 - Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ (65 витков) при трех значениях амплитуды тока (1 - 7,5 мА; 2 - 15 мА; 3 - 23 мА). Частота возбуждения- 20 МГц.

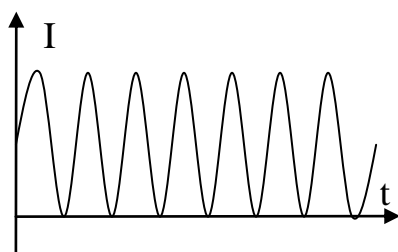
Постоянный ток отсутствует



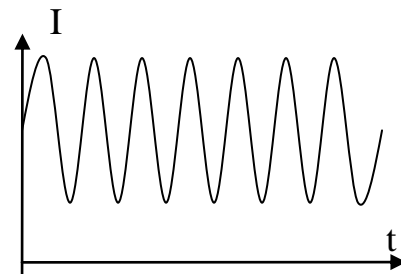
а



б



в



г

Рисунок 3.14 - Эпюры сигнала возбуждения с различной постоянной составляющей, а- без постоянной составляющей тока, б- постоянный ток 3,7 мА, в- постоянный ток 7,5 мА, г- постоянный ток 11,2 мА

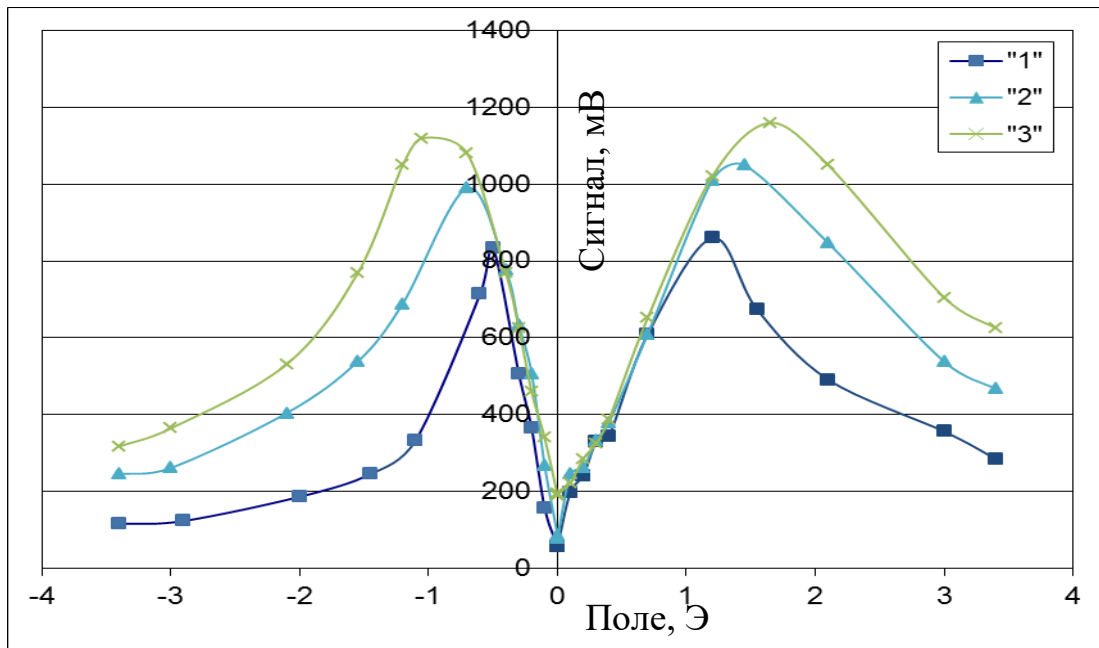


Рисунок 3.15 - Полевая характеристика бескарасного ЧЭ при трех значениях амплитуды тока (1 - 7,5 мА; 2 - 15 мА; 3 - 23 мА). Частота возбуждения 20 МГц. Для каждого случая постоянный ток равен половине амплитуды

На рисунке 3.16 показана зависимость чувствительности от амплитуды тока в присутствии постоянного тока. Видно, что при токе 5-10 мА кривая наклоняется и выходит на насыщение, что и определяет оптимальное значение амплитуды тока возбуждения.

Далее более детально исследовалось влияние постоянного тока при фиксированной величине амплитуды высокочастотного тока. На рисунке 3.17 показаны полевые характеристики при различных значениях постоянного тока возбуждения [89].

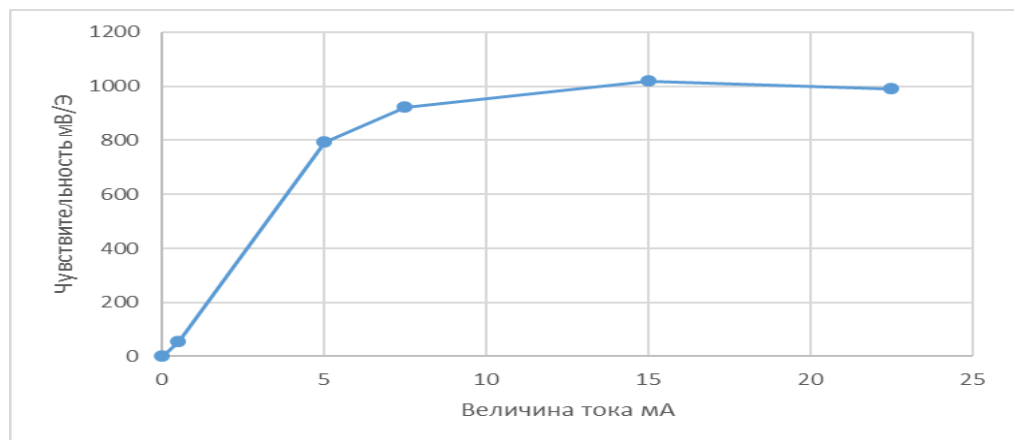


Рисунок 3.16 - Зависимость чувствительности бескарасного ЧЭ (частота возбуждения- 20 МГц) от амплитуды тока возбуждения при наличии постоянного тока, равного половине амплитуды

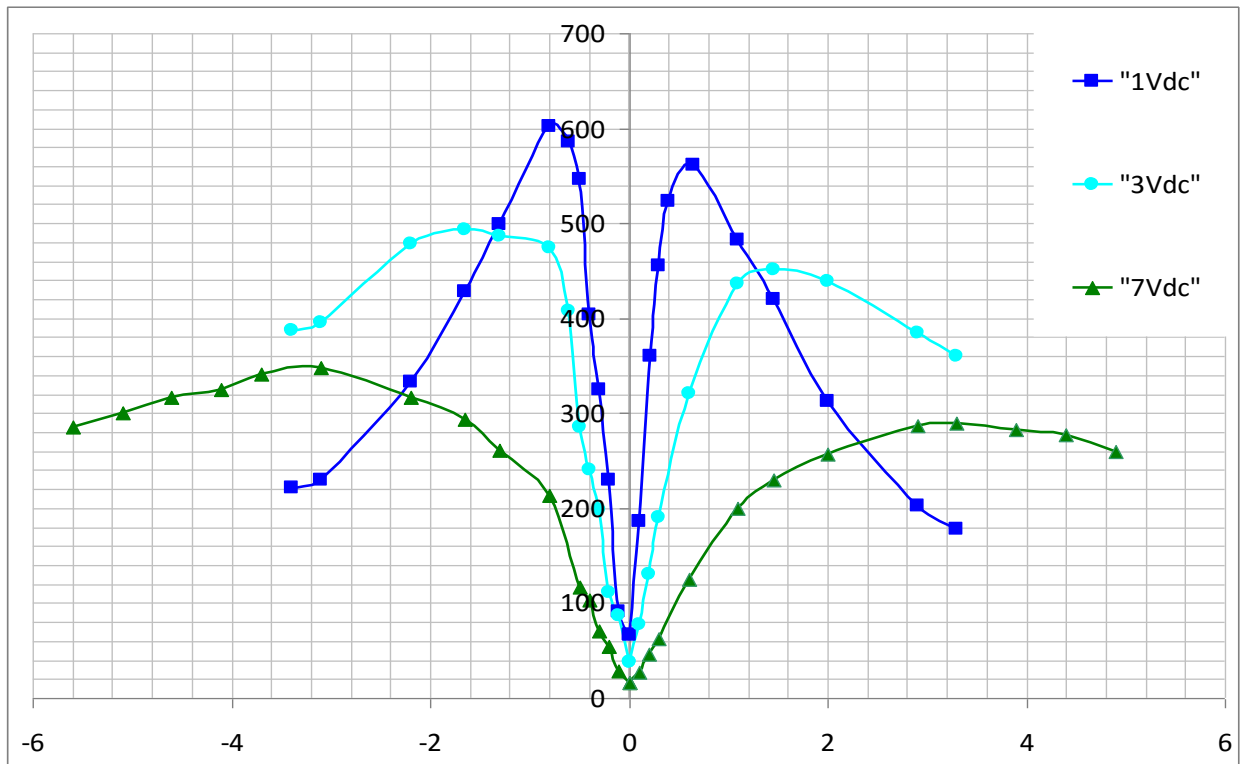


Рисунок 3.17 - Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ (65 витков) при трех значениях постоянного тока (■ – 1В (7.5 мА); ● – 3В (23мА); ▲ – 7 В (54мА)). Частота возбуждения 20 МГц

Из представленного графика видно, что чувствительность снижается, а диапазон области измерения сенсорного элемента возрастают с увеличением постоянной составляющей тока в микро-проводе. Тем не менее, предельное значение постоянного тока ограничено из-за большого выделения тепла в малом объеме и, как следствие, перегорания микро-провода. Таким образом, средний рабочий ток не должен превышать половины предельного значения. В таблице 3.1 приведены расчетные значения среднего рабочего и предельного токов для микро-провода состава $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$ с диаметром жилы от 10 мкм до 40 мкм.

Таблица 3.1 - значения среднего рабочего и предельного токов для микро-проводов

Диаметр, мкм	10	20	30	40
Рабочий ток, мА	8	30	54	78
Предельный ток, мА	16	61	108	157

На рисунке 3.18 показана зависимость чувствительности и диапазона измерений от величины постоянной составляющей сигнала возбуждения.

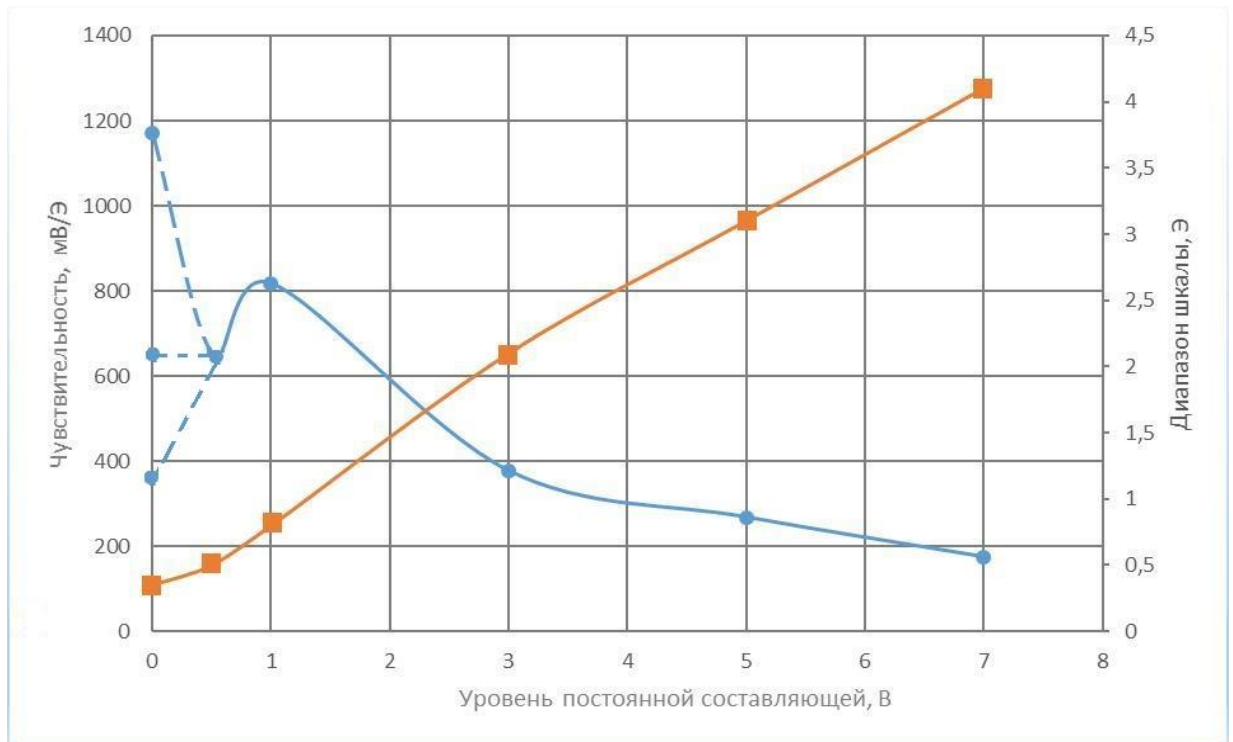


Рисунок 3.18 - Зависимость чувствительности (маркер ● по основной шкале) и диапазона измерений (маркер ■ по вспомогательной шкале) от величины постоянной составляющей для бескаркасного ЧЭ на частоте 20 МГц

Из рисунка 3.18 видно, что максимальная чувствительность наблюдается при малых значениях постоянной составляющей, однако, увеличение постоянной составляющей не только уменьшает чувствительность, но и расширяет диапазон измерений. Следовательно, за счет изменения постоянной составляющей сигнала возбуждения можно управлять чувствительностью и диапазонами измерения магнитных полей сенсорного элемента, что очень важно при разработке интеллектуальных МИ датчиков. Однако, в области от 0 до 1В постоянной составляющей (в данном случае 1В постоянной составляющей соответствует половине амплитудного значения напряжения) наблюдается экстремум с малым значением чувствительности. Такое поведение объясняется асимметрией сигнала возбуждения (положительной и отрицательной составляющих). Для рассматриваемой конфигурации датчиков оптимальное значение постоянного тока составляет 1-30 мА (при диаметре жилы микро-провода не менее 20 мкм).

Кроме чувствительности и диапазона измерений, еще одним важным параметром является максимальная скорость работы измерительного элемента. Измерение не только постоянных, но и переменных магнитных полей высокой частоты, является главным преимуществом разрабатываемого сенсора. На рисунке 3.19 показана форма выходного

сигнала ЧЭ, а на рисунке 3.20 показаны АЧХ в переменных магнитных полях для ЧЭ на подложке (синий ▲) и бескаркасного ЧЭ (зеленый ■).

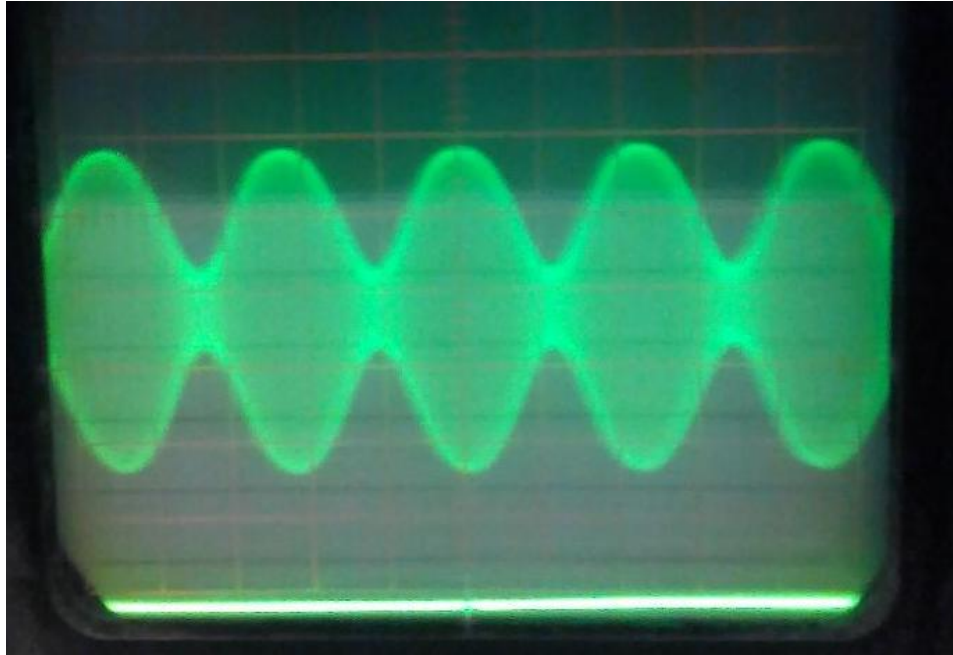


Рисунок 3.19 – Оциллограмма выходного сигнала бескаркасного ЧЭ в синусоидальных переменных магнитных полях $\pm 0,3$ Э с частотой 8 кГц (50мкс/кл)

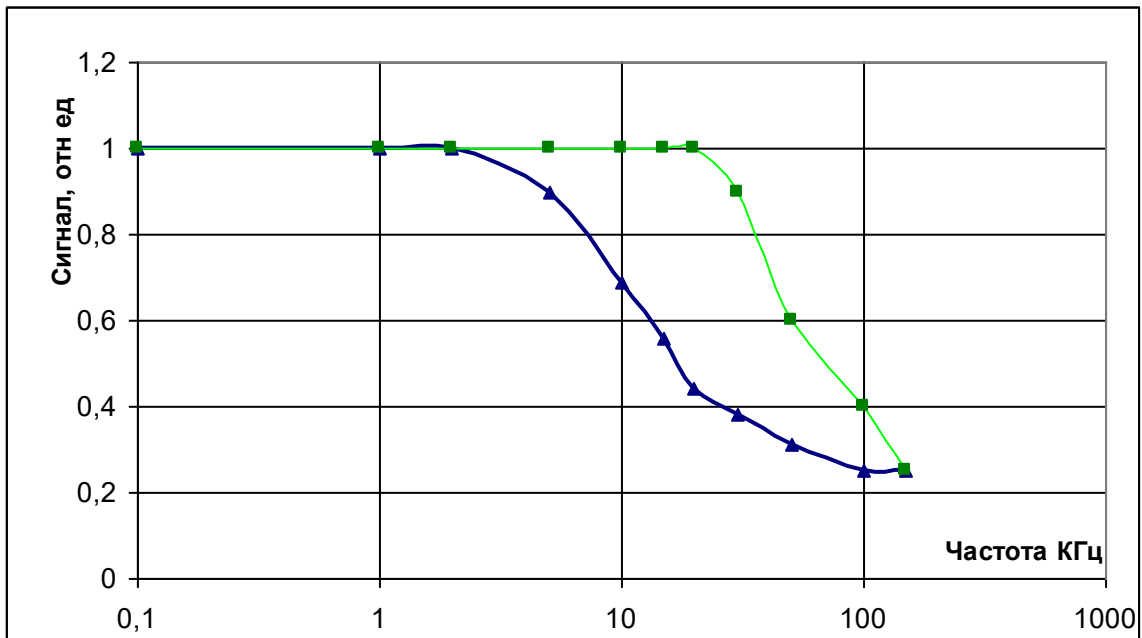


Рисунок 3.20 – Амплитудно частотная характеристика бескаркасного ЧЭ (65 витков) (■) и ЧЭ на каркасе (▲) в переменных синусоидальных магнитных полях $\pm 0,3$ Э

Из графиков (Рисунок 3.20) видно, что за счет уменьшения индуктивности детектирующей катушки удаётся на порядок (до 30 кГц) продлить постоянный участок амплитудно-частотной характеристики [90].

3.4 Влияние температурной и термомагнитной обработки на магнитный импеданс в микропроводе

Температурная стабильность работы устройства - это один из важнейших его параметров, именно температурная зависимость определяет точность и максимальную погрешность измерений магнитного датчика. В главе 1 были рассмотрены температурные зависимости магнитной проницаемости аморфных микропроводов. Температура Кюри исследуемых в данной работе МИ проводов значительно выше (примерно в 3 раза) максимальной рабочей температуры датчика, соответственно, изменение магнитной структуры и магнитной проницаемости МИ провода за счет изменения величины намагниченности насыщения крайне мало. При исследовании температурной зависимости чувствительного элемента, использующего импедансные характеристики аморфного МИ провода, необходимо исследовать влияние температуры на распределение механических напряжений и на электрическое сопротивление.

Было проведено измерение удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) на постоянном токе. Для изучения ТКС был собран датчик, в котором применен МИ провод длиной 120 мм и сечением 16 мкм. Схема измерения ТКС показана на рисунке 3.21.

