

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”».

Научный руководитель:

**Панина Лариса Владимировна**

профессор, кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

**Скиданов Владимир Александрович**, доктор технических наук, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, Российская академия наук (ИППМ РАН), заведующий лабораторией, заведующий отдела Проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий;

**Благодырёв Владимир Александрович**, кандидат технических наук, АО «Российские космические системы», начальник отдела координации проектов.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова» РАН

Защита диссертации состоится «29» декабря 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.132.06 при в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”» по адресу 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций библиотеки НИТУ МИСиС (Ленинский проспект, д. 4) и в сети Internet по адресу: <http://www.misis.ru>

Автореферат разослан " " 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д212.132.06:

доктор физико-математических наук



В.Г. Костишин

## Общая характеристика работы

### 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.

В начале 90-х появились 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. 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 МИ материалов.

МИ-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, в геодезии, авто, авиа и космической технике и т.д. Миниатюрные МИ-элементы могут быть использованы для портативных устройств навигации или кардиографах-имплантатах. По сравнению с другими магнитными датчиками МИ-элементы имеют преимущество по сочетанию ряда свойств: быстродействия, высокой чувствительности, миниатюрности, малого потребления энергии, себестоимости изготовления. Размер МИ элемента может быть менее 100 мкм, что позволит регистрировать слабые локальные поля. Подобные разработки ведутся в ведущих научных центрах мира (в США, Японии, Китае).

МИ-эффект перспективен для разработки интеллектуальных датчиков (ИД), что даст 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. ИД 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. При использовании МИ чувствительных элементов, микроконтроллер может также выполнять функции высокочастотного возбуждения.

Таким образом, исследование магнитного импеданса и построение интеллектуальных датчиков на его основе является актуальной задачей, как с точки зрения оптимизации МИ 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 многопроводной 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 терромагнитной 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.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал участие в постановке задачи, выборе объектов исследования, проведении экспериментальных исследований, получении и анализе результатов. Автором разработана и собрана установка для исследования недиагонального импеданса микропроводов и тестирования МИ-чувствительных элементов. Так же при непосредственном участии автора проводились работы по модернизации вибромагнетометра для измерения магнитных характеристик микропроводов. Юданов Н.А. непосредственно участвовал в разработке терромагнитных методов управления свойствами микропроводов, а также под руководством автора разрабатывалась технология изготовления чувствительного элемента и датчика на его основе. Автором было разработано программное обеспечение для интеллектуального МИ датчика.

### **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, Ордиция, Испания 2-4 июля (IWMW 2015). Московский международный симпозиум по магнетизму «MISM-2014» Москва. 29 июня - 3июля 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». Алматы. 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.

#### **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.



Во введении обусловлена актуальность проводимых исследований, сформулирована цель и поставлены задачи, указана научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, так же даны основные положения, выносимые на защиту, и представлена апробация работы.

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. Особое внимание уделено температурной зависимости магнитоимпеданса. Отмечено, что в настоящее время ведется множество исследований в данной области и активно оформляются новые патенты. В конце первой главы на основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследования.

Во ВТОРОЙ главе рассмотрены основные методики измерения кривых намагниченности и магнитоимпедансных характеристик микропроводов, а также обсуждаются методы термомагнитной обработки для модификации магнитной структуры и улучшения температурной стабильности МИ характеристик. Рассмотрены следующие методы исследования: индукционный измеритель петли гистерезиса с миниатюрными дифференциальными катушками, вибрационный магнитометр, системы для измерения диагонального и недиагонального МИ, магнито-компенсационный стенд. В качестве объектов исследования были выбраны аморфные  $\text{Co}_{66,94} \text{Fe}_{3,83} \text{Ni}_{1,44} \text{B}_{11,57} \text{Si}_{14,59} \text{Mo}_{1,69}$  микропровода в стеклянной оболочке. Данный сплав в аморфном состоянии характеризуется маленькой отрицательной магнитострикцией порядка  $-10^{-7}$ .

Для указанных микропроводов были разработаны методики термической и термомагнитной обработки для управления магнитной структурой и недиагонального МИ. Магнитные свойства аморфных сплавов (и аморфных микропроводов) зависят от их структуры. В аморфных сплавах наблюдается локальная анизотропия, обусловленная неоднородным движением атомов в процессе затвердевания при быстром охлаждении расплава. Поэтому характеристики атомного распределения, его химический состав, плотность, внутренние напряжения имеют локальные различия в зависимости от способа и условий производства.

Для улучшения температурной стабильности и контролируемости свойств аморфных

сплавов применяют различные виды термообработки: термический отжиг, отжиг в магнитном поле, отжиг при механическом напряжении. При нагреве в аморфной фазе происходят структурные изменения, что оказывает существенное влияние на магнитную структуру. При медленном нагреве структура аморфного сплава становится более стабильной за счет уменьшения свободного объема и релаксации остаточных напряжений.

