

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет информационных
технологий и электроники
(наименование)
Направление подготовки

Магистерская программа

Кафедра
«Нано- и микроэлектроника»
(наименование)
11.04.04. «Электроника и
наноэлектроника»
(код и наименование)
Нано- и микроэлектроника
(наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
на тему

Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского
магнитоимпедансного эффекта

Студент 24ПДм1
номер группы

Алекс 08.06.26
подпись, дата

Горбунцов Алексей Андреевич
ФИО полностью

Научный руководитель

к.т.н. доцент, ПГУ
должность, наименование организации

08.06.26
подпись, дата

Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы

Рецензент

к.т.н., директор, «РАСТ+»
должность, наименование организации

08.06.26
подпись, дата

Перекусихин Ю.В.
фамилия, инициалы

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

08.06.26
подпись, дата

Рыжова Т.Н.
фамилия, инициалы

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.26 № 10)

Заведующий кафедрой НимЭ
должность, наименование организации

10.06.26
подпись, дата

Пронин И.А.
фамилия, инициалы

Работа защищена с оценкой отлично (протокол ГЭК от 19.06.26 № 2)

Секретарь ГЭК
должность, наименование организации

19.06.26
подпись, дата

Вольсков А.А.
фамилия, инициалы

РЕФЕРАТ

Тема работы: «Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта».

Цель работы: изучение гигантского магнитного импеданса (ГМИ) в магнитомягких аморфных сплавах, исследование конструктивных и технологических аспектов изготовления магнитных чувствительных элементов для миниатюрных датчиков на основе ГМИ эффекта, повышение их качества и надежности в процессе изготовления.

Объект исследования: магнитный чувствительный элемент, обладающий эффектом гигантского магнитного импеданса.

Предмет исследования: изучение и выявление особенностей чувствительных элементов в магнитных датчиках с ГМИ и способы по улучшению их параметров.

Отчет состоит из: 112 страниц, 22 рисунков, 5 таблиц, 102 использованных источников, 15 слайдов презентации и 8 приложений.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитный отклик, гигантский магнитный импеданс, чувствительный элемент, ферромагнитные материалы, ферромагнитная микропроволока, ферромагнитная лента, магнитные пленки, датчики магнитного поля, технология изготовления, блок управления.

Исследования базировались на анализе материалов, конструкций и методик получения существующих магнитных чувствительных элементов работающих на эффекте ГМИ, их проблемах, преимуществах и недостатках, а также экспериментальных методах изучения в случае компонентов и деталей для установки по изготовлению чувствительного элемента.

В ходе работы были описаны эффект ГМИ и принцип его работы. Проанализировано соотношение основных параметров, характеристик и конструкций материалов с ГМИ.

Выведены основные критерии выбора магнитоимпедансных датчиков с чувствительным элементом в виде аморфной ферромагнитной микропроволоки.

Указаны самые распространенные способы по изготовлению чувствительного элемента.

Разработан специализированный блок управления для установки по изготовлению чувствительного элемента по методу Тейлора-Улитовского, который должен обеспечивать изготовление высококачественных аморфных микропроволок. Составлены чертежи для крышки корпуса и самого корпуса блока управления.

Создан программный код в среде разработки *Arduino IDE*, который отвечает за логику работы блока контроля.

Полученную информацию можно использовать на практике, а именно для изготовления качественных и надежных опытных образцов чувствительных элементов в виде аморфной ферромагнитной микропроволоки, работающих на эффекте ГМИ.

Выявленные особенности магнитного чувствительного элемента, работающего на эффекте ГМИ указывают на возможность дальнейшего улучшения их функциональных характеристик за счет правильного подбора материала, конструкции и способа изготовления данного устройства.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Материалы и конструкции чувствительных элементов с ГМИ	7
1.1 Критерии выбора материалов с ГМИ	7
1.2 Оценка материалов с эффектом ГМИ и их конструкций	8
1.3 Рекомендуемые ГМИ-материалы для сенсорных датчиков.....	21
2 Конструкции магнитных датчиков с аморфной микропроволокой, реализующей эффект ГМИ	23
2.1 Двухвыводной датчик импеданса	23
2.2 Миниатюрный датчик импеданса, изготовленный с помощью технологии <i>MEMS</i>	25
2.3 Датчик ГМИ с поперечной катушкой.....	27
2.4 Генераторные/частотные датчики ГМИ	28
2.5 Сравнение конструкций магнитных датчиков с ГМИ	30
3 Технология производства аморфной металлической микропроволоки.....	33
3.1 Способы изготовления аморфной металлической микропроволоки .	33
3.2 Блок управления и контроля для установки формирования аморфного ферромагнитного микропровода	38
3.3 Алгоритм работы блока управления и контроля для установки формирования аморфного ферромагнитного микропровода	48
Заключение	52
Список использованных источников	55
Приложение А. Задание на ВКР	65
Приложение Б. Блок управления и контроля схема электрическая структурная.....	69
Приложение В. Чертеж корпуса блока управления и контроля.....	71
Приложение Г. Чертеж крышки для корпуса блока управления и контроля	73
Приложение Д. Листинг <i>Arduino IDE</i> модуля для блока управления и контроля.	75
Приложение Е. Список опубликованных научных работ.....	91
Приложение Ж. Результат проверки ВКР в системе Антиплагиат.ВУЗ	93
Приложение З. Презентация ВКР.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Темой данной диссертации является «Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта».

Актуальность темы: Одним из важных направлений современного приборостроения является поиск и внедрение новых сред и физико-химических эффектов для первичных преобразователей и конвертеров физических величин, которые определяют эффективность и качество создаваемых на их основе функциональных устройств.

Датчики магнитного поля лежат в основе многих передовых инженерных решений в магнитометрии, низкотоковой аппаратуре и автоматике. Современные сенсоры отличаются широкой применимостью, высоким отношением сигнал/шум и сравнительно простой технологией изготовления. В то же время курс на миниатюризацию, повышения качества магнитных/электрических свойств и снижение себестоимости электроники требует дальнейшего совершенствования сенсорных элементов. К приоритетным задачам относятся разработка высококласных магниточувствительных структур, использующих эффект гигантского магнитного импеданса.

Явление магнитоимпеданса состоит в том, что комплексное сопротивление (импеданс) ферромагнитного проводника, по которому протекает переменный ток, меняется под действием внешнего магнитного поля. В области слабых полей относительное изменение импеданса в таких проводниках достигает сотен процентов.

Поиск проводников с высокой полевой чувствительностью импеданса и установление условий проявления ГМИ - одно из наиболее динамично развивающихся направлений прикладной электродинамики и физики магнитных материалов.

Высокая чувствительность импеданса к магнитному полю делает ГМИ крайне перспективным для практики: датчики на его основе применимы в

магнитной дефектоскопии, медицине, системах позиционирования, градиентометрии и разнообразных электронных устройствах.

Целью работы является исследование конструктивных и технологических аспектов изготовления магнитных чувствительных элементов для миниатюрных датчиков на основе ГМИ эффекта, повышение их качества и надежности в процессе изготовления.

Задачи:

- изучить эффект ГМИ, принцип его работы, проанализировать соотношение основных параметров и характеристик материалов с ГМИ;
- указать критерии выбора конструкции чувствительных элементов и магнитоимпедансных датчиков;
- изучить основные технологии по изготовлению чувствительного магнитного элемента в форме аморфной ферромагнитной микропроволоки (АФМ) для миниатюрных магнитных сенсоров;
- усовершенствовать технологию формирования АФМ, разработав специализированный блок управления для установки по изготовлению чувствительного магнитного элемента данной формы;
- на основе полученной информации, сделать заключительные выводы.

1 Материалы и конструкции чувствительных элементов с ГМИ

1.1 Критерии выбора материалов с ГМИ

Для материалов с эффектом ГМИ, которые будут использоваться в магнитных датчиках, должны соблюдаться три основных требования, а именно, доступность в цене, высокий коэффициент ГМИ и высокая чувствительность к приложенному внешнему полю. С учетом теоретического анализа и экспериментальных результатов других работ, можно сделать вывод, что большой эффект ГМИ должен существовать в магнитных материалах, имеющих:

- низкое удельное сопротивление;
- высокую магнитную проницаемость;
- высокую намагниченность насыщения;
- малый параметр ферромагнитной релаксации (или низкий параметр времени релаксации).

Поэтому основными материалами, реализующие эффект ГМИ являются ферромагнитные сплавы. Особое внимание будет уделено сплавам на основе железа и кобальта т.к. они обладают оптимальным соотношением электрических и магнитных свойств и параметров и имеют достаточно низкую стоимость.

Применение дорогостоящих и редкоземельных ферромагнетиков (самарий, гадолиний и т.п.) и сплавов с их наличием приходится исключить из данного обзора, т.к. они не соответствуют основному критерию выбора материала: относительно высокая магнитная чувствительность при доступной цене производства.

Что касается структуры ферромагнетиков, то в данном случае кристаллические ферромагнитные материалы имеют преимущество в виде более низкого удельного сопротивления, но аморфные ферромагнитные материалы обладают лучшими магнитными свойствами в области слабых магнитных полей (например, более высокой магнитной проницаемостью, и намагниченностью насыщения), поскольку им не свойственна

магнитокристаллическая анизотропия. В частности, можно ожидать, что немагнестрикционные материалы продемонстрируют наилучшие характеристики эффекта ГМИ.

Время релаксации часто рассматривается в диапазоне высоких частот, где происходит ферромагнитный резонанс, в то время как в диапазоне промежуточных частот (т.е. 0,1–10 МГц), На котором работает большинство датчиков на основе эффекта ГМИ, его можно не учитывать. Кроме того, не стоит забывать, что на практике для магнитных сенсоров важны также технологичность их изготовления и стоимость материалов, из которых они состоят.

1.2 Оценка материалов с эффектом ГМИ и их конструкций

В ферромагнитных материалах максимальное значение эффекта ГМИ, наблюдаемое экспериментально, намного меньше теоретически прогнозируемого значения. Исследования в этой области были сосредоточены на специальной термической обработке и разработке новых материалов со свойствами, подходящими для практического применения датчиков с эффектом ГМИ. В этом разделе будут рассмотрены и оценены все существующие материалы с ГМИ.

1.2.1 Аморфные и нанокристаллические ферромагнитные микропровода.

1.2.1.1 Проволока на основе кобальта. Как обычная, так и покрытая стеклом аморфная проволока на основе кобальта обладает эффектом ГМИ благодаря высокой круговой проницаемости. В основном это связано с наличием циркулярной анизотропии и кольцевой доменной структуры внешней оболочки, которая возникает в результате взаимодействия отрицательной магнитострикции и остаточного сжимающего напряжения [1]. Среди исследованных аморфных сплавов на основе кобальта, система сплавов с номинальным составом CoFeSiB демонстрирует почти нулевую магнитострикцию $k_s = 0,4 \times 10^{-7}$. Этот сплав часто получают путём легирования системы Fe-Si-B , которая имеет положительное значение $k_s = 25 \times 10^{-6}$ с CoSiB ,

у которого отрицательное k_s значение -3×10^{-6} [1,2]. В результате в обычной аморфной проволоке $\text{Co}_{68}\text{Fe}_{4,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ был достигнут рекордный уровень изменения импеданса (1200% при 14,2 МГц) [3]. Это значение значительно выше ранее зарегистрированного (600%) для того же состава в работах [4,1]. Это увеличение значения изменения импеданса связано с минимизацией контактного сопротивления и компенсацией паразитной импедансной составляющей [3].

В попытке разработать магнитные проволоки для высокочастотных сенсорных датчиков в работе [5] сообщено, что эффект ГМИ на высоких частотах демонстрировался в аморфной проволоке со стеклянной оболочкой CoMnSiB с практически нулевой магнитострикцией.

Для аморфного микропровода $\text{Co}_{68}\text{Mn}_7\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ изменение импеданса и магнитный отклик достигли значений 153% и 65 %/Э соответственно, при частоте 30 МГц. В работе [6] также показано, что эти проволоки также демонстрируют эффект ГМИ на частотах вплоть до ГГц. В диапазоне частот от 100 МГц до 6 ГГц коэффициент ГМИ достиг максимального значения 100% на частоте 2 ГГц. Для аморфных проволок на основе Co эффект ГМИ может быть дополнительно усилен с помощью соответствующего отжига в магнитном поле [7], отжига в джоулевом токе [8-12] или приложения растягивающего напряжения [13,14]. Таким образом, аморфные провода на основе кобальта с почти нулевым и отрицательным значением магнитострикции являются хорошими кандидатами для использования в датчиках ГМИ. Следует отметить, что в то время как обычные аморфные проволоки на основе кобальта подходят для использования в датчиках в низкочастотном и среднечастотном диапазоне (до нескольких МГц), аморфные микропровода со стеклянным покрытием можно использовать еще и в электротехнических устройствах, работающих на гораздо более высоких частотах (до нескольких ГГц). Благодаря относительно высокому удельному сопротивлению микропровода сохраняют высокое значение добротности на более высоких частотах по сравнению с лентами. На практике, в зависимости от конкретных требований к сенсорному устройству,

следует выбирать либо проволоки, либо микропроволоки соответствующим образом.

1.2.1.2 Проволоки на основе железа. Аморфные проволоки на основе железа имеют относительно низкий коэффициент ГМИ или вообще не имеют его, из-за их относительно низкой эффективной магнитной проницаемостью, которая обусловлена наличием радиальной доменной структуры внешней оболочки, возникающей в результате взаимодействия между положительной магнитострикцией и компрессионного напряжения [7,15]. Было обнаружено, что первичный сплав Fe-Si-B, имеющий положительное значение k_s , равное 25×10^{-6} , демонстрирует, небольшой эффект магнитоимпеданса ($\sim 3\%$), в то время как больший эффект магнитоимпеданса ($\sim 36\%$) был получен в отожженных проволоках [7,16]. Именно осаждение нанокристаллической фазы FeSi значительно снизило объёмную положительную магнитострикцию и, следовательно, привело к эффекту магнитоимпеданса в отожжённых проволоках FeSiB [16]. Кристаллизация аморфных сплавов на основе FeSiB, содержащих Nb и Cu, вызывает образование наноразмерной ОЦК-структуры, и ОЦК-сплавы проявляют превосходные магнитомягкие свойства (т.е. высокую эффективную проницаемость и малую коэрцитивную силу) [2,7]. В этих сплавах Cu и Nb играют роль максимизации плотности зародышей кристаллов и замедления роста зёрен, что приводит к ультрамелкозернистой структуре. Среди этих сплавов наноструктурированные сплавы с номинальным составом $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ показали наилучшие магнитные параметры.

Таким образом, в работе [7] показано, что обычные нанокристаллические проволоки $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ (отожженные при 550-600 °C в течение 1 часа) демонстрировали явление ГМИ. Наибольшее значение коэффициента ГМИ составило около 200% на частоте 500 кГц для данного образца проволоки. В другом исследовании [17] используя тот же сплав, Fe частично заменили на Cr в надежде на дальнейшее снижение магнитострикции исходного сплава. Хотя коэффициент ГМИ и магнитная чувствительность были немного ниже в образцах, легированных хромом, его добавление улучшило отклик ГМИ и

значительно снизило нежелательный гистерезис на кривых ГМИ при увеличении и уменьшении приложенного магнитного поля [17]. Кроме того, наличие хрома значительно повысило коррозионную стойкость, что важно для применения датчиков в агрессивных средах.

Эффект ГМИ также наблюдался в нанокристаллических проволоках и микропроводах на основе Fe со стеклянным покрытием [15]. Интересно, что нанокристаллические микропровода в стеклянной оболочке $\text{Fe}_{89}\text{B}_1\text{Si}_3\text{C}_3\text{Mn}_4$, демонстрировали эффект ГМИ в ГГц диапазоне частот [6]. При частоте 4 ГГц коэффициент ГМИ достигал значения до 70% для образца, отожженного при 350 °С. Для этой микропровода конвенциональный отжиг в печи оказался более эффективным в улучшении эффекта ГМИ по сравнению с отжигом током. Более того, следует помнить, что как для аморфных, так и для нанокристаллических проводов на основе железа с покрытием из стекла, удаление стеклянного слоя может значительно улучшить эффект ГМИ и магнитный отклик. Однако коэффициенты ГМИ для нанокристаллических проводов на основе железа часто меньше, чем у аморфных проволок на основе кобальта [1].

1.2.2 Электроосажденные микропровода. Помимо быстро закаленных проволок, электролитически осажденные проволоки, которые состоят из высоко проводящего немагнитного металлического сердечника (например, Cu, CuBe и Ag) и тонкого слоя мягкого магнитного металла (например, NiFe, NiFeRu, NiFeMo, CoP и CoNiFe), показали отличные свойства ГМИ [18–22]. Для электролитически осажденных проволок магнитный слой может иметь либо кольцевую, либо радиальную конфигурацию доменов, которая сильно зависит от состава сплава и условий обработки образца [20]. Предполагается, что проволоки с кольцевой структурой доменов демонстрируют больший эффект МИ [18,22].

В работе [18] предположили, что эффект гигантского магнитоимпеданса может быть дополнительно усилен в композитной аморфной проволоке, если

электропроводность внутреннего сердечника намного выше, чем оболочки. После этой работы были предприняты экспериментальные попытки исследовать эффект ГМИ в электроосаждённых проволоках, таких как CoP/Cu [19], NiFe/Cu [21], CoNiFe/Cu [20], NiFeRu/Cu [23], и NiFeMo/Cu [24].

В работе [25] указано, что проволока из CoP/Cu, полученная методом электроосаждения, обладает радиальной магнитной анизотропией (т. е. радиальной доменной структурой), а размер замыкающих доменов увеличивается с ростом толщины магнитного слоя (CoP). Интересно отметить, что, хотя от магнитных проволок с радиальной магнитной анизотропией не ожидалось появления эффекта ГМИ, был достигнут значительный рост коэффициента ГМИ с увеличением толщины магнитного слоя в композиционной проволоке CoP/Cu [25]. Это указывает на то, что наблюдаемый эффект ГМИ был связан с распределением тока по радиусу образца с двумя чётко определёнными областями с различными магнитными свойствами [26–28]. При измеренной частоте 10,7 МГц коэффициент МИ и магнитная восприимчивость достигли максимальных значений 534% и 21 %/Э соответственно [19].

В исследовании [20] было обнаружено, что коэффициент МИ достигает значения 1200% на частоте 4 МГц для проволоки с гальваническим покрытием FeNiCo/CuBe. Это одно из самых высоких значений, зафиксированное на сегодняшний день, среди существующих проволок с гальваническим покрытием. Однако информация о магнитном отклике ГМИ не была предоставлена [20].

В комплексном исследовании влияния параметров обработки (например, плотности тока при электроосаждении, коэффициента рабочей нагрузки, состава электролита, значения pH , приложенного магнитного поля, магнитных слоев и последующего отжига) на электроосаждённых проволоках NiFe/Cu в работе [21] сообщили, что коэффициент МИ и магнитный отклик достигли максимальных значений 1110% и 218 %/Э соответственно при частоте 4 МГц для образца проволоки, обработанного методом отжига джоулевым током.

Также было обнаружено, что эффект ГМИ может быть дополнительно усилен в электроосаждённых проволоках за счёт включения изолирующего промежуточного слоя между сердечником и магнитной оболочкой (например, в проволоке CuBe/изолятор/NiFeB) [29,30]. Коэффициент МИ в данном случае достиг значения 250% при частоте от 500 кГц до 1 МГц что на 23% больше, чем для электроосажденного провода CuBe/NiFeB без изоляционного слоя [29]. Это может быть связано с различиями в распределении тока под воздействием внешнего магнитного поля и с электромагнитным взаимодействием между проводящим сердечником и ферромагнитным слоем с изоляционным слоем и без него [29,30].

В этом контексте в работе [22] разработана модель для прогнозирования эффекта ГМИ в таких типичных проволоках. Она показывает, что зависимость магнитной проницаемости оболочки от поля существенно влияет на распределение вихревых токов и, следовательно, приводит к наблюдаемому эффекту ГМИ. Добавление тонкого изоляционного слоя может привести к дальнейшему усилению эффекта ГМИ на достаточно высоких частотах, поскольку он фактически увеличивает как диагональный, так и недиагональный импеданс [22].

В целом композитные провода с электроосаждением являются подходящими материалами для производства высокопроизводительных магнитных датчиков и сенсорных устройств, работающих на низких и промежуточных частотах (до нескольких МГц). В этом рабочем режиме композитные провода с электроосаждением композитные провода могут быть даже более перспективными, чем быстрозакалённые проволоки и ленты.

1.2.3 Аморфные и нанокристаллические ферромагнитные ленты.

1.2.3.1 Ленты на основе кобальта. Сообщалось об эффектах ГМИ в аморфных лентах на основе Co из-за высокой поперечной магнитной проницаемости, обусловленной наличием поперечно ориентированной доменной структуры [31]. Как и в случае с аморфными проволоками на основе кобальта, было обнаружено, что ленты с составом CoFeSiB и почти нулевой, но

отрицательной магнитострикцией демонстрируют самый высокий коэффициент ГМИ среди лент на основе кобальта [32]. Коэффициент МИ достиг значения $\sim 160\%$ на частоте 1 МГц в аморфной ленте $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$ ($x=0,057$) с почти нулевой магнитострикцией. Было предпринято несколько попыток улучшить соотношение МИ и магнитную восприимчивость сплава CoFeSiB за счёт добавления других элементов, таких как Cr, Mn, Ni и Mo. Однако полученные результаты были неудовлетворительными [33-35]. Но в других исследованиях [36-38] было показано, что частичная замена В на Cu и Nb в исходной композиции CoFeSiB (образуя композицию CoFeSiBCuNb) улучшила как отношение МИ, так и магнитный отклик. Эта замена благоприятствовала получению поперечной доменной структуры, поскольку наличие Cu и Nb образует хорошо дифференцированные микроструктуры [2]. Отжиг при низких температурах также привёл к значительному улучшению соотношения МИ и магнитного отклика этих сплавов [36]. За счёт оптимизации условий отжига наибольший коэффициент МИ (513%) и магнитный отклик (144 %/Э) были достигнуты при измеренной частоте 5 МГц в ленте $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{Nb}_{2,2}\text{Cu}_{0,8}\text{B}_7$, отожженной при 300 °C в течение 25 мин (рисунок 1) [38]. Это одно из самых высоких значений для лент на основе кобальта. Эти материалы идеально подходят для использования в сенсорных устройствах на основе ГМИ, работающих в низкочастотном и среднечастотном диапазонах.