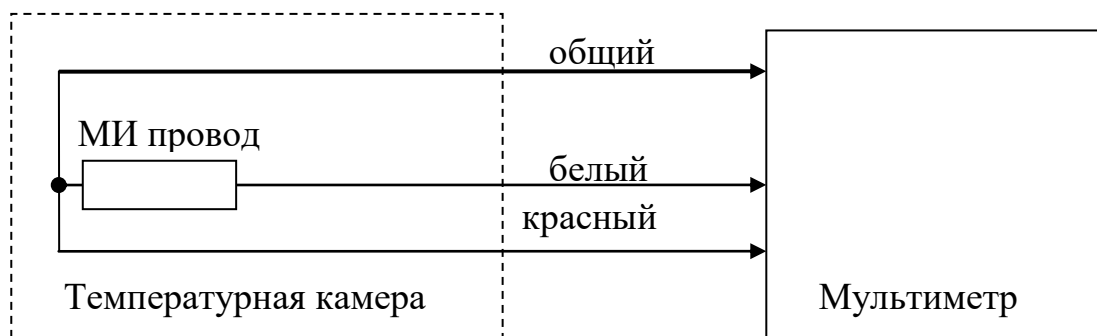


Рисунок 3.21 – Схема измерения ТКС датчика на основе микропровода (использовался провод состава: $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{V}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$, длиной 12 см и сечением 16 мкм)

Датчик помещался в температурную камеру и испытывался в диапазоне температур от -50°C до $+65^{\circ}\text{C}$. При достижении заданной температуры в соответствии с таблицей проводились измерения сопротивления цифровым мультиметром. Для получения истинных значений сопротивления МИ провода из измеренных значений вычитались сопротивления подводящих проводов. Данные по измерению сопротивления при различных температурах приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сопротивление микропровода и подводящих проводов (в Ом) при различных температурах

Материал	-50°C	-20°C	0°C	$+20^{\circ}\text{C}$	$+50^{\circ}\text{C}$	$+65^{\circ}\text{C}$	
МИ провод (бел)	528.94	529.14	529.36	529.66	530.15	530.46	Ом
Подвод. провода (кр.)	0.383	0.386	0.388	0.389	0.41	0.426	Ом
	С вычетом подводящих проводов						
МИ провод	528,557	528,754	528,972	529,271	529,74	530,034	Ом

После проведения измерений были рассчитаны удельное сопротивление ($8,8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см.) и ТКС, значение которого равно $2,5 \cdot 10^{-5}$ K^{-1} . Высокое удельное сопротивление и низкий ТКС объясняются сложным составом сплава микропровода. А учитывая, что в датчике используется короткий отрезок МИ проводника, длина которого не превышает 6 мм при довольно стабильном ТКС, столь малым изменением сопротивления в интересующем диапазоне температур ($-40^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$) можно пренебречь.

Однако, как видно из результатов измерений диагонального магнитного импеданса при различных температурах, он оказывается довольно восприимчив к изменению температуры. На рисунке 3.22 приведены кривые диагонального магнитного импеданса при 20°C (●) и при 54°C (■) на различных частотах (а – 10 МГц, б – 50 МГц). Это, прежде всего, может быть связано с распределением внутренних напряжений, возникающих при затвердевании из расплава (см. Главу 1). Также, в проводах со стеклянной оболочкой, внутренние напряжения могут зависеть от температуры из-за различных тепловых коэффициентов расширения стекла и металла. В аморфных сплавах кристаллическая анизотропия отсутствует, и магнитная анизотропия определяется в основном магнитострикцией. Если внутренние напряжения зависят от температуры, то и эффективное поле анизотропии будет испытывать сильную зависимость от температуры.

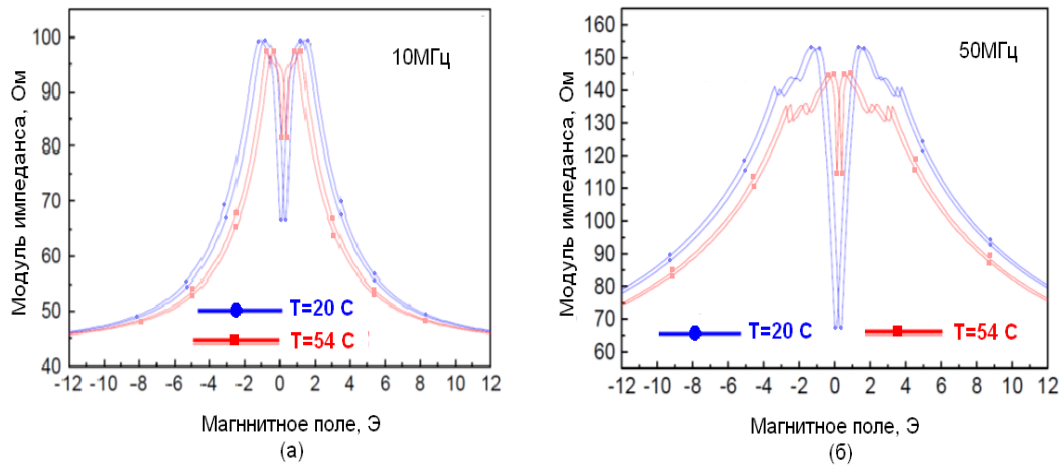


Рисунок 3.22 – Диагональный магнитоимпеданс при различных температурах 20°C - ●, 54°C - ■ а) на 10МГц и б) 50МГц в микропроводе состава $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{V}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$

Температурная зависимость работы чувствительного элемента, построенного на МИ микропроводе, пропорциональна температурной нестабильности магнитного импеданса. На рисунке 3.23 приведена кривая изменения чувствительности от температуры для бескаркасного ЧЭ (65 витков) на частоте 20 МГц. Максимум чувствительности соответствует 60°C-70°C, что может быть связано с частичной релаксацией механических напряжений. При дальнейшем повышении температуры чувствительность падает, так как направления внутреннего напряжения также могут меняться, что приведет к разбросу легких осей анизотропии и снижению чувствительности датчика [91, 92].

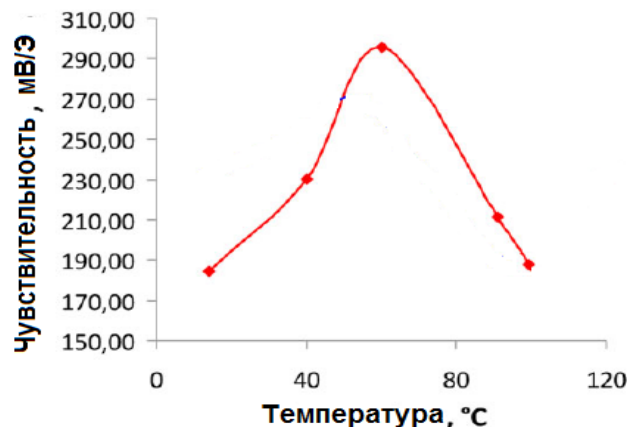


Рисунок 3.23 – Кривая изменения чувствительности от температуры для бескаркасного ЧЭ (65 витков) на частоте 20 МГц. Использовался микропроводе состава $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{V}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$, общим диаметром 44 микрона, диаметром жилы 40 микрон

При проведении цикла нагревания-охлаждения наблюдается тепловой гистерезис, то есть полевые зависимости импеданса необратимо изменяются, как показано на рисунке 3.24. Интересно отметить, что после охлаждения чувствительность при комнатной температуре увеличивается. При дальнейших циклах нагревания-охлаждения в том же диапазоне температур зависимость от температуры снижается. При этом повторные циклы термообработки в том же диапазоне температур не влияют на изменение параметров. Соответственно, можно предположить, что проведение первой термообработки (отжига) позволяет не только улучшить чувствительность, но и повысить температурную стабильность [92].

В главе 2 рассматривались методики по модификации магнитной структуры аморфных микропроводов с помощью термической и термомагнитной обработки. Такие методы обработки очень важны для контроля магнитных свойств и структуры аморфных микропроводов. Наиболее распространённым методом модификации свойств и стабилизации температурной зависимости является термический отжиг (обработка). На рисунке 3.25 показаны кривые намагничённости до и после отжига при температуре 300°C в течении 5 мин [93]. В данном случае происходит нежелательное изменение магнитной структуры, что обусловлено изменением знака магнитострикции. То есть условия отжига должны тщательно подбираться [93].

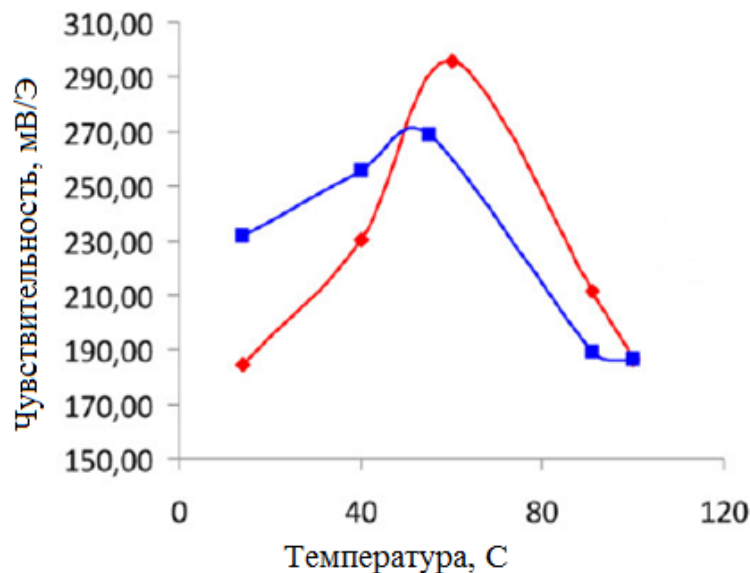


Рисунок 3.24 – Кривая изменения чувствительности от воздействующей температуры, для бескаркасного ЧЭ (65 витков) на частоте 20 МГц, при проведении цикла нагрев (♦) – охлаждение (■)

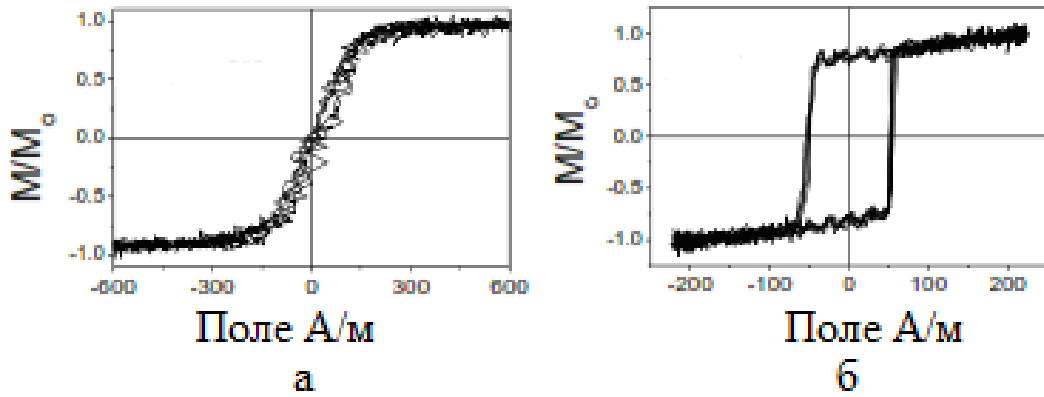


Рисунок 3.25 - Кривые намагничивания микропровода состава $\text{Co}_{69.2}\text{Fe}_{4.1}\text{Si}_{13.8}\text{B}_{11.8}\text{C}_{1.1}$ до (а) и после (б) отжига при температуре 300°C в течении 5 мин [93]

В процессе сборки чувствительного элемента датчика в МИ проводнике появляются дополнительные механические напряжения, которые могут понизить чувствительность датчика. Для компенсации таких механических напряжений ЧЭ также может подвергаться температурной обработке. Отжиг при температуре порядка 150°C в течении 5-10 минут позволяет значительно улучшить чувствительность. До и после проведения температурной обработки были измерены полевые характеристики ЧЭ, которые приведены на рисунке 3.26 (маркер \blacklozenge до обработки, маркер \blacktriangle после обработки). Оптимальная температура обработки для разных составов и геометрических размеров различна, но должна быть меньше температуры Кюри и температуры кристаллизации аморфного сплава. Необходимо добиться, чтобы температурная обработка приводила только к частичной релаксации внутренних напряжений, но сохранялась бы преимущественная ориентация напряжений.

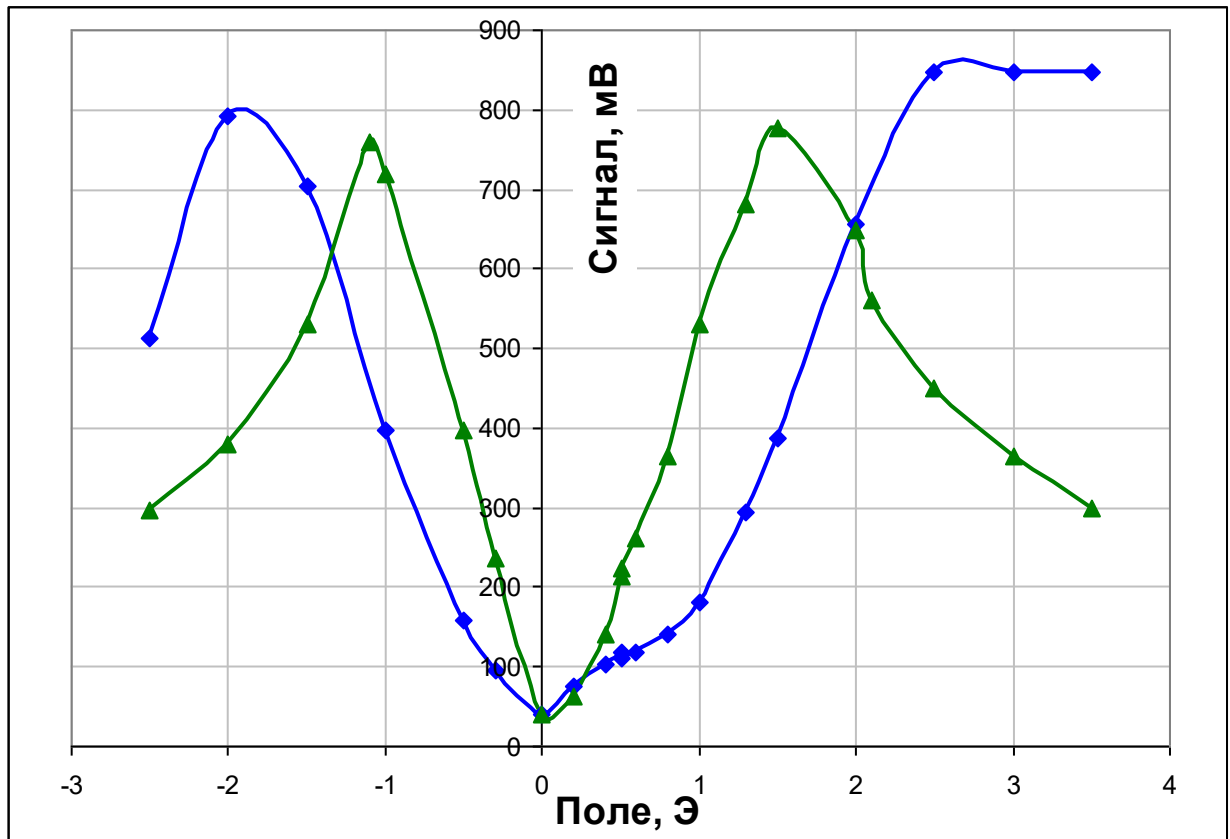


Рисунок 3.26 – Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ на частоте 22 МГц ♦ до проведения термообработки, ▲ после проведения термообработки

Как видно из графика чувствительность датчика выросла с 401 мВ/Э до 506 мВ/Э, эксперимент проводился на бескаркасной конструкции ЧЭ. Для подтверждения повторяемости и вычисления среднего значения увеличения чувствительности после термообработки подобным образом было обработано 5 сенсоров, в среднем чувствительность после термообработки выросла на 102 мВ/Э. На рисунке 3.27 показаны полевые характеристики другого бескаркасного ЧЭ до и после термообработки (Δ -100С, ■- 160С, ▲ - 210С) при различных температурах. Измерения проводились при 20С на частоте 20 МГц. После термообработки при температуре 160°С чувствительность возрастает в 2 раза, при этом при дальнейшем увеличении температуры термообработки чувствительность и амплитуда выходного сигнала стремительно снижаются, что связано с необратимыми изменениями в микропроводе (растрескивание и отслоение стеклянной оболочки).

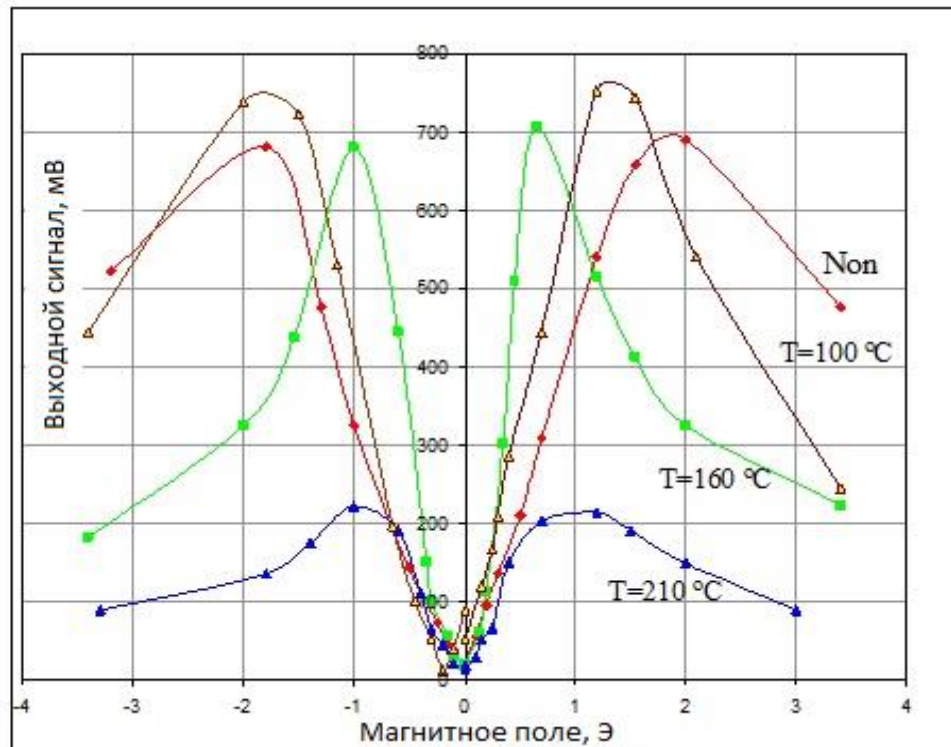


Рисунок 3.27 – Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ на частоте 20 МГц до \blacklozenge и после термообработки (Δ -100°C, \blacksquare - 160°C, \blacktriangle - 210°C) датчика при различных температурах

Из рисунка 3.27 так же видно, что в данном ЧЭ минимальное значение выходного сигнала соответствует нулевому значению поля, у некоторых ЧЭ при определённых условиях минимальное значение выходного сигнала может быть незначительно сдвинуто по полю, такое поведение объясняется существованием геликоидальности или продольной намагниченностью внутренней области [92, 94]. Ранее (в главе 2) было рассказано про геликоидальность в аморфном микропроводе и описаны методы её компенсации. В некоторых случаях полезно передвигать рабочую точку. Управляемого изменения рабочей точки можно добиться с помощью термомагнитной обработки. Она позволяет «передвигать» полевую характеристику ЧЭ по полю за счет намагниченности внутренней области. Термомагнитная обработка проводилась после обычной термообработки (150-160°C), в результате которой достигалась максимальная чувствительность. Режим изменения температуры и магнитного поля обсуждались в главе 2 (см. Рис. 2.5), $T_{\text{обrab}} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, величина магнитного поля $H_{\text{обrab}} = 6 \text{ Э}$, общая длительность процесса составляет 5 минут. До и после проведения термомагнитной обработки была измерена характеристика чувствительности, показанная на рисунке 3.28

(зеленый график до обработки, синий после). В процессе данной обработки, также как и при простой термообработке, температура должна быть меньше температуры Кюри и температуры перекристаллизации материала. Термомагнитная обработка не изменяет аморфную структуру МИ провода.

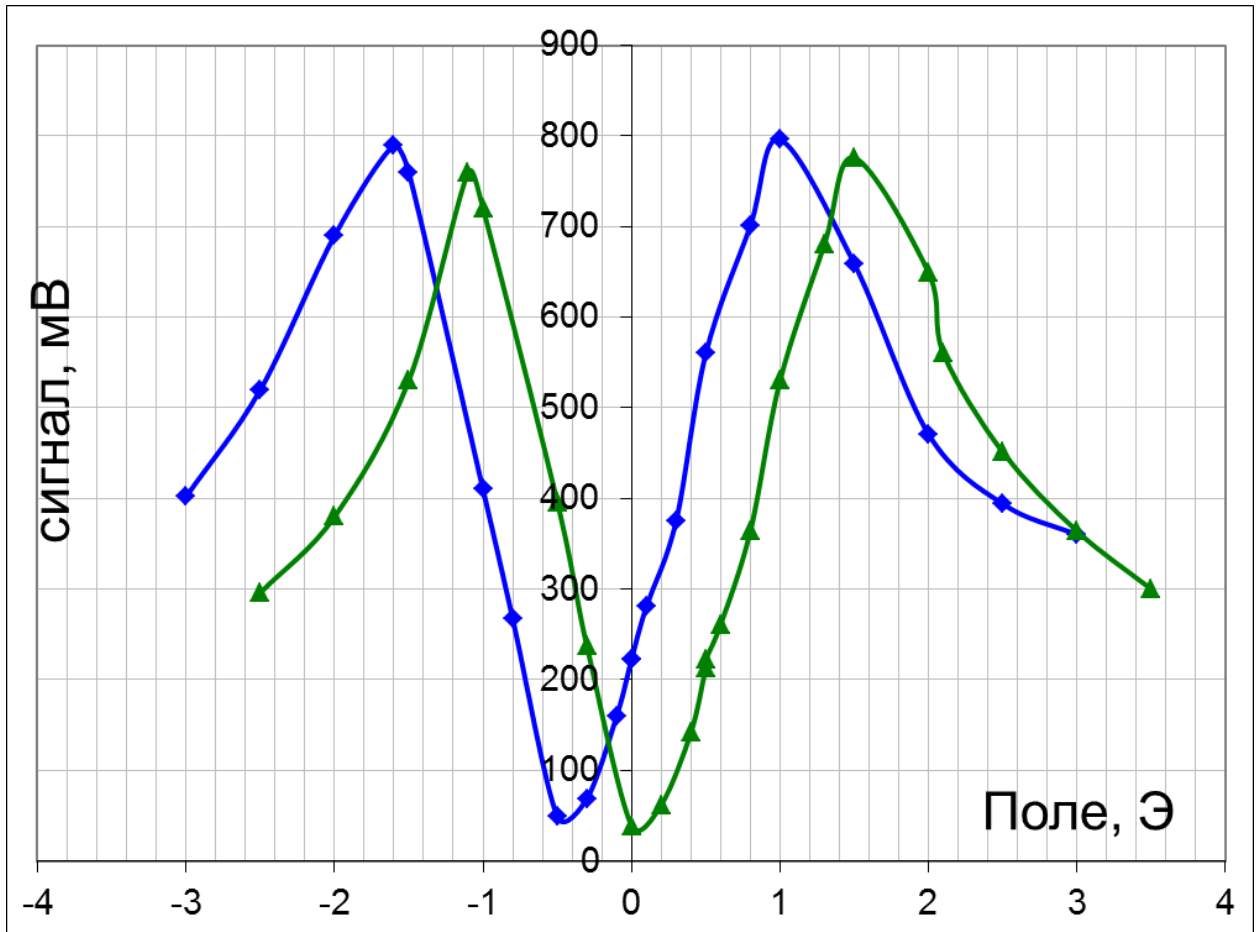


Рисунок 3.28 – Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ на частоте 22 МГц ▲ до проведения термомагнитной обработки, ◆ после проведения термообработки

Как видно из графика минимум выходного сигнала передвинулся из нуля поля, и соответствует 0,42 Э, при этом ни чувствительность датчика, ни форма кривых не изменились. Чувствительность составляет 502 мВ/Э. Эксперимент также проводился на бескаркасной конструкции ЧЭ. Для подтверждения повторяемости результатов термообработка проводилась на 5 сенсорах, и результаты подтвердили повторяемость. Температура термомагнитной обработки зависит от состава МИ проводника и его поперечного сечения, для состава $\text{Co}_{66.94}\text{Fe}_{3.83}\text{Ni}_{1.44}\text{V}_{11.57}\text{Si}_{14.59}\text{Mo}_{1.96}$ с диаметром 40 микрон она составляет 150°C. В данном случае термомагнитная обработка привела к смещению изначально симметричной кривой относительно нулевого поля. Мы объясняем

это увеличением продольной коэрцитивности внутренней области, которая превышает внешнее поле.