В заключении главы приведены основные технологии изготовления МИ чувствительного элемента, где представлены: технология изготовления на подложке, на микрокаркасе и без каркаса. В содержании даны подробные инструкции и приведено необходимое технологическое оборудование. Образцы на каркасе (подложке) содержат 40 витков с сечением каркаса 1,6х0,6 мм, сечение микрокаркаса 300 мкм, а бескаркасные образцы намотаны непосредственно провод на провод и содержат 50-65 витков. На рисунке 1 приведены фотографии МИ чувствительных элементов (1а- на подложке, 1б- на микрокаркасе, 1в- бескаркасный).



Рисунок 1 – фотографии МИ чувствительных элементов (А- на подложке, Б- на микрокаркасе, В- бескаркасный).

В ТРЕТЬЕЙ главе приведены результаты экспериментальных исследований квазистатических процессов намагничивания и МИ в микропроводах указанного состава при различных условиях.

Магнитоимпедансные характеристики в значительной степени определяются статической магнитной структурой, информация о которой может быть получена из кривых намагничивания. Кривая намагничивания в целом имеет форму, характерную для циркулярной анизотропии, с высокой восприимчивостью и эффективным полем анизотропии порядка 120 А/м. Наличие относительно высокой остаточной намагниченности возможно связано с внутренней областью с осевой анизотропией. 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. Воздействие внешних растягивающих напряжений приводит к усилению циркулярной анизотропии в проводах с отрицательной магнитострикцией и может уменьшить остаточную намагниченность, что подтверждается результатами измерений. Остаточная намагниченность уменьшилась с 50% до 20% при воздействии растягивающих напряжений в 390 МПа, но и эффективная анизотропия увеличилась до 500 А/м. Следовательно, магнитная структура провода с отрицательной магнитострикцией оказывается весьма чувствительной к внешним механическим воздействиям, что необходимо учитывать при разработке высокочувствительных магнитных сенсоров.

Исследования диагонального импеданса также демонстрируют наличие в основном циркулярной анизотропии и более сложной чем кольцевая доменной структуры, что проявляется в гистерезисе МИ характеристик. Только в присутствии постоянного тока, который в основном устраняет доменную структуру, удастся добиться почти бесгистерезисного поведения МИ с двумя симметричными пиками, показаны на рисунке 2.

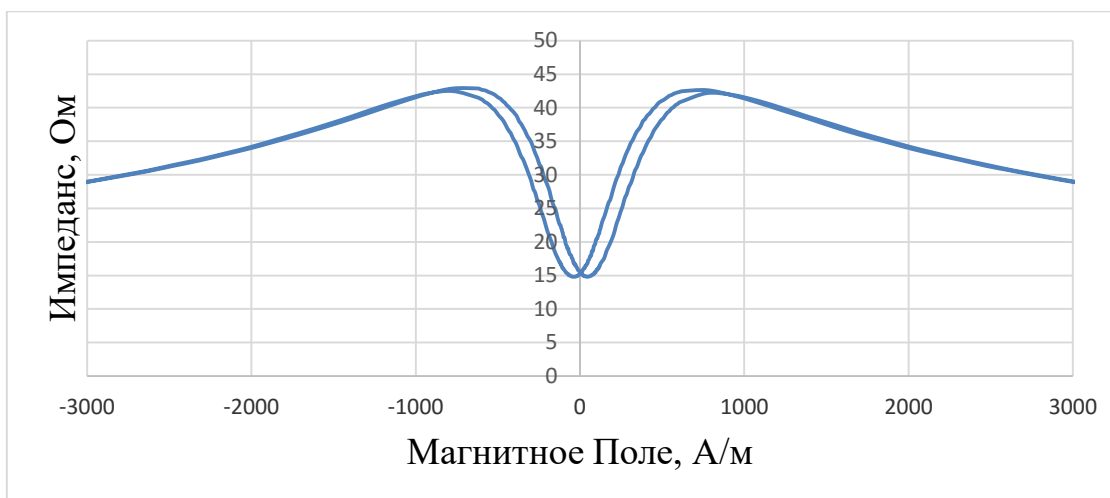


Рисунок 2 – Диагональный магнитоимпеданс в микропроводе состава:  $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$ , диаметром жилы 40 мкм, на 30МГц при присутствии постоянного тока 45 мА. Измерения проведены с помощью векторного анализатора цепей.

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). 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.

Был проведен анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) датчика, который показал, что LC-резонанс ЧЭ на подложке наблюдается на частоте 8 МГц. Для бескаркасного ЧЭ резонансные частоты выше- порядка 20-22 МГц. Как видно из рисунка 4, при синусоидальном или импульсном возбуждении этой частоте соответствует наибольшее значение выходного напряжения.