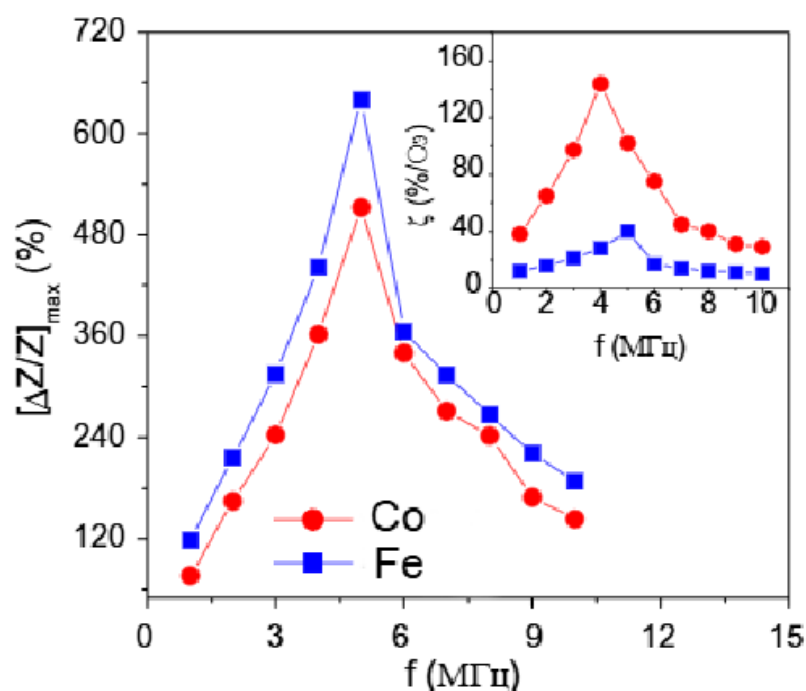


Рисунок 1 - Частотная зависимость максимального коэффициента МИ $[\Delta Z/Z]_{\max}$ и магнитного отклика для $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{Nb}_{2.2}\text{Cu}_{0.8}\text{B}_7$ и $\text{Fe}_{71}\text{Al}_2\text{Si}_{14}\text{B}_{8.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3.5}$

В целом эффект ГМИ в образце ленточной формы меньше, чем в образце проволоочной формы, что связано с их разной структурой магнитных доменов. К преимуществам материалов на основе Co-относятся низкая магнитострикция и простота управления магнитной анизотропией путем отжига в приложенном магнитном поле или под приложенным внешним напряжением [15]. Недостатками являются высокое удельное сопротивление и относительно большой остаточный эффект магнитострикции [39]. Кроме того, материалы, содержащие Co, относительно дороги.

1.2.3.2 Ленты на основе железа. Аморфные ленты на основе Fe также как и аморфные проволоки часто демонстрируют относительно слабые или даже нулевые эффекты МИ из-за очень низкой эффективной магнитной проницаемости, обусловленной наличием продольно ориентированной доменной структуры [7,40].

Напротив, нанокристаллические сплавы на основе железа обладают значительно улучшенным эффектом ГМИ в результате повышенных

магнитомягких параметров за счет образования поперечно ориентированных доменов [41,42].

Впервые эффект ГМИ был обнаружен в нанокристаллических лентах FeSiBCuNb в работе [43]. В ней было показано, что частичная замена Cu и Nb на B в исходной нанокристаллической композиции FeSiB, образующей нанокристаллическую композицию FeSiBCuN, приводит к одновременному улучшению эффекта ГМИ и магнитного отклика. В исследовании [44] продемонстрировано, что на частоте 4,5 МГц коэффициент МИ достиг максимального значения в 400% для $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$. Ленту отжигали при температуре 550 °С в течение 3 ч, в то время как у ее аморфного аналога этот показатель составлял всего около 40%.

Были предприняты значительные усилия для улучшения эффекта ГМИ, а также магнитного отклика нанокристаллического сплава FeSiBCuNb, как с использованием различных методов отжига [45,46], так и путем изменения состава сплава, например $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_x\text{B}_{22,5-x}\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ ($x=9,16$) [47], FeCuMoSiB [48,49], $\text{Fe}_{73,5-x}\text{Mn}_x\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($x=1,3,5$) [50,51], $\text{Fe}_{73,5-x}\text{Cr}_x\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Au}_1$ ($x=1,2,3,4,5$) [52]. Соответствующая термическая обработка (например, оптимальная температура и время отжига, отжиг с приложенным магнитным полем и/или механическим напряжением и др.) может значительно повысить эффект ГМИ.

Добавление небольшого количества Al (2 ат.%) в нанокристаллический сплав FeSiBCuNb привело к значительному улучшению как эффекта ГМИ, так и магнитного отклика [53]. Это объясняется увеличением магнитной проницаемости, уменьшением коэрцитивной силы и снижением сопротивления [2]. Для нанокристаллического образца $\text{Fe}_{71}\text{Al}_2\text{Si}_{14}\text{B}_{8,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3,5}$, оптимизированного путем отжига аморфной ленты при 550 °С в течение 45 мин, коэффициент МИ и магнитный отклик достигли максимальных значений 640% и 40 %/Э соответственно при измеренной частоте 5 МГц [38].

Эффекты ГМИ также были зарегистрированы в нанокристаллических лентах, таких как FeZrB [54,55], FeZrBCu [56,57], FeZrCuBAl [58-60] и FeCoZrNbB [61,62]. В работе [59] показано, что коэффициент МИ достиг

чрезвычайно большого значения в 1100% при частоте 4,6 МГц в нанокристаллической ленте $\text{Fe}_{92-x}\text{Zr}_7\text{B}_x\text{Cu}_1$ ($x=8$) (т.е. аморфном сплаве, отожженном при 550 °С в течение 1 часа). Однако оценить отклик ГМИ этого образца довольно сложно, поскольку на кривой ГМИ наблюдается большая асимметричная двухпиковая особенность, вызванная небольшим остаточным гистерезисом распределения локальной анизотропии при низких магнитных полях. Такая асимметричная двухпиковая форма профиля ГМИ нежелательна для применения в сенсорных устройствах [58]. При сравнении величины эффекта ГМИ для нанокристаллических лент на основе Fe в работе [54] сказано показали, что больший коэффициент ГМИ наблюдается в образце с более низким электрическим сопротивлением. Поскольку электрическое сопротивление нанокристаллического образца FeZrBCu было меньше, чем у нанокристаллического FeSiBCuNb , в первом образце был достигнут больший коэффициент МИ [54,55].

В общем, нанокристаллические материалы на основе Fe обладают простотой управления магнитной мягкостью с помощью соответствующих термообработок, при которых происходит процесс нанокристаллизации. По сравнению с аморфными сплавами на основе Co, нанокристаллические материалы на основе Fe имеют более низкое сопротивление и более высокую намагниченность насыщения, а следовательно, обеспечивают больший эффект ГМИ [38]. Однако чувствительность ГМИ к полю часто ниже в нанокристаллическом образце на основе Fe. Еще одним недостатком нанокристаллического материала на основе Fe может быть его хрупкость после отжига. Тем не менее, материалы, содержащие Fe, значительно дешевле, чем содержащие Co.

1.2.4 Магнитные тонкие пленки. Большое количество ферромагнитных однослойных и многослойных пленок, проявляют эффект МИ. Экспериментально доказано, что эффект МИ намного сильнее в многослойной плёнке, чем в однослойной [63, 64]. Разницу в ГМИ эффекте между многослойными и однослойными плёнками можно понять следующим образом:

для однослойных плёнок коэффициент МИ был относительно небольшим на частотах всего в несколько МГц, потому что скин-эффект был относительно слабым. Также из-за разницы в удельном сопротивлении между внутренним и внешним слоями многослойной пленки может произойти очень значительное изменение импеданса на гораздо более низких частотах, если индуктивность, создаваемая внешними магнитными слоями, станет больше сопротивления, определяемого в основном внутренним проводником [63,65-67]. Разница в удельном электрическом сопротивлении внутреннего слоя также приводит к различному отклику ГМИ в многослойных пленках CoSiB/M/CoSiB ($M = \text{Cu, Ag, Ti}$) [68, 69]. Удельное электрическое сопротивление Ag (1,62 мкОм/см) меньше, чем у Cu (1,72 мкОм/см) и Ti (47,8 мкОм/см), и, следовательно, наибольшее соотношение ГМИ было получено в образце CoSiB/Ag/CoSiB [69]. Коэффициент МИ и магнитный отклик этого образца достигли максимальных значений - 440% и 49 %/Э - на частоте 10 МГц.

Высокое соотношение МИ было достигнуто в сэндвич-структуре тонкоплёночной структуры с изоляционным промежуточным слоем SiO₂ между немагнитным проводником и ферромагнетиком (например, CoSiB/SiO₂/Cu/SiO₂/CoSiB) [68]. Полученное значение коэффициента МИ и магнитного отклика составило 700% и 300 %/Э соответственно при частоте 20 МГц. Увеличение коэффициента МИ многослойной плёнки CoSiB/SiO₂/Cu/SiO₂/CoSiB можно объяснить тем, что управляющий ток проходит только через проводящий слой, а разница в удельном сопротивлении между слоями ферромагнетика и немагнитного проводника увеличивается за счёт наличия изоляционного слоя (SiO₂) [68]. Однако в многослойных пленках FeSiBCuNb/SiO₂/Cu/SiO₂/FeSiBCuNb с аналогичной структурой получено гораздо меньшее значение отношения МИ (т.е. ~32% при частоте 5,45 МГц). Это можно объяснить различием в доменной структуре магнитных слоёв (например, CoSiB и FeSiBCuNb).

Кроме того, следует отметить, что для многослойных пленок конечной ширины магнитный поток может фактически просачиваться через внутренний

проводящий слой, что приводит к значительному снижению коэффициента ГМИ. Утечка потока через проводящий слой может привести к значительному снижению коэффициента ГМИ, когда ширина пленки меньше критического значения, которое зависит от поперечной проницаемости и толщины слоя. Это может количественно объяснить снижение соотношения МИ в $\text{CoSiB/SiO}_2/\text{Cu/SiO}_2/\text{CoSiB}$ с уменьшающейся шириной слоя Cu [68].

В высокочастотном диапазоне значения МИ были относительно малы что в однослойных, что в многослойных пленках. Что касается применения в сенсорах, многослойные пленки являются более перспективными, чем однослойные. Использование тонкопленочной технологии предпочтительнее, поскольку ее совместимость с технологией интегральных схем позволяет добиться миниатюризации и избежать проблем с выравниванием и пайкой проводов. Однако, по сравнению с быстро закаливаемыми проволоками и лентами, тонкие пленки часто сложнее получить с точным составом. И также их трудно подключить к системе измерения ГМИ и сложно интегрировать в линию передачи для измерений на высокой частоте.

1.2.5 Магнитные композиты. С целью улучшения эффекта ГМИ в аморфных лентах на основе Со разработана трёхслойная микроструктура «аморфная лента/Cu/аморфная лента», демонстрирующая максимальную величину МИ в 830% на частоте 280 кГц. Усиление эффекта ГМИ можно объяснить большой эффективной магнитной проницаемостью, обусловленной замкнутым путём магнитного потока в трёхслойной структуре [70,71].

Другой тип композитного материала состоит из аморфных микропроводов, внедрённых в полимерную матрицу. С целью уменьшения общего сопротивления композита аморфные микропроводы соединяются параллельно. Эффект ГМИ увеличивается с ростом числа микропроводов. Как видно из рисунка 2, на частоте 10 МГц эффект ГМИ составляет около 14% для одиночной аморфной микропровода, тогда как для композитного образца, содержащего четыре аморфные микропроводы, он достигает 447%. Кроме того, магнитный отклик композита с четырьмя аморфными микропроводами

достигает 43 %/Э, что значительно выше, чем у одиночной микропроволоки (~2%/Э) при той же частоте 10 МГц.

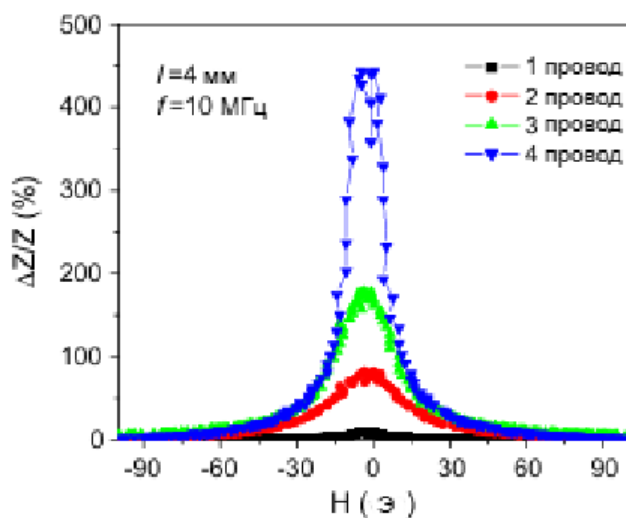


Рисунок 2 - Эффект ГМИ, измеренный в зависимости от магнитного поля при 10 МГц в композитном образце, содержащем различное количество аморфных микропроводов длиной 4 мм

Чтобы подтвердить предположение, что усиление эффекта ГМИ в композите обусловлено снижением сопротивления, в работе [72] также исследован эффект ГМИ при уменьшении длины микропроводов. Поскольку сопротивление микропроволоки уменьшается с сокращением её длины, можно ожидать больший эффект ГМИ у более короткой микропроволоки. Действительно, больший эффект ГМИ наблюдался в композитных образцах, содержащих более короткие микропроволоки. Например, при частоте 10 МГц наблюдавшийся эффект ГМИ составил 235% для композита, содержащего две микропроволоки длиной 1 мм, тогда как для образца с длиной микропроводов 4 мм он составил 83%. Это ещё раз подтверждает, что сопротивление образца является важным фактором, определяющим величину эффекта ГМИ.

Более того, не только эффект ГМИ, но и его магнитный отклик также существенно возрастает при уменьшении длины микропроводов. Это благоприятно сказывается на практике, поскольку миниатюризация реальных электронных устройств требует, чтобы чувствительный элемент был как можно меньше.

1.3 Рекомендуемые ГМИ-материалы для сенсорных датчиков

В настоящее время доступен широкий спектр ГМИ-материалов для практического использования в ГМИ-сенсорах. В таблице 1 суммированы несколько материалов, обладающих высокой величиной ГМИ и магнитным откликом и перспективных для создания высокоэффективных ГМИ-сенсоров. Выбор подходящего материала зависит от конкретных требований, таких как чувствительность к магнитному полю, рабочий диапазон частот, габариты, доступность, надежность. Сверхвысокая чувствительность ГМИ к внешнему постоянному магнитному полю (до 10^{-8} Э) может быть использована в датчиках магнитного поля и других сенсорах, основанных на изменении локального магнитного поля.

Таблица 1 – Параметры ферромагнитных материалов

Материал	Конструкция	Коэрцитивная сила, Э	Коэф. ГМИ, %	Магнитный отклик, %/Э	Частота, МГц
$\text{Co}_{68}\text{Fe}_{4,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$	Микропроволока	180	1200	-	14,2
$(\text{Co}_{94}\text{Fe}_6)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Микропроволока	10	125	50	3,22
$\text{Co}_{68,25}\text{Fe}_{4,5}\text{Si}_{12,25}\text{B}_{15}$	Микропроволока	125	600	320	15
$\text{Co}_{83,2}\text{B}_{3,3}\text{Si}_{5,9}\text{Mn}_{7,6}$	Микропроволока	1	7,8	15,6	1
$\text{Co}_{68,2}\text{Mn}_7\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Микропроволока	50	153	65	30
$\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	Микропроволока	100	200	-	0,5
$\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	Микропроволока	25	25,5	8,9	2
CoP/Cu/CoP,	Электроосажденная проволока	30	190	26	1
CoP/Cu	Электроосажденная проволока	100	534	21	10,7
NiFe/Cu,	Проволока композитная	45	1100	218	4
FeNiCo/CuBe	Проволока композитная	50	1200	-	4
$\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{Nb}_{2,2}\text{Cu}_{0,8}\text{B}_7$	Лента	2	50	125	0.1
$\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	Лента	150	400	37	4,5
$\text{Fe}_{71}\text{Al}_2\text{Si}_{14}\text{B}_{8,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3,5}$	Лента				
$\text{Fe}_{84}\text{Zr}_7\text{B}_8\text{Cu}_1$	Лента	100	640	40	5
NiFe/Au/NiFe	Лента	75	1100	40	4.6
NiFe/Ag	Многослойная тонкая пленка	65	150	30	300
FeSiBCuNb/Cu/FeSiBCuNb	Многослойная тонкая пленка	150	250	12	18000
FeNiCrSiB/Cu/FeNiCrSiB	Многослойная тонкая пленка	70	1733	87	0,1

Продолжение таблицы 1

CoSiB/Cu/CoSiB	Многослойная тонкая пленка	70	77	7,2	13
CoSiB/SiO ₂ /Cu/SiO ₂ /CoSiB	Многослойная тонкая пленка	9	440	49	10
FeSiBCuNb/SiO ₂ /Cu/SiO ₂ /FeSiBCuNb	Многослойная тонкая пленка	11	700	304	20
Аморфная лента на основе Co/Cu /аморфная лента на основе Co	Многослойная тонкая пленка	60	32	4	5,45
Co _{70,3} Cr ₃ Fe _{3,7} B ₁₀ Si ₁₃ /полимер	Трехслойная микроструктура	20	830	-	0,28
Co ₆₈ Fe _{4,5} Si _{12,5} B ₁₅	Магнитные микропровода встроены в полимерную матрицу	50	470	43	10

Таким образом, исходя из данных таблицы 1, очевидно лучшего варианта исполнения чувствительного элемента для ГМИ датчика нет. Но все же стоит отметить, что в аморфных лентах коэффициент ГМИ в целом ниже, чем в микропроводах, поэтому им требуется обязательный отжиг в магнитном поле для улучшения магнитных свойств, что усложняет процесс изготовления датчика.

У тонких пленок (особенно многослойных) значения МИ на уровне микропровода и их легко совместить с интегральными схемами, но соблюдать точный химический состав в их случае довольно проблематично, как и подключить их к системе измерений ГМИ, что усложняет исследования их магнитных и электрических свойств

Поэтому исследования в данной работе будет проводиться на аморфной микропроводе из сплава на основе Co (CoFeSiB), т.к. это наиболее доступный в реализации вариант, дающий одновременно довольно высокий коэффициент ГМИ и магнитный отклик в высоком диапазоне рабочих частот при точном химическом составе материала.

2 Конструкции магнитных датчиков с аморфной микропроволокой, реализующей эффект ГМИ

Существует множество способов измерения магнитных полей, большинство из которых основано на тесной связи между магнитными и электрическими явлениями. В этом разделе будут описаны несколько самых распространенных технологий, используемых для измерения магнитного поля на основе эффекта ГМИ и в которых возможно применение чувствительного элемента в виде аморфной микропроволоки.

2.1 Двухвыводной датчик импеданса

Самое простое исполнение датчика. Когда мягкий ферромагнитный материал (с низкой коэрцитивной силой, H_c , и высокой магнитной проницаемостью, μ) подвергается воздействию высокочастотного переменного тока и приложенного магнитного поля, происходит значительное изменение глубины скин-слоя, что также приводит к резкому изменению импеданса (Z , сопротивления переменному току), который графически представлен на рисунке 3.

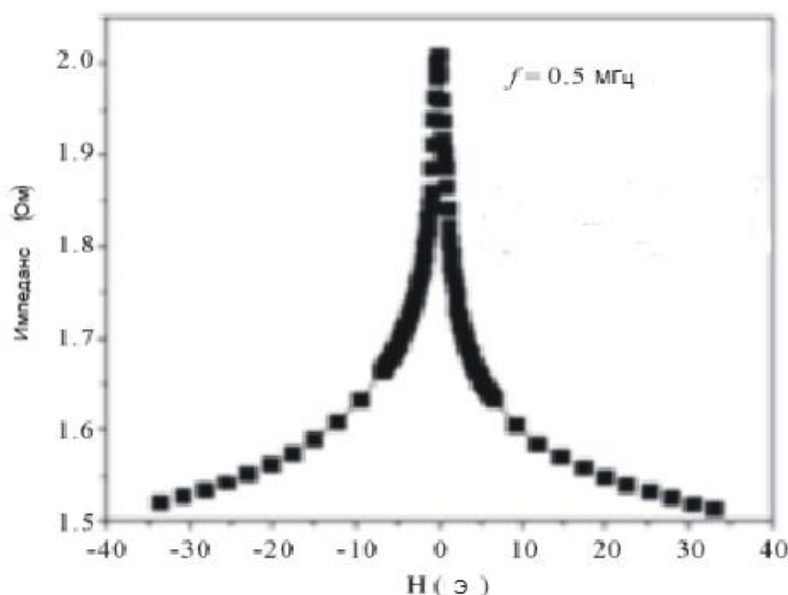


Рисунок 3 – Влияние скин-эффекта на импеданс

Скин-эффект возникает, когда переменный ток проходит по поверхности проводящего ферромагнитного материала. Высокие частоты переменного тока создают изменяющееся магнитное поле, которое, в свою очередь, создаёт

электрическое поле. Электрическое поле препятствует изменению плотности тока. Большая часть сопротивления току возникает в сердцевине проводника, заставляя ток проходить по внешней «поверхности» проводника. Следует отметить, что ферромагнитный проводник обычно является нелинейным элементом. Это означает, что напряжение не совсем пропорционально току и, более того, оно также содержит гармоники более высоких порядков основной частоты. Линеаризация в таком случае достигается подбором анизотропии, слабым смещающим полем или *DC*-током.

Экспоненциальное убывание плотности тока от поверхности к внутренней части зависит от циклической частоты тока ВЧ, сопротивления и проницаемости. В ферромагнитных материалах проницаемость зависит от частоты, амплитуды переменного магнитного поля, а также от других параметров, таких как величина и ориентация постоянного магнитного поля смещения, механическое напряжение и температура. Импеданс пропорционален глубине скин-слоя. Относительная магнитная проницаемость (μ_R) — это показатель того, насколько легко намагничивается образец. Высокая относительная магнитная проницаемость повышает чувствительность импеданса к частоте переменного тока. Коэрцитивная сила (H_c) — это степень обратного намагничивания, необходимая для того, чтобы свести наведённый магнетизм к нулю. Материалы с очень низкой коэрцитивной силой обладают высокой магнитной чувствительностью.

В идеальных магнитомягких материалах магнитная проницаемость достигает максимума при нулевом внешнем поле и резко падает при наличии магнитного поля. Этот принцип и используется в датчике ГМИ.

Такие сенсоры можно изготовить в виде спиральной структуры (рисунок 4). Спиральная структура датчика также может иметь очень компактный фактор, что упрощает интеграцию в интегральную схему [73].

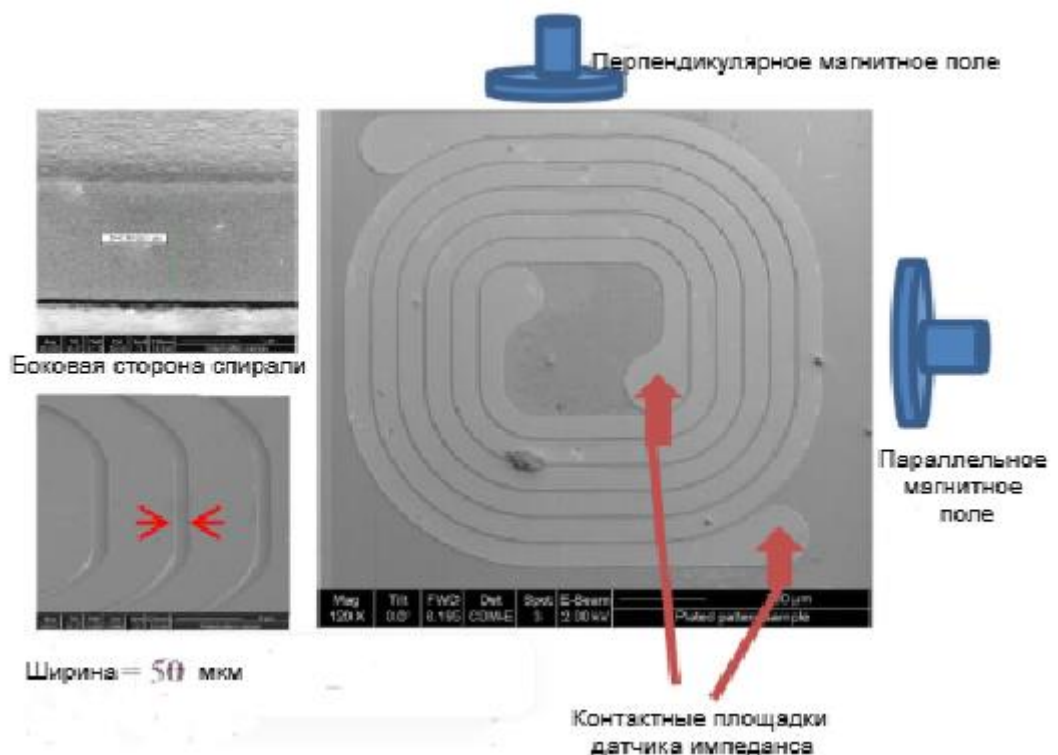


Рисунок 4 – Двухнаправленная спиральная структура датчика ГМИ

Можно использовать простую магнитную головку (рисунок 5), применяя ее в бесконтактном вращающемся энкодере [74].



