

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

На правах рукописи

КОЛОМЕЙЦЕВ АНДРЕЙ

**RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
СВЕРХСЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 2.2.4 – Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук,
Баранов Павел Федорович

Томск – 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ СВЕРХСЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	12
1.1 Датчики для измерения сверхслабых магнитных полей	12
1.2 СКВИД-магнитометры	18
1.3 Квантовые магнитометры с оптической накачкой	19
1.4 Флюксометры	21
1.5 Датчики на магниторезистивных эффектах	22
1.5.1 АМР магнитометры	22
1.5.2 ГМР магнитометры.....	23
1.5.3 ТМР магнитометры.....	25
1.6 ГМИ магнитометр	27
1.7 Магнитоэлектрические магнитометры	28
1.8 Резонансные оптомеханические магнитометры	29
1.9 Магнитометр на основе спин-волнового интерферометра.....	30
1.10 Магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе (NV-центр)	31
1.11 Датчики на основе эффекта Холла.....	33
1.12 Магнитоупругие магнитометры	34
1.13 Феррозонды	35
1.14 Сравнение датчиков сверхслабых магнитных полей	36
1.15 Пути совершенствования феррозондов	37
1.16 Выводы к главе 1	49
ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	51
2.1 Математическая модель RTD-феррозонда	51
2.1.1 Кривая намагниченности ферромагнитного сердечника.....	52

2.1.2 Аналитическое описание работы RTD-феррозондового преобразователя	53
2.2 Экспресс-калькулятор RTD-феррозонда	69
2.3 Конечно-элементная модель RTD-феррозонда.....	72
2.4 Выводы к главе 2.....	84
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ.....	85
3.1 Разработка конструкций RTD-феррозондовых датчиков	85
3.2 Моделирование конструкций RTD-феррозондовых датчиков.....	92
3.3 Изготовление RTD-феррозондовых преобразователей	119
3.4 Выводы к главе 3.....	130
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ	131
4.1 Установка для создания измеряемого магнитного поля.....	131
4.2. Возбуждение RTD-феррозондовых датчиков	133
4.3. Обработка выходного сигнала RTD-феррозондовых датчиков.....	135
4.4 Экспериментальные исследования изготовленных образцов RTD-феррозондов	139
4.5. Проверка возможности измерения сложного сигнала	171
4.6 Выводы к главе 4.....	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	176
Список используемой литературы	178
Приложение А	192
Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	193

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Измерение сверхслабых магнитных полей (менее 20 мкТл) является одной из важнейших задач в области передовых цифровых и медицинских технологий. Так, при построении квантового компьютера, требуется обеспечить измерение абсолютного значения магнитной индукции с точностью до 100 пТл в широком диапазоне температур, вплоть до 50 мК при тепловыделении менее 100 мкВт. В медицинской диагностике и исследовании биосигналов человека диапазон измерения магнитной индукции варьируется от десятков нТл до долей пТл. Для измерения сверхслабых магнитных полей традиционно применяются СКВИДы, магнитометры с оптической накачкой, магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии и феррозондовые датчики. За исключением феррозондов, все перечисленные выше магнитометры являются громоздкими, дорогими и требующими специальных условий эксплуатации устройствами.

Благодаря своему принципу действия, феррозонды являются достаточно простыми технологически и недорогими датчиками, имеющими потенциал совершенствования с точки зрения повышения чувствительности, миниатюризации и пространственного разрешения для измерения трехмерной картины распространения магнитных полей.

Совершенствование феррозондов может идти по трем направлениям: миниатюризации и оптимизация геометрии преобразователя; совершенствование способов возбуждения и обработки измерительной информации; применения новых материалов в качестве магнитного сердечника феррозонда. В последние годы, существует тенденция отказа от моточных феррозондов в пользу планарных, выполненных по технологии микроэлектромеханических систем или по технологии травления печатных плат. Однако, по своим метрологическим характеристикам они, в большинстве своем, уступают традиционным моточным датчикам.

В начале 2000-х годов появились исследования по созданию феррозондов, основанных не на измерении амплитуды второй гармоники в выходном сигнале феррозонда, а на измерении разности временных интервалов между максимальным и минимальным значениями амплитуды ЭДС в выходном сигнале феррозонда за один период. В мировой литературе разность временных интервалов между максимальным и минимальным значениями амплитуды ЭДС за один период получила сокращенное обозначение RTD (от. англ. residence times difference – разница во времени пребывания). Эффект появления разности временных интервалов обусловлен тем, что при возбуждении феррозонда переменным током синусоидальной формы и отсутствии внешнего измеряемого магнитного поля, сердечник намагничен в обоих направлениях симметрично. Однако, при появлении внешнего измеряемого магнитного поля сердечник будет сохранять намагниченность одного из знаков дольше, чем противоположного знака за один период сигнала возбуждения. Тогда выходной сигнал RTD-феррозонда будет иметь временное смещение относительно середины периода. Разность временных интервалов между минимальным и максимальным значениями ЭДС выходного сигнала прямо пропорционально зависит от измеряемого внешнего магнитного поля, а знак этой разности указывает на направление магнитного поля относительно оси чувствительности феррозонда.

RTD-феррозонды являются перспективными датчиками для измерения сверхслабых полей с возможностью минимизации тепловыделения за счет снижения амплитуды тока возбуждения и применения планарных технологий изготовления.

Так как RTD-феррозонды появились сравнительно недавно, в отечественных и зарубежных публикациях отсутствуют полноценные математические модели, описывающие их работу в зависимости от параметров тока возбуждения и формы кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.

Целью диссертационной работы является разработка подробной математической модели, конечно-элементный анализ, практическая реализация

и экспериментальное исследование конструкций RTD-феррозондовых датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей.