Полевая характеристика ЧЭ сильно зависит не только от частоты сигнала возбуждения, но и от амплитуды высокочастотного возбуждения. На рисунке 3 показаны полевые характеристики бескаркасного ЧЭ в зависимости от амплитуды синусоидального сигнала возбуждения.

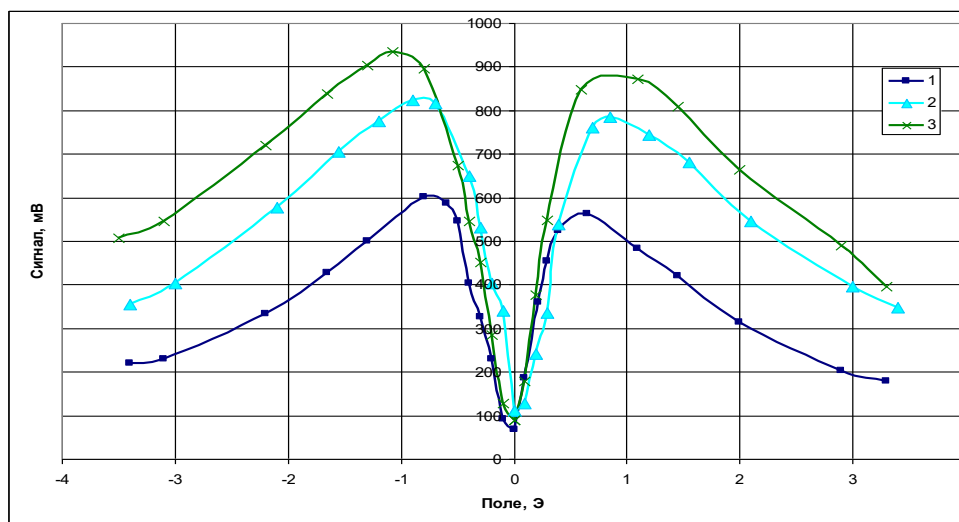


Рисунок 3 - Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ (65 витков) при трех значениях амплитуды тока (1 - 7,5 мА; 2 - 15 мА; 3 - 23 мА). Частота возбуждения- 20 МГц. Постоянный ток отсутствует.

При увеличении амплитуды тока увеличивается максимум амплитуды выходного сигнала, который наблюдается также в более высоких полях, хотя чувствительность самого элемента почти не изменяется. Это свидетельствует о частичном перемagnetивании провода сигналом возбуждения и увеличении объема провода с геликоидальной намагничённостью. При добавлении постоянной составляющей в синусоидальный сигнал возбуждения значение

выходного напряжения в нулевом поле уменьшается, при этом увеличивается чувствительность. Еще одной особенностью полевой характеристики при добавлении постоянной составляющей в сигнал возбуждения является расширение линейного участка поведения выходного сигнала как функции внешнего магнитного поля.