Рисунок 5 – Простая магнитоиндукционная головка с использованием аморфной проволоки

2.2 Миниатюрный датчик импеданса, изготовленный с помощью технологии *MEMS*

Общая конструкция данного датчика показана на рисунке 6. В стеклянную подложку встраивается аморфная микропроволока и катушка для сбора микросигналов. Стекло – поддерживающий слой устройства, микропроволока работает в качестве чувствительного элемента, катушка микроприемника предназначена для извлечения сигнала. Все устройство

покрывается слоем негативного фоторезиста, который используется в качестве верхнего слоя микроспирали. Электрические соединительные площадки находятся на поверхности.

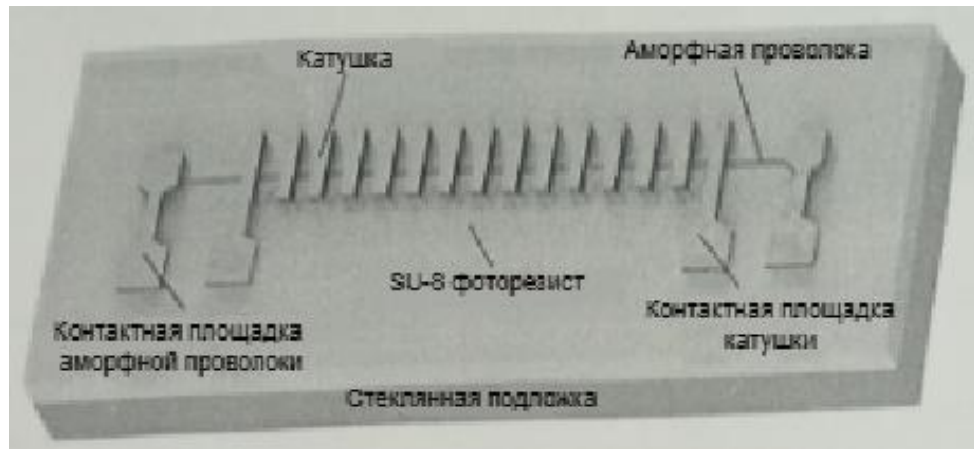


Рисунок 6 – Модель магнитного миниатюрного датчика

Приемная катушка датчика сигнала состоит из четырех частей: нижней катушки, стойки, диэлектрического слоя и верхней катушки. Согласно принципу работы датчика, приемная катушка может быть эквивалентна катушке индуктивности. Изменение внешнего магнитного поля вызывает изменение импеданса аморфного провода, что создает электродвижущую силу (ЭДС) катушки. Амплитуда индуцированной ЭДС через катушку (1) может быть выражена как:

$$E_c = N \times L_c \times (dI_c/dt): \quad (1)$$

где N – витки катушки датчика, L_c – индуктивность катушки, I_c – индуцированный ток через катушку, t – время протекания тока через катушку. Индуктивность катушки определяется как уравнение (2):

$$L_c = d\phi/dI_c: \quad (2)$$

где ϕ – магнитный поток через одновитковую катушку. Уравнение (1) показывает, что E_c можно улучшить, увеличив индуктивность катушки. Производительность микроиндуктора на высокой частоте зависит не только от подложки и материала катушки, но и от геометрических параметров катушки микроиндуктора.

На рисунке 7 представлена по трем измерениям выходного сигнала датчика, выходная характеристическая кривая. Кривая показывает связь между

выходным напряжением датчика ГМИ из аморфной проволоки и внешним магнитным полем: напряжение линейно изменяется с магнитным полем в диапазоне 0-45000 нТл. Характеристики датчика ГМИ: скорость изменения напряжения составляет 130 мВ/Э, погрешность линейности составляет 4,83% [75].

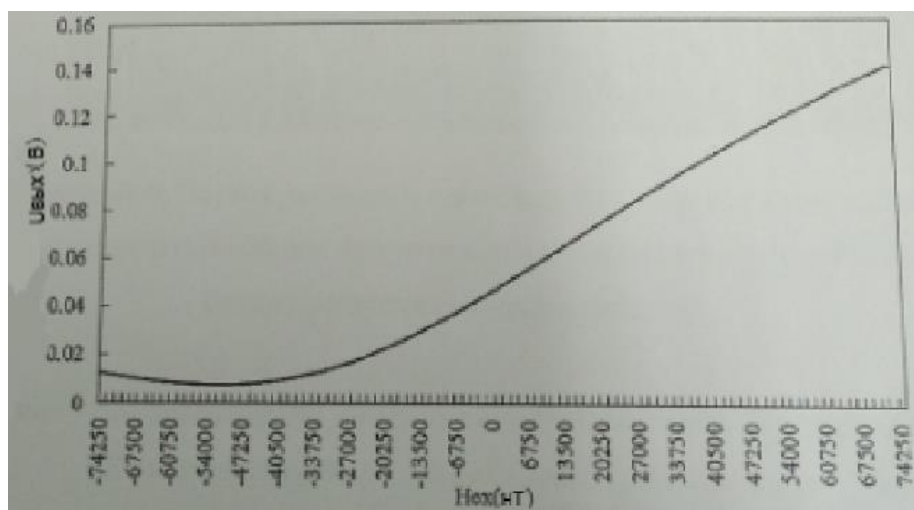


Рисунок 7 - Выходная характеристика образца аморфного проволочного магнитного датчика в диапазоне от -74250 нТл до 74250 нТл

2.3 Датчик ГМИ с поперечной катушкой

Электрическая схема такого датчика приведена на рисунке 8. Метод измерения сигналов, зависящих от приложенного магнитного поля, заключается в использовании катушки на магнитомягком проводнике. Появление напряжения на катушке связано с тем, что переменный ток вызывает изменение магнитной индукции в проводе как в продольном, так и в поперечном направлениях. Это явление было названо недиагональным магнитоимпедансом и более подробно изучено с использованием аморфных проволок на основе кобальта, изготовленных методом быстрой закалки. Аморфные ленты и тонкие пленки практически не применяются, т.к. в таком случае очень серьезно усложняется реализация такого датчика. Недиагональный магнитоимпеданс чувствителен к доменной структуре поверхности, и сигнал отклика в измерительной катушке должен быть максимальным в однодоменных проводах [76].

Как было сказано ранее, при подаче переменного тока на магнитный провод сигнал напряжения генерируется не только на проводе, но и в катушке, установленной на нем. Эти напряжения связаны с диагональным и недиагональным сопротивлениями соответственно. Эти сопротивления по-разному зависят от осевого магнитного поля: первое симметрично, а второе антисимметрично с почти линейной частью в пределах определенного интервала поля. В случае недиагональной характеристики необходим постоянный ток смещения, устраняющий круговые области. Импульсное возбуждение, сочетающее в себе как высокочастотные, так и низкочастотные гармоники, создает недиагональную характеристику напряжения без дополнительного тока смещения или поля. Это идеально подходит для практического проектирования схемы датчика [77].

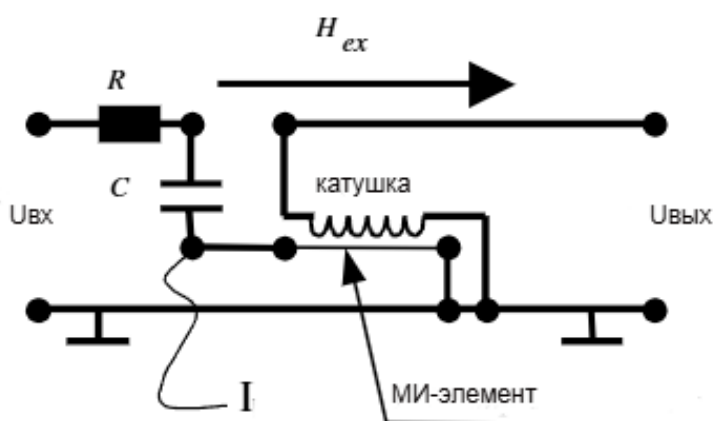


Рисунок 8 – Электрическая схема измерения с поперечной съёмной катушкой

2.4 Генераторные/частотные датчики ГМИ

Датчики магнитного поля могут использовать высокую чувствительность магнитоимпеданса к внешним постоянным или низкочастотным переменным полям, где низкая частота по крайней мере в десять раз ниже частоты возбуждения. Высокая частота возбуждения сопряжена с множеством проблем, таких как паразитные токи смещения, рассогласование импедансов и наличие отражённых сигналов. Чтобы избежать этих проблем, элемент с

магнитоимпедансом может служить индуктивностью в колебательных схемах, таких как генератор Колпитца и резонансный мультивибратор.

На рисунке 9 показан генератор Колпитца, в котором используется резонанс между индуктивным МИ-элементом и ёмкостями C_1 и C_2 . При частотах колебаний около 100 МГц ГМИ-сигнал может значительно увеличиваться. Выходной сигнал генератора примерно повторяет ГМИ-кривую; он является нелинейной функцией приложенного поля.

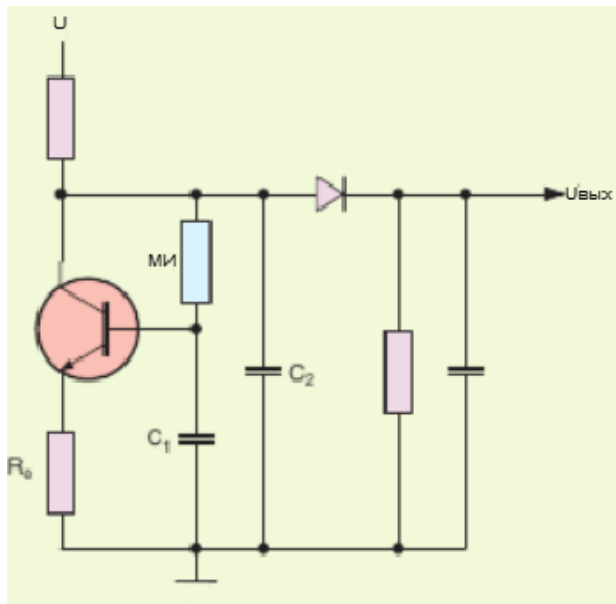


Рисунок 9 - Генератор Колпитца с МИ-элементом

Пара МИ-элементов, используемая в схеме мультивибратора, позволяет создать линейный датчик поля (рисунок 10).

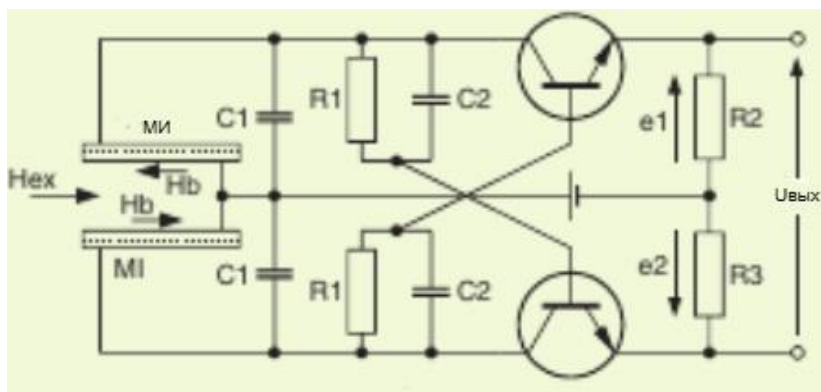


Рисунок 10 - Линейный датчик поля с мультивибратором

Два МИ-элемента, симметрично подключённые в мультивибраторе, подмагничиваются противоположно направленными постоянными полями H_b , так что в диапазоне приложенных полей $-H < H_{ex} < H_b$ выходное напряжение

было приблизительно линейным. Однако для создания поля подмагничивания H_b требуется, чтобы вокруг МИ-элементов были намотаны небольшие намагничивающие соленоиды. Этому усложнения можно избежать, если использовать постоянный ток смещения, поскольку скрученные провода обладают асимметричным ГМИ-эффектом. В паре скрученных МИ-элементов токи смещения текут в противоположных направлениях относительно приложенного постоянного поля. На рисунке 11 показана линейная зависимость от приложенного поля.

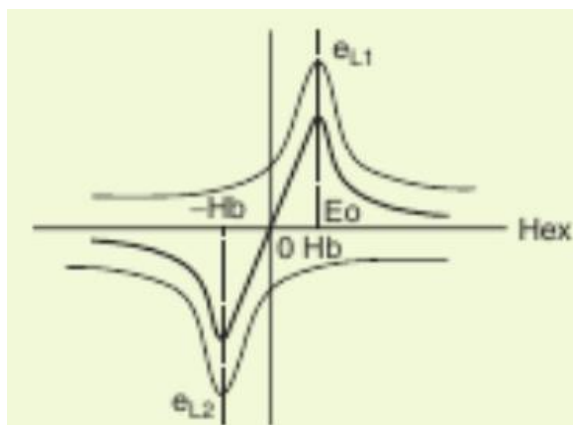


Рисунок 11 – Зависимость выходного напряжения от поля

В типичном датчике поля МИ-элементы расположены параллельно в двух плечах генератора, а поля подмагничивания H_b — противоположны. Датчик градиента поля использует либо однонаправленные поля подмагничивания для параллельных элементов, либо последовательно расположенные элементы с противоположными полями подмагничивания. Датчики такого типа могут обнаруживать биомагнитные поля и поля рассеяния, вызванные трещинами в стальных листах, а также использоваться в качестве магнитных энкодеров (датчиков углового положения) высокого разрешения [78].

2.5 Сравнение конструкций магнитных датчиков с ГМИ

Ключевыми параметрами, которыми обычно описывают магнитные датчики, являются:

- диапазон измерений, Э;
- чувствительность, для ГМИ %/Э;
- разрешение/минимально обнаруживаемое поле, Э;

- шумовая плотность по полю, $\text{Э}/\sqrt{\text{Гц}}$;
- полоса пропускания и время отклика, Гц;
- нелинейность: отклонение от линейной характеристики, % от полного диапазона.
- нулевое смещение и его температурный дрейф: эквивалентное поле нуля, Э; дрейф нуля $\text{Э}/^\circ\text{C}$;
- температурный коэффициент чувствительности $\%/^\circ\text{C}$;
- питание: напряжение/потребляемая мощность, мВт.

Сравнение данных параметров между рассмотренными ранее типами ГМИ датчиков приведено в таблице 2

Таблица 2 – Параметры различных датчиков ГМИ

Параметр	Двухвыводной датчик импеданса	Миниатюрный ГМИ-датчик выполненный с использованием <i>MEMS</i>	Датчик с поперечной катушкой	Генераторный/Частотный датчик
Диапазон измерений, Э	$\pm 0,5..5$	$\pm 0,5..8$	$\pm 0,2..2$	$\pm 5..100$
Чувствительность, $\%/Э$ ($\text{кГц}/Э^*$)	$\sim 5..30$	$\sim 10..100$	$\sim 20..100$	$\sim 0,1..10$
Разрешение, мЭ	$\sim 0,5..5$	$\sim 0,005..0,5$	$\sim 0,005..0,1$	$\sim 0,01..1$
Шумовая плотность, $\text{Э}/\sqrt{\text{Гц}}$;	$\sim 0,0005..0,005$	$\sim 0,0005..0,0005$	$\sim 0,000005..0,0001$	$\sim 0,00001..0,001$
Полоса пропускания, кГц	$\sim 5..10$	$\sim 1..10$	$\sim 20..50$	$\sim 5..10$
Нелинейность, %	$\sim 0,5..2$	$\sim 0,1$	$\sim 0,1$	$\sim 0,5..2$
Нулевое смещение, Э;	$\sim 0,01..0,1$	$\sim 0,001..0,01$	$< 0,001$	-
Температурный дрейф $\%/^\circ\text{C}$	$\sim 0,0005..0,005$	$\sim 0,00002$	$\leq 0,00005$	$\sim 0,0001..0,001$
Температурный коэффициент чувствительности $\%/^\circ\text{C}$	$\sim 0,1..0,5$	$\sim 0,02..0,04$	$\sim 0,01..0,05$	$\sim 0,02..0,2$ (зависит от опорного генератора)
Питание, мВт	$\sim 5..50$	$\sim 10..60$	$\sim 5..30$	$\sim 10..150$

Из отдельных особенностей каждой конструкции датчиков следует отметить следующее:

1. Для двухвыводного датчика импеданса подойдут и проволока и лента и тонкая пленка. Аморфные ленты проще контактируются; тонкопленочные многослойные меандры проще интегрировать в схему; микропроволоки - когда важны миниатюрность и 3D-форм-фактор.

Из плюсов: простота. Минусы: чувствительность к дрейфам амплитуды и температуре без дифференциальной компенсации.

2. Миниатюрный ГМИ-датчик выполненный с использованием *MEMS*. Такой датчик особенно хорош, когда нужно измерять слабые магнитные поля, т.к. он обладает высокой чувствительностью. Но за это приходится платить более сложной схемотехникой, узким линейным диапазоном и необходимостью реализации температурной компенсации. Для такого датчика импеданса лучше всего использовать только аморфные микропроволоки.

3. Для датчика ГМИ с поперечной катушкой лучше всего в качестве чувствительного элемента подойдет стекло-покрытые Со-богатые аморфные микропроволоки (дающие ярко выраженный вне-диагональный отклик и линейность около $H \approx 0$); ленты и плёнки применяются гораздо реже. Из плюсов можно отметить линейность, естественное подавление фоновой амплитуды. К минусам относят: чувствительность к взаимной индуктивности и наводкам, требуется стабильная механическая геометрия/позиционирование.

4. Для генераторных/частотных датчиков ГМИ также как и для двухвыводного одинаково подойдут все типы конструкций чувствительных элементов. Плюсы: стабильный частотный выход, удобство цифровой обработки, высокая линейность в замкнутом контуре. Минусы: требования к фазовому запасу и температурной стабильности, нагрузочная чувствительность.

3 Технология производства аморфной металлической микропроволоки

3.1 Способы изготовления аморфной металлической микропроволоки

Аморфные металлические сплавы можно получить с помощью различных методов быстрого затвердевания, в том числе методом разбрызгивания, методом вытягивания нити из вращающегося барабана из расплава, методом распыления и конденсации из газовой фазы. В этом разделе будут рассмотрены и оценены наиболее широко распространенные технологии для получения аморфных металлических сплавов.

3.1.1 Формирование из расплава. Широко распространенным можно считать метод формирования из расплава [79]. Диаметры производимых проволок варьируются от 1 до 300 мкм [80,81]. Центральным элементом этого процесса является выброс под давлением потока расплава через выпускное отверстие в охлаждающую жидкость с последующим быстрым затвердеванием этого потока до того, как он распадется на капли. Для обеспечения возможности производства металлической проволоки необходимо соблюдать следующие важные условия:

- 1) затвердевание потока расплавленного металла при высокой скорости охлаждения и на расстоянии «стабильности» от точки выброса;
- 2) использование охлаждающей жидкости с низкой вязкостью и поверхностным натяжением;
- 3) стабильное течение охлаждающей жидкости с высокой скоростью.

В действительности, из-за трудности одновременного поддержания высокой способности потока металлического расплава к переохлаждению без осаждения кристаллических фаз в диапазоне температур между температурой плавления и температурой стеклования, метод формирования из расплава ограничен для получения проволоки из металлического сплава с высокой стеклообразующей способностью. Чтобы решить эту проблему, был разработан [82] так называемый метод формирования во вращающейся воде.

3.1.2 Формирование во вращающейся воде. Этот метод отличается от метода формирования из расплава тем, что вместо того, чтобы позволить потоку расплава попадать внутрь вращающегося барабана, поток расплава непосредственно выбрасывается во вращающуюся воду [82-84]. Поперечное сечение вращающегося в воде устройства для изготовления магнитных проволок показано на рисунке 12. В данном процессе струя расплавленного металла выбрасывается через кварцевое сопло диаметром 80-200 мм в слой жидкого охладителя, образованный центробежной силой на внутренней поверхности вращающегося барабана диаметром около 400-600 мм. Скоростью вращения охлаждающей жидкости и струи расплава можно управлять с помощью вращения барабана и давлением выбрасываемого газа соответственно [83]. В зависимости от используемого сплава необходимо регулировать расстояние между наконечником форсунки и поверхностью охладителя, угол выброса, глубину слоя охлаждающей жидкости и ее температуру. Технология формирования во вращающейся воде позволяет изготавливать непрерывную проволоку круглого сечения. В таких проволоках вдоль их направления образуется дендритная структура. Скорость охлаждения часто составляет около 10^5 К/с. Из широкого спектра черных и цветных металлов отливают аморфную или микрокристаллическую проволоку [82].

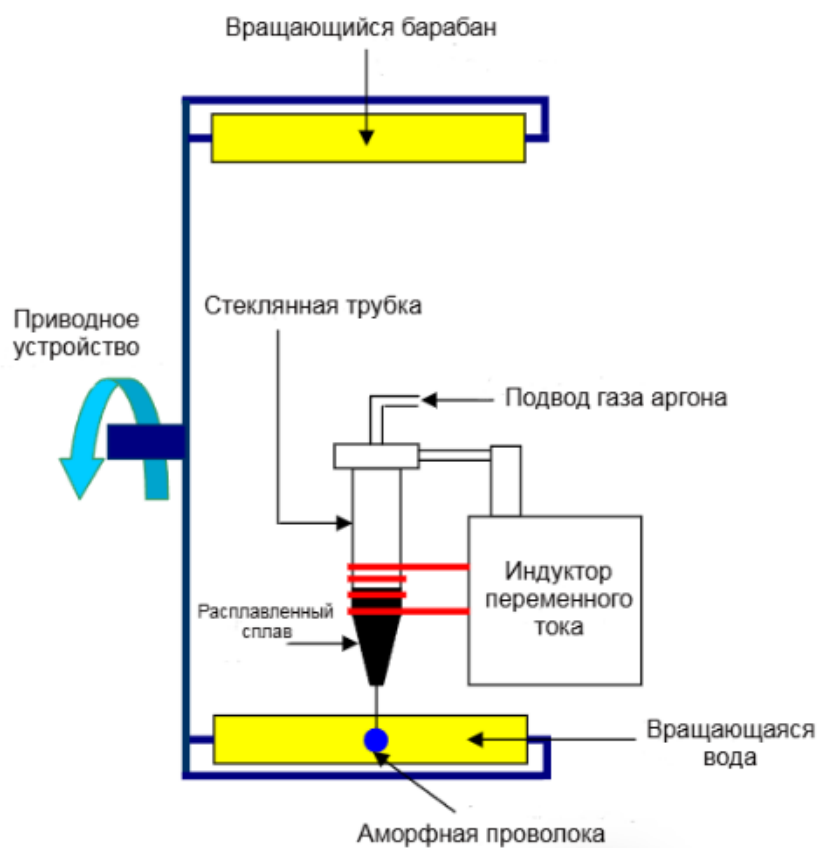


Рисунок 12 - Вид в разрезе вращающегося устройства для производства магнитных проводов

Одним из основных преимуществ данного метода является то, что его можно использовать для изготовления проволоки с составами сплавов, которые трудно получить традиционными методами.