В соответствии с поставленной целью, были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Разработка аналитической модели RTD-феррозонда, связывающей параметры тока возбуждения с ЭДС, наводимой в измерительной обмотке, и учитывающей аналитическое описание кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.
2. Анализ работы RTD-феррозонда с учетом параметров тока возбуждения, амплитуды измеряемого магнитного поля и параметров кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.
3. Разработка конструкций RTD-феррозондов на основе предложенной аналитической модели с использованием технологии печатных плат, и проведение их конечно-элементного анализа.
4. Изготовление и экспериментальные исследования RTD-феррозондов при измерении сверхслабых постоянных магнитных полей и магнитных полей, имитирующих магнитное поле сердца человека.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электромагнитного поля, теории погрешностей, дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования. При расчетах и моделировании использовались программные пакеты Mathcad, Multisim, Comsol и LabVIEW.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной на практике точностью экспериментальных данных, полученных при апробации RTD-феррозондовых датчиков с применением эталонных средств измерений, с результатами моделирования и теоретических исследований. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием современных прецизионных средств измерений, прошедших периодические поверку и калибровку.

Научная новизна работы

1. Получены аналитические выражения для расчета разности временных интервалов между пиками ЭДС выходного сигнала RTD-феррозонда в зависимости от амплитуды и частоты тока возбуждения и формы кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.
2. Предложена методика конечно-элементного анализа конструкций RTD-феррозонда для заданных параметров: геометрия сердечника, амплитуда и частота тока возбуждения, форма петли гистерезиса ферромагнитного сердечника; и на его основе предложены варианты конструкций планарных RTD-феррозондов.
3. Реализованы и экспериментально исследованы предложенные конструкции планарных RTD-феррозондов с коэффициентом преобразования до 0,464 мкс/мкТл для измерения сверхслабых постоянных магнитных полей и переменных магнитных полей сложной формы, имитирующих биосигналы.

Практическая ценность работы. Разработанные в ходе диссертационных исследований аналитическая модель и методика конечно-элементного анализа могут найти широкое применение при проектировании высокочувствительных RTD-феррозондов. Разработанные конструкции RTD-феррозондов могут найти применение в системах магнитного вакуума и биомагнитных исследованиях, а также в составе систем навигации, ориентации и стабилизации робототехнических комплексов как наземного, так подводного и космического назначения, в системах экранирования квантовых компьютеров, при поиске и обнаружении магнитных аномалий.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований использованы при выполнении следующих НИР:

- Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-873.2020.8 «Высокочувствительные средства сравнения для передачи единиц физических величин», 2020-2021 гг.

- Грант РФФИ № 19-37-90061 «Планарный феррозондовый преобразователь для магнитокардиографии», 2019-2021 гг.
- Грант РФФИ № 17-79-10083 «Планарный феррозондовый преобразователь для системы магнитного вакуума квантового компьютера», 2017-2019 гг.
- Грант ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», № 14.578.21.0232 «Интеллектуальный инерциальный модуль на основе микроэлектромеханических датчиков с функциями гироскопа, акселерометра и магнитометра для систем ориентации, и навигации транспортных средств с автоматизированным управлением», 2017-2020 гг.

Результаты работы также используются: в ООО «Лорге Медикал» при реализации проекта по созданию медицинских систем для биомагнитных исследований; в учебном процессе в отделе Электронной инженерии Томского политехнического университета.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенные на основе математического анализа RTD-феррозондов обобщенные аналитические выражения позволяют рассчитать временные интервалы в выходном сигнале датчика с учетом параметров тока возбуждения, амплитуды измеряемого магнитного поля и характеристик кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.
2. Использование разработанной методики конечно-элементного анализа позволяет проводить оценку амплитуды выходного сигнала, разности временных интервалов, коэффициента преобразования и рабочего диапазона измерений для различных конструкций RTD-феррозонда, при заданных амплитуде и частоте тока возбуждения и форме петли гистерезиса ферромагнитного сердечника.

3. Разработанные RTD-феррозонды позволяют измерять постоянные и переменные магнитные поля сложной формы с коэффициентом преобразования до 0,464 мкс/мкТл в диапазоне от 100 нТл до 15 мкТл и относительной погрешностью не более 3,2 %.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- VIII International Scientific and Practical Conference Information and Measuring Equipment and Technologies (IME&T 2017), г. Томск, 2017 г.;
- VI Международный молодёжный форум «Инженерия для освоения космоса», г. Томск, 2018 г.;
- XII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2018), г. Новосибирск, 2018 г.;
- III International Conference Cognitive Robotics, г. Томск, 2018 г.;
- XXII IMEKO World Congress, г. Белфаст, Великобритания, 2018 г.;
- International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR 2018), г. Чэнду, Китай, 2018 г.
- XIII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2019), г. Новосибирск, 2019 г.;
- IV Международная научно-практическая конференция «Инновации в технике и технологиях (ИТТ-2021), г. Великий Новгород, 2021 г.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 11 публикациях: 7 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science (WoS) и Scopus; 3 статьи в рецензируемых научных сборниках трудов международных и российских конференций; 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 144 наименований и приложений. Работа содержит 195 страниц основного текста, включая 132 рисунка и 37 таблиц.

В первой главе дан обзор современных датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей, применяемых для измерения биоманнитных сигналов и остаточного магнитного поля в системах магнитного вакуума квантового компьютера. Описаны сверхпроводящие квантовые интерферометры, магнитометры с оптической накачкой, флюксометры, магниторезистивные, магнитоэлектрические, оптомеханические, магнитоупругие преобразователи, магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе и спин-волнового интерферометра. Особое внимание уделено перспективным решениям в феррозондовых датчиках.

Во второй главе проведен математический анализ работы RTD-феррозондового преобразователя. Предложена математическая модель RTD-феррозонда, связывающая параметры тока возбуждения с ЭДС, наводимой в измерительной обмотке с учетом аналитического описания кривой намагничивания ферромагнитного сердечника. Описана разработанная программа экспресс-калькулятора для оценки характеристик RTD-феррозонда при различных наборах входных параметров и методика конечно-элементного анализа RTD-феррозонда, позволяющая провести моделирование работы датчика в зависимости от конструктивных особенностей и свойств всех материалов, входящих в конструкцию.

В третьей главе приведено описание шести разработанных конструкций RTD-феррозондовых датчиков. Проведен конечно-элементный анализ в среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics предложенных конструкций. На основании результатов моделирования сделаны выводы о необходимых параметрах тока возбуждения для рассматриваемых форм сердечников с учетом геометрических особенностей датчиков. Приведено описание процедуры изготовления макетных образцов RTD-феррозондовых датчиков по технологии печатных плат.