3.5 Влияние технологии изготовления чувствительного элемента на свойства микропровода. Магнитное взаимодействие в многопроводных ЧЭ

3.5.1 Каркасная технология изготовления

В главе 2 была описана первая конструкция ЧЭ, которая собиралась на керамической или текстолитовой подложке размера 1206 (3,2x1,6x0,5мм). Были измерены характеристики данного датчика, такие как чувствительность, предел измерительной шкалы.

Для изучения влияния способа сборки ЧЭ на его характеристики было собрано по 5 одинаковых ЧЭ на подложке различными методами. В первом методе (образец 1) МИ проводник припаивался припоем ПОС-61 при температуре 310 С, вторым способом (образец 2) припаивался низкотемпературным сплавом «Розе» при температуре 120С, третьим – (образец 3) приклеивался электропроводным клеем при комнатной температуре.

Типичные характеристики выходного сигнала датчика как функции внешнего магнитного поля для различных методов обеспечения электрических контактов приведены на рисунке 3.29. Общие данные ЧЭ на подложке приведены в таблице 3.3. Использовалось возбуждение МИ провода импульсным током величиной 6 мА в пике, с частотой 8МГц. Видно, что способ подключения микропровода к контактными площадкам и его нагрев в месте пайки не оказывают существенного влияния на характеристику в той области кривых, где чувствительность датчика максимальна.

Таблица 3.3 – Общие технические данные ЧЭ на подложке на 8 МГц

Параметр	Величина	Ед. измерения
Чувствительность	550	мВ/Э
Диапазон измерения	0,25	Э
Макс значение амплитуды вых. сигнала	137	мВ
Рабочая частота	8	МГц
Диаметр МИ проводника (и их число)	23 (1)	Мкм
Число витков детектирующей катушки	40	
Диаметр (и тип провода) катушки	60 (ПЭВ-1)	Мкм
Габаритные размеры	3,2x1,8x1	Мм

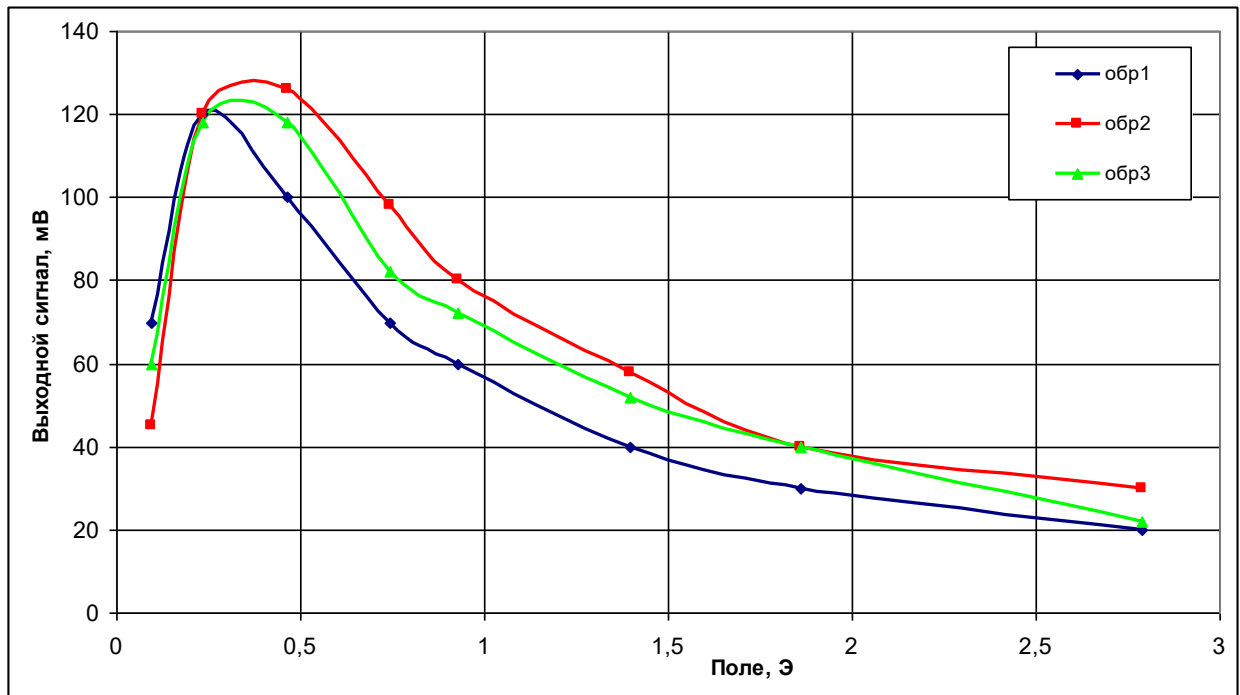


Рисунок 3.29 - Выходные характеристики трех образцов датчиков, в которых электрические контакты осуществлены различными способами: пайка при температуре 310°C (1) и 120°C (2), использование электропроводного клея при комнатной температуре (3)

Таким образом, как видно из графиков, процесс пайки даже при относительно высоких температурах существенно не изменяет магнитную структуру и состояние провода. На самом деле, как обсуждалось выше, обработка при умеренной температуре может улучшить чувствительность МИ провода. Чувствительность в данном случае лежит в диапазоне 600-700 мВ/Э, а диапазон линейности характеристики сенсора составляет $\pm 0,3$ Э.

Недиагональный МИ сенсорный элемент аналогичен ортогональному магнитомодуляционному сенсору, использующему фундаментальную моду [95]. Известно, что в таких сенсорах при использовании нескольких сердечников удается добиться нелинейного увеличения чувствительности [96]. Поэтому было интересно исследовать характеристики МИ элементов с несколькими проводами. Хотя значительного увеличения чувствительности обнаружено не было, но оказалось возможным существенно расширить диапазон измерений.

Основным недостатком конструкции с несколькими МИ проводами является зависимость выходного сигнала от расстояния между проводами. Между тем, крайне сложно обеспечить точность установки МИ проводов на уровне нескольких микрометров.

Для исследования зависимости выходного сигнала от расстояния между проводами

использовалась конструкция, собранная описанным выше способом с двумя МИ проводниками. Для данной конструкции была изучена зависимость амплитуды выходного сигнала при фиксированном значении магнитного поля от расстояния между МИ проводниками (рисунок 3.30). Было установлено, что пределы измерительной шкалы от расстояния между проводниками не зависят, однако изменяется амплитуда, а значит и чувствительность датчика. Наибольшая чувствительность и амплитуда выходного сигнала наблюдается в случае минимального расстояния между МИ проводниками. При расстояниях, превышающих 500 мкм, значение чувствительности и амплитуды перестают изменяться вследствие исчезновения магнитостатического взаимодействия между МИ проводниками [96].



Рисунок 3.30 – Зависимость амплитуды сигнала ЧЭ на подложке от расстояния между МИ проводниками на частоте 8 МГц

Далее было предложено два типа модернизированных конструкций ЧЭ, со склеенными МИ проводниками и с перекрещенными. Характеристика чувствительности разработанных конструкций с перекрещенными проводниками приведена на рисунке 3.31. Для подтверждения воспроизводимости параметров чувствительности датчика с двумя МИ проводниками в двух предложенных конфигурациях было собрано по 5 образцов таких конструкций, разброс амплитуды выходного сигнала по всей шкале измерения у конструкции со скрещенными проводниками не превысил 8%, а у конструкции со

склеенными проводами – 5%. Общие технические данные двухпроводного ЧЭ на подложке приведены в таблице 3.4.

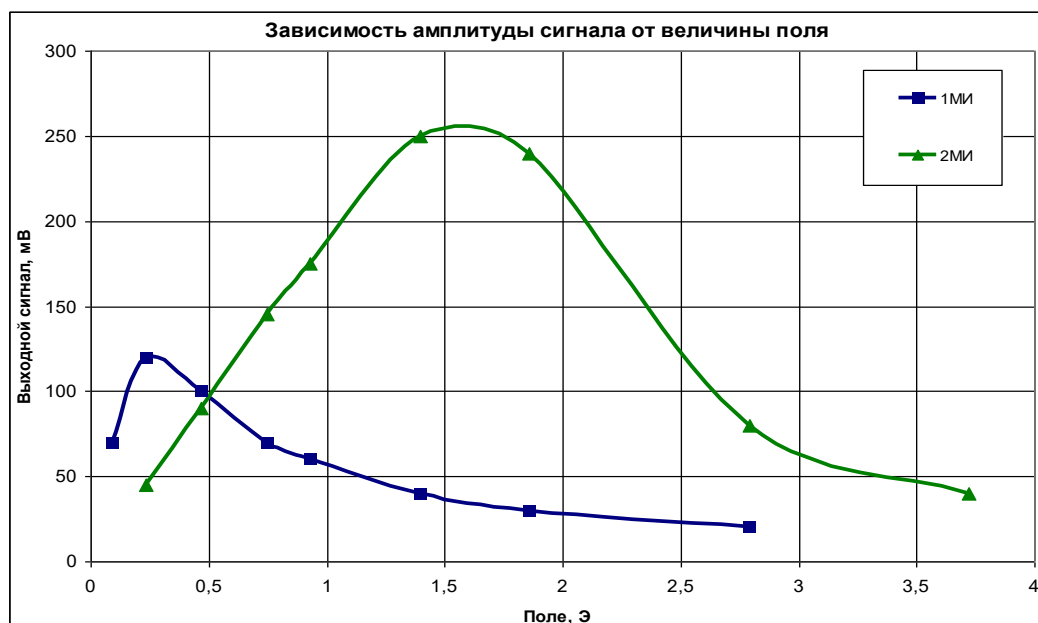


Рисунок 3.31 – Полевая характеристика чувствительных элементов на каркасе (■ однопроводного, ▲ двухпроводного) при частоте 8 МГц

Таблица 3.4 – Общие технические данные двухпроводного ЧЭ на подложке при частоте 8МГц

Параметр	Величина	Ед. измерения
Чувствительность	179	мВ/Э
Диапазон измерения	1,4	Э
Макс значение амплитуды вых. сигнала	250	мВ
Рабочая частота	8	МГц
Диаметр МИ проводника (и их число)	23 (2)	Мкм
Число витков детектирующей катушки	40	
Диаметр (и тип провода) катушки	60 (ПЭВ-1)	Мкм
Габаритные размеры	3,2x1,8x1	Мм

3.5.2 Технология сборки ЧЭ на микро каркасе, её особенности и свойства

Для уменьшения габаритных размеров, увеличения чувствительности и расширения диапазона измерительной шкалы ЧЭ первая конструкция была видоизменена в ЧЭ на микро каркасе.

Стоит отметить, что от точности позиционирования микропровода в катушке зависит точность работы ЧЭ и его характеристика чувствительности.

Характеристики данного ЧЭ приведены в таблице 3.5, полевая характеристика приведена на рисунке 3.32.

Таблица 3.5 – Общие технические данные ЧЭ на микро каркасе при частоте 16,5МГц

Параметр	Величина	Ед. измерения
Чувствительность	400	мВ/Э
Диапазон измерения	1,5	Э
Макс значение амплитуды вых. сигнала	600	мВ
Рабочая частота	16,5	МГц
Диаметр МИ проводника (и их число)	38 (1)	Мкм
Число витков детектирующей катушки	50	
Диаметр и тип провода катушки	40, ПЭВ-1	Мкм
Габаритные размеры	3,5x0,5x0,5	Мм

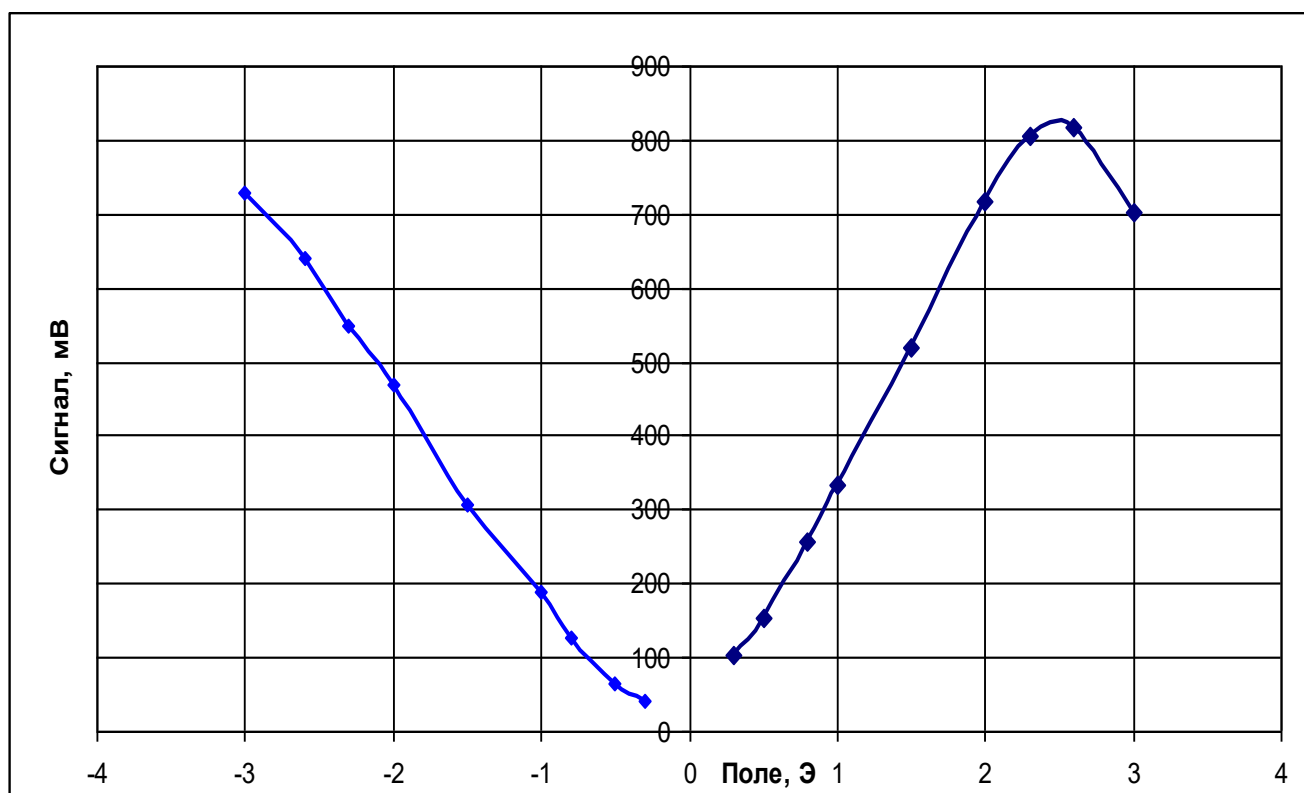


Рисунок 3.32 – Полевая характеристика чувствительного элемента на микро каркасе при частоте 16,5МГц

Из рисунка 3.32 и таблицы 3.5 видно, что за счет уменьшения радиуса катушки детектирующей катушки значительно увеличилась чувствительность и максимальная амплитуда выходного сигнала сенсора, следовательно, дальнейшее уменьшение радиуса катушки должно также увеличить чувствительность и амплитуду выходного сигнала.

3.5.3 Бескаркасная конструкция ЧЭ, её особенности и свойства

Бескаркасная конструкция ЧЭ лишена недостатков имеющих в конструкции на микро каркасе и обладает минимальными габаритами среди рассмотренных конструкций. По своей сути она является очередной модификацией описанной выше конструкции.

Магнитные характеристики датчика при возбуждении различными частотами показаны на рисунке 3.35 и приведены в таблице 3.33.

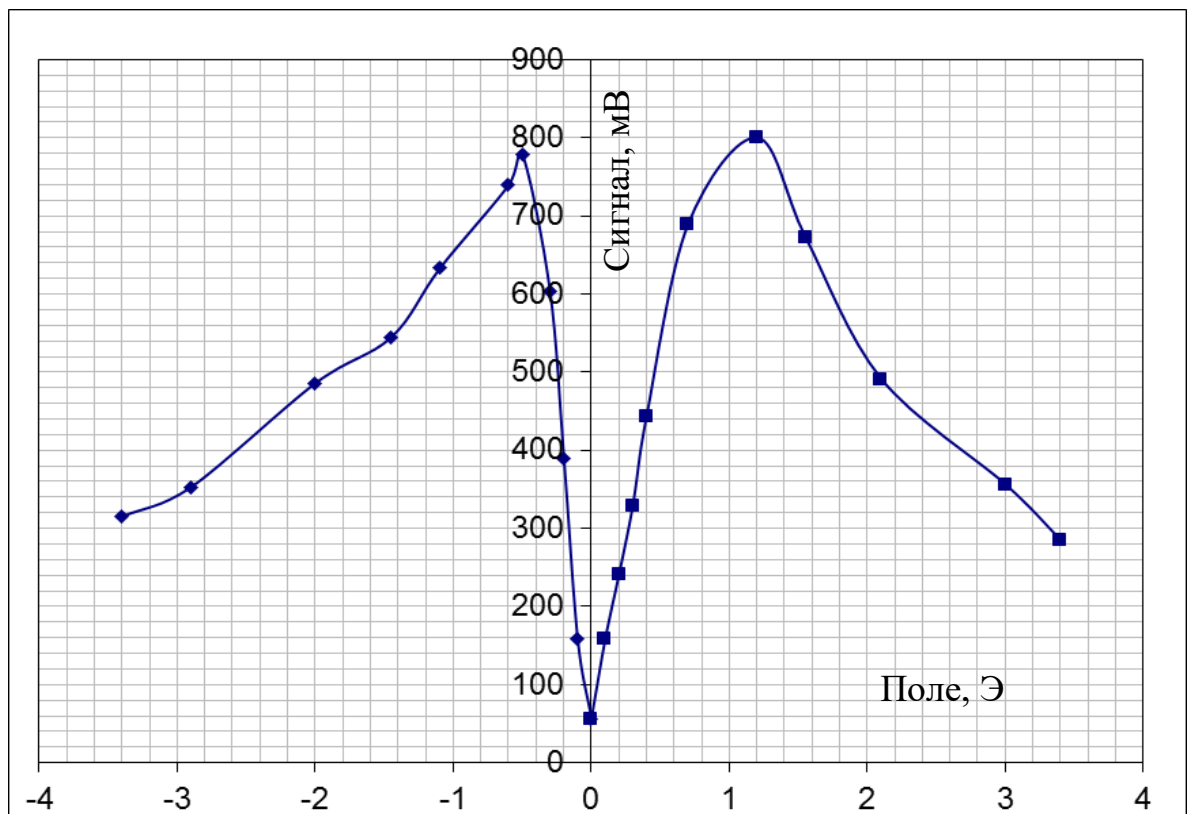


Рисунок 3.33 – Полевая характеристика бескаркасного чувствительного элемента (65 витков) при частоте 20МГц

Таблица 3.6 – Общие технические данные бескаркасного ЧЭ на 20 МГц

Параметр	Величина	Ед. измерения
Чувствительность	850	мВ/Э
Диапазон измерения	0,5...2,5	Э
Макс значение амплитуды вых. сигнала	798	мВ
Рабочая частота	20	МГц
Диаметр МИ проводника (и их число)	38 (1)	Мкм
Число витков детектирующей катушки	65	
Диаметр и тип провода катушки	40, ПЭВ-1	Мкм
Габаритные размеры	4,5x0,1x0,1	Мм

3.6 Выводы по главе

В данной главе приведены результаты исследований магнитных и импедансных свойств аморфных МИ микропроводов и способов их модификации. В результате измерения кривой намагниченности двумя методами был обнаружен значительный магнитный гистерезис, который указывает на наличие геликоидальной анизотропии. Гистерезис также обнаружен в поведении диагонального импеданса. При воздействии постоянного тока гистерезис почти полностью исчезает, что свидетельствует об устранении доменной структуры. Так же выявлено, что наличие гистерезиса может снижать амплитуду выходного сигнала, снимаемого с катушки (недиагональный импеданс), и уменьшать динамический диапазон измерения магнитного поля. Был подобран оптимальный режим возбуждения для устранения влияния доменной структуры, при котором величина постоянного тока равна половине импульсного значения тока. Результаты изучения амплитудно-частотных характеристик подтверждают, что наибольшую чувствительность недиагонального МИ элемента можно получить только на частоте резонанса его детектирующего контура.