3.1.3 Технология Тейлора-Улитовского. В 1924 году Тейлор [85,86] впервые представил технологию, позволяющую изготавливать тонкую проволоку однородного поперечного сечения, которую затем доработал Улитовский [87,88]. Суть данной технологии заключается в следующем: металлическая заготовка помещается в стеклянную трубку, и этот материал расплавляется с помощью индукционного нагрева. В результате стеклянная трубка размягчается из-за контакта с расплавленным металлом, и ее можно вытягивать. При этом она служит тиглем во время затвердевания, что в дальнейшем обеспечивает при обработке металла ровную поверхность и одинаковый диаметр проволоки.

Также благодаря наличию стеклянной оболочки, предотвращается прямой контакт между расплавленным металлом и охлаждающей жидкостью и значительно снижается способность потока расплавленного металла распадаться на капли до затвердевания [87–92]. По сравнению с методом формирования в воде, вращающейся вокруг прядильной машины, метод формирования из расплава со стеклянным покрытием обеспечивает более высокую скорость охлаждения, что позволяет легче получать аморфную проволоку даже при наличии стеклянного покрытия [91,92].

Схематическое изображение процесса формирования из расплава со стеклянным покрытием представлено на рисунке 13 [91]. В ходе этого процесса расплавленный металл захватывается сразу же после быстрого вытягивания капилляра из размягченного стекла. Капилляр вытягивается из конца стеклянной трубки, содержащей расплавленный металл. Сначала в стеклянную трубку помещают кусочки сплава, а затем расплавляют их в высокочастотной печи с помощью индукционной катушки. Вокруг капли расплавленного металла образуется размягчённая стеклянная оболочка, которая позволяет вытягивать капилляр.

Чтобы избежать окисления металла, обычно создают низкий уровень вакуума около 50–200 Па внутри стеклянной трубки. Чтобы процесс вытягивания был непрерывным, было [90] предложено перемещать стеклянную трубку с постоянной скоростью 0,5–7 мм/мин. Сформированная проволока охлаждается струей воды на расстоянии примерно 1 см от высокочастотного индукционного нагревателя.

В зависимости от скорости вытягивания скорость охлаждения может варьироваться от 10^4 до 10^7 К/с.

Конечный продукт представляет собой металлическую проволоку в стеклянной оболочке и собираемый на вращающемся барабане со скоростью около 5 м/с. Скорость охлаждения в этом процессе может варьироваться в пределах 10^4 – 10^6 К/с при изготовлении проволоки диаметром от 50 до 2 мкм [86,93].

По методу Тейлора получается широкий ассортимент металлической проволоки, включая сталь, медь и благородные металлы, а также металлы с низкой температурой плавления [93]. Однако одна из проблем, возникающих при использовании этого метода, заключается в загрязнении материала стеклянной оболочкой. Чтобы этого избежать, необходимо выбрать стекло, совместимое с материалом по химическим свойствам и вязкости и температура плавления.

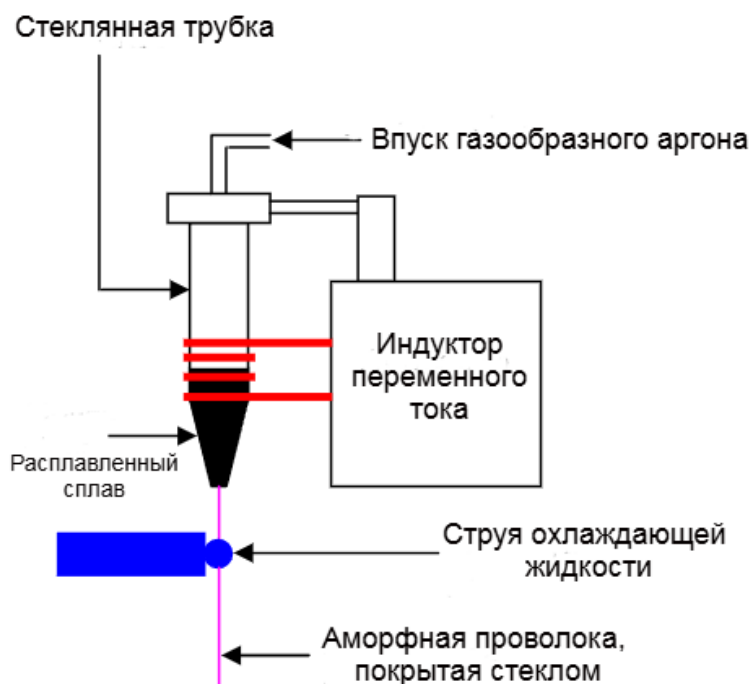


Рисунок 13 - Схематическая иллюстрация процесса изготовления аморфной проволоки/микропроволоки методом формования из расплава с покрытием из стекла

Используя этот метод, можно было получать металлическую проволоку, покрытую стеклом, с металлическим сердечником диаметром 3–25 мкм и толщиной стекла 2–15 мкм. В случае с микропроводами диаметр металлического сердечника обычно составляет от 0,8 до 30 мкм, а толщина покрытия — от 2 до 15 мкм [91,92].

Метод формирования из расплава со стеклянным покрытием для изготовления проволоки/микропроволоки имеет ряд преимуществ перед другими методами, например:

- воспроизводимость свойств проволоки при массовом производстве
- широкий диапазон изменения параметров (геометрических и физических),
- возможность непрерывного изготовления длинных проволок длиной до 10 км.

Таким образом, аморфные провода/микропровода (например сплавы на основе кобальта и железа) обычно производятся этим методом.

Первые два метода (формирование в расплаве и формирование во вращающейся воде) позволяют производить металлическую аморфную проволоку без стеклянного покрытия, в то время как метод Тейлора-Улитовского позволяет получать тонкую аморфную проволоку со стеклянным покрытием. С инженерной точки зрения такая ферромагнитная микропровода со стеклянным покрытием более перспективна и особенно полезна в качестве чувствительного элемента для изготовления магнитного сенсора.

3.2 Блок управления и контроля для установки формирования аморфного ферромагнитного микропровода

Одним из важнейших моментов в процессе производства аморфного ферромагнитного микропровода является операция по вытягиванию микропровода и наматывание его на приемную катушку, т.к. от скорости вытягивания капилляра будет зависеть геометрические и соответственно магнитные параметры получаемого продукта. В случае же плохого контроля над данным процессом возможно проявление нестабильных механических свойств микропровода по всей его длине, что однозначно негативно скажется на надежности чувствительного элемента и приведет к ухудшению его электрических и магнитных характеристик.

Поэтому в данном разделе предлагается описание по созданию специального блока управления и контроля для установки по изготовлению АФМ, который бы обеспечил стабильность работы узла приема для нее, и, несомненно, высокое качество ферромагнитной микропровода.

Ниже приведено краткое представление блока управления для узла приема установки по созданию АФМ:

- назначение: вытягивание аморфного микропровода и его намотка на катушку;

- компоненты: *ESP32* (контроллер на котором будет строиться узел), энкодер с кнопкой (отвечает за управление), семисегментный индикатор *MAX7219* (отображает для пользователя режимы и мощность), *BLDC* двигатель (непосредственно вытягивает и наматывает АФМ), драйвер *BLDC* двигателя, конвертер *UART TTL-RS485*;

- входы: энкодер с кнопкой, сигнал скорости с драйвера;

- выходы: драйвер широтно-импульсной модуляции (ШИМ), дисплей;

- режимы:

- 1) *E = expectation*, скорость двигателя 0 оборотов/мин, можно устанавливать предварительную мощность от 0 до 6000 оборотов/мин (регулировка шага 1 и 50), доступен реверс;

- 2) *R = receiving* скорость двигателя: 0..6000 оборотов/мин, мощность можно менять в процессе работы (регулировка шага также 1 и 50), реверс невозможен;

- логика работы:

- 1) переключение режимов *expectation-receiving* осуществляется через короткое нажатие кнопки энкодера, долгое нажатие этой же кнопки в режиме *expectation* меняет направление вращения двигателя;

- 2) установка мощности задаётся поворотом энкодера, медленное вращение - маленький шаг регулировки (1 оборот/мин), быстрое вращение энкодера - большой шаг регулировки (50 оборотов/мин).

Теперь можно приступить к более подробному описанию по созданию такого блока контроля.

Основой проектируемого блока управления является модуль *ESP32-CN340C TYPE-C* (рисунок 14). Указанный микроконтроллер считается одним из популярных и доступных для разработки и создания различных проектов в

сферах контроля доступа, *IoT*, робототехники и т.п. И в данной работе *ESP32-CH340C TYPE-C* будет содержать алгоритм работы всей системы в виде программного кода. Из положительных сторон у данного модуля можно выделить: высокую производительность (два ядра работают на частоте до 240 МГц, что позволяет одновременно выполнять, например, обработку данных с датчиков и управление веб-сервером), низкое энергопотребление, и как приятное дополнение, интегрированная беспроводная связь.

Микросхема *CH340C* преобразует сигналы *USB* с персонального компьютера (ПК) в стандартный последовательный порт (*UART*) с уровнем 3,3 В, который понимает *ESP32*. Ее главное преимущество - она не требует внешнего кварцевого резонатора, что упрощает конструкцию платы и делает ее более надежной. Также схема платы спроектирована таким образом, что при прошивке (загрузке кода) через *Arduino IDE* микросхема *CH340C* с помощью сигналов *DTR* и *RTS* автоматически переводит *ESP32* в режим программирования.



Рисунок 14 - модуль *ESP32-CH340C TYPE-C*

Поэтому работа на плате разработки *ESP32-CH340C* дает доступ к значительно более широким возможностям. Если сравнивать данный модуль с другими микроконтроллерами в том же ценовом диапазоне, например с: *Arduino Uno*, *STM32F103*, *Raspberry Pi Pico*, можно с уверенностью сказать, что они уступают не только в производительности, ограниченности ресурсов

памяти, но и в функциональности, а в отдельных случаях требуют более глубоких знаний в настройке и программировании.

ESP32 также имеет гораздо более гибкую периферию: больше цифровых/аналоговых пинов, встроенные ЦАП для вывода аналогового сигнала и аппаратная поддержка сенсорных кнопок.

Единственное с чем данный микроконтроллер может уступить, например *Arduino Uno*, это логические уровни. У последнего они рассчитаны на 5 В, что делает его более простым и безопасным в использовании с огромным количеством классических 5-вольтовых датчиков, модулей и шилдов. *ESP32* работает с логическими уровнями 3,3 В, что требует большей внимательности при подключении и, возможно, использования преобразователей уровней для некоторых устройств

Но все равно, *ESP32* остается современным более мощным и универсальный инструментом, который отлично подойдет для реализации данного проекта. Характеристики *ESP32-CH340C TYPE-C* приведены в таблице 3 [94].

Таблица 3 - Основные компоненты и характеристики *ESP32-CH340C TYPE-C*

Микроконтроллер	<i>ESP32-D0WDQ6-V3</i> (двухъядерный 32-бит <i>Xtensa LX6</i>)
Тактовая частота	до 240 МГц
Память	520 КБ <i>SRAM</i> , 448 КБ <i>ROM</i> , 4 МБ <i>Flash</i>
Беспроводная связь	<i>Wi-Fi 802.11 b/g/n</i> (2.4 ГГц), <i>Bluetooth 4.2 (BR/EDR и BLE)</i>
Преобразователь <i>USB-UART</i>	<i>CH340C</i>
Разъем для связи/питания	<i>USB Type-C</i>
Напряжение питания	5 В (по <i>USB</i>) или внешнее 3,3 В / 5-12 В (<i>VIN</i>)
Рабочее напряжение логики	3,3 В
Количество выводов (<i>GPIO</i>)	25 (иногда 30), из них 15 могут использоваться как аналоговые входы (12-бит АЦП)

К модулю *ESP32-CH340C TYPE-C* также будут подсоединены энкодер с кнопкой и семисегментный индикатор *MAX7219* (рисунок 15) с помощью

которых, пользователь блока управления сможет управлять его режимами, мощностями и доступно их считывать в любой момент времени.



Рисунок 15 - семисегментный индикатор MAX7219 (справа) и энкодер с кнопкой (слева).

Второй не менее важный компонент проектируемого блока управления непосредственно сам двигатель. В данной работе было решено использовать *BLDC* бесщеточный постоянного тока (рисунок 16), т.к. они лучше всего подходят если требуется высокая скорость, эффективность и долговечность.

BLDC-двигатель может вращаться непрерывно, обеспечивая плавность и тишину работы. Является замкнутой системой с датчиками Холла для обратной связи. При перегрузке контроллер выдаст сигнал ошибки, предотвращая непредсказуемое поведение системы.

В устройстве находятся: ротор в виде постоянных магнитов и статор из нескольких катушек с обмоткой, которые создают магнитное поле. Электронный контроллер подаёт ток на одну из обмоток статора. Обмотка становится электромагнитом и притягивает/отталкивает ближайший постоянный магнит ротора, заставляя его поворачиваться. После того как ротор сдвинулся с места, контроллер сразу же подает ток на следующую обмотку, отключая предыдущую, таким образом получается что ротор как бы следует за уходящим магнитным полем, тем самым вращаясь.

Задача контроллера в данном процессе, знать, в каком положении находится ротор, чтобы в нужный момент включить правильную обмотку.

Скорость вращения регулируется ШИМ, который, в секунду времени подает огромное множество импульсов напряжения на обмотки, и от того насколько длинными будут эти импульсы и будет зависеть насколько больше будет мощность/скорость двигателя

BLDC-двигатели имеют свои недостатки, такие как: нагрев, вибрации и сложность в обслуживании, но они также сильно выделяются на фоне других типов электродвигателей благодаря своим преимуществам. Для ясности, рассмотрим их в сравнении с наиболее распространенными «конкурентами»:

- щеточные двигатели не рассматриваются из-за наличия непосредственно щеток, которые изнашиваются и снижают надежность и КПД.

- асинхронные и синхронные двигатели переменного тока уже лучше, т.к. не имеют щеток, но первые имеют меньший пусковой момент, большие габариты и сниженный КПД при переменной нагрузке, а вторые, хоть и обладают высоким КПД, довольно недешевы и требуют более сложной системы управления и часто дополнительного источника питания.

- шаговые двигатели предельно точны в позиционировании, но они не быстрые, что уже критично, и довольно шумные

- линейные двигатели довольно хороши, но они сложны в управлении и очень дороги.

Поэтому если смотреть на спектр существующих двигателей, *BLDC* подходит для данного проекта более чем, и способен выполнить все поставленные задачи [95].



Рисунок 16 – Бесщеточный BLDC двигатель постоянного тока

Теперь рассмотрим следующий момент: для указанного типа двигателя нужен подходящий контроллер. В этой работе предлагается использовать *BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri* (рисунок 17). Данная модель из популярной (благодаря своей доступности и функциональности) китайской серии драйверов *BLD-300*, предназначена непосредственно для управления бесколлекторными (*BLDC*) электродвигателями. Используется конкретно версия *Ri* из-за наделения этого драйвера цифровым интерфейсом *RS485*, управление которым осуществляется по протоколу *Modbus RTU*. Это позволяет задавать скорость, реверсировать направление и считывать параметры. По сути, это версия с цифровым интерфейсом просто необходима для промышленной автоматизации систем. Характеристики *BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri* приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Основные технические характеристики *BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri*

Напряжение питания	от 12 до 56 В. Рекомендуемое номинальное напряжение 48 В.
Выходная мощность	Максимальная мощность драйвера составляет 300 Вт.
Выходной ток	на уровне 12-15 А.
Скорость вращения двигателя.	до 20 000 об/мин.
Рабочая температура	от -20 С до +60 С.

Кроме того драйвер предоставляет гибкие возможности для управления скоростью вращения двигателя с помощью встроенного или внешнего потенциометров, аналогового сигнала и через широтно-импульсную модуляцию (ШИМ или *PWM*) с уровнями логики 5 В. (это позволяет интегрировать драйвер с микроконтроллерами).



Рисунок 17 - Контроллер *BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri*

Также *BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri* обладает следующими дополнительными функциями:

- закрытый контур управления. Обеспечивает равномерную скорость двигателя при нагрузке;
- настройка пикового выходного тока для предотвращения повреждения двигателя из-за перегрузки;
- настройки времени разгона и торможения, что обеспечивает плавный пуск при высокой нагрузке и снижает пиковый пусковой ток [96].

Все перечисленные преимущества и определили выбор именно данной модели драйвера для *BLDC* двигателя, т.к. в этом случае будет обеспечиваться надежность процесса вытягивания и наматывания АФМ на приемную катушку. Данный контроллер не позволит в процессе работы каким-либо скачкам тока/напряжения, внешним условиям, дополнительным нагрузкам в сети и т.п.

повлиять на заданные пользователем параметры, из-за чего операция по формированию АФМ будет обладать максимальной стабильностью, а значит предотвращаются механические повреждения чувствительного элемента, и сохраняются соответственно его электрические и магнитные свойства по всей длине микропровода. Причем вся защита от внешних негативных воздействий полностью автоматизирована и не требует постоянного человеческого контроля.

Но т.к. *BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri* работает с цифровым интерфейсом *RS485*, то, чтобы соединить его с *ESP32-CH340C TYPE-C* придется дополнительно воспользоваться конвертером интерфейсов.

Конкретно в данной работе предлагается использовать модуль преобразователя интерфейсов *UART TTL-RS485* (рисунок 18), собранный на микросхеме конвертера физических уровней *MAX485*, которая и преобразует сигнал *TTL* (необходимый для *Arduino*, *ESP32*) в стандарт *RS485* и обратно [97].

MAX485 - полудуплексный драйвер с номинальной единичной нагрузкой, поэтому на одной шине *RS485* можно разместить до 32 устройств *MAX485*. Скорость передачи данных достигает 2,5 Мбит/с. *MAX485* выпускается в 8-контактных корпусах различных форм, типичное напряжение питания составляет 5 В. Напряжение на входе и выходе также составляет 5 В, что позволяет напрямую подключать его к любому микроконтроллеру с напряжением питания 5 В [98].

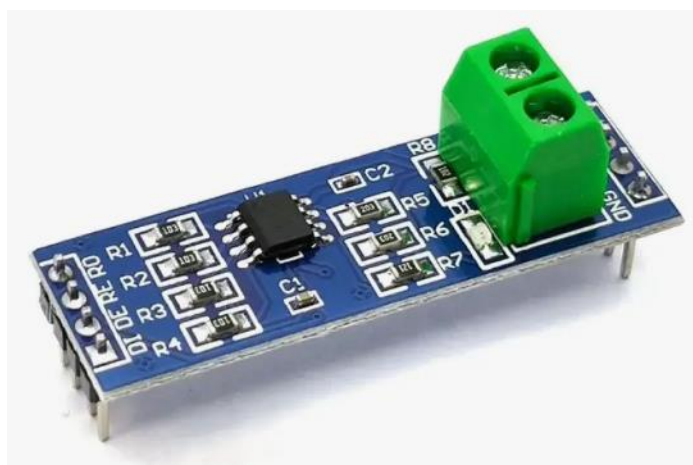


Рисунок 18 - Конвертер *UART TTL-RS485*

Технические параметры конвертера приведены в таблице 5 [99,100].

Таблица 5 - Технические характеристики *UART TTL-RS485*

Питание	3,3 - 5 В
Приёмопередатчик	MAX485CSA
Количество передатчиков	1
Количество приёмников	1
Нагрузочная способность	до 32 узлов в одном сегменте
Режим работы	полудуплексный
Режим передачи	дифференциальный сигнал (балансный)

Таким образом, полная сборка компонентов для блока управления представлена на рисунке 19.

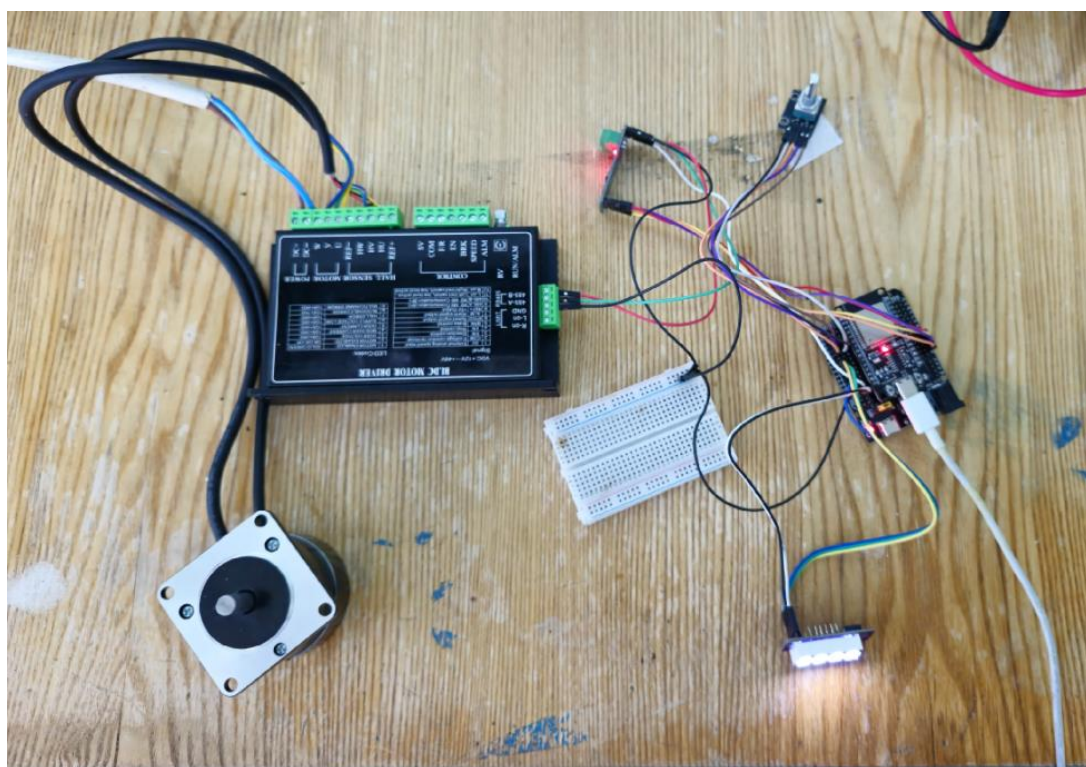


Рисунок 19 – Собранные в единый электрический узел компоненты для блока контроля и управления процесса вытягивания и наматывания АФМ на приемную катушку

Структурная схема блока контроля представлена в приложении Б.

Далее эту собранную конструкцию необходимо поместить в корпус с крышкой. Чертежи специализированного корпуса и крышки представлены в приложениях В и Г соответственно, и на их основе, в среде разработки Компас

3D, были выполнены объемные модели конструкций, показанные на рисунке 20.