В четвертой главе приведено описание установки для создания измеряемого магнитного поля, схемы возбуждения RTD-феррозондовых датчиков, схемы и программного обеспечения для обработки и анализа измерительной

информации с RTD-феррозондов. Для каждого изготовленного образца приводятся результаты определения чувствительности и диапазона измерений магнитной индукции в зависимости от амплитуды и частоты тока возбуждения, оценивается возможность измерения биосигналов на примере магнитокардиограммы.

ГЛАВА 1

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ СВЕРХСЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В этой главе дан обзор современных датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей, применяемых для измерения биомагнитных сигналов и остаточного магнитного поля в системах магнитного вакуума квантового компьютера. Описаны сверхпроводящие квантовые интерферометры, магнитометры с оптической накачкой, флюксометры, магниторезистивные, магнитоэлектрические, оптомеханические, магнитоупругие преобразователи, магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе и спин-волнового интерферометра, особое внимание уделено перспективным феррозондовым датчикам.

1.1 Датчики для измерения сверхслабых магнитных полей

Шестой технологический уклад характеризуется развитием робототехники, биотехнологий, нанотехнологии, систем искусственного интеллекта, глобальных информационных сетей и интегрированных высокоскоростных транспортных систем [1]. Сопровождаемое этим появление принципиально новых материалов и возможности измерения ранее недоступных параметров открывают новые перспективы и, что не менее важно, позволяет серьезно модифицировать уже существующие устройства.

Так переход к передовым цифровым технологиям и создание систем планирования и прогнозирования, машинного обучения, проверки работоспособности готовых программных продуктов требует создания универсального квантового компьютера.

Построение универсального квантового компьютера в виде реального физического прибора является фундаментальной задачей 21 века. Решением задачи построения квантового компьютера, включающего в себя процессор, управление процессором, систему охлаждения, фильтрацию, экранирование и создание магнитного вакуума, защиту от внешних воздействий, разработку

программного обеспечения, занимается всего несколько организаций в мире, например, D-Wave Systems Inc., Burnaby, Canada. В частности, в этой фирме разработана система для создания магнитного вакуума, позволяющая минимизировать влияние внешних магнитных полей на работу квантового процессора.

В таких системах используют пассивные и активные методы экранирования магнитных полей. Пассивные методы основаны на применении экранов из материалов с высокой магнитной проницаемостью или сверхпроводников. В активных методах магнитное поле компенсируется с помощью системы катушек. Катушки включены в систему с обратной связью, значение магнитного поля измеряется датчиками, расположенными в непосредственной близости от экранируемого объекта.

Тепловой шум ограничивает верхнюю рабочую температуру сверхпроводникового квантового процессора на уровне от 50 до 70 мК. Такая температура достигается в рефрижераторах растворения непрерывного цикла, лучшие из них обеспечивают охлаждаемую мощность около 100 мкВт при температуре 50 мК. Таким образом, требования к условиям работы квантового процессора определяют требования к датчикам магнитного поля: должно обеспечиваться измерение абсолютного значения магнитной индукции с точностью не менее 100 пТл в широком диапазоне температур вплоть до 50 мК при тепловыделении менее 100 мкВт.

Другой областью применения датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей является медицина и биологические исследования. Устойчивое развитие различных областей науки и техники, появление новых устройств в области медицины позволяют диагностировать различные заболевания на ранних стадиях, тем самым предотвратить риски развития труднодиагностируемых болезней. В текущий момент, работы ученых в области биотехнических систем и медицинской техники направлены на снижение стоимости изготовления и использования оборудования, повышение его точности, гибкости условий эксплуатации и сокращения времени получения результатов [2].

Согласно данным Европейского общества кардиологов, на момент окончания 2019 года (до начала эпидемии коронавируса) смерть почти каждого третьего человека на Земле вызвана сердечно-сосудистым заболеванием [3]. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) более 80 % процентов случаев смерти от сердечно-сосудистых заболеваний вызван инфарктом миокарда и инсультом [4]. По тем же данным три четверти смертей приходится на страны с низким и средним уровнем дохода. Это может говорить о стоящей задаче перед научным сообществом, связанной с разработкой новых, более высокоточных средств диагностики для непрерывного мониторинга и предупреждения опасных состояний органов системы кровообращения.

В настоящее время самым распространенным методом кардиодиагностики является электрокардиография (ЭКГ). Синусовый узел в сердце возбуждает электрические сигналы, являющиеся импульсами возбуждения для сердечных мышц. Синусовый узел здорового человека создает импульсы с частотой 60-90 импульсов в минуту в состоянии покоя. ЭКГ, в таком случае, является графическим отображением прохождения электрических импульсов по проводящей системе сердца. Изменение направления электрических потенциалов в сердце можно отобразить в виде кривой, изменяющейся во времени. Эта кривая имеет характерные пики, которые принято называть зубцами. Выделяют 5 зубцов: *P*, *Q*, *R*, *S* и *T* (рисунок 1.1). Помимо амплитуды зубцов, регистрируются интервалы между ними, то есть время, за которое сигнал проходит по определенным отделам сердца [5].