Исследования температурной зависимости МИ показали, что необходима термостабилизация чувствительного элемента. Для стабилизации параметров при изменении температуры был предложен метод температурной обработки. После термообработки ЧЭ при температуре 160°C в течении 5 мин. термостабильность возрастает на 20% в диапазоне до 75°C. Та же термообработка увеличивает чувствительность при комнатных температурах более чем в 2 раза, при этом повторные циклы термообработки в том же диапазоне температур не влияют на изменение параметров и температурные градиенты.

В конце главы приведены экспериментальные результаты измерения характеристик магнитоимпедансных чувствительных элементов, изготовленных по различным технологиям. Среди полученных результатов можно выделить характеристики бескаркасного МИ элемента, средняя чувствительность которого соответствовала 850 мВ/Э, а максимальная после проведения термообработки превышала 1500 мВ/Э. При этом его габаритные размеры не превышали 4,5x0,1x0,1 мм.

Из проведенных экспериментов и анализа результатов можно сделать вывод, что бескаркасный чувствительный элемент обладает наилучшими как магнитными, так и масса-габаритными характеристиками, и может быть успешно применен в высокочувствительных и миниатюрных датчиках магнитных полей.

ГЛАВА 4 Технологические аспекты изготовления миниатюрных датчиков на основе МИ эффекта в аморфных микропроводах

4.1 Принципиальная конструкция чувствительного элемента для магнитоимпедансного датчика

Представляется, что наиболее простая конструкция МИ датчика реализуется при использовании диагонального магнитоимпеданса, так как не требуются возбуждающая и детектирующая катушки. Однако соответствующие МИ характеристики являются сильно нелинейными и требуются внешние поля смещения (и, следовательно, генерирующие эти поля катушки). С другой стороны, линейные характеристики могут быть получены при недиагональном МИ, где используется детектирующая катушка. Также, при недиагональной МИ схеме возможна оптимизация выходного сигнала. Таким образом, с одной стороны недиагональный МИ приводит к усложнениям конструкции чувствительного элемента (ЧЭ), показанного на рис. 4.1, а с другой стороны имеет ряд преимуществ.

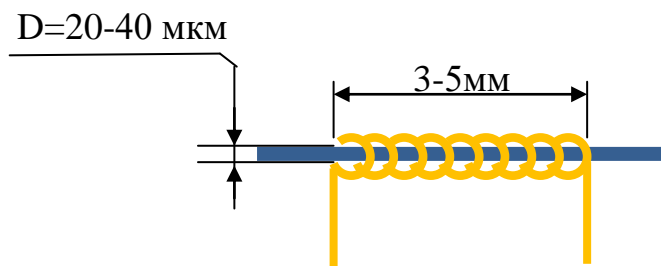


Рисунок 4.1 - Принципиальная схема недиагонального МИ элемента

Выходной сигнал ЧЭ может быть антисимметричным относительно внешнего поля, то есть возможно определение величины и направления внешнего поля, что подтверждается результатами измерений, приведенными в главе 3. Высокочастотный ток, текущий по проводнику с геликоидальной намагниченностью, индуцирует в нем как циркулярные, так и продольные переменные намагниченности. Соответственно, переменная продольная намагниченность индуцирует напряжение в катушке, что и используется в качестве выходного сигнала. Внешнее магнитное поле, направленное вдоль оси МИ элемента, изменяет геликоидальную намагниченность и, соответственно, напряжение в детектирующей катушке. При изменении направления внешнего поля фаза напряжения в катушке по отношению к возбуждающему сигналу сдвигается на 180° , поэтому можно определить направление внешнего поля. Кроме того, недиагональный

импеданс позволяет увеличить выходной сигнал при резонансном возбуждении, что увеличивает чувствительность выходного напряжения и улучшает характеристики отношения сигнал/шум [97, 98]. Это связано с тем, что на данном этапе чувствительность МИ сенсора (и разрешение) ограничены шумами, которые оказываются значительно выше, чем внутренние магнитные шумы чувствительного элемента. Следовательно, разрешение МИ сенсоров может быть улучшено с помощью увеличения чувствительности выходного напряжения [99].

При разработке конструкции необходимо добиваться не только высоких технических показателей, таких как чувствительность, энергопотребление, линейность, но и хороших технологических (простота массового производства, большой процент выхода годных), и экономических (низкая себестоимость, высокая конкурентоспособность) показателей.

Детектирующая катушка может также приводить к дополнительным электромагнитным помехам, что может быть устранено использованием дополнительных компенсирующих катушек: магнитно-компенсационной и помехо-компенсационной. Все катушки, включая детектирующую и МИ проводники, собираются на подложке в общую сборку.

Магнитно-компенсационная катушка наматывается сверху на детектирующую тем же проводом и того же сечения в два слоя и содержит двукратное число витков по отношению к детектирующей катушке. Она так же, как и детектирующая, закрепляется (например, клеем БФ-1). Эта катушка предназначена для генерации магнитных полей в области измерения датчика. При помощи этой катушки датчик может калиброваться и расширять свой диапазон измерения магнитных полей. Катушка питается постоянным током не более 50 мА.

Помехо-компенсационная катушка наматывается подобно детектирующей катушке (тем же способом, тем же проводом с тем же числом витков на таком же МИ проводнике). При сборке ЧЭ эта катушка включается встречно детектирующей, а её МИ проводник служит лишь каркасом – сердечником - и к нему не подводится сигнал возбуждения, а её выводы замкнуты между собой проводником подложки. За счёт такого включения удается скомпенсировать помехи, наведенные в детектирующей катушке. На рисунке 4.2 приведена принципиальная схема включения усложненного ЧЭ, а на рисунке 4.3 показан вариант сборки усложненного ЧЭ на подложке с напыленными токоподводящими проводниками. Для уменьшения внешнего радиошума на частоте возбуждения в топологии его подложки подводящие проводники должны быть сгруппированы по парам и подводиться к МИ элементу с одной стороны [100].

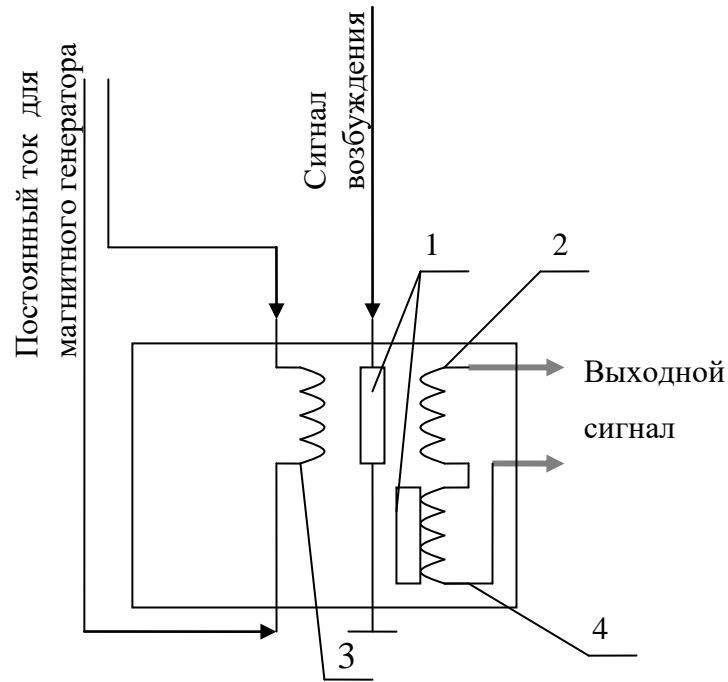


Рисунок 4.2 - Принципиальная схема усложненного ЧЭ. Здесь 1-МИ проводники, 2-детектирующая катушка, 3-магнитно-компенсационная катушка, 4- помехо-компенсационная катушка

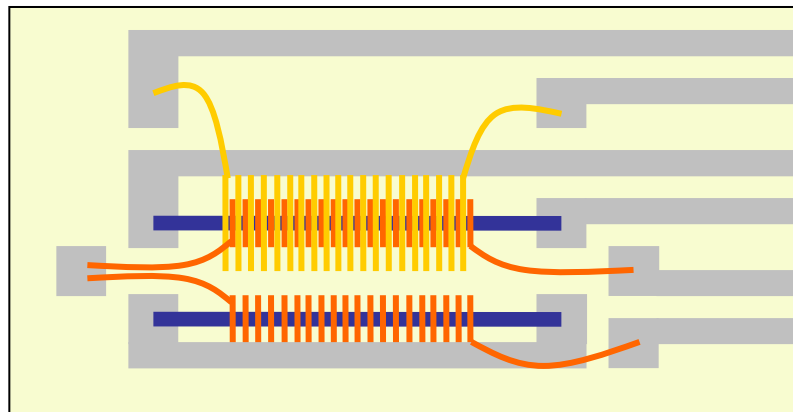


Рисунок 4.3 - Вариант сборки усложненного ЧЭ на подложке с напыленными токоподводящими проводниками

4.2 Особенности построения датчиков с применением магнитоимпедансных чувствительных элементов

Датчик это самостоятельное, автономное устройство, размещаемое в месте контроля физического параметра или отбора информации, и преобразующее физический параметр в электрический сигнал. Магнитоимпедансный датчик, как и все другие датчики,

состоит из чувствительного элемента и вспомогательного устройства (рисунок 4.4). Чувствительный элемент преобразует величину измеряемого воздействия на сенсор в электрический сигнал, пропорциональный величине воздействия. Согласующее устройство обеспечивает согласование работы ЧЭ, удобство подключения, стабилизацию режимов работы датчика и вывод информации. Оно может состоять как только из одной аналоговой части, так и из совмещения аналоговой с цифровой частями.

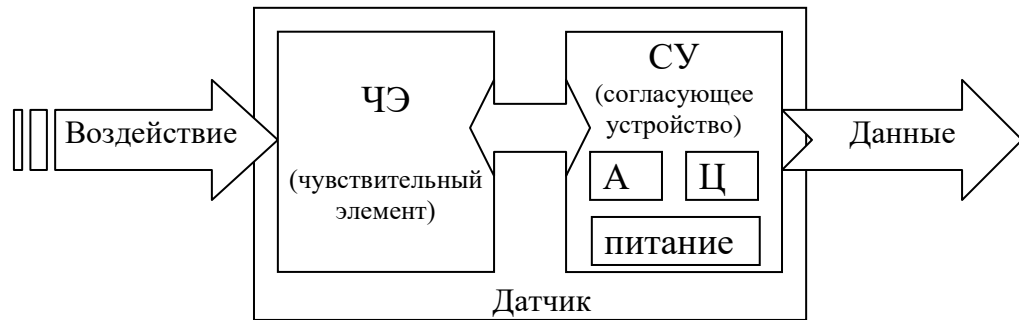


Рисунок 4.4 – Структурная блок-схема датчика

Чувствительный элемент для своей работы требует наличия высокочастотного сигнала возбуждения, а также выпрямления и усиления выходного сигнала. Простейшая блок схема включения, основанная на возбуждении импульсным током, показана на рисунке 4.5 [101]. Сигнал от импульсного генератора (1) поступает как на сам МИ элемент (3), так и на схему формирования временной задержки (2), которая осуществляет синхронизацию МИ элемента и аналогового ключа (4). Сигнал от МИ элемента через аналоговый ключ (4), который замыкается в момент пиковой амплитуды сигнала, поступает на операционный усилитель (5), выход усилителя является выходом магнитоимпедансного датчика.

Рассмотренная схема имеет ограниченную функциональность, температурную нестабильность, малый динамический диапазон и точность измерений. Кроме того, частота возбуждения сенсора ограничивается временной задержкой электронного ключа, при его применении частота возбуждения не должна превышать 10-12МГц.

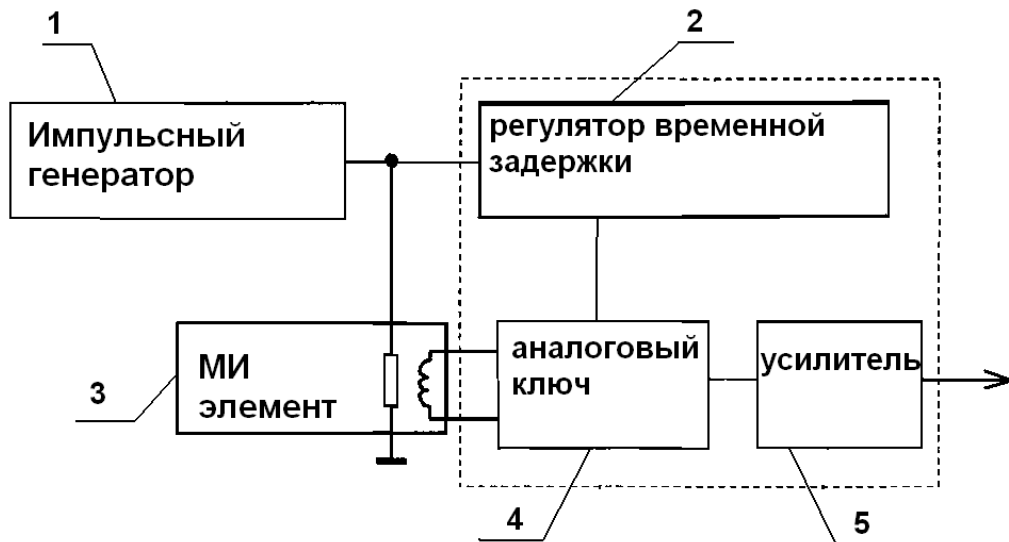


Рисунок 4.5 – Блок-схема датчика, основанная на импульсном возбуждении

Подобного рода недостатки возможно устранить, усложнив и оптимизировав схему. Например, в конструкцию может быть добавлен микроконтроллер и обратная связь по полю [102] с целью компенсации внешних полей рассеяния (рисунок 4.6). При этом даже в такой конструкции остались некоторые указанные выше недостатки: ограниченная функциональность датчика, температурная нестабильность работы, ограниченная шкала и невысокая точность измерения.

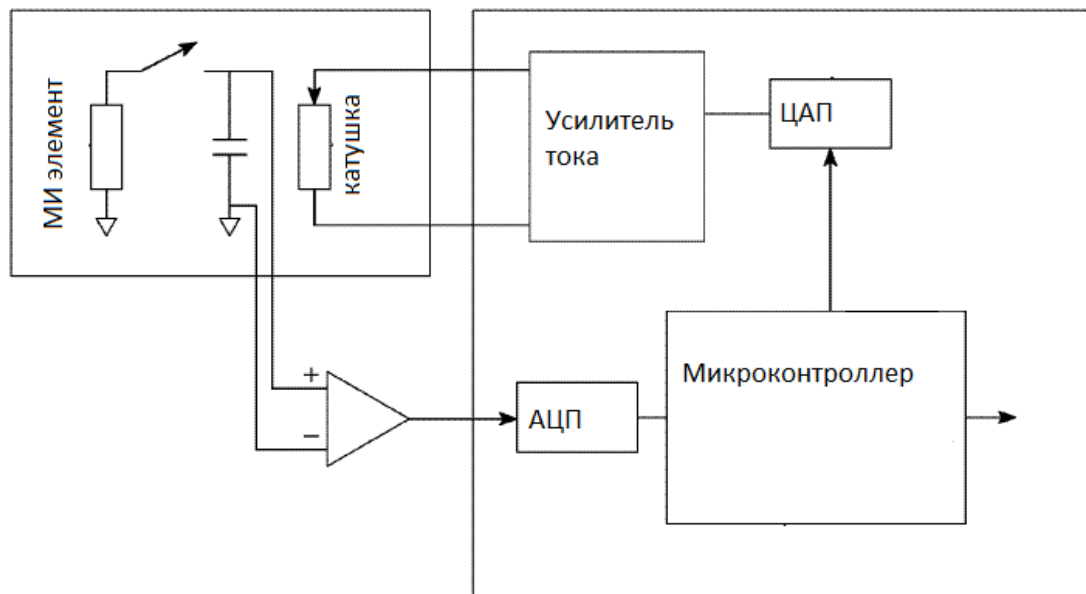


Рисунок 4.6 – Блок-схема датчика [102]

В разрабатываемой нами конструкции элементами усовершенствования датчика является не только применение микроконтроллера со встроенными функциональными модулями, но и двухуровневой температурной компенсации. С использованием современного микроконтроллера становится возможным без усложнения схемы и без увеличения себестоимости значительно повысить функциональность устройства. А применение современных ВЧ детекторов повышает точность измерений и сокращает габариты устройства. Микроконтроллер в рассматриваемой конструкции является интеллектуальным ядром датчика. Именно контроллер оценивает внешние факторы, воздействующие на датчик, и подстраивает под них его работу, а также позволяет проводить математическую обработку данных, самодиагностику и автокалибровку, передавать данные пользователю в удобном для него виде. В состав микроконтроллера входят модули аналогово-цифрового и цифро-аналогового преобразователей (АЦП и ЦАП), модули ввода-вывода данных, широтно-импульсные модуляторы (ШИМ), и другие. Всё это сильно упрощает как схемную реализацию, так и технологию изготовления датчика [100]. Для микроконтроллера разрабатывается специальный пакет программного обеспечения, который программируется на этапе изготовления датчика.

Блок схема разрабатываемого датчика показана на рисунке 4.7, где изображены следующие элементы:

- 1–первая обмотка (верхняя) – выполняет генерацию магнитного поля, входит в состав МИ элемента, позволяет проводить калибровку и изменение пределов измерительной шкалы;
- 2–вторая обмотка (нижняя) – выполняет роль детектирующей катушки МИ элемента;
- 3–магнитоимпедансный (МИ) элемент, состоящий из МИ проводов и двух обмоток, обмотки наматываются друг на друга (одна под другой);
- 4–ВЧ детектор – выполняет функцию детектирования ВЧ аналогового сигнала от МИ элемента;
- 5–операционный усилитель – усиливает выпрямленный сигнал с МИ элемента до уровней, приемлемых для работы с АЦП;
- 6–микроконтроллер – является интеллектуальным ядром датчика;
- 7–широтно-импульсный модулятор (ШИМ) – встроенный в микроконтроллер модуль, выдает сигнал возбуждения МИ элементу;
- 8–аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) – встроенный в микроконтроллер модуль, выполняет преобразование аналогового сигнала в цифровой;
- 9–температурный датчик – необходим для измерения текущей температуры датчика;
- 10–блок терморезистора – необходим для температурной стабилизации в расширенном температурном диапазоне.

11- цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) - встроенный в микроконтроллер модуль, выполняет преобразование цифрового сигнала в аналоговый;

12 – усилитель постоянного тока (УПТ) - необходим для согласования ЦАП и компенсационной катушки, а так же для её управления.

13 – универсальный асинхронный приёмо-передатчик (UART) – встроенный в микроконтроллер модуль, выполняет последовательный обмен данными датчика с пользователем на скорости до 4,5Мбит/с. А встроенный модуль универсальной последовательной шины (USB) позволяет передавать данные непосредственно на USB порт компьютера.

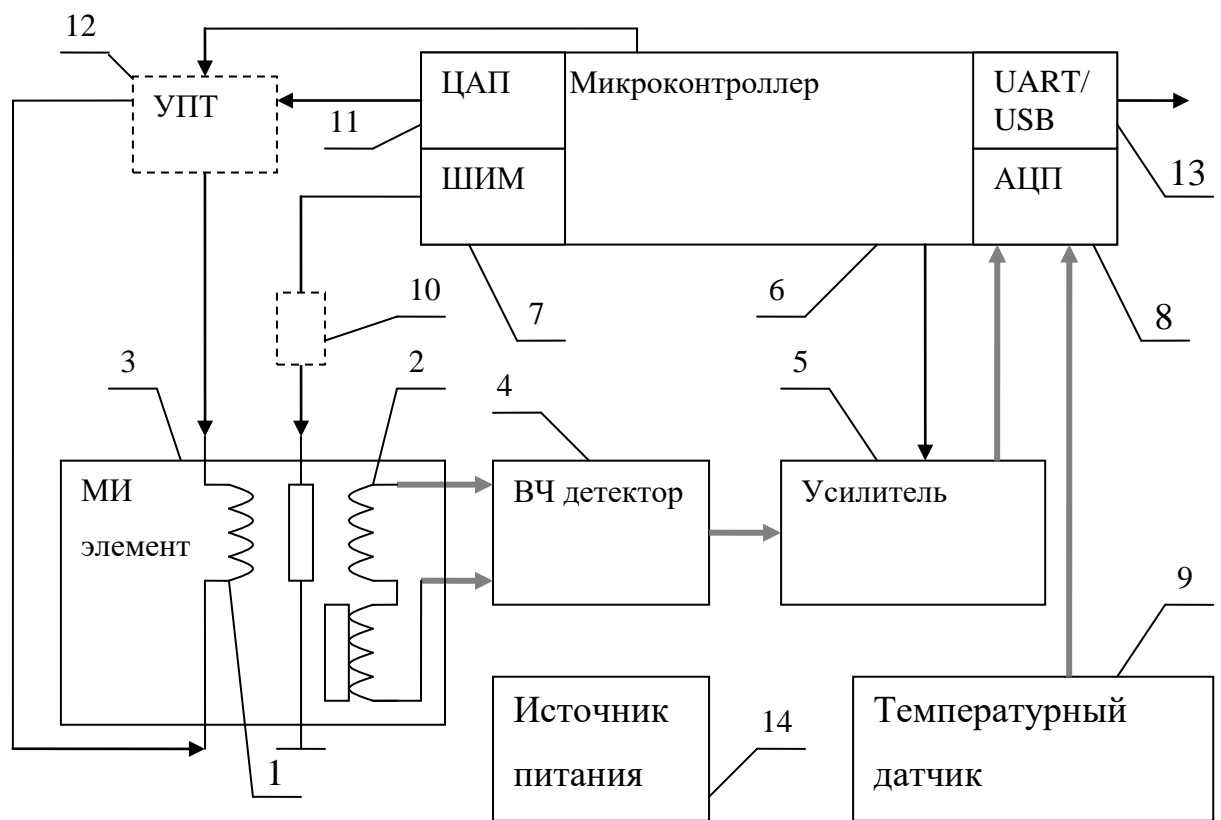


Рисунок 4.7 – Функциональная блок-схема разрабатываемого датчика

Как видно из блок-схемы (рисунок 4.7) применение отдельного генератора для возбуждения МИ элемента нецелесообразно, поскольку с подобной задачей справляется встроенный в микроконтроллер (6) модуль ШИМ [103]. В присутствии магнитного поля на концах детектирующей катушки (2) возникает переменный сигнал. Этот сигнал от магнитоимпедансного ЧЭ проходит через ВЧ детектор (4), который не требует управления микроконтроллером (6), выпрямляется и попадает на операционный усилитель (5). В данной конструкции невозможно применение диодного выпрямителя из-за нелинейности

его вольтамперной характеристики в начальной области, а также электронного ключа из-за его медленной работы. Поэтому выпрямление происходит при помощи ВЧ детектора, выход детектора соединен с усилителем (5), таким образом выпрямленный сигнал попадает на операционный усилитель. При необходимости микроконтроллер (6) изменяет коэффициент усиления для получения более точных данных и изменения предела измерительной шкалы. Усиленный сигнал попадает во встроенный в микроконтроллер (6) модуль аналогово-цифрового преобразователя (8), где происходит его преобразование в цифровой формат. Параллельно с этим происходит обработка данных с температурного датчика (9). Перед выдачей результатов измерения на выход устройства через UART модуль (13) происходит перерасчет данных по температуре (компенсируется температурная зависимость МИ элемента), обработанные данные могут быть дополнительно кодированы в необходимый формат и выданы пользователю по последовательному интерфейсу на устройство отображения данных. Микроконтроллер имеет встроенный модуль ЦАП для управления первой катушкой (магнитно-компенсационной) магнитоимпедансного ЧЭ. При помощи этой катушки датчик калибруется и изменяется предел измерительной шкалы [100].