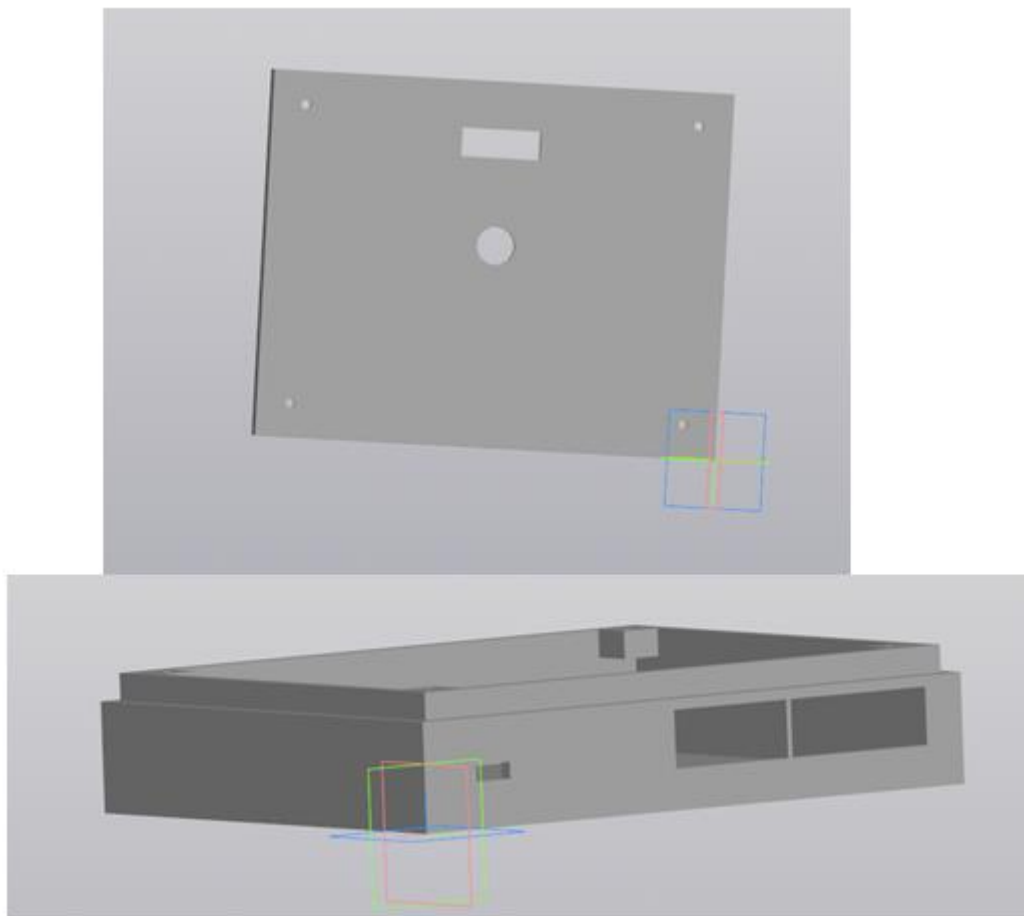


Рисунок 20 - 3D модели корпуса и крышки, выполненные в среде программирования Компас 3D

3.3 Алгоритм работы блока управления и контроля для установки формирования аморфного ферромагнитного микропровода

Собрав все компоненты в единый электрический узел, можно приступить к написанию программного кода для микроконтроллера, чтобы вся эта конструкция в принципе могла работать.

Программирование микроконтроллера осуществлялось в среде разработки *Arduino IDE (Integrated Development Environment)* т.к. она позволяет писать, компилировать и загружать программы (скетчи) не только на платы *Arduino*, но и на другие микроконтроллеры, в том числе и *ESP32*.

Краткая информация по логике работы блока контроля была приведена в подразделе 3.2, в данном пункте она будет рассмотрена подробнее.

При включении блока управления пользователь должен предварительно установить параметры работы двигателя *BLDC*, а именно выбрать направление его вращения: по часовой или против часовой, и скорость вращения в единицах измерения: обороты/мин. Этот режим будет называться: *expectation*, двигатель в этом режиме остается неподвижен. Всю информацию пользователь может считать с четырехразрядного дисплея *MAX7219*. Цифры на индикаторе обозначают задаваемую скорость вращения от 0 до 6000 (оборотов/мин), горящая крайняя правая точка или крайняя левая точка указывают в каком направлении будет вращаться двигатель (по часовой или против соответственно). Изначально на *MAX7219* должны загораться четыре нуля и крайняя правая точка. Мощность двигателя меняется вращением энкодера, причем быстрое вращение меняет скорость с шагом 50 оборотов/мин, медленное – 1 оборот/мин. Направление вращения меняется долгим нажатием на кнопку энкодера. Работа описанного режима показана на рисунке 21.

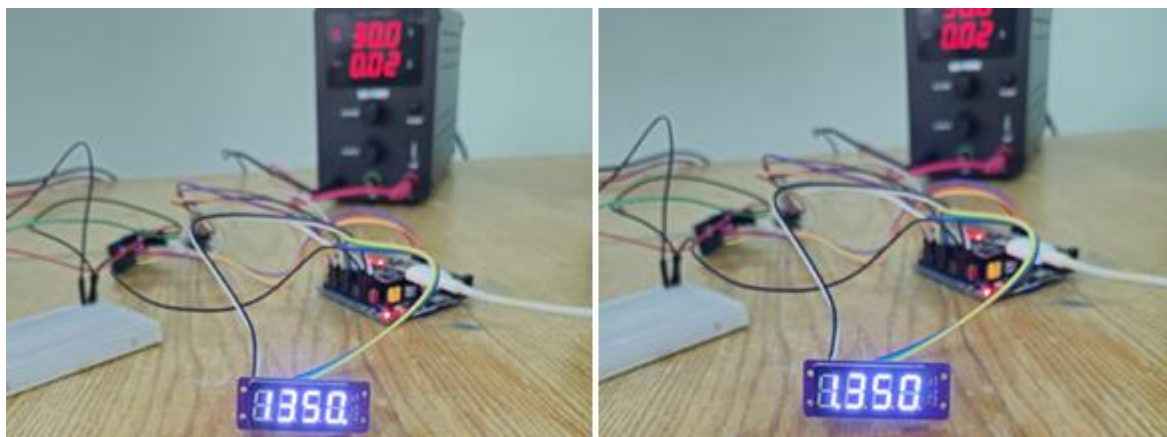


Рисунок 21 – Режим установки работы двигателя (слева – вращение по часовой со скоростью 1350 оборотов/мин, справа – вращение против часовой со скоростью 1350 оборотов/мин)

Далее, когда пользователь настроил работу бесщеточного двигателя, он может запустить его, сделав короткое нажатие на кнопку энкодера, т.е. перейдя в режим *receiving*. В таком случае на дисплее вместе с числом, обозначающее заданную скорость вращения, также загорятся одновременно все 4 точки, как показано на рисунке 22.



Рисунок 22 – Режим активной работы двигателя (скорость вращения – 1354 оборота/мин)

Стоит отметить, что в режиме *receiving*, реверсировать движение двигателя *BLDC* нельзя, но предоставляется возможность изменения его скорости, как и в режиме *expectation*, с единственным отличием, что когда пользователь крутит энкодер, индикатор будет показывать задаваемую мощность, но после пары секунд бездействия через короткое мигание, *MAX7219* покажет выбранную реальную скорость.

При необходимости остановки работы, пользователь может сделать короткое нажатие на кнопку энкодера и блок управления снова перейдет изначальное рабочее состояние, как при первом включении.

Листинг программного кода, для работы блока управления и контроля, выполненный в среде разработки *Arduino IDE*, представлен в приложении Д [101,102].

Таким образом, в данном разделе был успешно спроектирован, собран и создан специальный блок управления и контроля для установки по изготовлению АФМ, который должен обеспечивать стабильность и надежность работы узла приема для нее, что позволит производить качественные и

добротные по своим свойствам магнитные чувствительные элементы. Для компонентов, в сборке реализующие данное устройство, по чертежам был спроектирован индивидуальный корпус для защиты их от внешней среды. Также был написан программный код для работы данного устройства, который предоставляет для пользователя простое и удобное в своем использовании управление.

Дальнейший процесс разработки предполагает тестирование работы устройства в реальных условиях, но на данный момент, к сожалению, это не представлялось возможным из-за отсутствия подходящего для испытания оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения данной работы были исследованы ГМИ эффект в магнитомягких аморфных сплавах и конструктивные/технологические аспекты изготовления миниатюрных датчиков на основе данного эффекта, а также решены следующие задачи:

1. Кратко описан эффект ГМИ, принцип его работы. Данный эффект заключается в изменении комплексного сопротивления ферромагнитного проводника, в котором протекает переменный ток, при приложении внешнего постоянного магнитного поля. Магнитоимпеданс является гигантским, когда эффект достигает 100 и более процентов. Современные магнитомягкие материалы дают эффект в несколько сотен процентов.

2. Проанализировано соотношение основных параметров, характеристик и конструкций материалов с ГМИ. Для них должны соблюдаться три основных требования, а именно, доступность в цене, высокий коэффициент ГМИ и высокая чувствительность к приложенному внешнему полю. Большой эффект ГМИ должен существовать в магнитных материалах, имеющих: низкое удельное сопротивление; высокую магнитную проницаемость; высокую намагниченность насыщения; малый параметр ферромагнитной релаксации. Поэтому основными материалами, реализующие эффект ГМИ являются ферромагнитные сплавы.

Лучшего варианта исполнения чувствительного элемента для ГМИ датчика нет. В аморфных лентах коэффициент ГМИ в целом ниже, чем в микропроводах, поэтому им требуется обязательный отжиг в магнитном поле для улучшения магнитных свойств, что усложняет процесс изготовления датчика. У тонких пленок (особенно многослойных) значения МИ на уровне микропровода и их легко совместить с интегральными схемами, но соблюдать точный химический состав в их случае довольно проблематично, как и подключить их к системе измерений ГМИ, что усложняет исследования их магнитных и электрических свойств. Дальнейшее изучение магнитных чувствительных элементов было сосредоточено на аморфных магнитных

микропроводах, как самой доступной и универсальной конструкции для данной работы.

3. Указаны критерии выбора конструкции магнитоимпедансных датчиков с чувствительным элементом в виде АФМ. Ключевыми параметрами, которыми обычно описывают магнитные датчики, являются: диапазон измерений; чувствительность; разрешение; шумовая плотность по полю; полоса пропускания и время отклика; нелинейность; температурный дрейф; температурный коэффициент чувствительности; питание.

Двухвыводной датчик импеданса. Из плюсов: простота. Минусы: чувствительность к дрейфам амплитуды и температуре без дифференциальной компенсации.

Миниатюрный ГМИ-датчик выполненный с использованием *MEMS*. Плюсы: высокая чувствительность; хорошее разрешение в слабых полях; быстрый отклик; компактность; возможность *MEMS*-интеграции. Минусы: узкий линейный диапазон; температурный дрейф; чувствительность к механическим напряжениям; необходимость калибровки и экранирования; не всегда минимальное энергопотребление.

Датчик ГМИ с поперечной катушкой. Из плюсов можно отметить линейность, естественное подавление фоновой амплитуды. К минусам относят: чувствительность к взаимной индуктивности и наводкам, требуется стабильная механическая геометрия/позиционирование.

Генераторный/частотный датчик ГМИ. Плюсы: стабильный частотный выход, удобство цифровой обработки, высокая линейность в замкнутом контуре. Минусы: требования к фазовому запасу и температурной стабильности, нагрузочная чувствительность.

Однозначно лучшего и универсального исполнения конструкции магнитного сенсора также не существует, каждый вид устройства лучший в отдельных аспектах, и выбирать стоит исходя из поставленных целей и задач.

4. Показаны одни из самых распространенных способов по изготовлению аморфной микропроводами, лучшей из которых является метод Тейлора-

Улитовского, который дает ряд преимуществ, таких как воспроизводимость свойств проволоки, широкий диапазон изменения параметров (геометрических и физических), возможность непрерывного изготовления длинных проволок.

5. Успешно спроектирован и собран специализированный блок управления для операции вытягивания микропровода для установки по изготовлению АФМ по методу Тейлора-Улитовского, который должен обеспечивать стабильность и надежность работы узла приема для нее и соответственно производить качественные и добротные магнитные чувствительные элементы. Представленное устройство состоит из микроконтроллера *ESP32*, энкодера с кнопкой, семисегментного индикатора *MAX7219*, *BLDC* двигателя, драйвера *BLDC* двигателя, преобразователя интерфейсов *UART TTL-RS485*. Данные элементы были выбраны благодаря наличию более сильных достоинств относительно своих конкурентов.

6. Разработаны чертежи для крышки корпуса и самого корпуса блока управления, предназначенные для защиты компонентов от внешней среды.

7. Создан программный код в среде разработки *Arduino IDE*, который отвечает за логику работы блока контроля и предоставляет для пользователя удобное управление по вытягиванию аморфного микропровода и его намотки на катушку. Написанный скетч реализует следующий алгоритм работы устройства, который представляет собой управление двумя режимами:

- *expectation*, когда скорость двигателя составляет 0 оборотов/мин, но можно устанавливать предварительную мощность от 0 до 6000 оборотов/мин (регулировка шага 1 и 50) и также доступен реверс направления двигателя;

- *receiving*, когда скорость двигателя: 0..6000 оборотов/мин, мощность можно менять в процессе работы (регулировка шага также 1 и 50), но реверс уже невозможен.

Переключение режимов *expectation-receiving* осуществляется через короткое нажатие кнопки энкодера, долгое нажатие этой же кнопки в режиме *expectation* реверсирует направление вращения двигателя. Установка мощности задаётся поворотом энкодера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vazquez M, Knobel M, Sanchez ML, Valenzuela R, Zhukov AP. Giant magneto-impedance effect in soft magnetic wires for sensor applications. *Sens Acta A* 1997;59:20–9
2. McHenry ME, Willard MA, Laughlin DE. Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets. *Prog Mater Sci* 1999;44:291–433.
3. Garcia D, Raposo V, Montero O, Iniguez JI. Influence of magnetostriction constant on magnetoimpedance-frequency dependence. *Sens Acta A* 2006;129:227–30.
4. Vazquez M. Giant magnetoimpedance in soft magnetic wires . *J Magn Magn Mater* 2001;226–230:693–9.
5. Nie HB, Zhang XX, Pakhomov AB, Xie Z, Yan X, Zhukov A, et al. Giant magnetoimpedance of glass covered amorphous microwires of Co–Mn–Si–B and Co–Si–B. *J Appl Phys* 1999;85:4445–7.
6. Vinai F, Coisson M, Tiberto P. High-frequency magneto-impedance in metastable metallic materials: an overview. *J Magn Magn Mater* 2006;300:e82–7.
7. Knobel M, Sanchez ML, Gomez-Polo C, Marin P, Vazquez M, Hernando A. Giant magneto-impedance effect in nanostructured magnetic wires. *J Appl Phys* 1996;79:1646–8.
8. Kraus L, Knobel M, Kane SN, Chiriac H. Influence of joule heating on magnetostriction and giant magnetoimpedance effect in a glass covered CoFeSiB microwire. *J Appl Phys* 1999;85:5435–7.
9. Kraus L, Chiriac H, Ovari TA. Magnetic properties of stress-joule-heated amorphous FeCrBSi microwire. *J Magn Magn Mater* 2000;215–216:343–5.
10. Pirola KR, Kraus L, Chiriac H, Knobel M. Magnetostriction and GMI in Joule-heated CoFeSiB glass covered microwires. *J Magn Magn Mater* 2001;226–230:730–2.
11. Brunetti L, Tiberto P, Vinai F, Chiriac H. High-frequency giant magnetoimpedance in joule-heated Co based amorphous ribbons and wires. *Mater Sci Eng A* 2001;304–306:961–4.

12. Li DR, Lu ZC, Zhou SX. Magnetic anisotropy and stress-impedance effect in Joule heated $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ ribbons. *J Appl Phys* 2004;95:204–7.
13. Kurlyandskaya GV, Vazquez M, Munoz JL, Garcia D, McCord J. Effect of induced magnetic anisotropy and domain structure features on magneto-impedance in stress annealed Co-rich amorphous ribbons. *J Magn Magn Mater* 1999;196–197:259–61.
14. Tejedor M, Hernando B, Sanchez ML, Prida VM, Vazquez M. Stress and magnetic field dependence of magneto-impedance in amorphous $\text{Co}_{66,3}\text{Fe}_{3,7}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$ ribbons. *J Magn Magn Mater* 1999;196–197:330–2.
15. Vazquez M, Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications. *J Phys D: Appl Phys* 1996;29:939–49.
16. Takemura Y, Tokuda H. *IEEE Trans Magn* 1996;32:4947–9.
17. Li YF, Vaquez M, Chen DX. GMI effect of $\text{Fe}_{73,5-x}\text{Cr}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ amorphous and nanocrystalline soft wires. *J Magn Magn Mater* 2002;249:342–5.
18. Usov N, Antonov A, Granovsky A. Theory of giant magntoimpedance effect in composite amorphous wire. *J Magn Magn Mater* 1997;171:64–8.
19. Phan MH, Peng HX, Wisnom MR, Tung MT, Dung NV, Nghi NH. Optimized GMI effect in electrodeposited CoP/Cu composite wires. *J Magn Magn Mater* 2007;316:244–7.
20. Kurlyandskays GV, Garcia-Arribas A, Barandiaran JM. Advantages of nonlinear giant magnetoimpedance for sensor applications. *Sens Acta A* 2003;106:234–9.
21. Li XP, Seet HL, Fran J, Yi JB. Electrodeposition and characteristics of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /Cu composite wires. *J Magn Magn Mater* 2006;304:111–6.
22. Buznikov NA, Antonov AS, Granovsky AB, Kim CG, Kim CO, Li XP, et al. Giant magnetoimpedance in composite wires with insulator layer between non-magnetic core and soft magnetic shell. *J Magn Magn Mater* 2006;300:e63–6.
23. Atalay FE, Kaya H, Atalay S. Magnetoimpedance effect in electroplated NiFeRu/Cu wire. *J Phys D: Appl Phys* 2006;39:431–6.

24. Velleuer J, Munoz AG, Yakabchuk H, Schiefer C, Hackl A, Kisker E. Giant magnetoimpedance in electroplated NiFeMo/Cu microwires. *J Magn Magn Mater* 2007;311:651–7.
25. Sinnecker JP, Garcia JM, Asenjo A, Vazquez M, Garcia-Arribas A. Giant magnetoimpedance in CoP electrodeposited microtubes. *J Mater Res* 2000;15:751–5.
26. Sinnecker JP, Knobel M, Pirola KR, Garcia JM, Asenjo A, Vazquez M. Frequency dependence of the magnetoimpedance in amorphous CoP electrodeposited layers. *J Appl Phys* 2000;87:4825–7.
27. Garcia JM, Sinnecker JP, Asenjo A, Vazquez M. Enhanced magnetoimpedance in CoP electrodeposited microtubes. *J Magn Magn Mater* 2001;226-230:704–6.
28. Garcia JM, Asenjo A, Vazquez M, Yakunin AM, Antonov AS, Sinnecker JP. Determination of closure domain penetration in electrodeposited microtubes by combined magnetic force microscopy and giant magneto-impedance techniques. *J Appl Phys* 2001;89:3888–91.
29. Wang XZ, Yuan WZ, Zhao Z, Li XD, Ruan JZ, Yang XL. Giant magnetoimpedance effect in CuBe/NiFeB and CuBe/Insulator/NiFeB electroless-deposited composite wires. *IEEE Trans Magn* 2005;41: 113–5.
30. Wang XZ, Yuan WZ, Zhao Z, Li XD, Ruan JZ, Zhao ZJ, et al. Enhancement of giant magnetoimpedance in composite wire with insulator layer. *J Magn Magn Mater* 2007;308:269–72.
31. Panina LV, Mohri K, Uchiyama T, Noda M. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films. *IEEE Trans Magn* 1995;31:1249–60.
32. Chiriac H, Ovari TA, Marinescu CS. Giant magneto-impedance effect in nanocrystalline glass-covered wires. *J Appl Phys* 1998;83:6584–6.
33. Hu J, Zhou SX, Zhang LH, Wang HX. Giant magnetoimpedance in the amorphous ribbon $\text{Fe}_8\text{Co}_{62,4}\text{Mn}_{0,5}\text{Mo}_{0,6}\text{Ni}_{0,5}\text{Si}_{14,7}\text{B}_{13,3}$. *Mater Sci Eng B* 1999;68:63–6.
34. Byon KS, Yu SC, Kim CG. Permeability and giant magnetoimpedance in $\text{Co}_{69}\text{Fe}_{4,5}\text{X}_{1,5}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ ($\text{X} = \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Ni}$) amorphous ribbons. *J Appl Phys* 2001;89:7218–20.

35. Goncalves LAP, Soares JM, Machado FLA, de Azevedo WM. GMI effect in the low magnetostrictive $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ alloys. *Physica B* 2006;384:152–4.
36. Phan MH, Peng HX, Wisnom MR, Yu SC, Chau N. Enhanced GMI effect in a $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ ribbon due to Cu and Nb substitution for B. *Phys Stat Sol A* 2004;201:1558–62.
37. Phan MH, Kim YS, Chien NX, Yu SC, Lee HB, Chau N. Giant magnetoimpedance effect in amorphous $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ and $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{Nb}_{2,2}\text{Cu}_{0,8}\text{B}_7$ ribbons. *Jpn J Appl Phys* 2003;42:5571–4.
38. Phan MH, Peng HX, Yu SC, Vazquez M. Optimized giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials. *J Appl Phys* 2006;99:08C505:1–5:3.
39. Pirota KR, Sartorelli ML, Knobel M, Gutierrez J, Brandiaran JM. Influence of induced anisotropy and magnetostriction on the giant magnetoimpedance effect and its aftereffect in soft magnetic amorphous ribbon. *J Magn Magn Mater* 1999;202:431–44.
40. Tejedor M, Hernando B, Sanchez ML, Prida VM, Gorria P. Magnetic domains and magnetoimpedance effect during the nanocrystallization of $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ribbons. *J Non-cryst Solid* 2001;287:396–400.
41. Li JCM. In: Liebermann HH, editor. *Rapidly solidified alloys: processes, structures, properties, applications*. New York: Marcel Dekker Inc.; 1993. p. 379 [Chapter 13].
42. Chen HS, Sherwood RC, Jin S, Chi GC, Inoue A, Masumoto T, et al. Mechanical properties and magnetic behavior of deformed metal glass wires. *J Appl Phys* 1984;55:1796–8.
43. Chen C, Luan KZ, Liu YH, Mei LM, Guo HQ, Shen BG. Giant magnetoimpedance effect in the soft ferromagnet $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$. *Phys Rev B* 1996;54:6092–4.
44. Guo HQ, Kronmuller H, Dragon T, Cheng ZH, Shen BG. Influence of nanocrystallization on the evolution of domain patterns and the magnetoimpedance effect in amorphous $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ ribbons. *J Appl Phys* 2001;89:514–6.