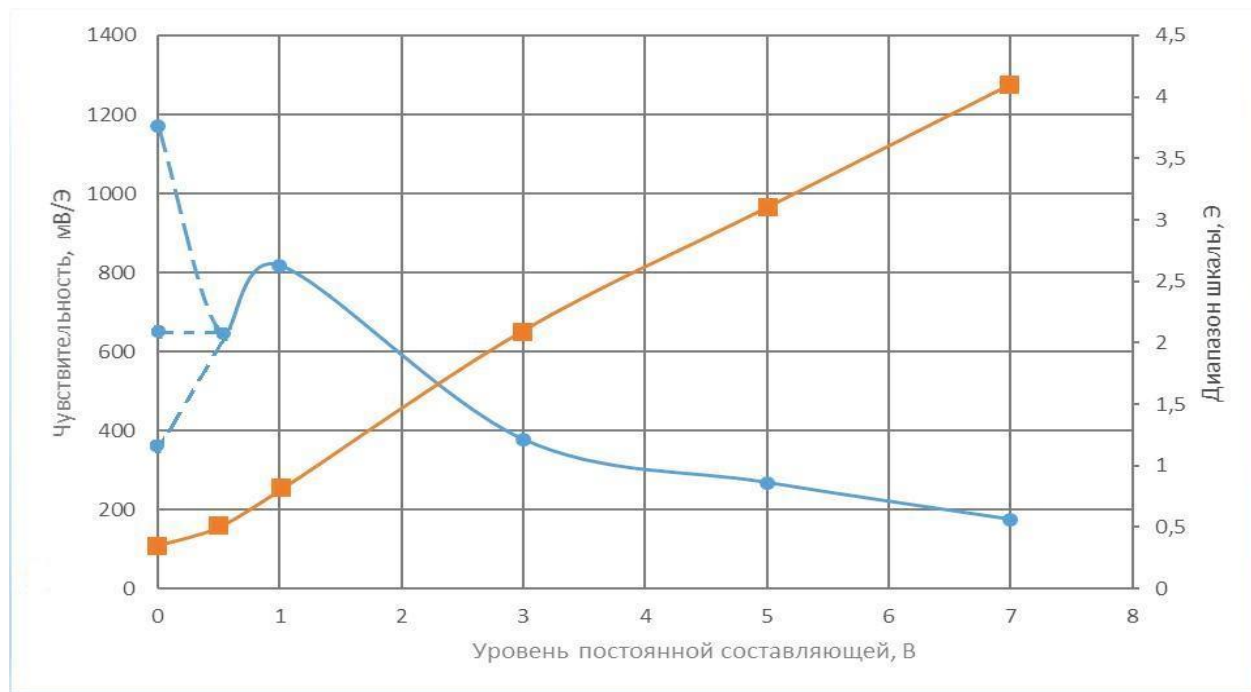


Рисунок 4 - Зависимость чувствительности (маркер • по основной шкале) и диапазона измерений (маркер ■ по вспомогательной шкале) от величины постоянной составляющей для бескаркасного ЧЭ на частоте 20 МГц.

Постоянный ток оказывает влияние на доменную структуру провода- намагничивает провод в циркулярном направлении, что увеличивает недиагональный импеданс. Также, постоянный ток увеличивает магнитную жесткость и уменьшает магнитный гистерезис. Однако при оптимальных условиях наличие постоянного тока значительно улучшает характеристики ЧЭ (рисунок 4). Из рисунка 4 видно, что чувствительность имеет максимум при некотором малом значении постоянного тока. В нулевом поле значение выходного напряжения неоднозначно, так как оно определяется остаточной доменной структурой, которая является нерегулярной. Поэтому присутствие постоянного тока необходимо. Увеличение чувствительности наблюдается до тех пор, пока постоянный ток увеличивает геликоидальную составляющую намагниченности, а доменная структура практически исчезает. Действие постоянного тока позволяет также расширить диапазон измерений.

Следовательно, за счет изменения постоянной составляющей сигнала возбуждения можно управлять чувствительностью и диапазоном измерения магнитных полей сенсорного элемента, что очень важно при разработке интеллектуальных МИ датчиков. Для рассматриваемой конфигурации датчиков оптимальное значение постоянного тока составляет 5-15 мА (при диаметре жилы микро-провода 20-40 мкм).

Кроме чувствительности и диапазона измерений, еще одним важным параметром является максимальная скорость работы измерительного элемента. Измерение переменных магнитных полей высокой частоты является одним из важных преимуществ разрабатываемого сенсора. На рисунке 5 показаны АЧХ в переменных магнитных полях. Для бескаркасного ЧЭ удаётся продлить постоянный участок амплитудно-частотной характеристики и на порядок (до 25 кГц) увеличить частоту измеряемого сигнала за счет уменьшения индуктивности детектирующей катушки

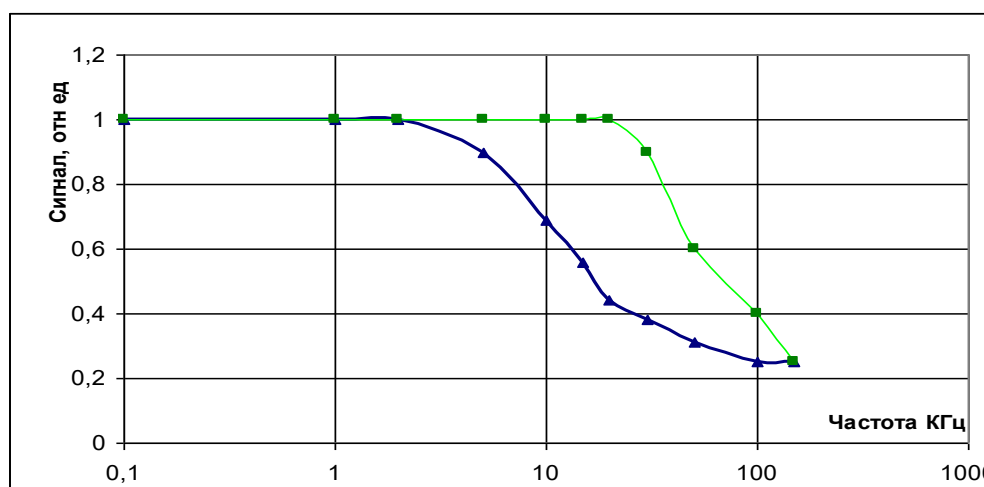


Рисунок 5 – Амплитудно частотная характеристика бескаркасного ЧЭ (65 витков) (■) и ЧЭ на каркасе (▲) в переменных синусоидальных магнитных полях  $\pm 0,3$  Э.