Для уменьшения шумов и повышения точности работы датчика было выделено два режима усиления: «Режим 1» - режим быстрого измерения с коэффициентом усиления от 1 до 10, «Режим 2» - режим измерения с усреднением, коэффициент усиления от 10 до 100. Режим 1 позволяет измерять переменные поля с частотой до 1 кГц и величиной от 0,1Э. С использованием внешнего экранирования Режим 2 позволяет измерять очень слабые величиной до нТ и почти постоянные магнитные поля (с частотой порядка 10 Гц), за счет использования однодоменного провода, большого коэффициента усиления, алгоритма выборки и усреднения в микроконтроллере.

Магнитно-компенсационная катушка выполняет роль генератора магнитного поля, при помощи неё микроконтроллер устанавливает фиксированные значения магнитных полей на измерительном элементе в двух направлениях. При измерении внешнего магнитного поля, включая поле магнитно-компенсационной катушки навстречу измеряемому, становится возможным значительно расширить диапазон измеряемых полей. А в отсутствии сильных внешних магнитных полей при помощи магнитно-компенсационной катушки можно проводить калибровку сенсора.

Для дополнительного расширения температурного диапазона работы датчика до уровня военного или космического применения (Military/Space $-55^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$) необходимо применение блока терморезистора (10) с обратным коэффициентом ТКС. На рисунке 4.8 приведен график температурной зависимости чувствительности выходного

сигнала МИ элемента к внешнему магнитному полю на линейном участке в относительных единицах. Данный чувствительный элемент изготовлен по бескаркасной технологии и прошел термообработку, поэтому он обладает частично скомпенсированной температурной зависимостью. График состоит из двух отрезков: увеличения и уменьшения чувствительности. В главе 3 объяснялось такое поведение ростом механических напряжений на границе стекло-металл в микропроводе [104].

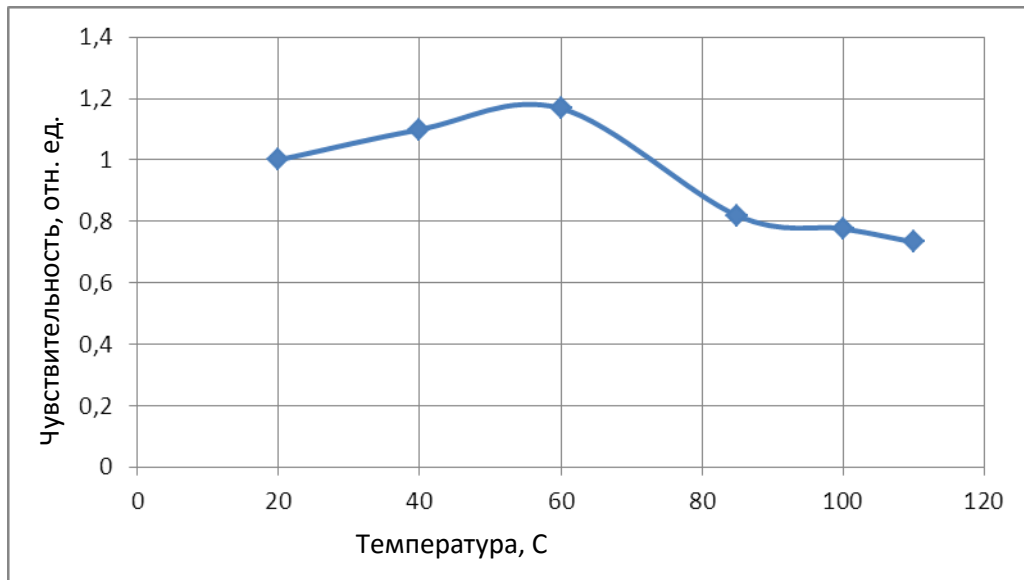


Рисунок 4.8 – Температурная зависимость выходного сигнала бескаркасного ЧЭ после термообработки при частоте возбуждения 20 МГц

Из рисунка 4.8 видно, что в интервале температур от $+60^{\circ}\text{C}$ до $+85^{\circ}\text{C}$ наблюдается наибольший градиент снижения чувствительности, потеря чувствительности на этом участке достигает 40%, она и задает общую тенденцию снижения чувствительности при температуре выше $+80^{\circ}\text{C}$. Стабилизировать процесс измерения магнитных полей МИ датчиком в широком интервале температур можно как математическим, так и физическим путем. Математический вариант заключается в следующем: происходит процесс измерения текущей температуры, в соответствии с которой осуществляется пересчет данных по заранее известному закону (полиному n -го порядка) в реальном времени, этот вариант является наиболее точным, но затрагивает много вычислительных ресурсов датчика. Второй вариант – физический. Прежде всего, с помощью методов отжига можно значительно улучшить температурную стабильность, как обсуждалось в Главе 3. Также можно использовать в установке блок терморезистора последовательно с МИ проводником. Блок терморезистора (рисунок 4.9) состоит из одного полупроводникового терморезистора, одного оксидного терморезистора и одного постоянного

тонкопленочного или чип-резистора. Зависимость сопротивления у полупроводниковых и оксидных терморезисторов от температуры как правило нелинейная. При комбинации двух типов терморезисторов возможно получение общей температурной зависимости с точкой экстремума в районе $+60^{\circ}\text{C}$. При возрастании температуры до $+60^{\circ}\text{C}$ сопротивление блока терморезистора будет увеличиваться, а ток через МИ проводник – уменьшаться, что в свою очередь вызовет уменьшение чувствительности. При температуре свыше $+60^{\circ}\text{C}$ сопротивление блока будет уменьшаться, а ток через МИ проводник – увеличиваться, что в свою очередь вызовет увеличение чувствительности. В результате, температурная зависимость МИ чувствительного элемента будет частично скомпенсирована.

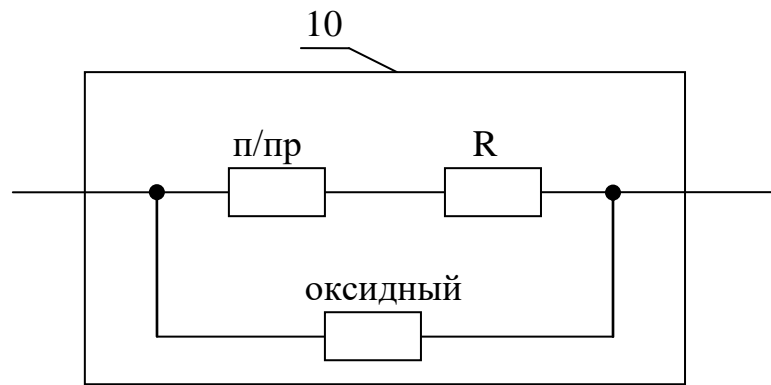


Рисунок 4.9 – Схема блока терморезистора

4.3 Выбор элементной базы для построения датчика

Всю элементную базу согласующего устройства датчика можно условно разделить на 3 основные части: аналоговая часть, цифровая часть и часть электропитания. Все части непосредственно взаимодействуют друг с другом, и неправильная работа одной из частей влияет на работу остальных.

Аналоговая часть состоит из детектора, усилителя, температурного датчика и усилителя постоянного тока, цифровая – из микроконтроллера, питание – из стабилизаторов напряжения и фильтров питания (рисунок 4.4).

4.3.1 Аналоговая часть датчика

Самыми важными элементами аналоговой части являются ВЧ детектор и усилитель, от них зависят такие параметры датчика как погрешность измерений,

температурная стабильность, потребляемая мощность. При выборе детектора необходимо учитывать, что рабочая частота МИ элемента должна попадать в его частотный диапазон, а коэффициент ослабления не должен превышать 5 дБ. Среди всего многообразия усилителей для применения в устройстве датчика наиболее удобным является логарифмический усилитель. Так как он обладает большим усилением при малых значениях входного сигнала, таким образом, повышается разрешающая способность датчика при измерении очень малых магнитных полей, и малым усилением при больших значениях амплитуды входного сигнала. С целью уменьшения габаритов и погрешностей измерения, а также увеличения температурной стабильности целесообразно применить совмещенный детектор-усилитель.

В мобильных телефонах, автомобильных сигнализациях и прочей электронике хорошо зарекомендовали себя ВЧ детекторы-усилители фирмы Analog Device. Данная фирма выпускает более 1000 наименований различных усилителей, для выбора конкретной микросхемы необходимо рассмотреть несколько наиболее подходящих микросхем. После длительной оценки номенклатуры электронных компонентов выбор остановился на AD8319.

Микросхема AD8319. Это полностью законченный демодулирующий логарифмический усилитель, который с высокой точностью преобразует радиочастотный сигнал в диапазоне частот от 0,1 до 2,5 ГГц, подаваемый на его дифференциальный вход, в децибельную форму представления сигнала на его выходе по постоянному току. С несколько меньшей точностью можно использовать в диапазоне частот от 0,01 до 3,5 ГГц. Этот демодулирующий логарифмический усилитель, предназначенный с высокой точностью преобразовывать радиочастотный входной сигнал в соответствующий децибельный выходной сигнал. В основе его структуры лежит метод прогрессивной компрессии, построенный на каскадном включении 5 усилительных ячеек и 6 детекторов, первый из которых работает в пассивном режиме. Микросхема может быть использована для работы в двух режимах — в режиме измерения и режиме управления (в качестве контроллера). AD8319 обеспечивает точное логарифмическое соответствие для сигналов в частотном диапазоне от 1 МГц до 8 ГГц, а также с приемлемой точностью может быть использована на частотах до 10 ГГц. Входной динамический диапазон составляет 40 дБ при стандартном сопротивлении источника входного сигнала величиной 50 Ом. При этом максимальная ошибка вследствие нелинейности характеристики не превосходит ± 1 дБ. Микросхема работает при однополярном напряжении от +3 до +5,5 В при токе потребления 22 мА, который снижается до 200 мкА в режиме блокировки. Малый уровень потребления при относительно высоких значениях собственных характеристик и

параметров позволяет производить экономичные и качественные микросхемы. Структурная схема, приведенная в официальном описании AD8319, показана на рисунке 4.10.

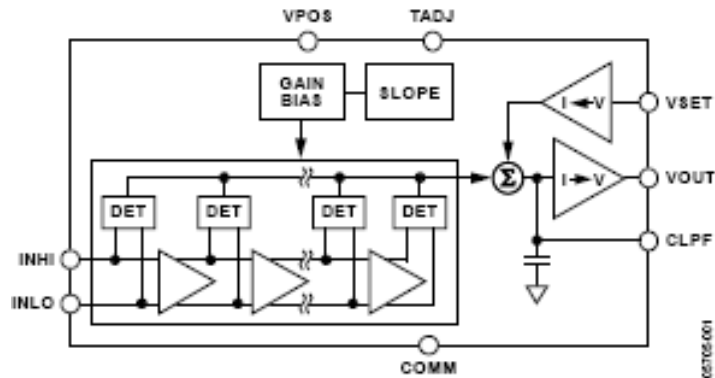


Рисунок 4.10 - Блок-схема AD8319 опубликованная в официальной документации

Наиболее значительное отличие данной микросхемы от AD8318 — это относительно точное отслеживание точки перехвата при изменении температуры во всем динамическом диапазоне 40 дБ. Дополнительным улучшением по сравнению со схемой AD8318 является другое время установления характеристики логарифмического усилителя: время установки импульсной характеристики составляет всего от 8 до 10 нс. Схема входного интерфейса полностью аналогична схеме AD8317 с точностью до величин номиналов элементов. Аналогична и схема выходного интерфейса. Типовая передаточная характеристика AD8319 приведена на рисунке 4.11. Микросхема выпускается в малогабаритном корпусе CSP размером 2 x 3 мм.

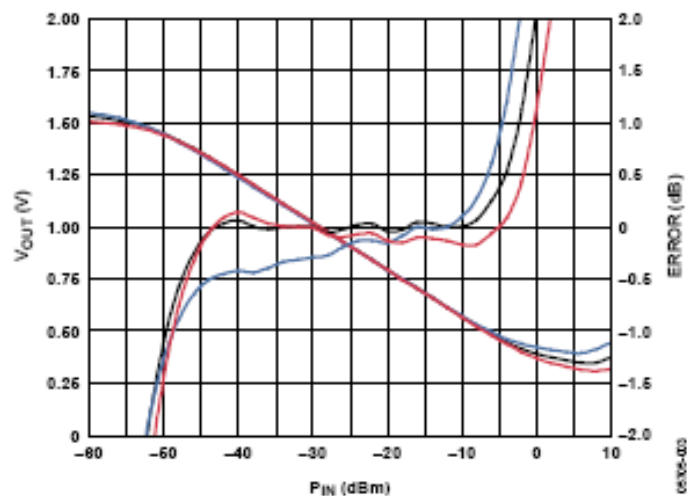


Рисунок 4.11 – Типовая передаточная характеристика AD8319

Наиболее подходящей для применения в миниатюрном устройстве измерения магнитных полей является микросхема AD8319.

Обратная логарифмическая шкала усиления микросхемы AD8319 позволяет проводить калибровку и автоматическую установку «нуля» шкалы с минимальным усложнением схемы и микропрограммы микроконтроллера, а так же улучшить разрешение по полю в области малых магнитных полей. Микросхема имеет вход для подключения цепи обратной связи при помощи которого задается коэффициент усиления.

В официальной документации приведены типовые схемы включения данной микросхемы, учитывая которые получаем схему, показанную на рисунке 4.12

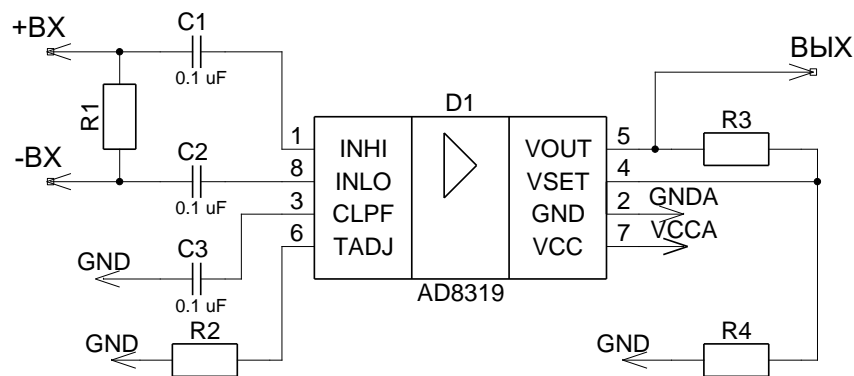


Рисунок 4.12 – Принципиальная электрическая схема включения микросхемы AD8319

4.3.2 Цифровая часть датчика

Для обеспечения правильного функционирования интеллектуального датчика необходимо выбрать наиболее подходящий микроконтроллер из нескольких тысяч наименований, представленными более чем десятью производителями. Основными критериями выбора являются следующие параметры:

1. тактовая частота не менее 20МГц;
2. объем памяти программ не менее 24 кБ;
3. малогабаритные корпуса;
4. обширная встроенная периферия (наличие ШИМ, UART/USB, АЦП, ЦАП);
5. АЦП не менее 12 разрядов, со скоростью не менее 0,4Мсемпла/с;
6. стоимость не более 10 у.е.

Данным критериям соответствуют микроконтроллеры, приведенные в таблице 4.1

Таблица 4.1- Микроконтроллеры и их характеристики

наименование	Частота, МГц	Память программ, кБ	Мин. корпус	Периферия	Стоимость у.е.	Прим.
PIC18F2455 (Microchip)	48	24	QFN44 5x5 мм	SPI, I2C, UART, ШИМ, АЦП, ЦАП	7	
PIC18F4550 (Microchip)	48	32	QFN44 5x5 мм	SPI, I2C, UART, USB, ШИМ, АЦП, ЦАП	9	
STM32F103 (ST microelectronics)	72	64...128	QFPN36 4x4 мм	SPI, I2C, UART, CAN, USB, ШИМ, АЦП, ЦАП	5	
ATMEGA128 (Atmel)	20	128	LQFP48 7x7 мм	SPI, I2C, UART, ШИМ, АЦП, ЦАП	10	
STM32F373 (ST microelectronics)	72	128...256	LQFP48 7x7 мм	SPI, I2C, UART, CAN, USB, ШИМ, АЦП, ЦАП, HDMI	7	
STM32F407 (ST microelectronics)	168	512...1024	BGA100 10x10мм	SPI, I2C, UART, CAN, USB, ШИМ, АЦП, ЦАП	10	
MPS430F149 (Texas Instruments)	20	60	LQFP32 5x5 мм	SPI, I2C, UART, ШИМ, АЦП, ЦАП	6	

Среди рассмотренных микроконтроллеров наилучшим соотношением характеристик обладает STM32F103, поскольку он обладает наилучшим соотношением требуемых параметров.

Данная микросхема представлена широкой линейкой корпусов, встроенной периферии с различными объемами памяти программ. Из линейки STM32f103 для применения в данной разработке был выбран STM32F103T8U7. Микросхема выполнена в корпусе VFQFPN-36 размером 4x4 мм, содержит 64кБ память программ, три 12-ти разрядных АЦП, широтно-импульсный модулятор (ШИМ), стандартные коммуникационные интерфейсы: USB, UART, SPI. Микроконтроллер STM32F103 выпускается в нескольких различных модификациях в линейке стандартных корпусов и с различным объемом памяти программ. В таблице 4.2 приведено несколько исполнений данного микроконтроллера.

Таблица 4.2 - STM32F103 в различных исполнениях

	STM32F103T		STM32F103C		STM32F103R		STM32F103V	
Флешь память, кБ	64	128	64	128	64	128	64	128
ОЗУ, кБ	20		20		20		20	
Таймеры	3		3		3		3	
SPI	1		2		2		2	
I2C	1		2		2		2	
USART	2		3		3		3	
USB	1		1		1		1	
CAN	1		1		1		1	
GPIO	26		37		51		80	
ADC (12 бит)	2/ 10кан		2/ 10кан		2/ 16кан		2/ 16кан	
Частота системной шины	72МГц							
Напряжение питания	2,0...3,6В							
Интервал рабочих температур	-40...+105С (расширенный) -40...+85С (стандартный)							
Корпус	VFQFP36		LQFP48, UFQFP48		LQFP64, TFBGA64		LQFP100, LFBGA100, UFBGA100	
Габариты	6x6мм		7x7мм 7x7мм		10x10мм 5x5мм		14x14мм 7x7мм 7x7мм	
Стоимость								

4.3.3 Организация питания

Построение схемы распределения питания зависит от требований остальных узлов данного устройства. Аналоговая часть (детектор-усилитель) питается напряжением от 3 В до 5,5 В, а микроконтроллер от 3 В до 3,6 В. С целью упрощения схемы был выбран номинал напряжения питания 3,3 В как цифровой части так и аналоговой. Поскольку устройство собирается в миниатюрном корпусе и токи потребления по цифровому и аналоговому питанию малы (менее 10 мА и менее 5 мА соответственно) а так же для уменьшения шумов в аналоговой части были выбраны линейные малогабаритные стабилизаторы напряжения ST6206 с выходным напряжением 3,3 В. Основные характеристики стабилизатора приведены в таблице 4.3. В схеме применено два одинаковых линейных стабилизатора ST6206 для организации питания аналоговой и цифровой частей.