45. Phan MH, Peng HX, Wisnom MR, Yu SC, Chau N. *Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of Fe-based nanocomposite materials. Composites: Part A* 2006;37:191–6.
46. Knobel M, Chiriac H, Sinecker JP, Marinescu S, Ovari TA, Inoue A. *Comparative study of the giant magneto-impedance effect in Fe-based nanocrystalline ribbons. Sens Acta A* 1997;59:256–60.
47. Franco V, Conde A. *Magnetic anisotropy distribution and giant magnetoimpedance in $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_x\text{B}_{22,5-x}\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ ($x = 9, 16$) alloys. Mater Lett* 2001;49:256–61.
48. Hu J, Jiang MH, Qin HW, Li B, Kronmuler H. *Magnetic properties of as-quenched Fe–Cu–Mo–Si–B nanocrystalline ribbons. Mater Sci Eng A* 2007;449–451:371–4.
49. Hu J, Qin HW, Zhou SX, Wang YH, Wang ZX. *Giant magnetoimpedance effect in $\text{Fe}_{79,5}\text{P}_{12}\text{C}_6\text{Mo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{Si}_{1,5}$ nanocrystalline ribbons. Mater Sci Eng B* 2001;83:24–8.
50. Phan MH, Peng HX, Tho ND, Chau N, Yu SC. *Enhanced GMI effect in $\text{Fe}_{73,5-x}\text{Mn}_x\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($x = 1, 3, 5$) nanocomposites due to Mn substitution for Fe. Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 2006;6170:61700Q:1–Q:8.
51. Tho ND, Chau N, Yu SC, Lee HB, Tuan LA, Hoa NQ. *Soft magnetic behavior in amorphous and nanocrystalline $\text{Fe}_{73,5-x}\text{Mn}_x\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($x = 1, 3, 5$) alloys. J Magn Magn Mater* 2006;304:e868–70.
52. Tho ND, Chau N, Yu SC, Lee HB, The ND, Hoa NQ. *A systematic study of giant magnetoimpedance of Cr-substituted $\text{Fe}_{73,5-x}\text{Cr}_x\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Au}_1$ ($x = 1, 2, 3, 4, 5$) alloys. J Magn Magn Mater* 2006;304:e871–3.
53. Phan MH, Peng HX, Wisnom MR, Yu SC. *Giant magnetoimpedance effect in ultrasoft FeAlSiBCuNb nanocomposites for sensor applications. J Appl Phys* 2018;98:014316.
54. Knobel M, Schoenmaker J, Sinnecker JP, Turtelli RS, Grossinger R, Hofstetter W, et al. *Giant magnetoimpedance in nanocrystalline $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ and $\text{Fe}_{86}\text{Zr}_7\text{B}_6\text{Cu}_1$ ribbons. Mater Eng A* 1997;226–228:546–9.

55. Chiriac H, Ovari TO, Marinescu CS. Giant magnetoimpedance effect in nanocrystalline ribbons. *Nanostruct Mater* 1999;12:775–8.
56. Hernando B, Alvarez P, Santos JD, Gorria P, Sanchez ML, Olivera J, et al. Magnetoimpedance effect in Nanoperm alloys. *J Magn Magn Mater* 2006;300:e59–62.
57. Hu J, Li B, Qi HW, Jiang MH. Giant magnetoimpedance in nanocrystalline $\text{Fe}_{90,3-x}\text{Zr}_7\text{B}_{2,7}\text{Cu}_x$ ($0,5 < x < 1,5$) as-spun ribbons. *Mater Letter* 2005;59:3069–72.
58. Lee HB, Kim YK, Kim TK, Song YH, Yu SC. Magnetoimpedance effect in nanocrystalline $\text{Fe}_{91-x}\text{Zr}_5\text{B}_x\text{Zr}_7\text{Cu}_1\text{Al}_2$ ($x = 2,4,6,8$) alloys. *J Appl Phys* 1999;85:5429–31.
59. Lee HB, Kim KJ, Kim TK, Kim CO, Yu SC. Magnetoimpedance effect in the nanocrystalline Fe–Zr–Cu B–Al alloy system. *J Appl Phys* 2000;87:5269–91.
60. Lee HB, Kim YK, Kim TK, Kim TK, Yu SC. Magnetoimpedance effect in nanocrystalline $\text{Fe}_{91-x}\text{Zr}_5\text{B}_x\text{Cu}_1\text{Al}_1$ ($x = 2, 4, 6, 8$) alloys. *J Magn Magn Mater* 2000;215–216:307–9. M.-H. Phan, H.-X. Peng / *Progress in Materials Science* 53 (2008) 323–420 417
61. Zhang K, Lv Z, Yao B, Wang D. Boron content dependence of magnetoimpedance in $\text{Fe}_{91-x}\text{Zr}_5\text{B}_x\text{Nb}_4$ alloys. *J Non-cryst Solid* 2006;352:78–83.
62. Kim KS, Yu SC, Lee HB, Kim YK. Magnetization behavior and magnetoimpedance effect in melt-spun $\text{Fe}_{75-x}\text{Co}_x\text{Zr}_8\text{Nb}_2\text{B}_{15}$ ($x = 5, 10, 15$) alloys. *J Magn Magn Mater* 2002;239:560–3.
63. Makhnovskiy DP, Panina LV. Size effect on magneto-impedance in layered films. *Sens Acta A* 2000;81:91–4.
64. Xiao SQ, Liu YH, Yan SS, Dai YY, Zhang L, Mei LM. Giant magnetoimpedance and domain structure in FeCuNbSiB films and sandwiched films. *Phys Rev B* 2020;61:5734–9.
65. Nishibe Y, Yamadera H, Ohta N, Tsukada K, Nonomura Y. Thin film magnetic field sensors utilizing magnetoimpedance effect. *Sens Acta A* 2000;82:155–60.

66. Mao XH, Zhou Y, Chen JA, Yu JQ, Cai BC. Giant magnetoimpedance and stress-impedance effects in multilayered FeSiB/Cu/FeSiB films with a meander structure. *J Mater Res* 2017;18:868–71.

67. de Andrade AMH, daSilva RB, Correa MA, Viegas ADC, Severino AM, Sommer RL. Magnetoimpedance of NiFe/Ag multilayers in the 100 kHz to 1,8 GHz range. *J Magn Magn Mater* 2004;272–276:1846–7.

68. Morikawa T, Nishibe Y, Yamadera H, Nonomura Y, Takeuchi M, Sakata J, et al. Enhancement of giant magneto-impedance in layered film by insulator separation. *IEEE Trans Magn* 1996;32:4965–7.

69. Morikawa T, Nishibe Y, Yamadera H. Giant magnetoimpedance effect in layered thin films. *IEEE Trans Magn* 1997;33:4367–72.

70. Amalou F, Gijs MAM. Giant magnetoimpedance in trilayer structures of patterned magnetic amorphous ribbons. *Appl Phys Lett* 2002;81:1654–6.

71. Amalou F, Gijs MAM. Giant magnetoimpedance of amorphous ribbon/Cu/amorphous ribbon trilayer microstructures. *J Appl Phys* 2004;95:1364–71.

72. Phan MH, Peng HX, Wisnom MR, Yu SC. Large enhancement of GMI effect in polymer composites containing Co-based ferromagnetic microwires. *J Magn Magn Mater* 2007;316:e253–6.

73. Harsha Uppili, Bevin Daglen. Bi-Directional Giant Magneto Impedance Sensor. *Advances in Materials Physics and Chemistry* Vol.3 No.5, September 2013. Oregon Episcopal School High School, Portland, USA. DOI: 10.4236/ampc.2013.35036

74. Pavel Ripka. *Magnetic Sensors and Magnetometers Second Edition*, Artech, 2021.

75. Chen, J., Li J., Li Y., Chen Y., Xu L. Design and Fabrication of a Miniaturized GMI Magnetic Sensor Based on Amorphous Wire by MEMS Technology. *Sensors* 2018, 18, 732.

76. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/233910221_The_surface_domain_structur

e_and_off-diagonal_magnetoimpedance_in_glass-coated_amorphous_microwires
[дата обращения: 05.10.2025].

77. Panina L.. *Off-Diagonal Impedance in Amorphous Wires and Its Application to Linear Magnetic Sensors. IEEE Transactions on Magnetics.* <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.835676>

78. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/3420707_Giant_magnetoimpedance_sensors [дата обращения: 17.10.2025].

79. Davies HA, Lewis BG, Donald IW. In: Mehrabian R, Kear BH, Cohen M, editors. *Rapid solidification processing: principles and technologies*. Baton, Rouge, LA: Claitor's Pub. Div.; 1978. p. 78–83.

80. Goto T. Fe–B and Fe–Si–B system alloy filaments produced by glass-coated melt spinning. *Trans Jpn Inst Met* 1980;21:219–25.

81. Squire PT, Atkinson D, Gibbs MRJ, Atalay SJ. Amorphous wires and their applications. *J Magn Magn Mater* 1994;132:10–21.

82. Ohnaka I, Fukusako T, Matui T. Preparation of amorphous wires. *J Jpn Inst Met* 1981;45:751–62.

83. Matsumoto T, Ohnaka I, Inoue A, Hagiwara M. *Scripta Metall* 1981;15:293–306.

84. Matsumoto T, Inoue A, Hagiwara M. US Patent No. 4, 523, 626; 1995.

85. Taylor GF. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses. *Phys Rev* 1924;23:655–60.

86. Taylor GF. Process and apparatus for making filaments, Patented February 24, 1931, United States Patent Office, 1, 793, 529.

87. Ulitovsky AV. In: *Micro-technology in design of electric devices*, vol. 7. Leningrad; 1951. p. 6.

88. Ulitovsky AV, Maianski IM, Avramenco AI. *Method of continuous casting of glass coated microwire*.

89. Wiesner H, Schneider J. *Magnetic properties of amorphous FeP alloys containing Ga, Ge, and As. Phys Stat Soli A* 1974;26:71–5. Patent No. 128427 (USSR), 15.05.60, *Bulletin*. No. 10. p. 14.

90. Chiriac H. *Preparation and characterization of glass covered magnetic wire. Mater Sci Eng A* 2001;304–306:166–71.

91. Larin VS, Torcunov AV, Zhukov A, Gonzalez J, Vazquez M, Panina L. *Preparation and properties of glass-coated microwires. J Magn Magn Mater* 2002;249:39–45.

92. Zhukov A, Gonzalez J, Vazquez M, Larin V, Torcunov A. *Nanocrystalline and amorphous magnetic microwires. In: Nalwa HS, editor. Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology, vol. X. p. 1–22.*

93. Donald IW. *Production, properties and applications of microwire and related products. J Mater Sci* 1987;22:2261–79.

94. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf [дата обращения: 02.05.2026].

95. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://microkontroller.ru/components/kak-rabotaet-besshetochnyj-blcd-dvigatel-postoyannogo-toka/?ysclid=mpa4vuo72j159016714> [дата обращения: 02.05.2026].

96. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://duxe.ru/upload/iblock/d29/g0jgx7w1vzzxjwh4z8isxzysgf70ov8b.pdf> [дата обращения: 03.05.2026].

97. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://robotchip.ru/obzor-konvertera-ttl-rs485/?ysclid=mog8dd15o7963371433> [дата обращения: 03.05.2026].

98. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.circuitstate.com/tutorials/what-is-rs-485-how-to-use-max485-with-arduino-for-reliable-long-distance-serial-communication/> [дата обращения: 03.05.2026].

99. [Электронный ресурс] Режим доступа:
<https://www.chipdip.ru/product/preobrazovatel-uart-ttl-v-rs485-na-max485-8009384821> [дата обращения: 09.05.2026].
100. [Электронный ресурс] Режим доступа:
<https://orion43.ru/datasheets/16588.pdf> [дата обращения: 09.05.2026].
101. [Электронный ресурс] Режим доступа: *<https://all-arduino.ru/arduino-dlya-nachinayushhih/>* [дата обращения: 16.05.2026].
102. [Электронный ресурс] Режим доступа:
<https://microkontroller.ru/arduino-projects/nachalo-raboty-s-arduino-ide-i-platoj-arduino/> [дата обращения: 16.05.2026].

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на ВКР

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой
Пронин И.А.

(фамилия, имя, отчество)

«21»

мая 2026 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр. 24ПДм1 факультета ФИТЭ

Направление подготовки «Нано- и микроэлектроника»

Магистерская программа 11.04.04. «Электроника и нанoeлектроника»

Горбунцов А. А.

(фамилия, инициалы студента)

2. Руководитель Головяшкин А. Н.

(фамилия, инициалы)

3. Тема выпускной работы Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта

Тема утверждена приказом ПГУ № 1136 а/о от «05» 11 2024г.

4. Техническое задание на выпускную работу (разработать, исследовать (назначение объекта разработки, исследования), исходные данные, граничные условия разрабатываемого или исследуемого объекта, условия эксплуатации и т.д.)

1. Определить критерии выбора материалов и конструкций чувствительных элементов магнитных датчиков, для этого:

- изучить эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ): принцип его работы и требования к материалам;

- проанализировать соотношение основных магнитных и электрических параметров и характеристик таких как: магнитоимпедансный эффект, магнитная проницаемость, намагниченность насыщения, время релаксации, удельное сопротивление у различных конструкций чувствительных элементов;

- теоретически обосновать выбор конструкции магнитоимпедансного датчика по следующим параметрам: диапазон измерений, чувствительность, разрешение, полоса пропускания, нелинейность, температурный коэффициент чувствительности, потребляемая мощность.

2. Разработать технологию по усовершенствованию процесса изготовления магнитных чувствительных элементов, для этого:

- изучить способы формирования магнитного чувствительного элемента, из которых выбрать наиболее оптимальный и распространенный;

- спроектировать специализированный блок управления для операции вытягивания и наматывания на приемную катушку микропровода, для установки по изготовлению чувствительного магнитного элемента, данное устройство должно обеспечивать для

чувствительного магнитного элемента, данное устройство должно обеспечивать для двигателя: несколько переключаемых режимов работы, скорость 0..6000 оборотов/мин (с регулировкой шага 1 и 50 оборотов/мин), возможность реверса, управление через широтно-импульсную модуляцию.

5. Объем и содержание основной части выпускной работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Материалы и конструкции чувствительных элементов с ГМИ

1.1 Критерии выбора материалов с ГМИ

1.2 Оценка материалов с эффектом ГМИ и их конструкций

1.3 Рекомендуемые ГМИ-материалы для сенсорных датчиков

2 Конструкции магнитных датчиков с аморфной микропроволокой, реализующей эффект ГМИ

2.1 Двухвыводной датчик импеданса

2.2 Миниатюрный датчик импеданса, изготовленный с помощью технологии *MEMS*

2.3 Датчик ГМИ с поперечной катушкой

2.4 Генераторные/частотные датчики ГМИ

2.5 Сравнение конструкций магнитных датчиков с ГМИ

3 Технология производства аморфной металлической микропроволоки

3.1 Способы изготовления аморфной металлической микропроволоки

3.2 Блок управления и контроля для установки формирования аморфного ферромагнитного микропровода

3.3 Алгоритм работы блока управления и контроля для установки формирования аморфного ферромагнитного микропровода

5.2. Иллюстративная часть (перечень и название слайдов презентации)

1. Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта	(1 слайд)
---	-----------

2. Цель и задачи ВКР	(1 слайд)
----------------------	-----------

3. Актуальность работы	(1 слайд)
------------------------	-----------

4. Эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ)	(1 слайд)
--	-----------

5. Анализ материалов и конструкций чувствительных элементов с ГМИ	(3 слайда)
---	------------

6. Анализ конструкций магнитных датчиков с ГМИ	(2 слайда)
--	------------

7. Технология изготовления аморфной ферромагнитной микропроволоки	(4 слайда)
---	------------

8. Заключение	(1 слайд)
---------------	-----------

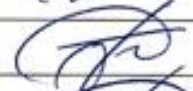
9. Спасибо за внимание	(1 слайд)
------------------------	-----------

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный план по выполнению выпускной работы магистра

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Материалы и конструкции чувствительных элементов с ГМИ	30%	26.05.26	
Конструкции магнитных датчиков с аморфной микропроволокой, реализующей эффект ГМИ	25%	28.05.26	
Технология производства аморфной металлической микропроволоки	35%	03.06.26	
Иллюстративная часть	5%	05.06.26	
Оформление пояснительной записки	5%	05.06.26	

Дата выдачи задания « 21 » мая 2026 г.

Руководитель выпускной работы  Головяшкин А.Н.
подпись, фамилия, инициалы

Задание к исполнению принял  Горбунцов А.А.
подпись, фамилия, инициалы

« 21 » мая 2026 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета  Кревчик В.Д.
подпись, фамилия, инициалы

« 8 » июня 2026 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Блок управления и контроля схема электрическая структурная

Пер. примен				
Гор. №				
Подп. и дата				
Взам. инв. №				
Инв. № докл.				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				

```

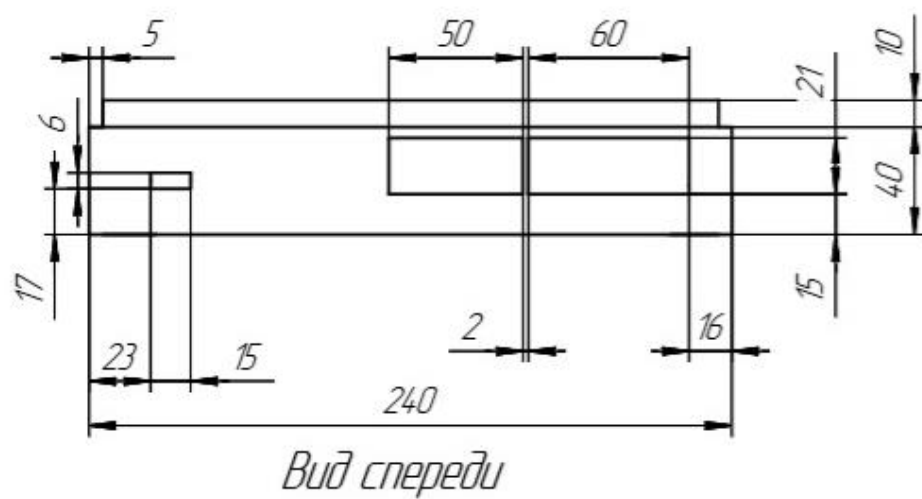
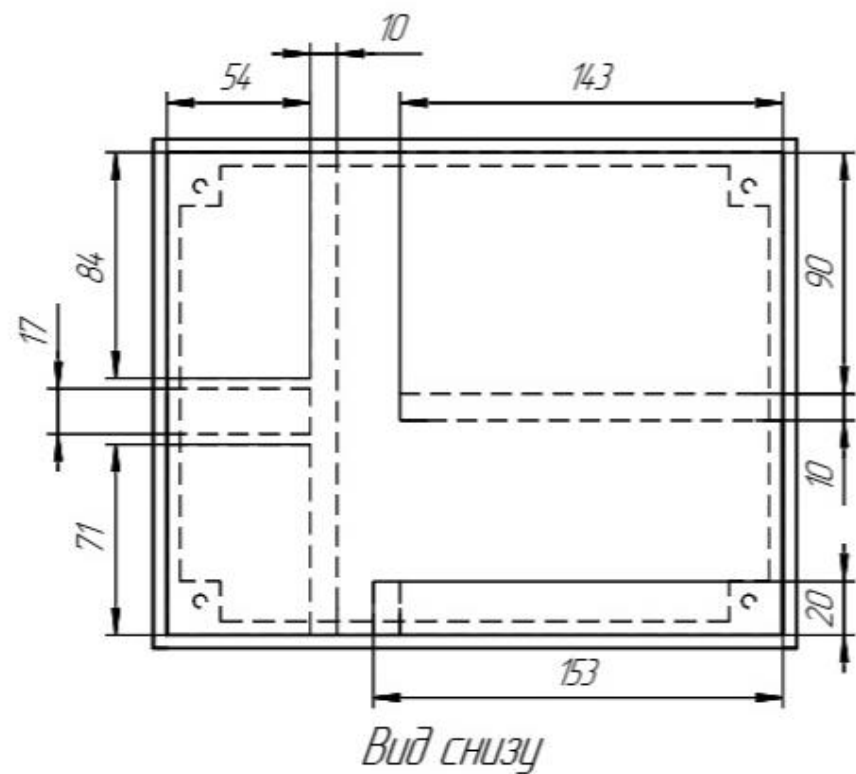
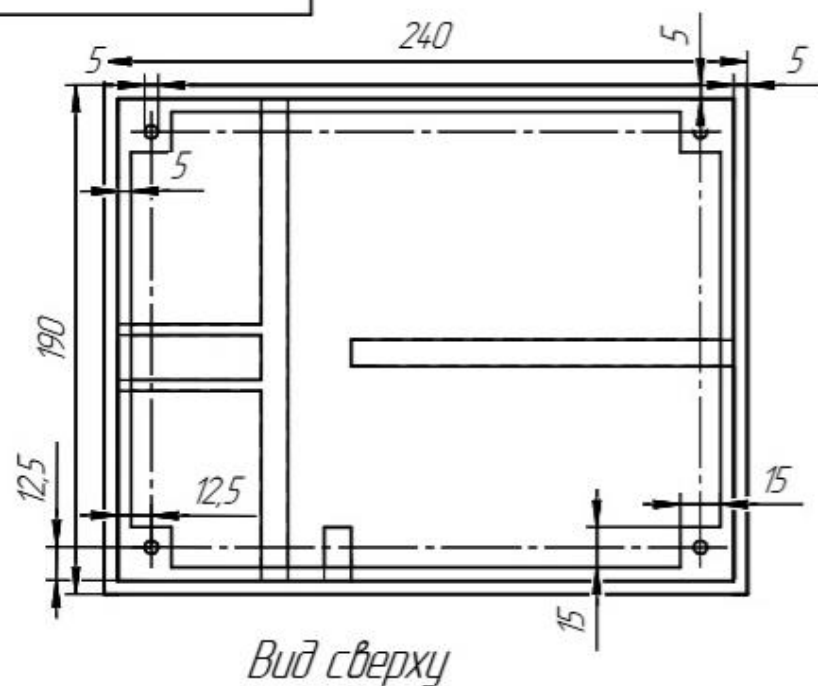
graph TD
    PC[Персональный компьютер] --> MC[Микроконтроллер ESP32-CH340C TYPE-C]
    MC --> I[Индикатор MAX7219]
    MC --> E[Энкодер]
    MC --> C[Конвертер UART TTL-RS485]
    C --> D[Контроллер BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri]
    D --> M[Двигатель BLDC]
    IP[Источник питания] --> D
  
```

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Блок управления и контроля схема электрическая структурная	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Горбунцов	<i>В.И.</i>	26.05.20				
Проб.		Головяшкин	<i>Г.П.</i>	20.06.20				
Т.контр.						Лист	Листов	1
Н.контр.		Рыжова	<i>Р.И.</i>	22.06.20				
Утв.								

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Чертеж корпуса блока управления и контроля

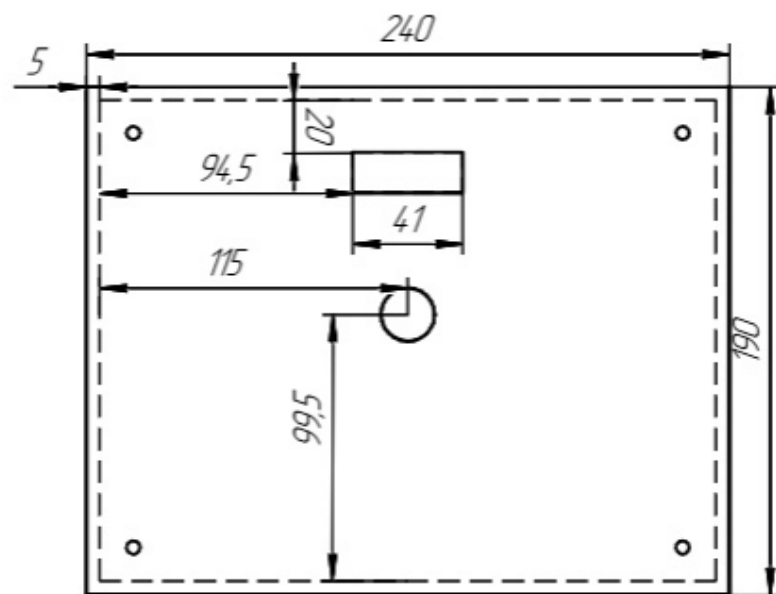


Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Чертеж корпуса блока	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Горбунцов	Горбунцов	Горбунцов	Горбунцов	управления и контроля	12		
Проб.	Головнякин	Головнякин	Головнякин	Головнякин		Лист	Листов	1
Т.контр.								
И.контр.	Рыкова	Рыкова	Рыкова	Рыкова				
Утв.								