Детальные исследования проводились по влиянию температуры на МИ характеристики микропроводов в стеклянной оболочке. По результатам измерений диагонального магнитного импеданса при различных температурах видно, что он довольно восприимчив к изменению температуры. На рисунке 6 приведены кривые диагонального МИ при 20°С (●) и при 54°С (■). Поскольку используемые температуры значительно меньше характерных температур кристаллизации и температуры Кюри, наблюдаемая температурная зависимость может быть связана с распределением внутренних напряжений, возникающих при затвердевании из расплава. 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 напряжения зависят от температуры, то и эффективное поле анизотропии будет испытывать сильную зависимость от температуры, что и объясняет значительные температурные зависимости МИ.

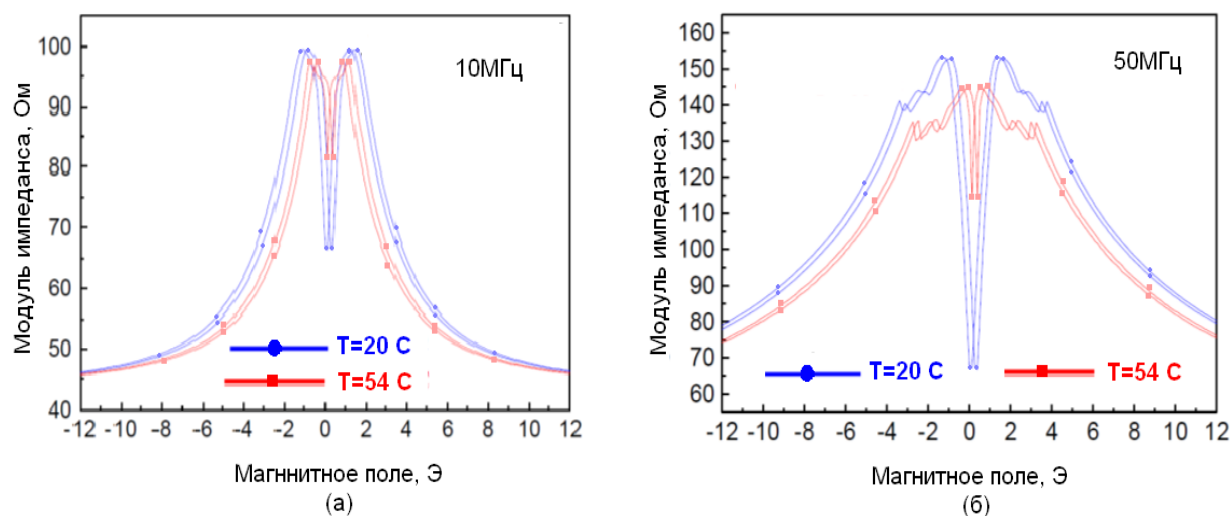


Рисунок 6 – Диагональный магнитоимпеданс при различных температурах 20°C - ●, 54°C - ■ а) на 10МГц и б) 50МГц в микропроводе состава  $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,69}$

Температурная зависимость работы чувствительного элемента, построенного на МИ микропроводе, пропорциональна температурной нестабильности магнитного импеданса. На рисунке 7 приведена кривая изменения чувствительности от воздействующей температуры для бескаркасного ЧЭ (65 витков) на частоте 20 МГц. Максимум чувствительности соответствует 60°C-70°C, что связано с релаксацией растягивающих механических напряжений, однако дальнейший рост температуры может приводить к возрастающему влиянию других типов напряжений, что приводит к искажениям в доменной структуре. При проведении цикла нагревания-охлаждения наблюдается тепловой гистерезис, то есть полевые зависимости импеданса необратимо изменяются. Интересно отметить, что после охлаждения чувствительность при комнатной температуре увеличивается. При дальнейших циклах нагревания-охлаждения зависимость от температуры снижается. Соответственно, можно предположить, что проведение отжига позволит не только улучшить чувствительность, но и температурную стабильность.

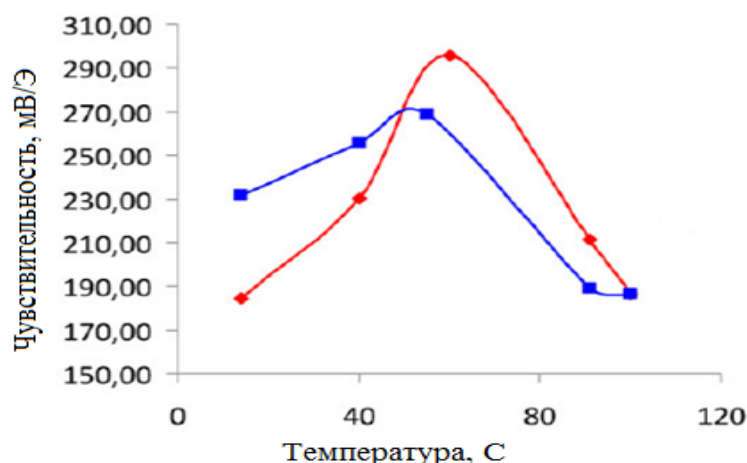


Рисунок 7 – Кривая изменения чувствительности от воздействующей температуры, для бескаркасного ЧЭ (65 витков) на частоте 20 МГц, при проведении цикла нагрев (♦) – охлаждение (■).