Таблица 4.3 - Основные электрические параметры ST6206

Наименование параметра	Величина	Ед. измерения
Входное напряжение	3,6...7,0	В
Выходное напряжение	3,30	В
Нелинейность	2	%
Собственный ток потребления	3	мкА
Максимальный выходной ток	250	мА
Температурный диапазон работы	-40...+85	С

Микросхемы стабилизаторов напряжения включены по типовой схеме в соответствии с рекомендациями производителя, рисунок 4.13

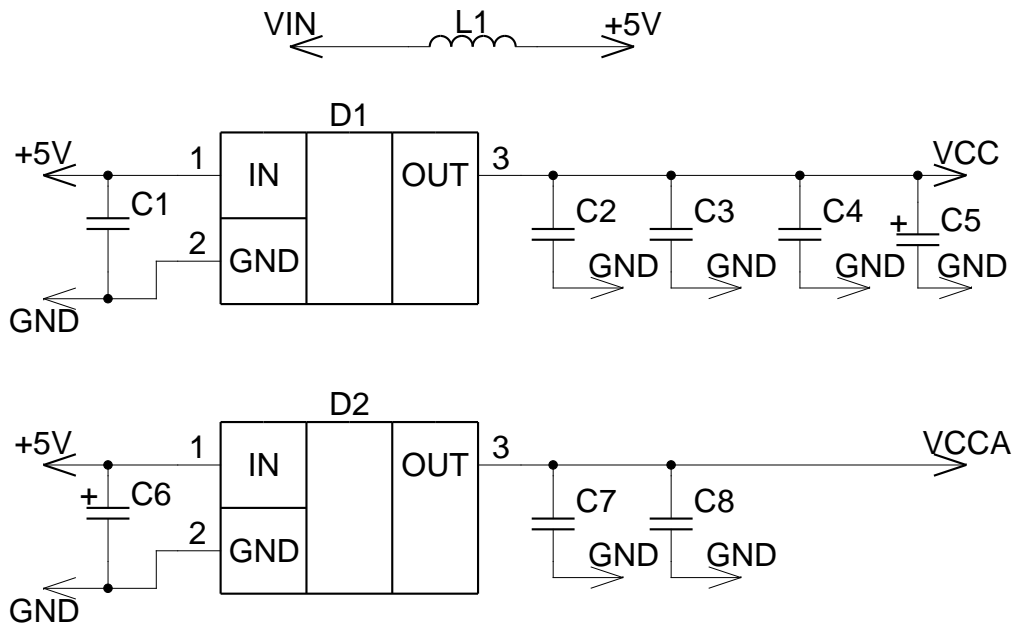


Рисунок 4.13 – Схема электрическая принципиальная включения микросхемы ST6206

4.4 Построение общей схемы, трассировка, технология изготовления

На основе рассмотренной ранее блок-схемы (рисунок 4.7) разработанного чувствительного элемента и выбранных электро- радио изделий (компонентов) можно построить общую электрическую принципиальную схему магнитоимпедансного датчика. Схема состоит из основных трех частей, рассмотренных ранее: аналоговая часть, цифровая часть, организация питания. Электрическая принципиальная схема приведена на формате А3 в приложении А1, перечень элементов приведен в приложении А2.

Принцип работы схемы МИ датчика.

Микроконтроллер при помощи встроенного широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и портов ввода/вывода формирует необходимый сигнал возбуждения для магнитоимпедансного чувствительного элемента. Выходной сигнал чувствительного элемента демодулируется и усиливается при помощи специализированной микросхемы, что позволяет существенно снизить габариты устройства, повысить точность измерений и снизить конечную себестоимость продукта. Применение диодного демодулятора при данном построении схемы невозможно из-за нелинейности начального участка вольт-амперной характеристики полупроводникового диода. Демодулированный и усиленный сигнал поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Так же на микроконтроллер заведена обратная связь усилителя, для выбора коэффициента усиления. Микроконтроллер проводит анализ полученных данных, по результатам которых может менять режим возбуждения, коэффициент усиления или включать подмагничивание при помощи дополнительной катушки МИ чувствительного элемента. Корректные данные микроконтроллер пересчитывает в реальные единицы измерения по специальным формулам пересчета, которые заложены в программное обеспечение МИ интеллектуального датчика. Вывод информации осуществляется через UART или USB интерфейсы. Вывод информации осуществляется в пакетном режиме с подсчетом контрольной суммы по алгоритму приведенному в описании программного обеспечения. На рисунках 4.14 а, б, в показана печатная плата МИ датчика.

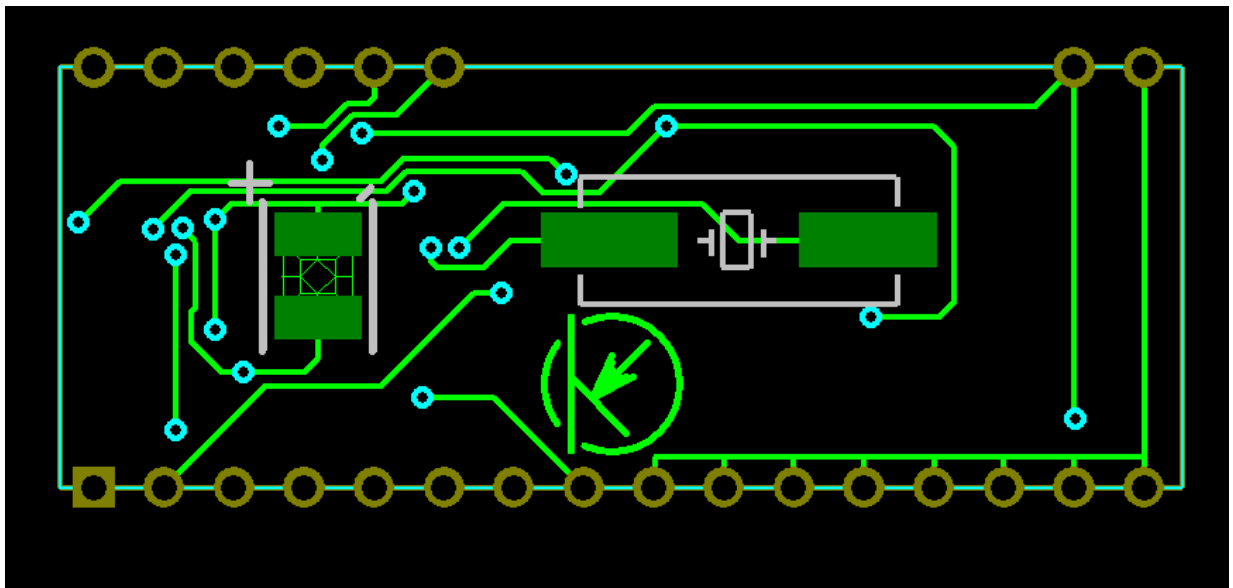


Рисунок 4.14 а – Топология печатной платы, сторона 1

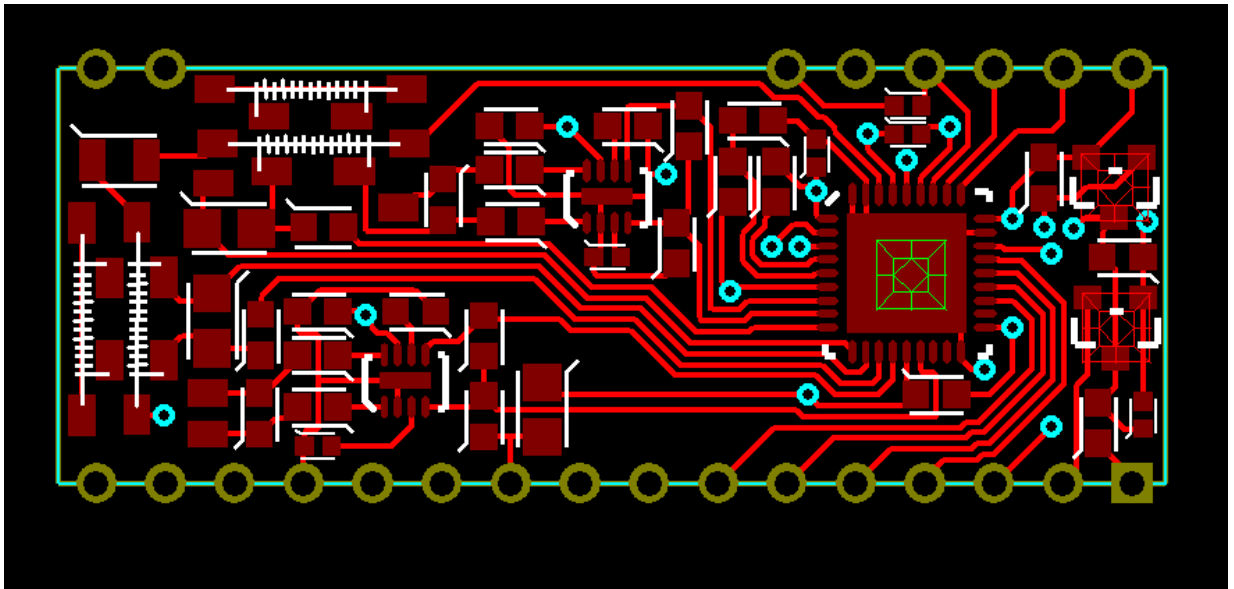


Рисунок 4.14 б – Топология печатной платы, сторона 2

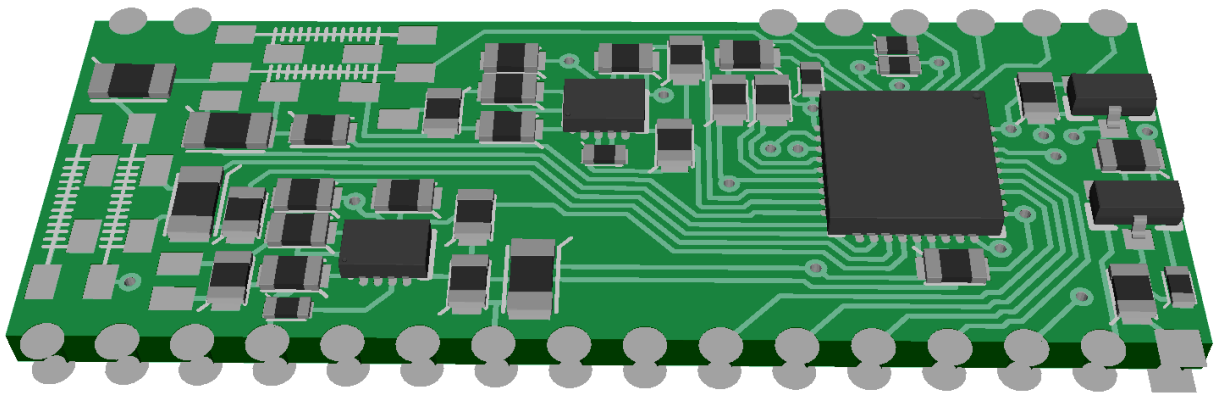


Рисунок 4.14 в – 3-D модель печатной платы магнитоимпедансного датчика

4.5 Принципы и возможности интеллектуализации МИ датчиков

Идеальная интеллектуальная структура на основании показаний датчиков оценивает внешние условия и учитывает свое собственное состояние. Необходимыми условиями такого поведения являются способности получать информацию и реагировать, что аналогично способности живых организмов чувствовать и двигаться. Такие возможности могут быть заложены в сенсоры и электромеханические преобразователи, они должны быть встроены в конструкцию еще на стадии проектирования. [105]

Интеллектуальный датчик – датчик способный подстраиваться под изменения внешней среды, изменения параметров измеряемого сигнала (величины). Такой датчик обладает достаточным логическим функционалом для принятия необходимых решений по

регулировке предела измерения, пересчета данных с поправкой на температуру и другими функциями, требующими математических вычислений и сложного логического анализа.

Интеллектуальные датчики-это новое направление в разработке и производстве датчиков, объединяющее в себе, помимо материаловедения, такие сферы как микроэлектроника, микросистемная техника и программирование.

Эти датчики становятся всё более востребованными, поскольку позволяют упростить процесс разработки изделий с их применением, а также позволяют обеспечить распределение вычислительных ресурсов, тем самым увеличить производительность изделия и снизить его потребление электроэнергии. Они хорошо зарекомендовали себя в автомобилестроении, мобильных технологиях (мобильные телефоны, планшеты, ноутбуки), авиации и космонавтики.

Центральной частью датчика является микроконтроллер, который управляет чувствительными элементами, производит их калибровку и собирает с них информацию, проводит анализ полученной информации и выдаёт её пользователю, а также может являться интеллектуальным ядром датчика. В данной разработке для минимизации габаритов микроконтроллер генерирует сигнал возбуждения для МИ чувствительного элемента. К достоинствам такой реализации можно отнести малый ток потребления и минимальные масса-габаритные показатели, к недостаткам – относительно не высокая частота возбуждающего сигнала, обычно не превышающая 20 или 30 МГц. Микроконтроллер может оценивать внешние факторы, воздействующие на датчик, и подстраивает под них его работу, а также позволяет проводить математическую обработку данных, самодиагностику и авто-калибровку, передавать данные пользователю в удобном для него виде. Для его работы необходима разработка программного обеспечения. Программное обеспечение задаёт «величину интеллекта» и определяет все функции и алгоритмы обработки данных внутри датчика.

«Величина интеллекта» влияет непосредственно на необходимый объем памяти программ, объем оперативной памяти и тактовую частоту ядра микроконтроллера, поэтому к выбору микроконтроллера нужно подходить более внимательно, учитывая предполагаемые ресурсы программного обеспечения.

Программное обеспечение в современных микроконтроллерах может включать в себя, помимо простых логических операций, сложный математический пересчет (возведение в степень, вычисление логарифмов, вычисление полинома N-го порядка и т.д.) выполняемых в реальном времени. Выполнение всех математических и логических операций в реальном времени является обязательным требованием, предъявляемым к интеллектуальным датчикам.

Разработка интеллектуального программного обеспечения в силу своей сложности должна проводиться на языках высокого уровня (С, С++) с возможностью применения готовых библиотек, что значительно упрощает работу со встроенными периферийными модулями микроконтроллера и ускоряет процесс разработки и отладки программного обеспечения.

Развитие интеллектуальных датчиков не стоит на месте. В настоящее время сформировано три основных тенденции в развитии интеллектуальных датчиков и технологий:

- миниатюризация габаритов;
- наращивание вычислительных мощностей;
- переход к беспроводным технологиям и облачным технологиям.

На сегодняшний день размер кристалла самого миниатюрного интеллектуального датчика составляет 1,5x1,5 мм (DS18B20 – датчик температуры). А вычислительные мощности новейших сенсоров, построенных на современном ARM ядре, превышают 100 миллионов операций в секунду. На автосалоне в Женеве 2016 компания Mercedes-Benz анонсировала применение новых интеллектуальных беспроводных сенсоров в автоэлектронике и переход к облачным технологиям.

4.6 Разработка программного обеспечения (ПО)

Разработка программного обеспечения осуществлялась в средах разработки KEIL6 и STM Cube на языке С, с применением готовых библиотек «HAL».

Довольно сложную программу микроконтроллера целесообразно разделить на 3 или 4 функциональных блок-схемы, каждая из которых состоит из более простых операций.

Общая структура блок-схемы ПО показана на рисунке 4.15. Сразу после включения питания начинается загрузка микроконтроллера. После завершения загрузки микроконтроллер переходит к работе с основным циклом, который замкнут в бесконечном цикле, «отвлекаясь» только на прерывание (прием и обработка данных от пользователя для изменения настроек).

Блок-схема загрузки показана на рисунке 4.16. Загрузка начинается с инициализации портов и внутренних модулей микроконтроллера (5), после чего микроконтроллер включает всю периферию (6): выдает сигнал возбуждения МИ элементу, замыкает ключи настройки режима, включает усилитель и температурный датчик. Далее происходит калибровка встроенного аналогово-цифрового преобразователя

(АЦП) (7). Следующим шагом микроконтроллер выполняет калибровку МИ элемента (8) при помощи встроенной в него второй катушки. На последнем этапе загрузки происходит чтение из внутренней памяти микроконтроллера и установка последних или исходных настроек (9).

На рисунке 4.17 приведена блок-схема прерывания для приема данных.

Упрощенная блок-схема основного цикла программы логико-математической работы микроконтроллера изображена на рисунке 4.18. Основной цикл начинается с оцифровки аналоговых данных (10) от МИ элемента, температурного датчика и других вспомогательных параметров. Затем следует их логический анализ (11) проверяется правильность установленных настроек усилителя, предела измерения шкалы МИ элемента и контрольных параметров, далее происходит ветвление алгоритма (12). В случае если данные не корректны, происходит изменение параметров настроек (13) при помощи обратных связей микроконтроллера с усилителем и чувствительным элементом, считается число некорректно полученных данных, если оно кратно 5, то происходит сброс настроек и калибровка МИ чувствительного элемента, с последующим возвратом в начало цикла. Если число равно 15, происходит полная перезагрузка датчика (15). Во всех остальных случаях некорректного приема данных происходит изменение настроек сенсора через обратные связи (13), наращивание счетчика (16) и возврат в начало основного цикла. В случае если данные корректны следующим шагом микроконтроллер обнуляет счетчик некорректных данных, измеряет текущую температуру пересчитывает данные (14) компенсируя температурную зависимость МИ элемента и логарифмическую шкалу усиления, после чего микроконтроллер подвергает данные кодированию и передает их пользователю (15). Затем данный цикл повторяется.

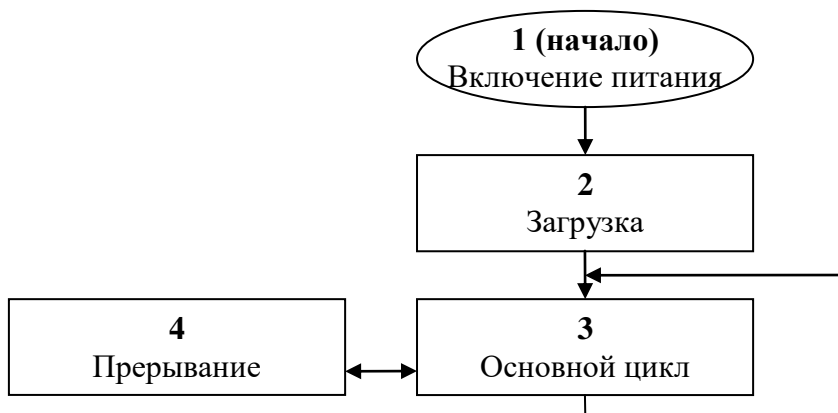


Рисунок 4.15 – Общая блок схема ПО

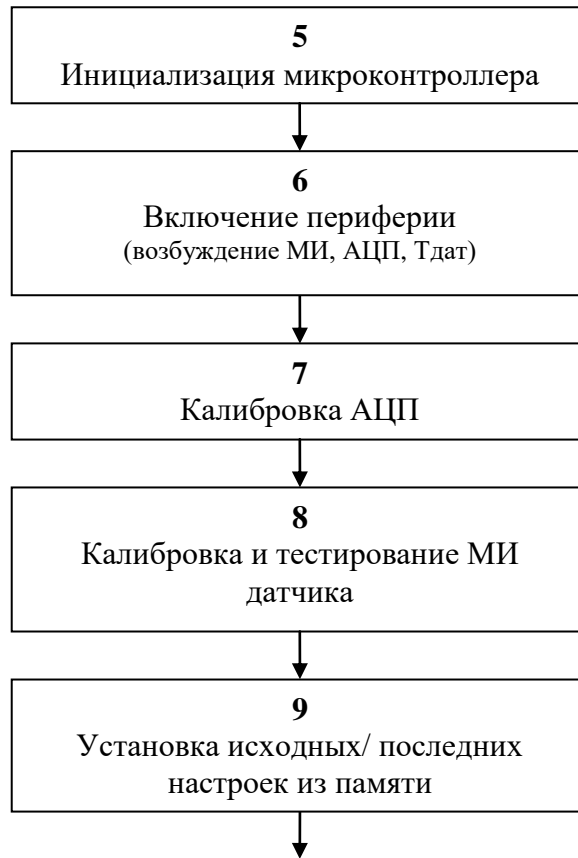


Рисунок 4.16 – Блок-схема загрузки

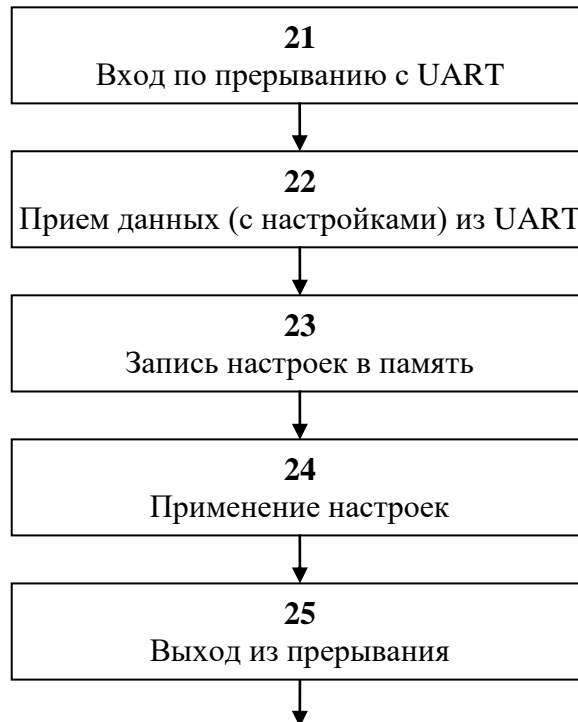


Рисунок 4.17 – Блок-схема прерывания



Рисунок 4.18 – Блок-схема основного цикла

Пересчет данных осуществляется по полиному 4-го порядка с двумя переменными, полученному из полевой и температурной характеристик датчика при его калибровке. Применение логарифмической шкалы усиления позволяет более точно измерять очень слабые магнитные поля (менее 0,1 Э), при этом общий диапазон измерительной шкалы не сокращается. Полинома 4-го порядка с двумя переменными достаточно для описания функций обратного логарифмического усиления усилителя и температурной нестабильности измерений МИ чувствительного элемента.