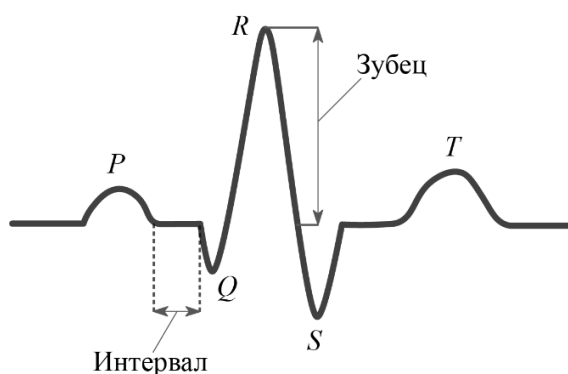


Рисунок 1.1– Интервалы и зубцы на кардиограмме

Измерения ЭКГ является хорошо изученным и отработанным на практике методом и по этой причине применяется повсеместно. Среди возможных внутренних и внешних помех, влияющих на работу ЭКГ, авторы [6] выделяют:

- частотные искажения (при недостаточной полосе пропускания наблюдается снижение амплитуды QRS-комплекса);
- ограничение сигнала по насыщению усилителя (высокое напряжение смещения или неправильная настройка могут являться причиной среза QRS-комплекса);
- петли заземления (при подключении пациента не только к кардиографу, но и к другой аппаратуре);
- разрыв по входу (обрыв электрода);
- нестабильность внутреннего сопротивления (межэлектродное сопротивление, в том числе, сопротивление электрод-кожа может варьироваться в диапазоне от 5 до 100 кОм);
- образование напряжения поляризации (на переходах кожа-электрод возникает напряжение смещения ± 300 мВ, что может вызвать насыщение усилителя электрокардиографа);
- смещение электродов (медленный дрейф напряжения поляризации при смещениях электродов из-за движения пациента);
- биологические и физические помехи (наводки напряжения от других органов или сетевых шнуров);
- импульсные помехи (воздействие от кардиостимулятора или дефибриллятора).

Часть перечисленных проблем может быть решена измерением не биоэлектрических, а измерением биомагнитных сигналов. Магнитокардиография выгодно отличается от уже распространенной электрокардиографии рядом преимуществ. Главными преимуществами являются: увеличенное пространственное разрешение (в сравнении с электродами, прикрепляемыми к коже

[7]), улучшенное позиционирование датчиков [8] и более быстрое обследование из-за бесконтактного метода измерения. Неинвазивность исследования и высокая чувствительности позволяет быстро обследовать значительное количество людей, в т.ч. беременных на поздних стадиях, а также проводить обследования сквозь бинты и гипс.

Однако, основной проблемой является тот факт, что амплитуда биомагнитных сигналов в человеческом теле крайне мала. Например, максимальное поле, создаваемое человеческим сердцем на расстоянии, достаточном, чтобы разместить датчик, достигает приблизительно 100 пТ и стремительно падает с удалением от источника [9-11]. Амплитуда магнитного поля Земли больше в $5 \cdot 10^5$ раз, а шумы, создаваемые силовыми линиями, достигают значений в 1-10 нТ [12-13].

Магнитное поле, создаваемое мозгом человека, не превышает сотен фемтотесла [14], а при прохождении нервного импульса по нервным волокнам амплитуда магнитной индукции составляет единицы фемтотесла [15].

Соответственно, для измерения биомагнитных сигналов возникает ряд требований к датчикам, такие как высокое отношение сигнал-шум, высокая чувствительность во всем частотном диапазоне биосигнала и др. [16].

Фундаментальные основы магнитометрии и типовые датчики для измерения магнитных полей хорошо описаны в работах Ю.В. Афанасьева, М.Л. Баранчиков, P. Ripka, J.E. Lenz и др. [17-20].

Особенности реализации и характеристики современных датчиков общего назначения для измерения слабых (менее 0,05 Тл) постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей рассмотрены в работе [21].

В настоящей главе рассмотрены датчики магнитного поля для измерения сверхслабых магнитных полей – менее 20 мкТл, применяемых для измерения биомагнитных сигналов и остаточного магнитного поля в системах магнитного вакуума квантового компьютера.

Для системы магнитного вакуума квантового компьютера работоспособностью и приемлемой чувствительностью обладают датчики трех типов: феррозондовые, магниторезистивные и сквиды [22].

В список датчиков магнитного поля, применяемых в области измерения биомагнитных сигналов, можно включить следующие [23]: сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИД) (SQUID-магнитометры); магнитометры с оптической накачкой; флюксометры (также известные как индукционные магнитометры); на эффектах гигантского магнитного импеданса (ГМИ), анизотропного магнитосопротивления (АМР), гигантского магнитосопротивления (ГМР), туннельного магнитосопротивления (ТМР); магнитоэлектрические магнитометры; резонансные оптомеханические магнитометры; магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе (NV-центр); на основе спин-волнового интерферометра; датчики Холла; магнитоупругие магнитометры; феррозонды. Основные области применения датчиков при измерении биомагнитных сигналов показаны на рисунке 1.2.

Методы магнитографии в медицине					
Измерение биомагнитных сигналов				Медицинские приборы	
МКГ	МЭГ	ММГ	МНГ	Биофизический мониторинг	Детектирование биомаркеров
SQUID				Магнитоупругие	
С оптической накачкой				ГМИ	
Феррозонды				АМР/ГМР/ТМР	
Измерительные катушки				Датчики Холла	
На основе NV-центра				Измерительные катушки	
АМР/ГМР/ТМР					
ГМИ					
Магнито-электрические					
Оптомеханические					
На основе спин-волнового интерферометра					

Рисунок 1.2 – Датчики сверхслабых магнитных полей для измерения биомагнитных сигналов в магнитокардиографии (МКГ), магнитоэнцефалографии (МЭГ), магнитомиографии (ММГ), магнитонейрографии (МНГ), биофизическом мониторинге и детектировании биомаркеров

Далее рассмотрим каждый тип датчика более подробно.

1.2 СКВИД-магнитометры

СКВИД-магнитометр был изобретен в 1964 году в исследовательском центре Форда [24]. Принцип работы СКВИД-магнетометра основан на волновых свойствах электрона. В сверхпроводящих материалах, электрон способен осуществить туннельный переход через потенциальный барьер. Переход электрона через потенциальный барьер называется Джозефсоновским эффектом. Два Джозефсоновских перехода, соединенных в сверхпроводящее кольцо, образуют замкнутый электрический контур (см. рисунок 1.3). При прохождении магнитного потока через плоскость контура, образуется ток, создающий магнитный поток, обратный по направлению к внешнему магнитному полю. Если сверхпроводящее кольцо включить в контур источника тока, то в кольце возникнут два одинаковых по направлению и величине электрических тока, которые будут складываться или вычитаться с током, индуцированным внешним магнитным полем. Возникающее падение напряжения на сверхпроводящем кольце будет прямо пропорционально величине внешнего магнитного потока