В процессе изготовления 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 °С в течении 5-10 минут позволяет значительно улучшить чувствительность. До и после проведения температурной обработки были измерены полевые характеристики ЧЭ, которые приведены на рисунке 8 (маркер ♦ до обработки, маркер ▲ 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.



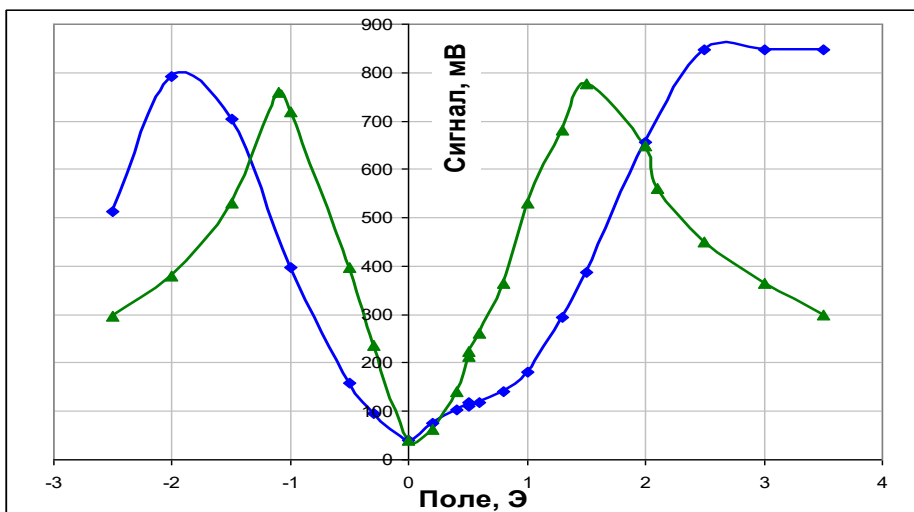


Рисунок 8 – Полевые характеристики бескаркасного ЧЭ на частоте 22 МГц: ♦ до проведения термообработки, ▲ после проведения термообработки. Проводился отжиг при температуре 150 °С в течении 5 минут.

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.

Еще одним методом управления магнитными свойствами микропроводов является термо-магнитная обработка. Она позволяет получить асимметричную кривую выходного сигнала по отношению к внешнему магнитному полю. Термоманитная обработка проводилась после обычной термообработки (150-160°С), в результате которой достигалась максимальная чувствительность. В присутствии небольшого поля  $H_{\text{обработ}} = 6$  Э температура вновь увеличивается до (150-160°С), общая длительность процесса составляет 5 минут. Такой процесс уже не меняет чувствительность, но полевая характеристика может быть сдвинута по полю, направление сдвига зависит от направления приложенного магнитного поля. Мы объясняем это увеличением продольной коэрцитивности внутренней области, которая превышает внешнее поле. Такое поведение может быть полезно для контроля за положением рабочей точки ЧЭ.

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.