Кодирование данных перед их выдачей необходимо для контроля достоверной передачи их пользователю. Оно заключается в установке меток синхронизации и подсчете контрольной суммы. Данные (рисунок 4.19) состоят из последовательности: заголовок, длина пакета, слова данных, младшим вперед, в конце добавляется контрольная сумма по пакету. Заголовок является константой наименее повторяющейся в массиве данных, длина пакета тоже константа указывающая на число байт данных в массиве слов. Каждое слово (рисунок 4.20) состоит из 2 байт, первый байт старший. Контрольная сумма вычисляется по сумме всех байт-данных в словах плюс длина пакета.

Заголовок (FF)	Длина пакета (2N)	Слово1	...	Слово N	КС
----------------	-------------------	--------	-----	---------	----

Рисунок 4.19 – Пакет данных

Ст. бит				мл				ст				мл			
3	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ст. байт								Мл. байт							
X – оцифрованное значение.															
3 – знаковый разряд (0→+, 1→-).															

Рисунок 4.20 - Слово данных

Пользователь (компьютер, вычислитель, метрологическая система), приняв пакет данных, определяет синхрометку, одновременно сам вычисляет контрольную сумму, которую затем сравнивает с полученной в пакете данных. В случае их совпадения передает пакет данных далее в работу.

В случае работы с дисплеем или индикатором на короткой линии подсчета контрольной суммы не требуется, а кодирование осуществляется в соответствии с описанием работы дисплея или индикатора.

Интерфейс UART работает на скорости 115200 б/с, 1 стартовый бит и 1 стоповый без контроля чётности, с уровнем логической единицы 3,3В. Интерфейс USB работает в

режиме USB-UART моста на скорости 115200 б/с, 1 стартовый бит и 1 стоповый без контроля чётности. Драйвер для работы по USB интерфейсу USB-UART от ST Microelectronics.

4.7 Работа МИ датчика

По указанной выше технологии был изготовлен прототип магнитоимпедансного (МИ) датчика. Корпусированный вариант МИ датчика выполнен в стандартном корпусе DIP-40 и показан на рисунке 4.21. Напряжение питания МИ датчика 5В, максимальный ток потребления в режиме с максимальной частотой дискретизации не превышает 200мА.

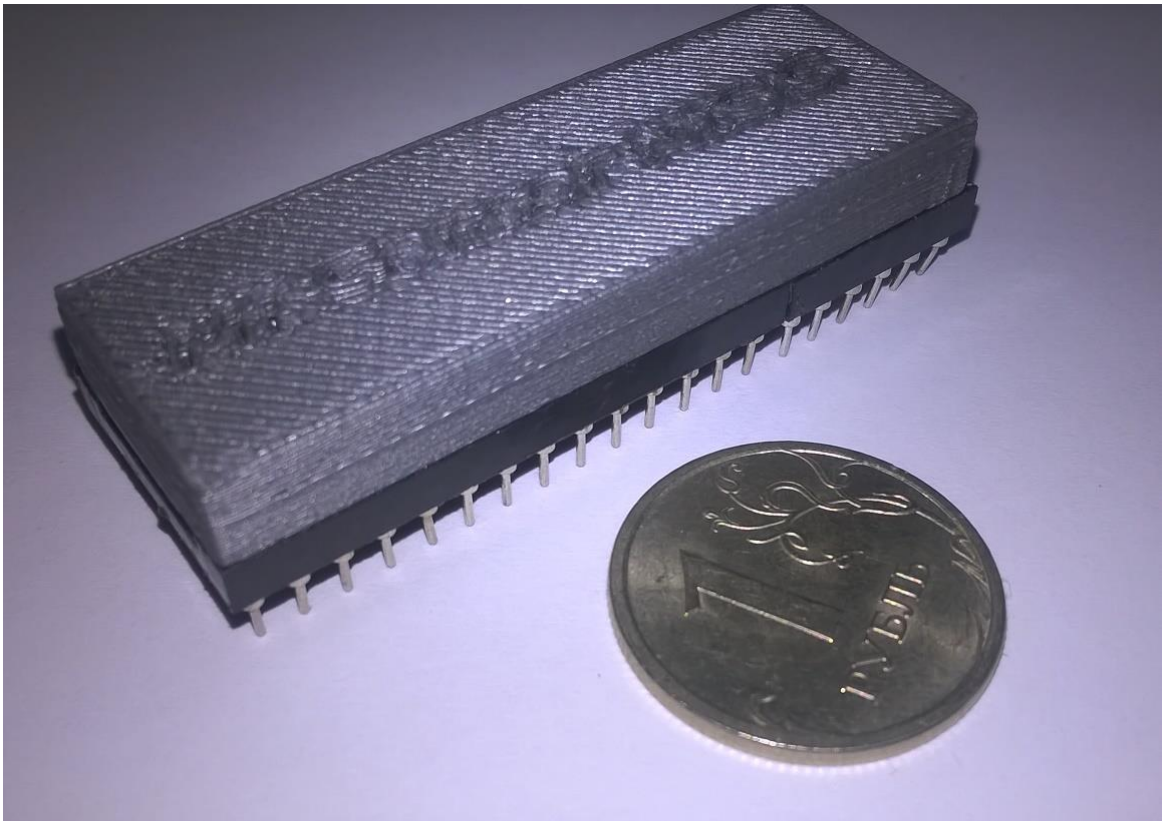


Рисунок 4.21 – Корпусированный вариант МИ датчика

Для графической визуализации данных, передаваемых МИ датчиком в компьютер, была разработана программа графического отображения данных в реальном времени. Программа производит отображение полученных данных во времени.

Калибровка датчика проводится в экранированном от внешних магнитных полей пространстве при помощи встроенной компенсационной катушки. Датчик пропускает через катушку импульсный ток с различными значениями, который создаёт эталонное

импульсное поле, по полученным данным определяются коэффициенты для полинома пересчета данных, которые хранятся в регистрах энергонезависимой памяти датчика.

Проверка работы МИ датчика. Датчик подключили к компьютеру через интерфейс USB, питание датчика также осуществлялось посредством USB интерфейса. Исходное положение датчика - перпендикулярно магнитному полю земли. Далее датчик развернули на 180° , ось вращения ортогональна магнитному полю. На рисунке 4.22 приведен график измерения магнитного поля земли МИ датчиком в графическом виде.

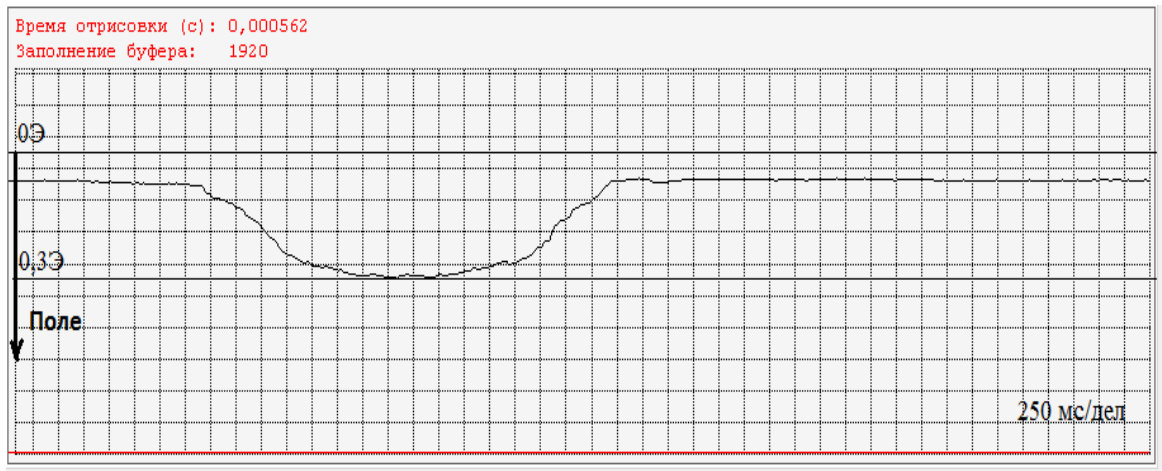


Рисунок 4.22 – График измерения магнитного поля земли МИ датчиком в графическом виде

В другом эксперименте исходное положение датчика так же перпендикулярно магнитному полю земли, а на расстоянии 5 см расположен проводник, по которому пропускали постоянный ток величиной 10 мА, импульсами с частотой 4 Гц. На рисунке 4.23 приведен график измерения магнитного поля проводника в реальном времени в графическом виде.

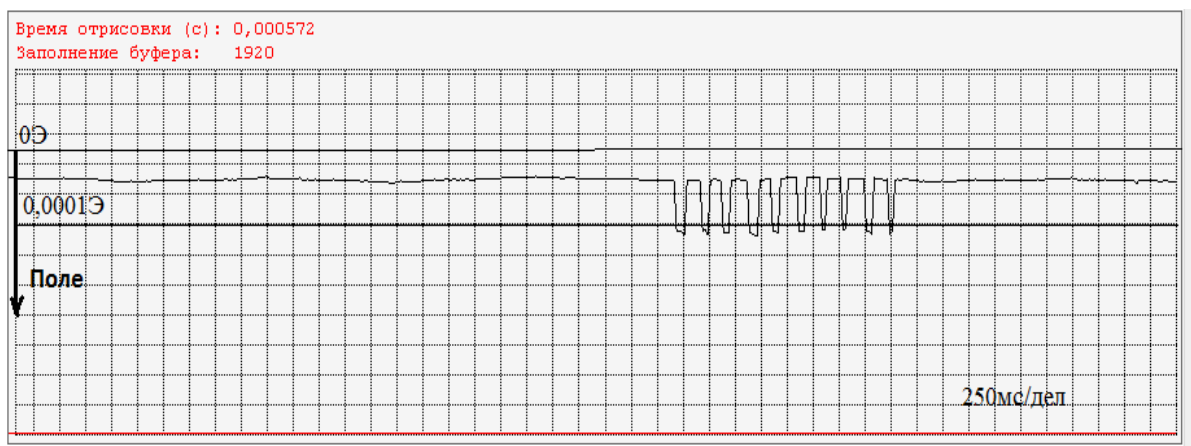


Рисунок 4.23 – График измерения магнитного поля проводника в графическом виде

4.8 Выводы по главе

В данной главе рассмотрены технологии построения датчиков с использованием МИ чувствительных элементов, приведены принципиальные схемы и конструкции магнитоимпедансных чувствительных элементов на основе микропроводов в недиагональной конфигурации, а также основные модули датчика магнитного поля с использованием МИ. При разработке конструкций удалось добиться не только высоких технических показателей, таких как чувствительность, энергопотребление, линейность, но и хороших технологических свойств (миниатюрные размеры, стандартная элементная база, прогнозируемая простота массового производства, низкая себестоимость) показателей. Рассмотрено несколько вариантов компенсации остаточной температурной зависимости, которые позволяют её полностью устранить.

Приведен обзор существующих решений построения датчиков с использованием МИ чувствительных элементов и предложена усовершенствованная модель МИ датчика для регистрации слабых локальных магнитных полей. Был проведен обзор современной электронной компонентной базы, подходящей для применений в миниатюрных датчиках. По результатам сравнительного анализа были выбраны необходимые компоненты, построена принципиальная схема и разработана топология печатной платы и 3-D модель датчика. Особенностью предлагаемой схемы является использование микроконтроллера как для возбуждения МИ элемента, так и для управления работой датчика. Это потребовало разработки программного обеспечения микроконтроллера, входящего в состав датчика.

В заключительной части четвертой главы приведены результаты измерений магнитных полей разработанным в настоящей работе МИ датчиком.

Заключение

В представленной диссертационной работе рассматриваются существующие и предлагаются новые методы управления свойствами аморфных микропроводов для высокочувствительных датчиков магнитного поля. Изучены принципы построения высокочувствительных магнитных датчиков с использованием МИ элементов, и предложены способы увеличения чувствительности, миниатюризации и интеллектуализации датчиков. Диссертация так же содержит теоретические основы МИ эффекта и новые подходы к изучению недиагонального МИ эффекта в составе чувствительного элемента датчика.

Основные результаты, полученные в работе, заключаются в следующем.

1. Предложена и исследована термомагнитная обработка микропроводов в составе чувствительного элемента для модификации их структурных свойств. Такая обработка позволяет частично снять внутренние механические напряжения в микропроводе, возникающие при затвердевании расплава, а также напряжения, приобретенные в процессе сборки сенсора.
2. Разработана методика измерения температурных зависимостей импедансных характеристик ЧЭ для различных вариантов его конструкции, проведено исследование этих зависимостей и предложены физические, физико-математические и электронные варианты температурной компенсации.
3. Разработан и собран магнитный стенд для проведения исследований свойств чувствительных элементов МИ датчиков. Обоснованы технические характеристики и принципы работы стенда.
4. Изучен недиагональный магнитный импеданс в микропроводах с наведенной геликоидальной анизотропией и предложен метод компенсации «offset», возникающий из-за отклонения анизотропии от циркулярного направления. Этот метод позволяет корректировать полевую характеристику датчика для выполнения точной калибровки.
5. Предложен много проводной недиагональный МИ чувствительный элемент, позволяющий увеличить максимум выходного сигнала при сохранении чувствительности, то есть расширить динамический диапазон.
6. Предложен двухпроводной и дифференциальный чувствительный элемент, получен патент RU2582488 на данную разработку (заявка №2015107590/28). Дифференциальный чувствительный элемент компенсирует наведенные электромагнитные помехи, что позволяет значительно повысить соотношение сигнал/шум.

7. Разработан и смонтирован стенд для изготовления бескаркасных чувствительных элементов на основе аморфных микропроводов. При помощи данного стенда были изготовлены все бескаркасные чувствительные элементы, исследованные в данной работе.
8. Предложен резонансный метод возбуждения, позволяющий резко повысить соотношение (вольт/Э) на один виток. Получен патент RU2549843 (заявка №2013149967/28). Увеличение чувствительности происходит за счет минимизации потерь энергии внутри детектирующего контура чувствительного элемента (ЧЭ) при совпадении частоты возбуждения ЧЭ и резонансной частоты внутреннего контура.
9. Разработана конструкция миниатюрного интеллектуального магнитоимпедансного сенсора. Получен патент RU2582488 на данную разработку (заявка №2015107590/28). В основе конструкции лежит несколько дифференциальных чувствительных элементов, ВЧ усилитель-детектор и микроконтроллер с интеллектуальным ПО. Применение такой конструкции позволило в значительной мере сократить габариты и массу, увеличить чувствительность и помехозащищенность.
10. Разработано интеллектуальное программное обеспечение для описанного в работе датчика. Программное обеспечение оценивает внешние воздействия (температура, магнитное поле и скорость его изменения) и подстраивает работу датчика под внешнее воздействие.
11. По описанной в работе технологии изготовлено несколько прототипов интеллектуальных магнитных датчиков, которые по своим техническим данным и свойствам находятся на уровне мировых аналогов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЧЭ – чувствительный элемент

МИ – магнитный импеданс

АММ – аморфные магнитомягкие материалы

ИД – интеллектуальный датчик

ГМИ –гигантский магнитный импеданс

ЭДС – электро-движущая сила

ТКС – температурный коэффициент сопротивления

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ШИМ – широтно-импульсный преобразователь

ВЧ – высокие частоты

П/Пр – полупроводниковый

ПК – персональный компьютер

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

УПТ – усилитель постоянного тока

UART – universal asynchronous receiver-transmitter (универсальный асинхронный приемо-передатчик)

USB – universal serial bus (универсальная последовательная шина)

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Н. А. Юданов, А. Т. Морченко, Л.В. Панина, В. Г. Костишин, С. А. Евстигнеева. Влияние отжига на недиагональный магнитоимпеданс в аморфных проводах // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2015, т. 18, № 3. С. 201—204.
2. N.A. Yudanov , L.V. Panina, A.T. Morchenko, V.G. Kostishyn, P.A. Ryapolov. High Sensitivity Magnetic Sensors Based on Off-diagonal Magnetoimpedance in Amorphous FeCoSiB Wires //J. of Nano- and Electronic Physics, 2013, vol. 5, No 4, 04001(4pp).
3. L.V. Panina, N.A. Yudanov, A.T. Morchenko, V.G. Kostishyn, D. P. Makhnovskiy. Off-diagonal magnetoimpedance (MI) in amorphous microwires for low-field magnetic sensors // Phys. Status Solidi, 2016, v. 105, No 3, p. 341-349.
4. N.A. Yudanov, L.V. Panina, A.T. Morchenko, V.G. Kostishyn, P.A. Ryapolov. High Sensitivity Magnetic Sensors Based on Off-diagonal Magnetoimpedance in Amorphous FeCoSiB Wires // J. of Nano- and Electronic Physics, 2013, vol. 5, No 4, 04001(4pp).
5. N.A. Yudanov, S.A. Evstigneeva, L.V. Panina, A.T. Morchenko, A. Zhukov, X.H. Peng. Temperature dependence of the off-diagonal magnetoimpedance in sensor configuration utilizing co-rich amorphous wires // Phys. Status Solidi, 2016, v. 105, No 3, p. 372-376.
6. N.A. Yudanov, A.A. Rudyonok, L.V. Panina, A.T. Morchenko, A.V. Kolesnikov, V.G. Kostishin. Effect of bias fields on off-diagonal magnetoimpedance (MI) sensor performance // J. Nano- and Electronic Phys., 2014, v. 6, No 3, p. 03046 (4 pp).
7. A. A. Rudenok, A. T. Morchenko, A. Zhukov, N. A. Yudanov, L.V. Panina, D. P. Makhnovskiy. Multicore off-diagonal magnetoimpedance sensors utilising amorphous wires // Phys. Procedia, 2015, v. 75, p. 1875-3892.
8. N.A. Yudanov, A.A. Rudyonok, L.V. Panina, A.T. Morchenko, A.V. Kolesnikov, V.G. Kostishin. Off-diagonal magnetoimpedance in amorphous wires and its application in miniature sensors of weak magnetic fields // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2014, v. 78, No 11, p. 1169–1173.
9. Н.А. Юданов, А.А. Рудёнок, Л.В. Панина, А.Т. Морченко, А.В. Колесников, В.Г. Костишин. Недиagonalный магнитоимпеданс в аморфных проводах и его применение в миниатюрных сенсорах слабых магнитных полей // Известия РАН. Серия физическая, 2014, т.- 78, № 11, с. 1438–1442.

10. Л.В. Панина, Н.А. Юданов, А.Т. Морченко, В.Г. Костишин, Д.Г. Крутогин, А.А. Рудёнок. Использование явления недиагонального магнитоимпеданса для построения датчиков слабых магнитных полей и токов // Физико-Химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Межвуз. сб.науч.тр. Вып.5, стр. 210-218. - Тверь, 2013.
11. Н.А. Юданов, А.А. Рудёнок, А.В. Колесников, Л.В. Панина, А.Т. Морченко, В.Г. Костишин Влияние полей смещения на характеристики датчиков на основе недиагонального магнитного импеданса // Труды XI Международной научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Курск 13-14 мая 2014 г., Ч.2. – С. 388-397.
12. Н.А. Юданов, Л.В. Панина, А.Т. Морченко, В.Г. Костишин, Евстигнеева С.А. Температурная зависимость недиагонального магнитоимпеданса (МИ) в аморфных проводках и магнитных сенсорах слабых магнитных полей // XII Международная научная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Казахстан, Усть-Каменогорск 2015, 20 – 23 мая. Часть 2, стр. 461.
13. N.A. Yudanov, A.A. Rudyonok, A.T. Morchenko, L.V. Panina. Off-diagonal magnetoimpedance sensor in multicore configuration // Moscow International Symposium on Magnetism MISM – 2014, 29 June - 3 July 2014. Book of Abstracts, p. 563.
14. А.А. Рудёнок, М.Г. Серёгин, Н.А. Юданов. Анализ рабочей характеристики датчика на основе эффекта гигантского магнитоимпеданса // 69-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва 2014г.
15. Р.Ю. Расулов, А.А. Рудёнок, Н.А. Юданов. Характеристики магнитоимпедансных датчиков в переменных магнитных полях // 69-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва 2014г.
16. С.А. Евстигнеева, Н.А. Юданов. Анализ характеристик температурной восприимчивости датчиков на основе эффекта гигантского магнитоимпеданса. 70-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва 2015 г.

17. Н.А. Юданов, С.А. Евстигнеева, А.Т. Морченко, Л.В. Панина, В.Г. Костишин
Характеристики магнитоимпедансных датчиков в переменных и поперечных
магнитных полях // 6-я Международная Конференция «Кристаллофизика и
деформационное поведение перспективных материалов», 26-28 мая 2015 г.
Тезисы докладов. – М., 2015. – С. 340.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дорощева Е.А., Проношин А.Ф. “О формировании магнитной анизотропии и доменной структуры в аморфных металлических сплавах”. ФММ, 54 (1982) 946-952.
2. Tsuei C.C., Lilienthal H. “Magnetization distribution in amorphous ferromagnet”. Phys. Rev., B 13 (1976) 4899-4901.
3. Inoue A., Makino A., Mazushima T. “Ferromagnetic bulk glassy alloys”. J. Magn. Magn. Mater., 215-216 (2000) 246-252.
4. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. “Аморфные металлы”. М., Metallurgia, (1987) 25-28.
5. Faxiang Qin, Hua-Xin Peng “Ferromagnetic microwires enabled multifunctional composite materials”. Progress in Materials Science, 58 (2013) 181-259.
6. Hasegawa R. “Present status of amorphous soft magnetic alloys”. J. Magn. Magn. Mater., 215-216 (2000) 240-245.
7. Wright J.G. “Amorphous transition metal films”. IEEE Trans. Magn., 12 (1976) 95-99.
8. Sato Turtell R., Holzer D., Grossinger R., Sassik H., Pillmayer N. “Low-temperature hardening of coercivity of amorphous alloys”. J. Magn. Magn. Mater., 226-230 (2001) 1496-1497.
9. Hika K., Panina L.V., Mohri K. “Magneto-Impedance in Sandwich Film for Magnetic Sensor Heads”. IEEE Trans Magn, 32 5 (1996) 4594-4596.
10. Bushida K., Mohri K., Uchiyama T. “Sensitive and quick response micro magnetic sensor using amorphous wire MI element Colpitts oscillator”. IEEE Trans Magn, 31 6 (1995) 3134-3136.
11. Kronmuller H. “Magnetic properties of amorphous ferromagnetic alloys”. J. Magn. Magn. Mater., (1979) 53-65.
12. Abe Y., Miyazawa K., Nakamura M., Ohashi. T. “Behavior of metal jet in the in-rotating-water spinning method”. ISIJ, 27 12 (1987) 929-935.
13. Ulitovski A.V., Avernin N.M. “Method of fabrication of metallic microwire”. Patent No 161325 (USSR), Bulletin, 7 (1964) .
14. Умнов П.П., Молоканов В.В., Шалимов Ю.С., Умнова Н.В., Чуева Т.Р., Заболотный В.Т. “Особенности получения аморфного провода методом Улитовского-Тейлора с использованием варианта непрерывного процесса литья”. Перспективные материалы, 2 (2010) 87.
15. Taylor G.F. “A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses”. Phys. Rev., 23 5 (1924) 655-660.
16. Ulitovski A.V., Maianiski I.M., Avramenco A.I. “Method of continuous casting of glass coated microwire”. Patent No 128427 (USSR), Bulletin, 10 (1960) 14.