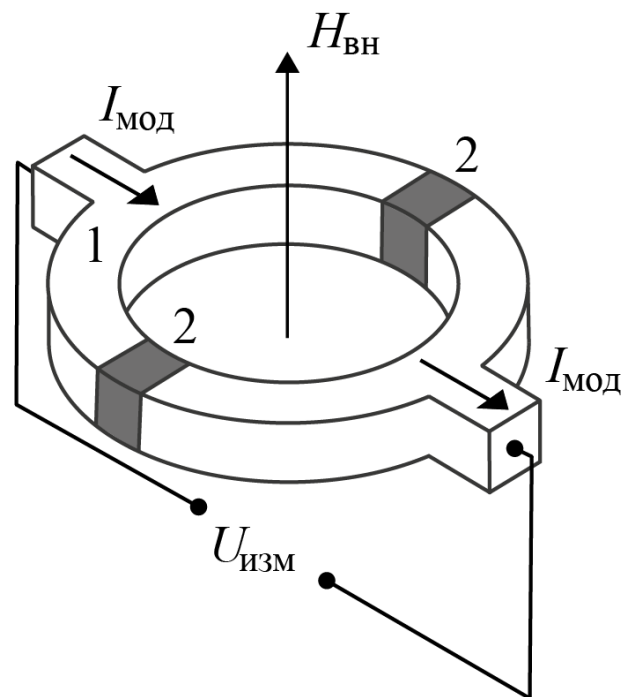


Рисунок 1.3 – СКВИД датчик

Такой метод измерения магнитного потока позволяет фиксировать поля с чувствительностью порядка 1 фТл [25-26] и в широком диапазоне частот [27-28]. Благодаря указанным характеристикам, СКВИД-магнитометры нашли широкое применение в системах магнитного вакуума квантового компьютера и для измерения биоманнитных сигналов [29-31].

Ключевой проблемой в применении СКВИД-магнитометров является техническая сложность создания необходимых условий для работы датчика. Во-первых, систему необходимо поддерживать в сверхпроводящем состоянии с помощью жидкого гелия. Во-вторых, высокой точности измерения можно добиться только в комнате, экранированной от магнитных полей [32]. Еще одним недостатком СКВИД-датчиков является неоднозначность вольт-поточковой характеристики, ограничивающей динамический диапазон и скорость нарастания измеряемого магнитного поля

Эти сложности делают СКВИД-магнитометры дорогостоящими средствами измерений, что усложняет процесс их внедрения в практику. В настоящее время ведутся работы по развитию высокотемпературных СКВИДов, способных работать при комнатной температуре [33]. Однако, такие датчики, пока, имеют невысокие метрологические характеристики.

1.3 Квантовые магнитометры с оптической накачкой

Несмотря на то, что теоретические основы магнитометров с оптической накачкой были описаны еще в 1960-х, широкое применение они нашли только в 21-ом веке [34]. Это стало возможным благодаря современному развитию науки и техники, которое позволило создавать экспериментальные образцы квантовых магнитометров с оптической накачкой (КМОН) с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками [35-37].

Принцип работы КМОН заключается в поляризации спинов щелочных атомов. Поляризованные атомы колеблются с Лармоновской частотой, определяемой поперечным смещением постоянного магнитного поля, как показано

на рисунке 1.4. В таком состоянии, атомы чувствительны к внешнему магнитному полю и при пропускании оптического излучения через паровую ячейку, происходит изменение интенсивности излучения, пропорциональное величине внешнего магнитного поля [38].

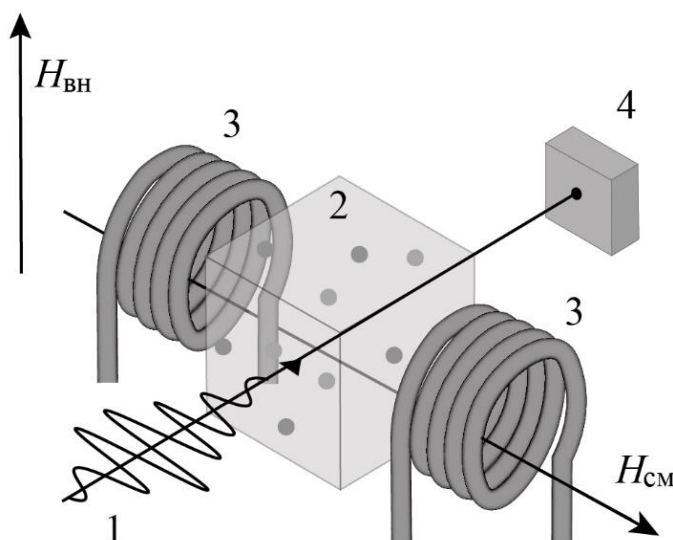


Рисунок 1.4 – Схематичное представление квантового датчика магнитометра с оптической накачкой (1 – луч накачки с круговой поляризацией; 2 – кювета; 3 – катушки Гельмгольца; 4 – приемник)

Существуют варианты исполнения КМОН, при которых оценивается изменение проходящего света и поляризации. В 2002 году был создан атомный магнитометр, свободный от спин-обменного уширения (SERF-магнитометры) [39]. Чувствительность таких магнитометров сравнима с чувствительностью SQUID-магнитометров (порядка $10 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$), что делает SERF-магнитометры ближайшими кандидатами на их замену [40-41].

Другим преимуществом КМОН является тот факт, что они не нуждаются в таких сложных системах охлаждения, что делает их более применимыми на практике по сравнению со SQUID-магнитометрами [42].

Большинство КМОН позволяют проводить измерения поля по только по одной или двум пространственным осям. Несколько научных групп провели успешные измерения магнитоэнцефалограмм и магнитокардиограмм с

помощью магнитооптических датчиков. Измерения показали высокую чувствительность аппаратуры, не уступающую по чувствительности СКВИД-системам, таким, как выпускаемые компанией STF MEG (Кокитлам, Канада). Однако все эти измерения проводились в дорогостоящих магнитоэкранированных комнатах [43-46].

Существуют варианты исполнения, которые магнитного экранирования не требуют [47-48], однако их чувствительность на порядки ниже по сравнению с традиционными КМОН.