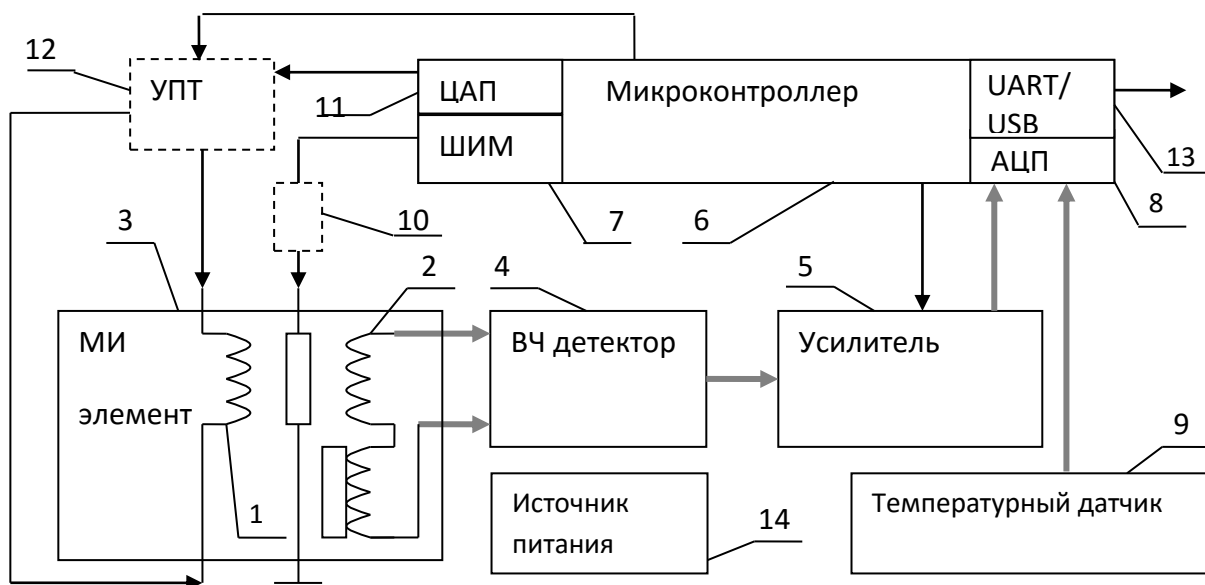
Датчик это самостоятельное, автономное устройство, размещаемое в месте контроля физического параметра или отбора информации, и преобразующее физический параметр в электрический сигнал. МИ датчик, как и все другие датчики, состоит из чувствительного элемента и вспомогательного согласующего устройства, которое может состоять как только из одной аналоговой части, так и из совмещения аналоговой с цифровой частями.

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. 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. 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. Для микроконтроллера разрабатывается специальный пакет программного обеспечения, который программируется на этапе изготовления датчика.

Блок схема разрабатываемого датчика показана на рисунке 9, 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

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.



Как видно из блок-схемы (рисунок 9) применение отдельного генератора для возбуждения МИ элемента нецелесообразно, поскольку с подобной задачей справляется встроенный в микроконтроллер (6) модуль ШИМ. 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. На рисунке 10 показана 3-D модель печатной платы магнитоимпедансного датчика.

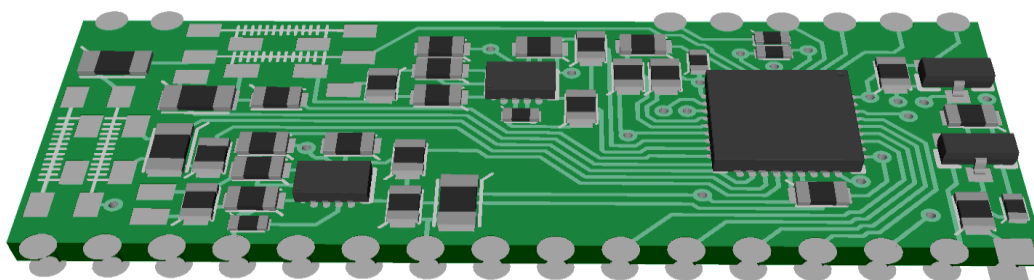


Рисунок 10 – 3-D модель печатной платы магнитоимпедансного датчика.

По указанной выше технологии был изготовлен прототип магнитоимпедансного (МИ) датчика. Корпусированный вариант МИ датчика выполнен в стандартном корпусе DIP-40 и показан на рисунке 11. Напряжение питания МИ датчика 5В, максимальный ток потребления в режиме с максимальной частотой дискретизации не превышает 200мА.

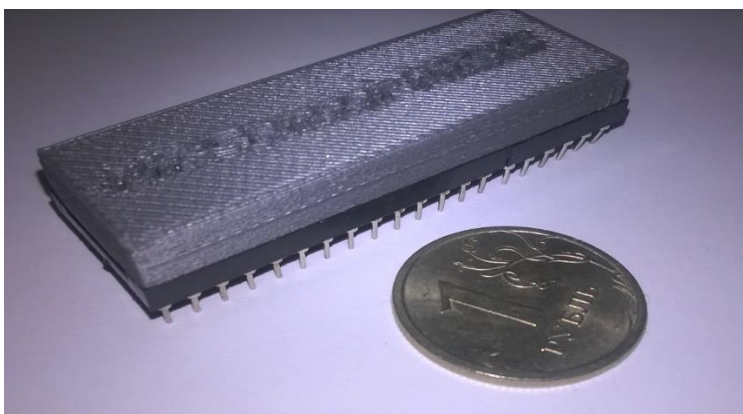


Рисунок 11 - Корпусированный вариант МИ датчика

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  $180^\circ$ , ось вращения ортогональна магнитному полю (рисунок 12).