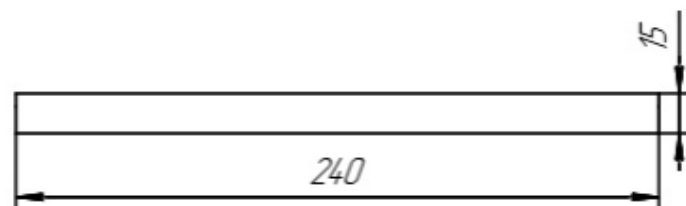
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

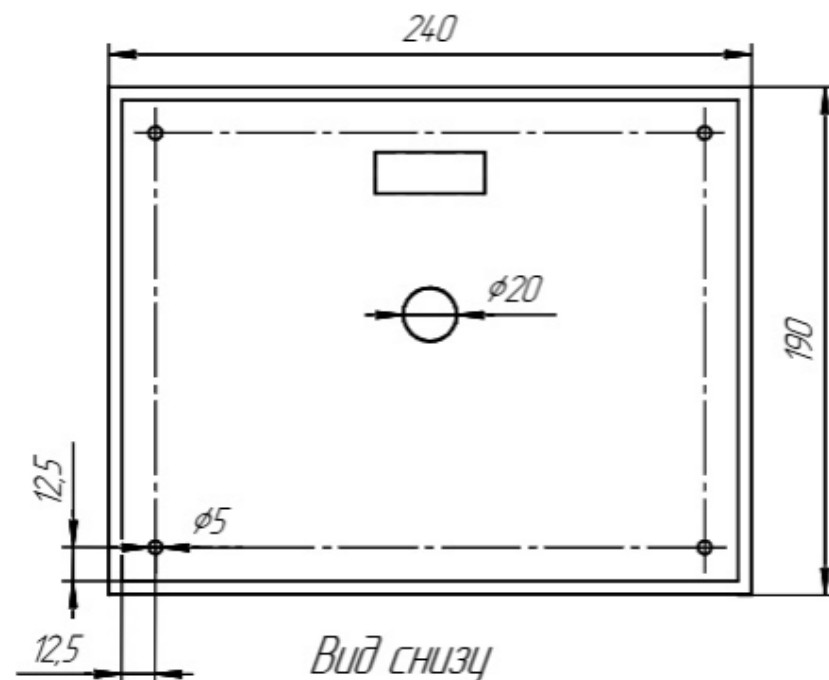
Чертеж крышки для корпуса блока управления и контроля



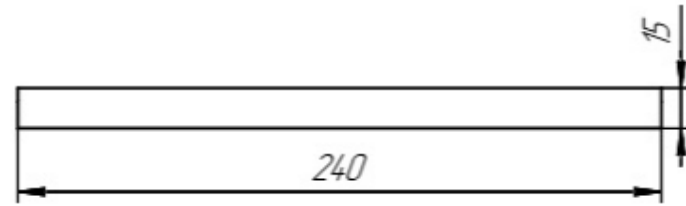
Вид сверху



Вид спереди



Вид снизу



Вид слева

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Чертеж крышки корпуса блока	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Горбунцов	Рыжова	26.05.20	26.05.20	управления и контроля	1		1:2
Проб.	Головешкин					Лист	Листов	1
Т.контр.								
Н.контр.	Рыжова	Рыжова	26.05.20					
Утв.								

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

Листинг *Arduino IDE* модуля для блока управления и контроля

```

#include <HardwareSerial.h>
#include <SPI.h>

// ----- ПИНЫ -----
// MAX7219
#define DIN 27
#define CLK 26
#define CS 25

// RS485
#define RXD2 16
#define TXD2 17
#define DE 4
#define RE 2

// Энкодер с кнопкой
#define ENC_A 34
#define ENC_B 35
#define ENC_BTN 32 // кнопка энкодера

// ----- РЕГИСТРЫ MODBUS (BLD-300Ri) -----
#define REG_SPEED 0x0056 // задание скорости (RPM)
#define REG_MOTOR_STATE 0x0066 // 0=стоп, 1=вперёд, 2=назад,
3=торможение
#define REG_485_ENABLE 0x00B6 // 1 = управление по RS-485
#define REG_SPEED_MODE 0x0034 // 1 = источник скорости RS-485
#define REG_LOOP_MODE 0x0089 // 0 = разомкнутый, 1 = замкнутый
контур

// ----- MAX7219 -----

```

```

class MAX7219_7SEG {
public:
    void begin() {
        pinMode(CS, OUTPUT);
        SPI.begin(CLK, -1, DIN, CS);
        sendCmd(0x0F, 0x00); // тест выкл
        sendCmd(0x0C, 0x01); // нормальный режим
        sendCmd(0x0B, 0x03); // 4 разряда
        sendCmd(0x0A, 0x08); // яркость
        sendCmd(0x09, 0xFF); // декодирование BCD
        clear();
    }

    void clear() {
        for (int i = 1; i <= 4; i++)
            sendCmd(i, 0x0F);
    }

    void setDigit(int pos, int val, bool dot = false) {
        uint8_t data = val & 0x0F;
        if (dot) data |= 0x80;
        sendCmd(pos, data);
    }

private:
    void sendCmd(uint8_t reg, uint8_t data) {
        digitalWrite(CS, LOW);
        SPI.transfer(reg);
        SPI.transfer(data);
        digitalWrite(CS, HIGH);
    }
}

```

```
}  
};
```

```
MAX7219_7SEG display;
```

```
// ----- RS485 / MODBUS -----
```

```
HardwareSerial RS485(2);
```

```
uint16_t modbusCRC(uint8_t *buf, int len) {
```

```
    uint16_t crc = 0xFFFF;
```

```
    for (int pos = 0; pos < len; pos++) {
```

```
        crc ^= buf[pos];
```

```
        for (int i = 0; i < 8; i++) {
```

```
            if (crc & 1) {
```

```
                crc >>= 1;
```

```
                crc ^= 0xA001;
```

```
            } else {
```

```
                crc >>= 1;
```

```
            }
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    return crc;
```

```
}
```

```
void sendFrame(uint8_t *data, int len) {
```

```
    while (RS485.available()) RS485.read();
```

```
    digitalWrite(RE, HIGH);
```

```
    digitalWrite(DE, HIGH);
```

```
    delayMicroseconds(50);
```

```
    RS485.write(data, len);
```

```

RS485.flush();
digitalWrite(DE, LOW);
digitalWrite(RE, LOW);
delay(150); // пауза согласно документации
}

```

```

void writeRegister(uint16_t reg, uint16_t value) {
    uint8_t frame[8];
    frame[0] = 0x01;
    frame[1] = 0x06;
    frame[2] = reg >> 8;
    frame[3] = reg & 0xFF;
    frame[4] = value >> 8;
    frame[5] = value & 0xFF;
    uint16_t crc = modbusCRC(frame, 6);
    frame[6] = crc & 0xFF;
    frame[7] = crc >> 8;
    sendFrame(frame, 8);
}

```

```

int readActualSpeed() {
    uint8_t frame[8];
    frame[0] = 0x01;
    frame[1] = 0x03;
    frame[2] = 0x00;
    frame[3] = 0x5F;
    frame[4] = 0x00;
    frame[5] = 0x01;
    uint16_t crc = modbusCRC(frame, 6);
    frame[6] = crc & 0xFF;

```

```

frame[7] = crc >> 8;
sendFrame(frame, 8);

```

```

unsigned long start = millis();
while (RS485.available() < 7) {
    if (millis() - start > 200) return -1;
}
uint8_t resp[7];
RS485.readBytes(resp, 7);
return (resp[3] << 8) | resp[4];
}

```

```

void setMotorSpeed(uint16_t speed) {
    if (speed > 0 && speed < 300) speed = 300; // минимальная рабочая
скорость
    writeRegister(REG_SPEED, speed);
}

```

```

void setMotorDirection(bool reverse) {
    // reverse = true -> назад (2), false -> вперёд (1)
    uint16_t val = reverse ? 2 : 1;
    writeRegister(REG_MOTOR_STATE, val);
}

```

```

void stopMotor() {
    writeRegister(REG_MOTOR_STATE, 0); // стоп
    setMotorSpeed(0);
}

```

// ----- РЕЖИМЫ -----

```

enum Mode {
    MODE_EXPECT,
    MODE_RUN,
    MODE_STOP
};

Mode currentMode = MODE_EXPECT;

// ----- ПАРАМЕТРЫ -----
volatile int encoderPos = 0;    // заданная скорость (0..6000)
bool reverseFlag = false;      // false = вперёд, true = назад
int realSpeed = 0;             // реальная скорость с драйвера

// ----- ЭНКОДЕР (прерывания) -----
volatile unsigned long lastEncoderMoveTime = 0; // время последнего
изменения энкодером
bool showSetpointTemp = false; // показывать уставку в RUN

void IRAM_ATTR encoderISR() {
    static uint8_t lastState = 0;
    static unsigned long lastInterruptTime = 0;

    unsigned long now = micros();
    if (now - lastInterruptTime < 2000) return; // антидребезг 2 мс
    lastInterruptTime = now;

    uint8_t state = (digitalRead(ENC_A) << 1) | digitalRead(ENC_B);

    // Определение направления (квадратурный энкодер)
    if ((lastState == 0b00 && state == 0b01) ||

```

```

    (lastState == 0b01 && state == 0b11) ||
    (lastState == 0b11 && state == 0b10) ||
    (lastState == 0b10 && state == 0b00)) {
    // Вращение по часовой (увеличение)
    encoderPos += 1;
}
else if ((lastState == 0b00 && state == 0b10) ||
        (lastState == 0b10 && state == 0b11) ||
        (lastState == 0b11 && state == 0b01) ||
        (lastState == 0b01 && state == 0b00)) {
    // Вращение против часовой (уменьшение)
    encoderPos -= 1;
}

lastState = state;

// Ограничение
if (encoderPos < 0) encoderPos = 0;
if (encoderPos > 6000) encoderPos = 6000;

lastEncoderMoveTime = millis();
showSetpointTemp = true; // при вращении показываем уставку
}

// ----- КНОПКА ЭНКОДЕРА -----
bool btnState = false;
bool lastBtnState = false;
unsigned long btnPressTime = 0;
bool longPressHandled = false;

```

```

// ----- МИГАНИЕ -----
bool blinkingActive = false;
int blinkRemaining = 0;
unsigned long lastBlinkTick = 0;
bool blinkState = false;

// ----- ТАЙМЕРЫ -----
unsigned long lastReadTime = 0;
unsigned long lastSendTime = 0;
unsigned long lastDisplayUpdate = 0;

// ----- ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ -----
void startBlink(int times) {
    blinkingActive = true;
    blinkRemaining = times * 2;
    lastBlinkTick = millis();
    blinkState = false;
}

void updateDisplayContent() {
    if (currentMode == MODE_STOP) {
        display.clear();
        return;
    }

    int valueToShow;
    bool allDots = false;
    bool rightDot = false;
    bool leftDot = false;

```

```

if (currentMode == MODE_EXPECT) {
    valueToShow = encoderPos;
    if (reverseFlag)
        leftDot = true; // левая точка = реверс
    else
        rightDot = true; // правая точка = вперёд
} else { // MODE_RUN
    if (showSetpointTemp) {
        valueToShow = encoderPos;
    } else {
        valueToShow = (realSpeed >= 0) ? realSpeed : 0;
    }
    allDots = true;
}

if (valueToShow > 9999) valueToShow = 9999;

int d1 = valueToShow % 10;
int d2 = (valueToShow / 10) % 10;
int d3 = (valueToShow / 100) % 10;
int d4 = (valueToShow / 1000) % 10;

display.setDigit(4, d1);
display.setDigit(3, d2);
display.setDigit(2, d3);
display.setDigit(1, d4);

if (allDots) {
    display.setDigit(1, d4, true);
    display.setDigit(2, d3, true);
}

```

```

display.setDigit(3, d2, true);
display.setDigit(4, d1, true);
} else {
    if (rightDot) display.setDigit(4, d1, true);
    if (leftDot) display.setDigit(1, d4, true);
}
}

```

```

void refreshDisplay() {
    if (blinkingActive) return;
    updateDisplayContent();
}

```

// ----- ОБРАБОТКА КНОПКИ ЭНКОДЕРА (с антидребезгом) -----

-

```

void handleEncoderButton() {
    bool reading = !digitalRead(ENC_BTN);

    // Антидребезг
    if (reading != lastBtnState) {
        delay(20); // простая задержка для подавлениядребезга
        reading = !digitalRead(ENC_BTN);
    }

```

```

    if (reading && !lastBtnState) {
        btnPressTime = millis();
        longPressHandled = false;
    }

```

// Длинное нажатие (>700 мс) – реверс, только в EXPECT

```

if (reading && !longPressHandled) {
  if (millis() - btnPressTime > 700) {
    if (currentMode == MODE_EXPECT) {
      reverseFlag = !reverseFlag;
      setMotorDirection(reverseFlag);
      startBlink(3);
      refreshDisplay();
    }
    longPressHandled = true;
  }
}

// Короткое нажатие – переключение EXPECT <-> RUN
if (!reading && lastBtnState && !longPressHandled) {
  if (currentMode == MODE_EXPECT) {
    currentMode = MODE_RUN;
    setMotorDirection(reverseFlag);
    setMotorSpeed(encoderPos);
    showSetpointTemp = true;
    lastEncoderMoveTime = millis();
  } else if (currentMode == MODE_RUN) {
    currentMode = MODE_EXPECT;
    stopMotor();
    showSetpointTemp = false;
  }
  startBlink(5);
  refreshDisplay();
}

lastBtnState = reading;

```

```

}

// ----- ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ -----

void periodicReadSpeed() {
    if (millis() - lastReadTime >= 500) {
        lastReadTime = millis();
        int spd = readActualSpeed();
        if (spd >= 0) realSpeed = spd;
    }
}

void periodicSendSpeed() {
    if (millis() - lastSendTime >= 200) {
        lastSendTime = millis();

        if (currentMode == MODE_RUN) {
            int speed = encoderPos;
            if (speed > 0 && speed < 300) speed = 300;
            setMotorSpeed(speed);
        } else {
            // В не RUN режимах скорость не отправляем (двигатель остановлен)
            // stopMotor уже вызывается при смене режима
        }
    }
}

void handleDisplayTimeout() {
    if (currentMode != MODE_RUN) {
        showSetpointTemp = false;
        return;
    }
}

```

```

    }

    if (showSetpointTemp && (millis() - lastEncoderMoveTime > 2000)) {
        showSetpointTemp = false;
        refreshDisplay();
    }
}

void handleBlink() {
    if (!blinkingActive) return;
    if (millis() - lastBlinkTick >= 100) {
        lastBlinkTick = millis();
        blinkState = !blinkState;
        if (blinkState) {
            display.clear();
        } else {
            updateDisplayContent();
        }
        blinkRemaining--;
        if (blinkRemaining <= 0) {
            blinkingActive = false;
            refreshDisplay();
        }
    }
}

// ----- ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ДРАЙВЕРА -----
void initDriver() {
    delay(200);
    writeRegister(REG_485_ENABLE, 1); // включить управление по RS-485

```

```

    delay(200);
    writeRegister(REG_SPEED_MODE, 1); // источник скорости – RS-485
    delay(200);
    writeRegister(REG_LOOP_MODE, 1); // замкнутый контур
    delay(200);
    writeRegister(REG_MOTOR_STATE, 1); // состояние "вперёд"
    (двигатель пока не запущен)
    delay(200);
}

// ----- SETUP -----

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // RS485
    pinMode(DE, OUTPUT);
    pinMode(RE, OUTPUT);
    digitalWrite(DE, LOW);
    digitalWrite(RE, LOW);
    RS485.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);

    // Энкодер
    pinMode(ENC_A, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ENC_B, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENC_A), encoderISR, CHANGE);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENC_B), encoderISR, CHANGE);

    // Кнопки
    pinMode(ENC_BTN, INPUT_PULLUP);

    // Дисплей