1.4 Флюксометры

Флюксометр или индукционный магнитометр является одним из старейших и простейших устройств для измерения магнитного поля. Простота метода, положенного в основу флюксометра заключается в том, что для измерения внешнего магнитного поля не требуется какой-либо источник энергии. Принцип работы флюксометра основан на законе электромагнитной индукции Фарадея – рисунок 1.5. При возникновении внешнего переменного магнитного потока, направление которого перпендикулярно плоскости намотки витков катушки измерительной катушки флюксометра, в обмотке возникает ЭДС самоиндукции, пропорциональная величине и частоте возбуждающего поля.

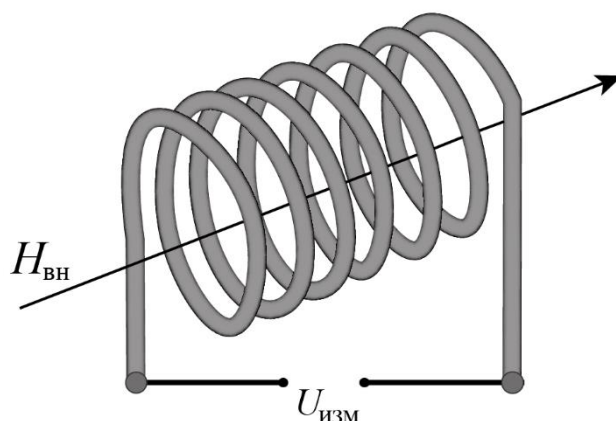


Рисунок 1.5 – Схематичное представление флюксометра

Следовательно, ключевым недостатком такого метода является снижение величины выходного сигнала с уменьшением частоты возбуждающего

поля, что приводит к невозможности измерения постоянного магнитного поля. Чувствительность датчика к переменному магнитному полю может быть повышена благодаря использованию ферромагнитного сердечника [49-50].

Благодаря отсутствию необходимости питания флюксметра электрическим током, данный тип датчиков в первую очередь нашел широкое применение в области космической промышленности [51-53].

Тем не менее, чувствительность флюксметров может достигать около 1 пТл в области частот, характерных для биомагнитных сигналов [54]. Результаты современных исследований [55] показывают теоретическую возможность детектирования QRS-комплекса датчиками подобного типа, однако частотная зависимость чувствительности затрудняет практическое применение флюксметра в рассматриваемых областях.

1.5 Датчики на магниторезистивных эффектах

В настоящее время, в датчиках магнитного поля, основанных на магниторезистивных свойствах чувствительного элемента, используются следующие эффекты: анизотропное магнитосопротивление (АМР), гигантское магнитосопротивление (ГМР) и туннельное магнитосопротивление (ТМР).

1.5.1 АМР магнитометры

Магнитометры на эффекте анизотропии магнитосопротивления (АМР магнитометры, от англ. *anisotropic magnetoresistance*) принципиально наиболее простые. Суть измерения заключается в следующем. Через тонкую ферромагнитную пластину пропускают электрический ток. В случае, если возникает перпендикулярно направленное по отношению к току внешнее магнитное поле, происходит изменение внутреннего вектора магнитного поля пластины. Это, в свою очередь, вызывает изменение омического сопротивления пластины. Выходное напряжение, снимаемое с пластины, становится модулированным амплитудой внешнего магнитного поля – рисунок 1.6.

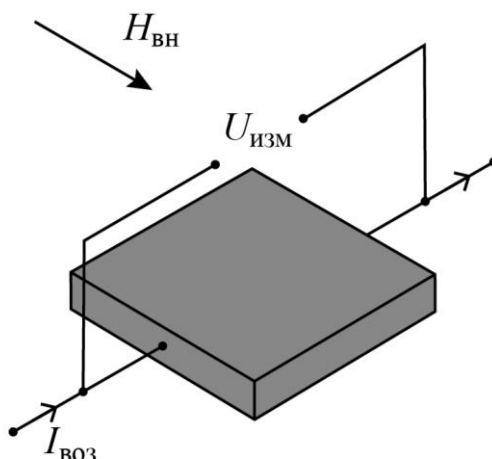


Рисунок 1.6 – Схематичное представление анизотропного магниторезистивного эффекта

Набор чувствительных элементов, включенных в измерительный мост, позволяет достигать измерения магнитного поля с точности в десятки пТл [50, 56-57].

AMR магнитометры нашли применения в различных областях науки и техники, таких как навигация [58], неразрушающий контроль [59], космические исследования [60] и др. Применение АМР магнитометров в системах магнитного вакуума квантового компьютера ограничено из-за высокого тепловыделения, связанного с диссипацией энергии в резистивном элементе. Из-за достаточно высокого уровня шума и низкой пороговой чувствительности АМР датчики не нашли применения для измерения биоманнитных сигналов, но могут применяться в качестве детекторов магнитных биомаркеров.

1.5.2 ГМР магнитометры

Магнитометры на основе эффекта гигантского магнитосопротивления (GMR магнитометры, от англ. *giant magnetoresistance*) используют квантово-механические свойства сверхрешеток – чередующихся слоев, толщиной в несколько атомов, материалов. Чередование слоев ферромагнетика и немагнит-

ного металла очень маленькой толщины приводит к возникновению разнонаправленной намагниченности в каждом слое при отсутствии внешнего магнитного поля – рисунок 1.7.