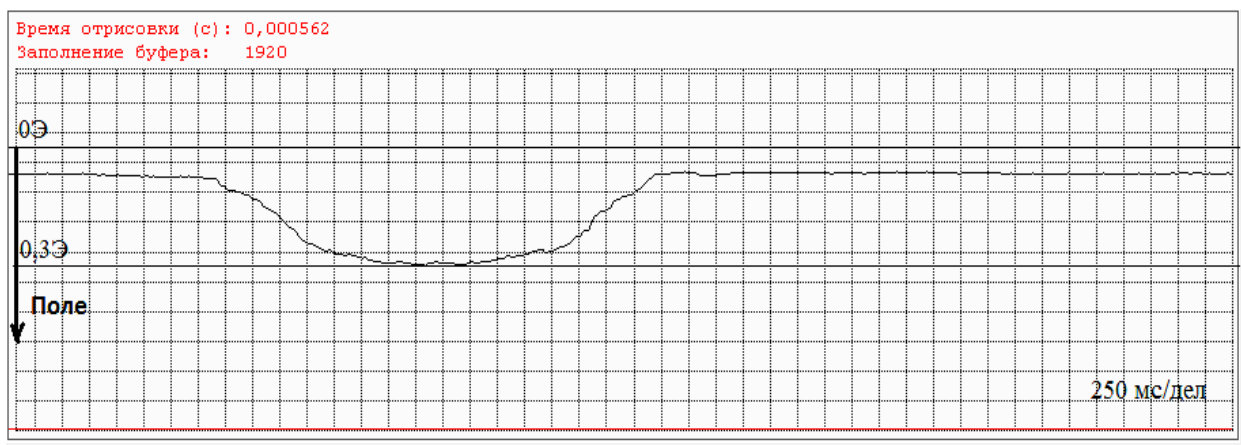


Рисунок 12 - график измерения магнитного поля земли МИ датчиком.

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 13 приведен график измерения магнитного поля проводника в реальном времени.

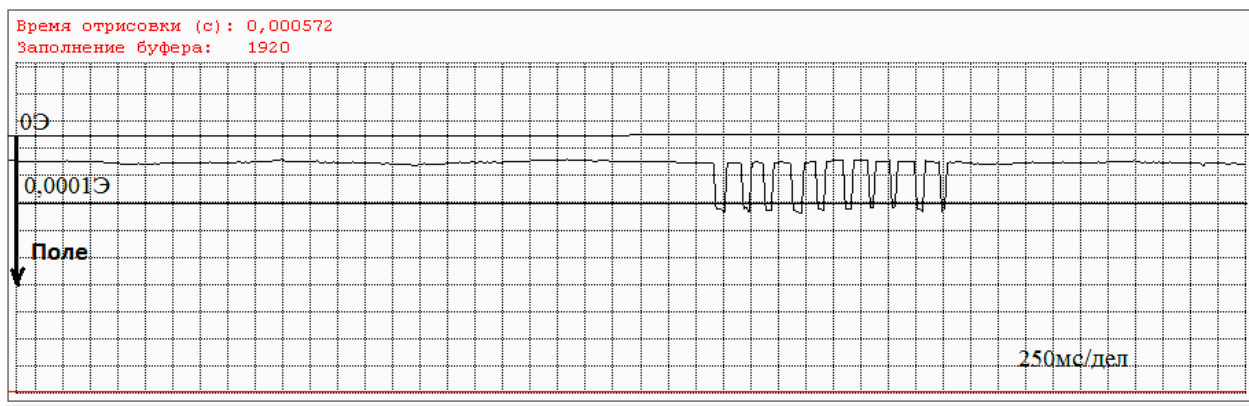


Рисунок 13 - график измерения магнитного поля проводника в графическом виде.

## Основные результаты и выводы

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. Предложенная термомагнитная обработка микропроводов в составе чувствительного элемента позволяет модифицировать структурные свойства микропровода. Такая обработка позволяет частично снять внутренние механические напряжения в микропроводе, возникающие при затвердевании расплава, а также напряжения, приобретенные в процессе сборки сенсора. И в результате такой обработки увеличивается чувствительность датчика.
2. Разработана методика измерения температурных зависимостей импедансных характеристик ЧЭ для различных вариантов его конструкции, проведено исследование этих зависимостей и предложено несколько вариантов температурной компенсации.

3. Разработан и собран магнитный стенд для проведения исследований свойств чувствительных элементов МИ датчиков.
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 двухпроводной 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.
6. 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.
7. Предложен резонансный метод возбуждения, позволяющий резко повысить соотношение (вольт/Э) на один виток. Получен патент RU2549843. Увеличение чувствительности происходит за счет минимизации потерь энергии внутри детектирующего контура ЧЭ при совпадении частоты возбуждения и резонансной частоты внутреннего контура ЧЭ.
8. Разработана конструкция миниатюрного интеллектуального магнитоимпедансного сенсора. Получен патент RU2582488. 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.
9. 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.
10. По описанной в работе технологии изготовлено несколько прототипов интеллектуальных магнитных датчиков, которые по своим техническим данным и свойствам находятся на уровне мировых аналогов.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

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.