17. Шалыгина Е.Е., Родионова В.В., Умнова Н.В., Умнов П.П., Молоканов В.В., Шалыгин А.Н., Рожновская А.А. “Особенности магнитных свойств «толстых» микропроводов, полученных методом Улитовского-Тейлора”. ФТТ, 54 2 (2012) 271-276.
18. Usov N., Antonov A., Dykhne A., Lagar'kov A. “Possible origin for the bamboo domain structure in Co-rich amorphous wires”. J. Magn. Magn. Mater., 174 (1997) 127-132.
19. Gargill G.S., Cochrane R.W. “Amorphous cobalt phosphorus alloys: atomic arrangement and magnetic properties”. J. de Phys., 35 (1974) C4-269 - C4-278.
20. Сокол-Кутыловский О.Л. Исследование магнитоупругих свойств аморфных ферромагнетиков с целью их применения в магнитных и механических датчиках: докт. дис. – Екатеринбург, 1997.
21. Yamasaki J., Humphrey F.B., Morhi K., Kawamura H., Takamura H. “Large Barkhausen discontinuities in Co-based amorphous wires with negative magnetostriction”. J. Appl. Phys., 63 (1988) 3949-3951.
22. Nderu N., Yamasaki J., Humphrey F.B. “Switching mechanism in Co-based amorphous wire”. J. Appl. Phys., 81 (1997) 4036-4038.
23. Chiriac H., Ovari T.A., Vazquez M., Hernando A. “Magnetic hysteresis in glass-covered and water-quenched amorphous wires”. J. Magn. Magn. Mater., 177-181 (1998) 205-206.
24. Yamasaki J., Takajo M., Humphrey F.B. “Mechanism of re-entrant flux reversal in FeSiB amorphous wires”. IEEE Trans. Magn., 29 (1993) 2545-2547.
25. Chiriac H., Yamasaki J., Ovari T.A., Takajo M. “Magnetic domain structure in amorphous glass-covered wires with positive magnetostriction”. IEEE Trans. Magn., 35 (1999) 3901-3903.
26. Gibbs M.R.J., Day I.E., Lafford T.A. “P.T. Squire, Domain wall mobility in amorphous wires”. J. Magn. Magn. Mater., 104-107 (1992) 327-328.
27. Gomez-Polo C., Vazquez M., Chen D.-X. “Directionally alternating domain wall propagation in bistable amorphous wires”. Appl. Phys. Lett., 62 (1993) 108-109.
28. Garcia-Miquel H., Chen D.-X., Vazquez M. “Domain wall propagation in bistable amorphous wires”, J. Magn. Magn. Mater., 212 (2000) 101-106.
29. Рудяк В. М. Эффект Баркгаузена. УФН. 1970, 101(3), 429–462.
30. Vazquez M., Zhukov A.P. / Magnetic properties of glass-coated amorphous and nanocrystalline microwires // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – Vol. 160, 1996. – pp. 223-228.
31. Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X., Hernando A. “Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications”. J. Magn. Magn. Mater., 130 (1994) 907-912.
32. Panina L.V., Kato H., Mizutani M., Mohri K., Humphry F.B. “Domain collapse in magnetostrictive wires”. IEEE Trans. Magn., 28 (1992) 2922-2924.
33. Баранов С.А.. Магнитные модели литого аморфного микропровода. Институт прикладной физики АНМ, МД–2028, Кишинев, Республика Молдова

34. Nderu J.N., Shinokawa Y., Yamasaki J., Humphrey F.B., Ogasawara I. “Dependence of magnetic properties of (Fe₅₀Co₅₀)₇₈Si₇B₁₅ amorphous wire on the diameter”. IEEE Trans. Magn., 32 (1996) 4878-4880.
35. Mohri K., Humphrey F.B., Kauashima K., Kimura K., Mizutani M. “Large Barkhausen and Matteucci effects in FeCoSiB and FeNiSiB amorphous wires”, IEEE Trans. Magn., 26 (1990) 1789-1791.
36. Каримова Г.В. Бистабильный литой аморфный микропровод из Fe, Fe Co – сплавов в стеклянной оболочке и его применение в магнитометрии. Автореферат кандидатской диссертации (физико-математические науки). Ижевск. 2006. 20 с.
37. Baranov S.A., Karimova G.V., Lomaev G.V. Domain wall movement in the cast amorphous microwire. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2006, 42(2), 73–78)
38. Shalyguina E.E., Molokanov V.V., Komarova M.A., Melnikov V.A., Abrosimova N.M. “Inverted Near-surface Hysteresis Loops in Annealed Fe_{80.5}Nb₇B_{12.5} Ribbons”. J. Magn. Magn. Mater. 290-291 (2005) Part 2, 1438-1441.
39. Хандрик К., Кобе С. “Аморфные ферро- и ферримагнетики”. М., Мир, (1983)
40. Шалыгина Е.Е., Комарова М.А., Молоканов В.В. “Магнитооптическое исследование Со-обогащенных аморфных микропроводок”. ЖЭТФ, 122 3(9) (2002) 593-599.
41. Vazquez M., Chen D.-X. “The magnetization reversal process in amorphous wires”. IEEE Trans. Magn., 31 (1995) 1229-1238.
42. Nderu J.N., Shinokawa Y., Yamasaki J., Humphrey F.B., Ogasawara I. “Dependence of magnetic properties of (Fe₅₀Co₅₀)₇₈Si₇B₁₅ amorphous wire on the diameter”. IEEE Trans. Magn. 32 (1996) 4878-4880.
43. Mohri K., Kohsawa T., Kawasima K., Yoshoda H., Panina L. V.. Magnetoinductive effect (MI effect) in amorphous wires// IEEE Trans.Magn.-1992.- V. 28.-No 5.-P. 3150-3152.
44. Theuss, H., Hofmann, B., G´omez-Polo, C., et al. (1995). Temperature dependence of the magnetization process of nearly nonmagnetostrictive Co-rich amorphous wires. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 145, 165.
45. Peng H.X., Qin F.X., Phan M.H., Tang Jie, Panina L.V., Ipatov M., Zhukova V., Zhukov A. and Gonzalez J., “Co-based magnetic microwire and field-tunable multifunctional macro-composites”, Journal of Non-Crystalline Solids, V. 355, 1380-1386, 2009.
46. Interplay of stress, temperature, and giant magnetoimpedance in amorphous soft magnets\ Michael Kurniawan, Rajat K. Roy, Ashis Kumar Panda, Michael E. McHenry// APPLIED PHYSICS LETTERS · December 2014.
47. Vazquez M. and Hernando A.. A soft magnetic wire for sensor applications// J. of Physics D: Applied Physics.-1999.-V.29.-No 4.-P.939-950.

48. Herrero-Gomez C., Marin P., and Hernando A. Bias free magnetomechanical coupling on magnetic microwires for sensing applications// *Appl. Phys. Lett.* -2013.-V.- 103.-No 14 .-P. 142414.
49. Knobel M., Sánchez M.L., Velázquez J., Vázquez M.. Stress dependence of the giant magneto-impedance effect in amorphous wires // *J. Phys.: Condens. Matter*, 1995, v. 7, N 9, p. L115-L120.
50. Atkinson D., Squire P.T.. Experimental and phenomenological investigation of the effect of stress on magneto-impedance in amorphous alloys // *IEEE Trans. Magn.*, 1997, v. 33, N 5, p. 3364-3366.
51. S.L. Zhang, J.F. Sun, D.W. Xing, F.X. Qin, H.X. Peng. Large GMI effect in Co-rich amorphous wire by tensile stress // *J. Magn. Magn. Mater.*, 2011, v. 323, N 23, p. 3018-3021.
52. Mandal K., Puerta S., Vázquez M., Hernando A.. Giant magnetoimpedance in amorphous Co_{83.2}Mn_{7.6}Si_{5.8}B_{3.3} microwires // *Phys. Rev. B*, 2000, v. 62, N 10, P. 6598-6602.
53. Mandal K., Puerta S., Vazquez M., Hernando A.. The frequency and stress dependence of giant magnetoimpedance in amorphous microwires // *IEEE Trans. Magn.*-2002.-V. 36.-No 5.-P. 3257-3259.
54. Bayri N., Atalay S. Giant stress-impedance effect in Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ amorphous wires// *J. Alloy and Compounds.*-2004.-V.381.-No 1-2.-P.245-249.
55. García C., Zhukov A., Zhukova V., Ipatov M., J.M. Blanco and J. Gonzalez. Effect of tensile stresses on GMI of Co-rich amorphous microwires // *Digests of the IEEE International Magnetism Conference.* -2005.-P.1273-1274.
56. Blanco J.M., Zhukov A., González J.. Effect of tensile and torsion on GMI in amorphous wire // *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, v. 196-197, P. 377-379.
57. Tejedor M., Hernando B., Sánchez M.L., Prida V.M., Vázquez M.. The torsional dependence of the magneto-impedance effect in current-annealed Co-rich amorphous wires // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1998, v. 31, N 23, p. 3331-3336.
58. Blanco J.M., Zhukov A., González J.. Torsional stress impedance and magneto-impedance in (Co_{0.95}Fe_{0.05})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ amorphous wire with helical induced anisotropy // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, v. 32, N 24, p. 3140-3145.
59. Blanco J.M., Zhukov A., González J.. Asymmetric torsion stress giant magnetoimpedance in nearly zero magnetostrictive amorphous wires // *J. Appl. Phys.*, 2000, v. 87, N 9, p. 4813-4815.
60. Noda M., Panina L.V., Mohri K.. Pulse response bistable magneto-impedance effect in amorphous wires// *IEEE Trans. Magn.*-1995.-V.31.-No 6.-P.3167-3169.
61. Lenz J., Edelstein A.S.. Magnetic sensors and their applications// *IEEE Sensors J.*-2006.-V.6.- P. 631-649.
62. Uchiyama T., Nakayama S., Mohri K., and Bushida K.. Biomagnetic field detection using very high sensitive magneto-impedance sensors for medical applications// *Phys. Stat. Solidi. A.*- 2009.-V. 206.- N 4.- P. 639-643.

63. Patent US 8,587,300B2 Magneto-impedance sensor element and method producing the same, Aichi steel corporation, 2011.
64. Advances in Materials Physics and Chemistry, 2013, 3, 249-254 Harsha Uppili, Bevin Daglen Oregon Episcopal School High School, Portland, USA Bi-Directional Giant Magneto Impedance Sensor
65. Антонов А.С. Магнитоимпеданс ферромагнитных микропроводов, тонких пленок и мультислоев при высоких частотах: докт. дис. – М.:2003.
66. Моисеев А.А. Эффект магнитоимпеданса в магнитомягких проволоках на основе Fe и Co: дипломная работа.
67. Ipatov M., Zhukova V., Zhukov A., González J., Zvezdin A.. Low-field hysteresis in the magnetoimpedance of amorphous microwires // Phys. Rev. B.- 2010.-V. 81.-No 13.-P. 134421-134428.
68. Sánchez T., Alvarez P., Olivera J., Pérez M.J., Belzunce F.J., Santos J.D., Sánchez J.L., Sánchez M.L., Gorria P., Hernando B.. Torsion annealing influence on the impedance behaviour in amorphous FeSiB and CoSiB wires //J. Non-Crystalline Solids.-2007.-V.353.-No 8-10.-P.914-918.
69. Ipatov M., Zhukova V., Gonzalez J., Zhukov A.. Manipulating the magnetoimpedance by dc bias current in amorphous microwire // J. Magn. Mater.- 2012.-V. 324.-No 1-2.-P. 4078-4083.
70. Panina L.V., Mohri K.. Mechanism of Magneto-Impedance effect in amorphous magnetic wires //J. Mag.Soc.Japan.- 1994.-V. 18.-P. 245-249.
71. Makhnovskiy D.P., Panina L.V., Mapps D.J. // Phys. Rev. B. 2001. V. 63, P. 144424-23.
72. Золотухин И.В. / Физические свойства аморфных металлических материалов // М.: «Металлургия», 1986. – 176 с.
73. Аморфные металлические сплавы / Под редакцией Люборского Ф.Е. – М.: Metallurgia, 1987. – 584 с.
74. Panina L.V., Sandacci S. I., Makhnovskiy D.P.. Stress effect on magnetoimpedance in amorphous wires at gigahertz frequencies and application to stress-tunable microwave composite materials// J. Appl. Phys.-2005.-V.97.-No 1.-P. 013701.
75. Семиров А.В., Моисеев А.А., Кудрявцев В.О., Букреев Д.А., Захаров Г.В. Установка для исследования влияния температуры и механических напряжений на магнитоимпеданс магнитомягких материалов.
76. Qin F.X., Peng H.X., Popov V.V., Panina L.V., Ipatov M., Zhukova V., Zhukov A., Gonzalez J. Stress tunable properties of ferromagnetic microwires and their multifunctional composites// J. Appl. Phys.- 2011.-V. 109.-Article Number 07A310.
77. Makhnovskiy D. P., Panina L.V., Sandacci S.I.. Field and stress-tuneable microwave composite materials based on ferromagnetic wires// Book chapter in: Progress in Ferromagnetism Research, Editor: Frank Columbus, Nova Science Publishers Inc (USA), 2004.
78. Okumura H., Laughlin D.E., McHenry M.E. / Magnetic and structural properties and crystallization behavior of Si-rich FINEMET materials // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – Vol. 267, 2003. – pp. 347–356.

79. Глезер А.М., Пермьякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. / Механическое поведение аморфных сплавов // Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. – 414 с.
80. Varga R., Zhukov A., Blanco J.M., and Ipatov M. / Fast magnetic domain wall in magnetic microwires // *Physical Review B*. – Vol. 74, 2006. – pp. 212405-1 – 212405-4.
81. Zhukov A., Ipatov M., Garcia C., Gonzalez J., Panina L., Blanco J. M., and Zhukova V. // Development of Thin Soft Magnetic Amorphous Microwires for High Frequency Magnetic Sensors Applications /Progress In Electromagnetics Research Symposium. – 2008. – pp. 650-657.
82. Zhukov A. Design of the Magnetic Properties of Fe-Rich, Glass-Coated Microwires for Technical Applications // *Advanced Functional Materials*. – Vol. 16, 2006, pp. 675–680.
83. Vazquez M. and Hernando A. / A soft magnetic wire for sensor applications // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – Vol. 29, 1996. – pp. 939-949.
- 84 Курляндская Г.В. Гигантский магнитный импеданс и его связь с магнитной анизотропией и процессами намагничивания ферромагнитных структур: докт. дис. – Екатеринбург, 2007.
85. Bordin G., Buttino G., Cecchetti A., Poppi M. Temperature dependence of magnetic properties and phase transitions in a soft magnetic Co-based nanostructured alloy// *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1999. – V. 32. – P. 1795-1800.
86. Юданов Н.А., Рудёнок А.А., Колесников А.В., Панина Л.В., Морченко А.Т., Костишин В.Г. Влияние полей смещения на характеристики датчиков на основе недиагонального магнитного импеданса // Труды XI Международной научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Курск 13-14 мая 2014 г., Ч.2. – С. 388-397.
87. Юданов Н.А., Рудёнок А.А., Колесников А.В., Панина Л.В., Морченко А.Т., Костишин В.Г. Недиагональный магнитоимпеданс в аморфных проводах и его применение в миниатюрных сенсорах слабых магнитных полей / *Изв. РАН, сер. физич.* 2014.Т.78. №11.
88. Yudanov N.A., Rudyonok A.A., Panina L.V., Kolesnikov A.V., Morchenko A.T. and Kostishyn V.G. / Effect of bias fields on off-diagonal magnetoimpedance (MI) sensor performance // *JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS* Vol. 6 No 5, 04001(4pp) (2014)
89. Yudanov N.A., Rudyonok A.A., Panina L.V., Kolesnikov A.V., Morchenko A.T., Kostishyn V.G. Effect of Bias Fields on off-Diagonal Magnetoimpedance (MI) Sensor Performance // *JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS* Vol. 6 No 3, 03046(4pp) (2014)
90. Юданов Н.А., Евстигнеева С.А., Морченко А.Т., Панина Л.В., Костишин В.Г. Характеристики магнитоимпедансных датчиков в переменных и поперечных магнитных полях // 6-я Международная Конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», 26-28 мая 2015 г. Тезисы докладов. – М., 2015. – С. 340. [Конференция поддержана РФФИ (проект № 02-15-20265)] Исследование по гранту РФФИ № 13-08-01319

91. Юданов Н.А., Л.В. Панина, А.Т. Морченко, В.Г. Костишин, Евстигнеева С.А. Температурная зависимость недиагонального магнитоимпеданса (МИ) в аморфных проводах и магнитных сенсорах слабых магнитных полей // XII Международная научная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» Казахстан, Усть-Каменогорск 2015. часть 2, стр 461 20 – 23 мая
92. Panina L.V., Yudanov N. A., Morchenko A. T., V.G. Kostishyn1, D. P. Makhnovskiy3 OFF-DIAGONAL MAGNETOIMPEDANCE (MI) IN AMORPHOUS MICROWIRES FOR LOW-FIELD MAGNETIC LOW-FIELD MAGNETIC SENSORS Physica Status Solidi (A), 2016. Работа также докладывалась на International Workshop on Magnetic Wires(IWMW 2015 2-4 July, Ordizia, Spain.
93. Ipatov M. Para optar al grado de Doctor en Ciencias // San Sebastian, 2008
94. Yudanov N.A., Evstigneeva S.A., Panina L.V., Morchenko A.T., Zhukov A. Temperature Dependence of the Off-Diagonal Magnetoimpedance in Sensor Configuration Utilizing Co-rich Amorphous Wires, Physica Status Solidi (A), 2016. Работа также докладывалась на International Workshop on Magnetic Wires(IWMW 2015 2-4 July, Ordizia, Spain.
95. Yudanov N.A., Rudyonok A.A., Morchenko A.T., Panina L.V. Off-diagonal magnetoimpedance sensor in multicore configuration // Moscow International Symposium on Magnetism MISM – 2014, 29 June - 3 July 2014. Book of Abstracts, p. 563.
96. Nikolay A. Yudanov, Alexander A. Rudenok, Larissa V. Panina, Alexander T.Morchenko, Dmitry P. Makhnovskiy, Arkady Zhukov // Multicore Off-Diagonal Magnetoimpedance Sensors Utilising Amorphous Wires //Physics Procedia Volume 75, 2015, Pages 1419–1426
97. Yudanov N.A., Rudyonok A.A., Panina L.V., Morchenko A.T., Kolesnikov A.V., Kostishin V.G. Off-Diagonal Magnetoimpedance in Amorphous Wires and Its Application in Miniature Sensors of Weak Magnetic Fields // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2014, Vol. 78, No. 11, pp. 1169–1173. DOI 10.3103/S1062873814110276
98. Panina L.V. · Yudanov N.A. · Morchenko A.T. · Kostishyn V.G. Makhnovskiy·D.P. Off-diagonal magnetoimpedance in amorphous microwires for low-field magnetic sensors - Dec 2015 · Physica Status Solidi (A) Applications and Materials
99. Dolabdjian C., Yelon A., Menard D.. / Characterization of an Optimized Off-Diagonal GMI-Based Magnetometer // IEEE Sensors Journal.-2013.-V.13.-No 1.-P. 379-388.
100. Rudenok A. A., Morchenko A. T., Zhukov A., Yudanov N. A., Panina L.V., Makhnovskiy D. P.. Multicore off-diagonal magnetoimpedance sensors utilising amorphous wires // Phys. Procedia, 2015, v.- 75, p. 1875-3892.
101. Uchiyama T., Mohri K., Honkura Y., Panina L.V. Recent advances of pico-tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor// IEEE TRANS MAGN.-2013.-V.48.-P. 3833-3839.
102. T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, L.V. Panina. Recent advances of pico-tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor// IEEE Trans. Magn., 2013, v. 48, No 11, p. 3833-3839.

103 Юданов Н.А., Рудёнок А.А., Панина Л.В., Морченко А.Т., Колесников А.В., Костишин В.Г.. Недиagonalный магнитоимпеданс в аморфных проводках и его применение в миниатюрных сенсорах слабых магнитных полей // Известия РАН. Серия физическая, 2014, т.- 78, № 11, с. 1438–1442.

104 Юданов Н. А., Морченко А.Т., Панина Л.В., Костишин В. Г., Евстигнеева С. А. Влияние отжига на недиagonalный магнитоимпеданс в аморфных проводках
Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 3. С. 201—204.

105. Уорден К. «Новые интеллектуальные материалы и конструкции», Техносфера, 2006.- 224с.