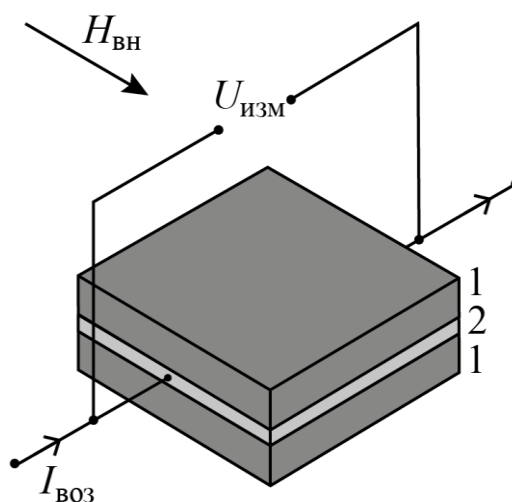


Рисунок 1.7 – Схематичное представление эффекта гигантского магнитосопротивления (1 – ферромагнетик, 2 – немагнитный металл)

Поток электронов,двигающийся под действием разности потенциалов, статистически состоит из одинакового количества электронов со спином вверх и спином вниз. При прохождении электронами слоя с направлением магнитного поля, совпадающим с собственным спином, электроны испытывают малое сопротивление и наоборот, проходя слой с несовпадающим спином испытывают большое сопротивление. При условии равенства количества электронов с разными спинами, результирующее сопротивление для каждой группы электронов одинаковое. При возникновении внешнего магнитного поля, собственное поле каждого слоя переориентируется согласно направлению возбуждающего поля. Ток, вызываемый электронами, спин которых не совпадает с направлением поля, резко уменьшится, т.е. сопротивление значительно возрастет. Для электронов, спин которых совпадает с направлением намагниченности, сопротивление стремительно падает, а ток увеличивается. Соотноше-

ние изменений тока электронов с разными спинами может быть разным в зависимости от материалов, но в любом случае, результирующий ток получается больше, чем при отсутствии внешнего магнитного поля, а суммарное сопротивление уменьшается [61-63].

В работах группы исследователей [64-65] описаны результаты измерения в магнитокардиографии с применением сенсоров на эффекте гигантского магнитосопротивления. Четыре датчика состояли из следующих слоев разной толщины: Ta (5 нм), NiFe (3,5 нм), CoFe (1,5 нм), Cu (2,9 нм), CoFe (2,5 нм), IrMn (10 нм), Ta (5 нм). Такая комбинация материалов позволила добиться чувствительности 6000 В/Тл при уровне шумов 3 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц. В эксперименте на полученной магнитокардиограмме удалось выделить 5 зубцов кардиограммы: P, Q, R, S, T. Однако, измерение потребовало экранированной комнаты и охлаждения магнитометра в сосуде Дьюара.

В работе [66] при комнатной температуре авторы фиксируют магнитное поле от сердечных сокращений, благодаря чему могут измерять частоту сердечных сокращений. Тем не менее, чувствительность датчика оказалась недостаточной, для получения кардиограммы.

ГМР магнитометры могут применяться для качественной оценки отдельных параметров жизнедеятельности и имеют потенциал развития из-за возможности комбинирования различных материалов. Однако, в настоящий момент, технология изготовления подобных датчиков достаточно сложная и для применения их в области биомагнитных измерений требуется охлаждение до сверхнизких температур и экранирование помещения.

1.5.3 TMR магнитометры

Магнитометры на основе эффекта туннельного магнитосопротивления (TMR магнитометры, от англ. *tunnel magnetoresistance*) имеют сходную структуру с ГМР магнитометрами, но вместо немагнитного металла, используется изолирующий туннельный барьер толщиной около 1 нм. Ток между ферромаг-

нетиками протекает в следствие туннельного эффекта. Сопротивление перехода зависит от взаимной намагниченности ферромагнитных слоев – рисунок 1.8.

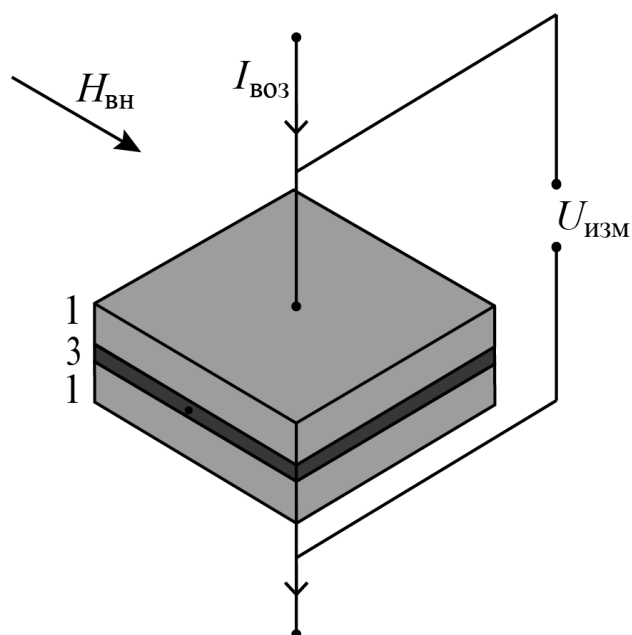


Рисунок 1.8 – Схематическое представление эффекта туннельного магнитосопротивления (1 – ферромагнетик, 3 – туннельный барьер)

При возникновении внешнего магнитного поля происходит изменение общего сопротивления структуры в 5-10 раз [67-68].

В работе [69] описан датчик с чувствительностью 10800 В/Тл и уровнем шумов 25,7 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 Гц для магнитокардиографии. Описанный ТМР магнитометр позволяет детектировать R-зубец и QRS-комплекс без усреднения сигнала. ТМР датчик устанавливается в экранирующей магнитной трубе и работает при комнатной температуре. В другой работе [70] авторы демонстрируют выделение QRS-комплекса при 64-х кратном усреднение измеряемого сигнала, а также сигналы при магнитоэнцефалографии.

В целом, ТМР магнитометры более пригодны для функциональной диагностики в сравнении с ГМР магнитометрами. Однако, их применимость в настоящее время ограничена исследованиями в области магнитокардиографии.

1.6 ГМИ магнитометр

Магнитометры на основе гигантского магнитного импеданса (ГМИ магнитометр, от англ. *giant magnetoimpedance*) известны с 1936 года. В работе [71] описано явление изменения импеданса в FeNi проволоках при наличии внешнего магнитного поля.

Описание эффекта известными терминами классической термодинамики не дало повторяемости результатов и изучение данной темы было прекращено. Позже, было обнаружено, что относительное изменение импеданса превышает 100 % в малых магнитных полях [72]. Развитие измерительной техники, использование новых методов и материалов, в настоящий момент, позволило добиться повышения чувствительности в несколько раз. Это вызвало значительный интерес к ГМИ магнетометрам в области применения измерений сверхслабых магнитных полей, в том числе, полей, создаваемых биотоками [73-75].