```

```

display.begin();
// Инициализация драйвера
initDriver();
// Начальное направление – вперёд
reverseFlag = false;
setMotorDirection(false);

Serial.println("READY");
refreshDisplay();
}

// ----- LOOP -----
void loop() {
    handleEncoderButton();
    handleStopButton();

    periodicReadSpeed();
    periodicSendSpeed();

    handleDisplayTimeout();
    handleBlink();

    // Обновление дисплея с частотой ~10 Гц (если не мигает)
    if (!blinkingActive && millis() - lastDisplayUpdate >= 100) {
        lastDisplayUpdate = millis();
        refreshDisplay();
    }
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Список опубликованных научных работ

СПИСОК
опубликованных и приравненных к ним
научных и учебно-методических работ
Горбунцова Алексея Андреевича

№ п/ п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем в п.л. или с.	Соавторы
1	2	3	4	5	6
а) Научные работы					
1.	Исследование влияния материала адгезионного подслоя контактных площадок на стабильность тонкопленочных тензорезисторов	Печатная	Вакуумная техника и технологии - 2025: Труды 32-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 25–27 июня 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Принята к публикации в II квартале 2025 г.	<u>5 с.</u>	Зуев В.Д. Рыжов А.А. Новичков М.Д. Шепелева А.Э. Киреев А.М. Агафонов Д.В. Хижняк А.А.
2.	Исследование влияния режимов синтеза на стабильность тонкопленочных тензорезисторов	Печатная	Вакуумная техника и технологии - 2025: Труды 32-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 25–27 июня 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Принята к публикации в II квартале 2025 г.	<u>5 с.</u>	Зуев В.Д. Рыжов А.А. Новичков М.Д. Шепелева А.Э. Антонов В.А. Агафонов Д.В. Хижняк А.А.
3.	Механизмы возникновения температурных погрешностей тонкопленочных резистивных структур	Печатная	Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2025. – Т. 2. – С. 385-389.	<u>5 с.</u>	Рыжов А.А. Гурин С.А. Новичков М.Д. Шепелева А.Э. Агафонов Д.В. Антонов В.А. Ильин В.А. Хижняк А.А. Зуев В.Д.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

Результат проверки ВКР в системе Антиплагиат.ВУЗ

И.о. ректора Пензенского государственного
университета Васину С.М.
студента 2 курса ФИТЭ очной формы
обучения
Горбунцова Алексея Андреевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Горбунцов Алексей Андреевич, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, Микроэлектроника и твердотельная электроника, прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» магистерской выпускной квалификационной работы на тему «Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.


подпись студента

09.06.26
дата

ВКР представлена на проверку 09.06.26

Руководитель ВКР



Головяшкин А.Н.

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной магистерской работы на тему «Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта»

студента 2 курса Горбунцова Алексея Андреевича

направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника,

магистерская программа «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР Головяшкин Алексей Николаевич



СПРАВКА

о результате проверки текстового документа на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет»

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ ANTIPLAGIAT.VUZ

Автор работы: Горбунцов Алексей Андреевич
Омечетирование: Горбунцов Алексей Андреевич
Расчет на дату: Горбунцов Алексей Андреевич
Название работы: Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ	32.81%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	76.09%
ИНТЕРИОРИТЕТ	0%
САМ ИНТЕРИОРИТЕТ	0%
КОПИРОВАНИЕ	0%



ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 03.06.2026

Структура документа: Проверены разделы: основная часть с.2-3, 21-61, содержание с.4, введение с.5-21, введение с.82-84, 88-100
Модуль поиска: Перечислены заимствования: Патенты СССР, РФ, СНГ; Профессиональные лексиконы, Медицинские термины; СПО ГАРАНТ; нормативно-правовые документы; Профессиональные лексиконы, Криптоанализ; Профессиональные лексиконы, АПК и Ветеринария; IEEE, PubMed, Библиографические ссылки; Коллекция ИВУ; СНИ России и СНГ; Публикации eLIBRARY; Коллекция открытых публикаций международного сообщества; Открытые научные работы Конференции; Книжные ресурсы; Медицинские термины; Периферия и периферия; Коллекция открытых публикаций международного сообщества; ИПО Адмис; Публикации РГБ (перевод и периферия); Периферия на коллекцию IEEE, СПО ГАРАНТ; аннотации; Периферия на базе публикаций открытого доступа PubMed; Перечислены заимствования IEEE, Публикации РГБ; Перечислены заимствования...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

СЮ проверка

Дата подписи: 03.06.2026

Подпись проверяющего



Число заимствований и подлинность текста, который был введен в систему.

Отметка о том, что информация о заимствованиях была получена из базы данных, которая была использована для проверки.

Руководитель ВКР

« 9 » июня 2026 год

подпись

Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Пензенский государственный
университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Горбунцов Алексей Андреевич
Самоцитирование
рассчитано для: Горбунцов Алексей Андреевич
Название работы: Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ	20.91%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	79.09%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%
ИИ-КОНТЕНТ	0%



ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 09.06.2026

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2-3, 21-51, содержание с.4, введение с.5-21, выводы с.52-54, 98-100
Модули поиска: Переводные заимствования; Патенты СССР, РФ, СНГ; Профессиональная лексика. Медицина; Цитирование; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Профессиональная лексика. Юриспруденция; Профессиональная лексика. АПК и биотех; IEEE; PubMed; Шаблонные фразы; Рувики; Коллекция НБУ; СМИ России и СНГ; Публикации eLIBRARY; Коллекция открытых публикаций международных издательств; Сводная коллекция научных работ Беларуси; Кольцо вузов; Медицина; Перефразирования по Коллекции открытых публикаций международных издательств; ИПС Адилет; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Перефразирования по коллекции IEEE; СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по базе публикаций открытого доступа PubMed; Переводные заимствования IEEE; Публикации РГБ; Переводные заимствования...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 09.06.26

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

(обязательное)

Презентация ВКР

ФГБОУ ВО ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

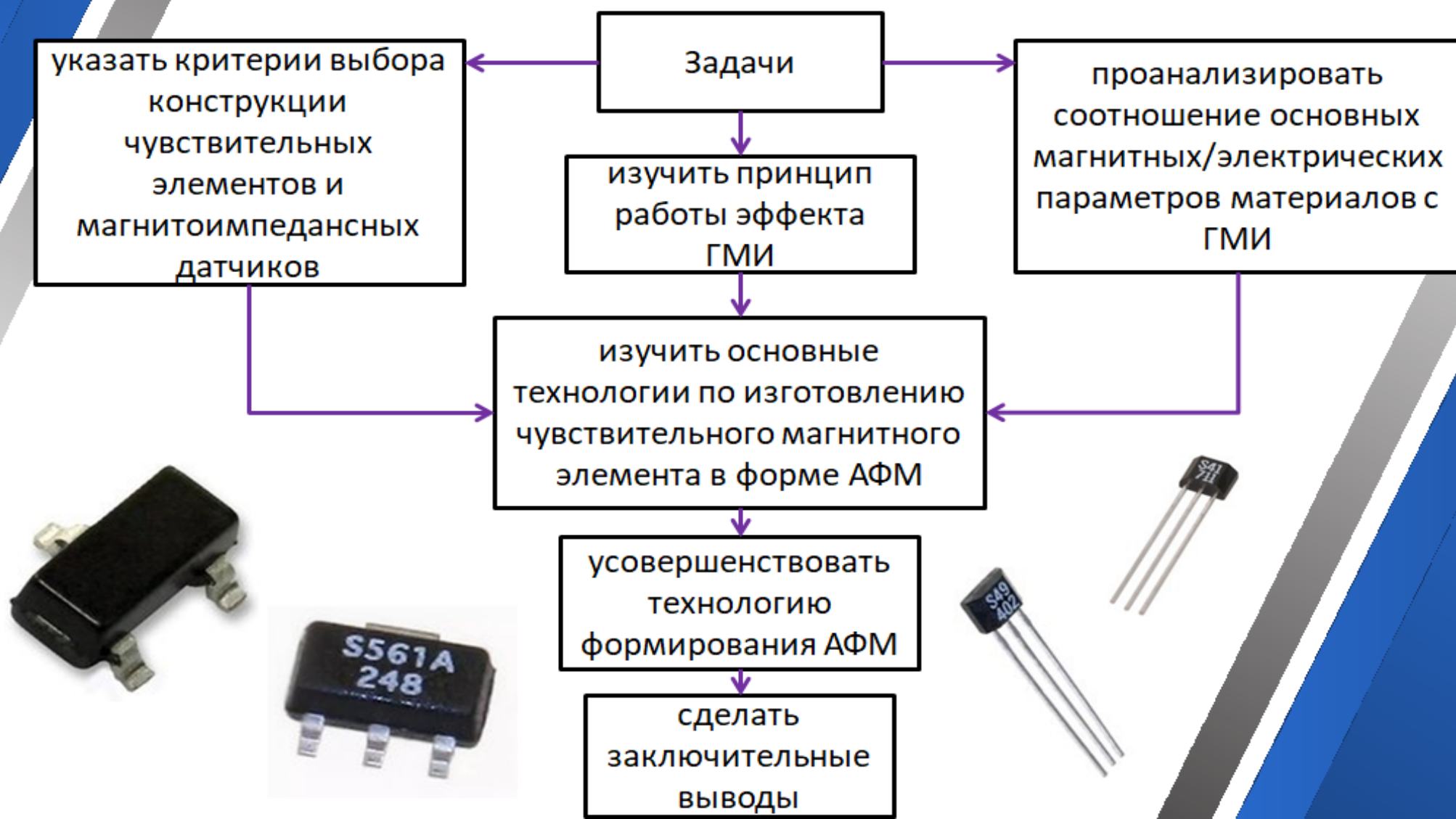
Чувствительные элементы датчиков на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта

Выполнил: ст. гр. 24ПДм1
Горбунцов Алексей Андреевич

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры
«Нано- и микроэлектроника» ПГУ
Головяшкин Алексей Николаевич

Цель и задачи ВКР

Цель работы: исследование конструктивных и технологических аспектов изготовления магнитных чувствительных элементов для миниатюрных датчиков на основе ГМИ эффекта, повышение их качества и надежности в процессе изготовления



Актуальность работы

1

Геодезическое
оборудование

Буссоли, магнитные
градиентометры



2

Медицинские
приборы

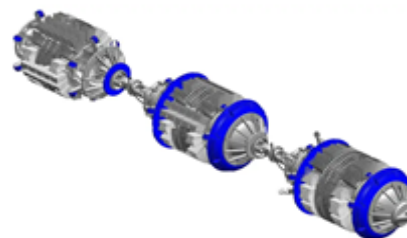
Магнитокардиографы,
имплантируемые
сенсоры



3

Системы
неразрушающего
контроля

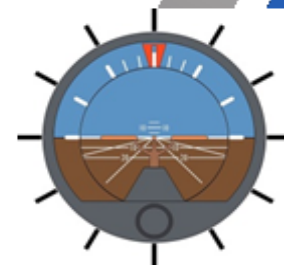
Внутритрубные
инспекционные
приборы,
магнитные
дефектоскопы



4

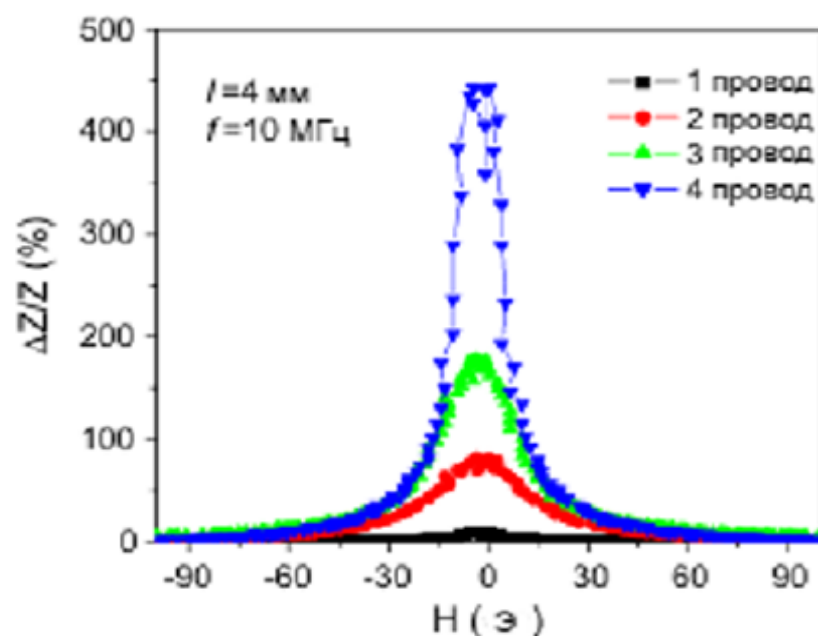
Авиационная
техника

Прецизионные
электронные
компасы



Эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ)

ГМИ - это явление изменения комплексного сопротивления ферромагнитного проводника при протекании через него переменного тока высокой частоты в присутствии внешнего магнитного поля. В области слабых полей относительное изменение импеданса в таких проводниках достигает сотен процентов.



Анализ материалов и конструкций чувствительных элементов с ГМИ

26
55,847

Fe
Ferrum
ЖЕЛЕЗО



Железо

27
58,9332

Co
Cobaltum
КОБАЛЬТ



Кобальт

Анализ материалов и конструкций чувствительных элементов с ГМИ



◆ Аморфные ферромагнитные ленты ◆

◆ Аморфные ферромагнитные микропровода ◆



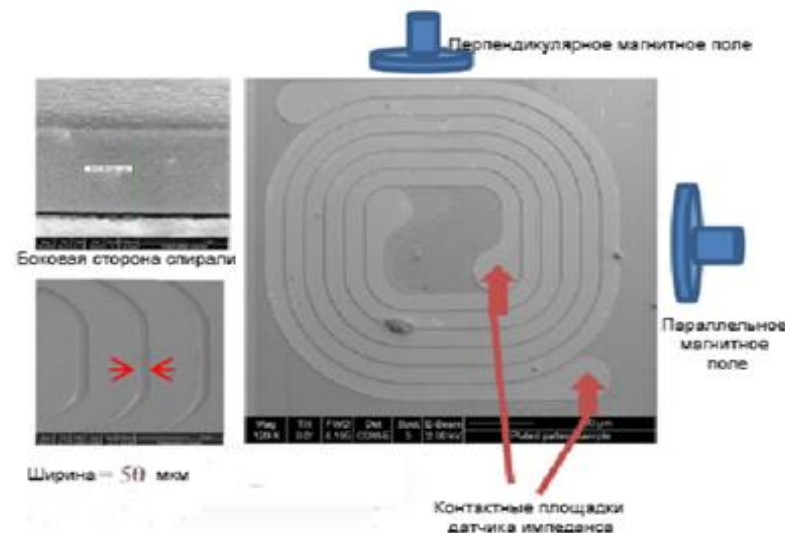
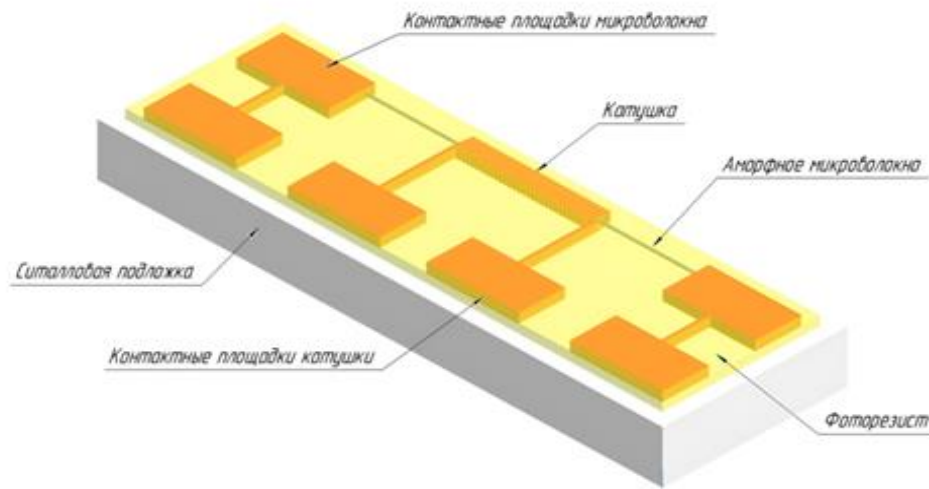
◆ Ферромагнитные тонкие пленки ◆

Анализ материалов и конструкций чувствительных элементов с ГМИ

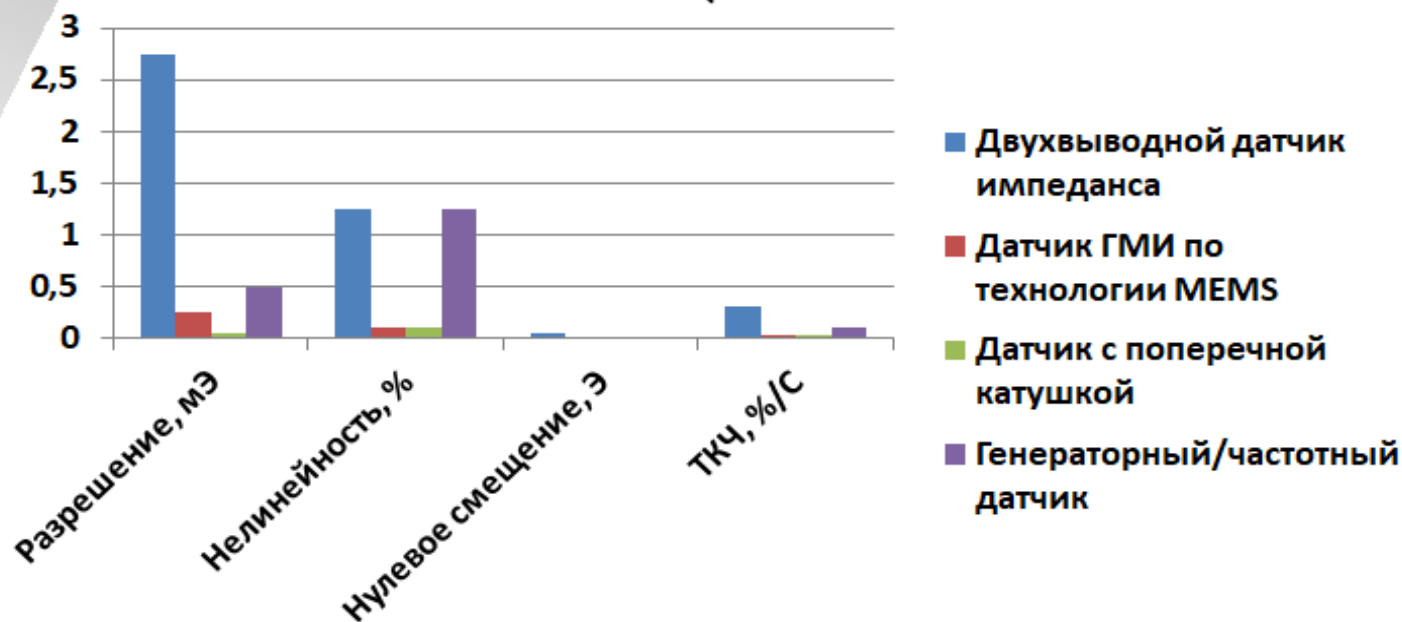
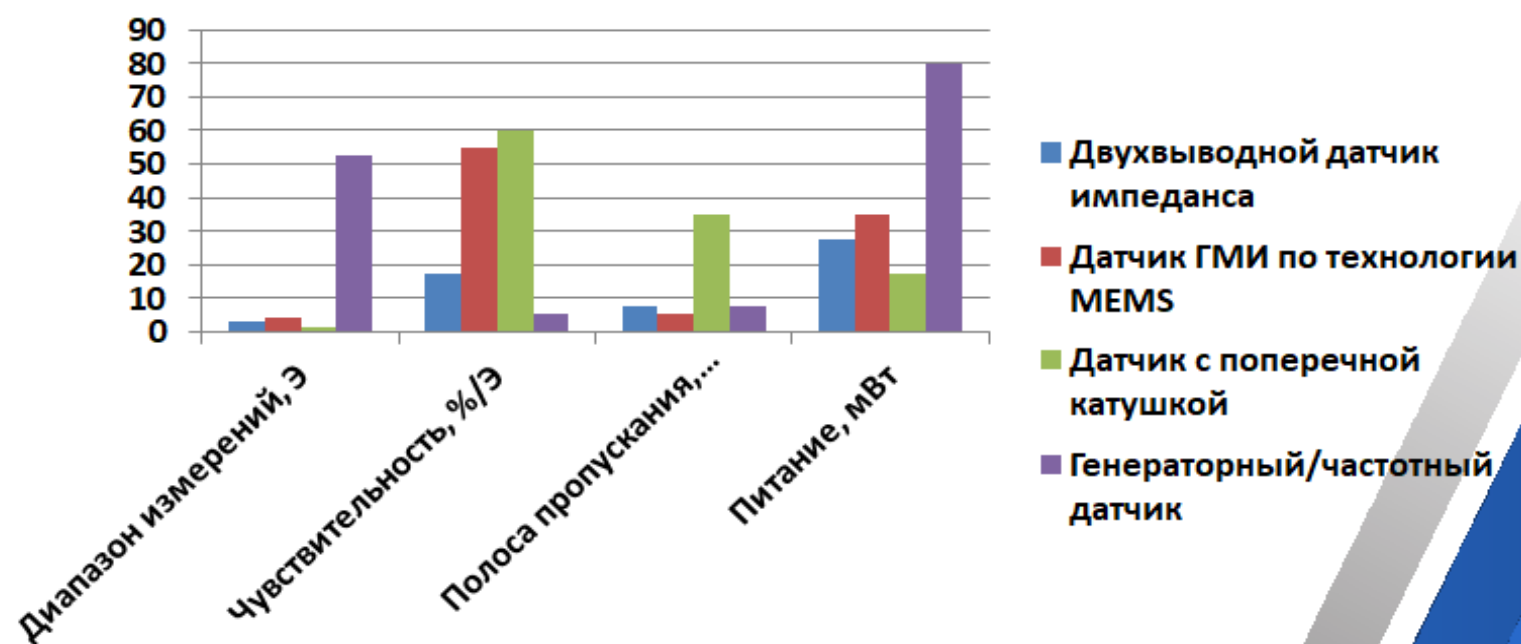
Материал	Конструкция	Коэрцитивная сила, Э	Коэф. ГМИ, %	Магнитный отклик, %/Э	Частота, МГц
$(\text{Co}_{94}\text{Fe}_6)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Микропроволока	10	125	50	3,22
$\text{Co}_{68,25}\text{Fe}_{4,5}\text{Si}_{12,25}\text{B}_{15}$	Микропроволока	125	600	320	15
$\text{Co}_{68,2}\text{Mn}_7\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Микропроволока	50	153	65	30
$\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	Микропроволока	25	25,5	8,9	2
$\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{Nb}_{2,2}\text{Cu}_{0,8}\text{B}_7$	Лента	2	50	125	0.1
$\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	Лента	150	400	37	4,5
$\text{Fe}_{84}\text{Zr}_7\text{B}_8\text{Cu}_1$	Лента	100	640	40	5
CoSiB/Cu/CoSiB	Многослойная тонкая пленка	70	77	7,2	13
$\text{CoSiB/SiO}_2/\text{Cu/SiO}_2/\text{CoSiB}$	Многослойная тонкая пленка	9	440	49	10
$\text{FeSiBCuNb/SiO}_2/\text{Cu/SiO}_2/\text{FeSiBCuNb}$	Многослойная тонкая пленка	11	700	304	20
NiFe/Ag	Многослойная тонкая пленка	65	150	30	300

Анализ конструкций магнитных датчиков с ГМИ

- ◆ Двухвыводной датчик импеданса
- ◆ Датчик ГМИ, по технологии MEMS
- ◆ Датчик ГМИ с поперечной катушкой
- ◆ Генераторный/частотный датчик



Анализ конструкций магнитных датчиков с ГМИ



Технология изготовления аморфной ферромагнитной микропровода

Аморфная ферромагнитная
проволока



Технология изготовления аморфной ферромагнитной микропровода

Назначение

- Вытягивание аморфного микропровода и его намотка на катушку

Входы

- Энкодер с кнопкой, сигнал скорости с драйвера

Выходы

- Драйвер широтно-импульсной модуляции (ШИМ), дисплей

Режимы

- E = expectation, скорость двигателя 0 об/мин, можно устанавливать предварительную мощность от 0 до 6000 об/мин (регулировка шага 1 и 50), доступен реверс;
- R = receiving скорость двигателя: 0..6000 об/мин, мощность можно менять в процессе работы (регулировка шага также 1 и 50), реверс невозможен;

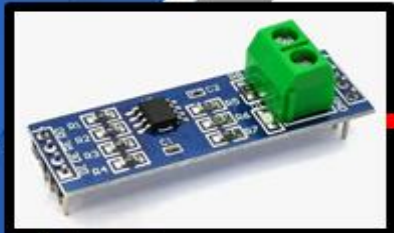
Логика работы

- переключение режимов expectation-receiving осуществляется через короткое нажатие кнопки энкодера, долгое нажатие этой же кнопки в режиме expectation меняет направление вращения двигателя;
- установка мощности задаётся поворотом энкодера, медленное вращение - маленький шаг регулировки (1 об/мин), быстрое вращение энкодера - большой шаг регулировки (50 об/мин).

Технология изготовления аморфной ферромагнитной микропроволоки

Блок управления и контроля

TTL UART-RS485



ESP32-CH340C TYPE-C



Двигатель BLDC



BLDC MOTOR DRIVER BLD-300Ri

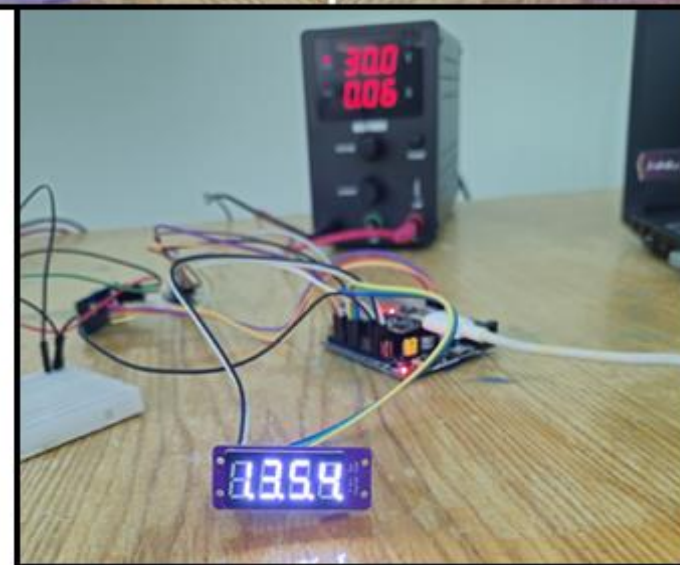
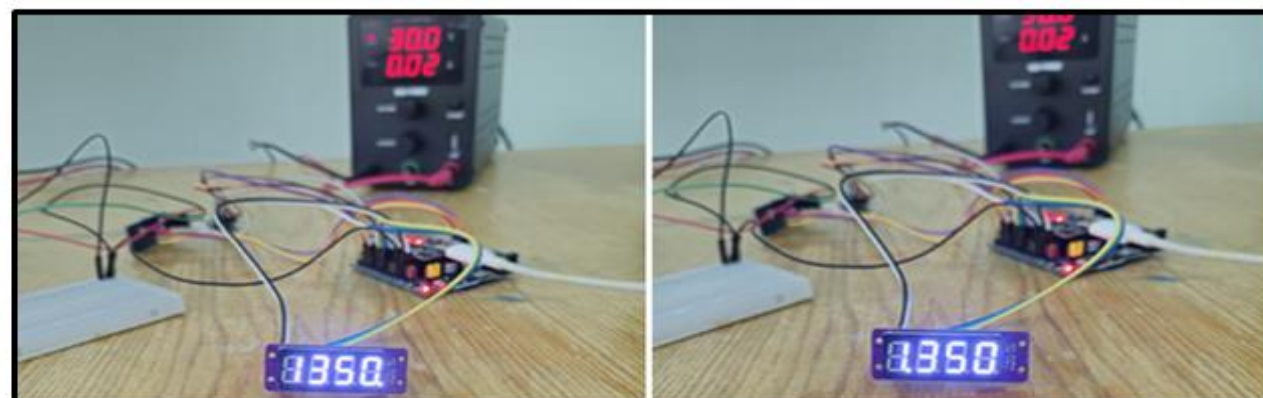
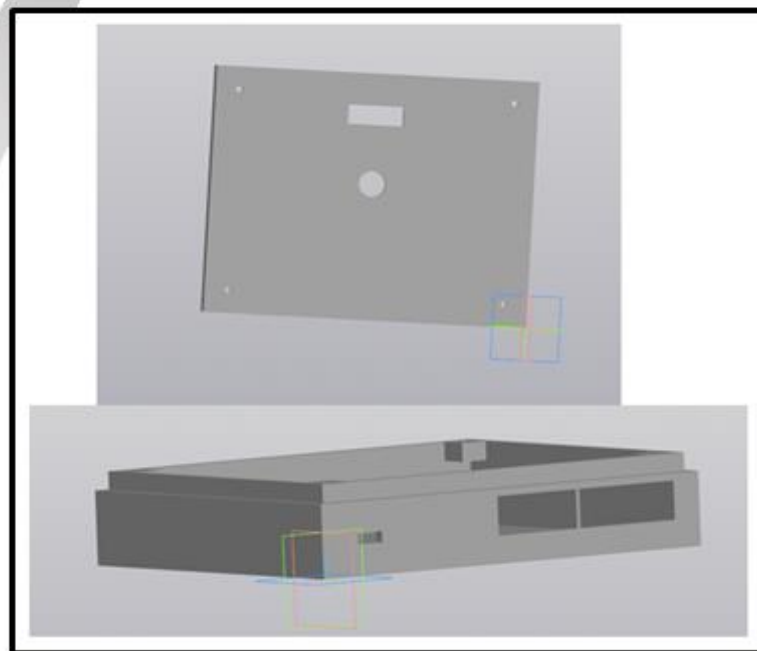


MAX7219 и энкодер



Технология изготовления аморфной ферромагнитной микропроволоки

3D модели корпуса и
крышки, выполненные в
среде программирования
Компас 3D



Режимы работы блока
управления и контроля

Заключение

- 1 Кратко описан эффект ГМИ и принцип его работы;
- 2 Проанализировано соотношение основных параметров, характеристик и конструкций материалов с ГМИ;
- 3 Указаны критерии выбора конструкции магнитоимпедансных датчиков с чувствительным элементом в виде АФМ.
- 4 Показаны одни из самых распространенных способов по изготовлению аморфной микропровода;
- 5 Успешно спроектирован и собран специализированный блок управления для операции вытягивания микропровода для установки по изготовлению АФМ по методу Тейлора-Улитовского, который должен обеспечивать стабильность и надежность работы узла приема для нее;
- 6 Разработаны чертежи для крышки корпуса и самого корпуса блока управления, предназначенные для защиты компонентов от внешней среды;
- 7 Создан программный код в среде разработки Arduino IDE, который отвечает за логику работы блока контроля и предоставляет для пользователя удобное управление по вытягиванию аморфного микропровода и его намотки на катушку.

Спасибо за внимание!