ГМИ магнитометр, описанный в работе [76] имеет рабочий диапазон частот 0,1-1000 Гц, чувствительность такого датчика достигает 10^6 В/Тл при уровне шумов 3 нТл. Датчик способен работать при комнатной температуре. Однако, результаты опубликованной работы сравнительно хуже результатов, полученных при традиционной электрокардиографии и не позволяют выделять какие-либо зубцы кардиограммы. В другой работе [77] описаны результаты эксперимента, в котором при комнатной температуре удалось достичь среднеквадратического уровня шумов в 200 пТл без экранирования. В результате удалось добиться выделения отдельных зубцов кардиограммы. Позже, в работе этой же группы авторов [78] удалось добиться улучшения качества полученных результатов. В представленной работе авторы достигли четкого выделения Т- и R-зубцов в измеренных данных. Это говорит о продолжающейся работе по улучшению устройств, использующих ГМИ эффект.

1.7 Магнитоэлектрические магнитометры

Магнитоэлектрические магнитометры являются перспективными датчиками для применения в области измерения биоманнитных полей. Теоретическая чувствительность таких датчиков может достигать 5000 В/Тл при комнатной температуре с уровнем шумов порядка 10 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частотах ниже 100 Гц. В основе магнитоэлектрического магнитометра лежит магнитострикционный материал, который механически соединен с пьезоэлектрической пластиной, помещенные внутри катушки – рисунок 1.9 [79-80].

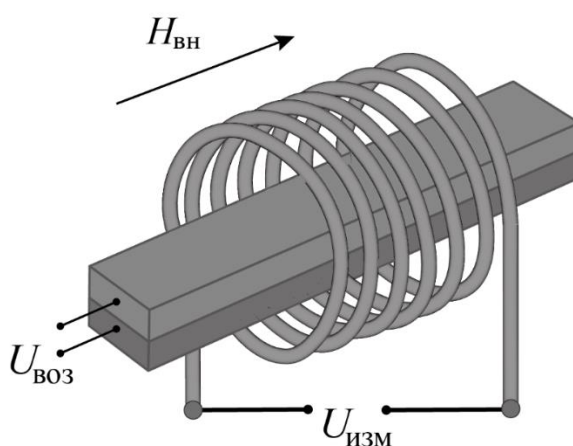


Рисунок 1.9 – Схематичное представление магнитоэлектрического датчика

Постоянное электрическое напряжение подается на катушку. Под действием электрического поля, магнитострикционный материал изменяет линейные размеры, создавая напряжение в пьезоэлектрике, что вызывает на его обкладках сигнал, пропорциональный величине магнитного поля. Коэффициент пропорциональности зависит от комбинации материалов и режима работы. Если магнитоэлектрический магнитометр находится во внешнем переменном магнитном поле, то изменение напряжения на обкладках пьезоэлектрика будет пропорционально изменению внешнего поля [81].

В работе [82] описан магнитометр способный детектировать R-зубец после усреднения 750 периодов измерения. Датчик имеет соотношение сигнал-шум 20 дБ при величине измеряемого сигнала порядка 100 пТл. В работе [83] достигнут предел детектирования 10 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

1.8 Резонансные оптомеханические магнитометры

Другой тип датчиков, способных детектировать слабые магнитные поля при нормальной температуре – резонансные оптомеханические. Структурно, датчик такого типа состоит из резонатора Фабри-Перо (два соосных обращенных друг к другу зеркала, образующие стоячую оптическую волну) соединенного с механическим осциллятором – рисунок 1.10.

Внешнее магнитное поле вызывает деформации магнитострикционного материала, соединенного с осциллятором. Это создает силу, смещающую одно из зеркал, таким образом, меняя резонансную частоту. Смещение резонансной частоты пропорционально величине внешнего магнитного поля [84].

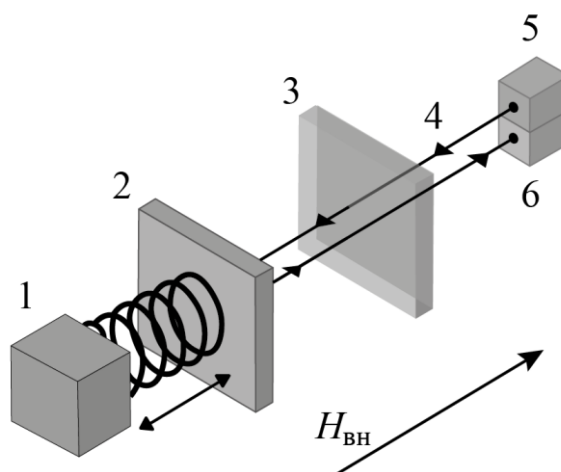


Рисунок 1.10 – Схематичное представление резонансного оптомеханического датчика (1 – резонатор, 2 – подвижное зеркало, 3 – неподвижное зеркало, 4 – оптический путь, 5 – источник излучения, 6 – приемник излучения)

Чувствительность таких магнитометров достигает сотен пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [85], но ключевой особенностью таких датчиков является миниатюризация, позволяющая изготавливать чувствительные элементы толщиной в единицы мкм и диаметром менее 100 мкм.

Основным фундаментальным недостатком датчиков такого типа является значительное снижение чувствительности в области низких частот [86].

Тем не менее, благодаря возможности варьировать механическую конструкцию возможно значительное расширение полосы пропускания подобного типа датчика в области нижних частот, что в будущем может способствовать их более широкому применению для измерения биоманнитных сигналов.

1.9 Магнитометр на основе спин-волнового интерферометра

Магнитометр на основе спин-волнового интерферометра представляет из себя скрещенные антенны, расположенные поверх конструкции из магнитного материала со смещением постоянного магнитного поля в плоскости конструкции датчика – рисунок 1.11. По краям конструкции датчика устанавливаются 2 антенны возбуждения и 2 измерительные антенны. Антенны возбуждения генерируют спиновые волны от одного и того же источника высокой частоты. Спиновые волны распространяются в направлении измерительных антенн. Если внешнее магнитное поле воздействует на датчик, то возникает разность фаз между спиновыми волнами на измерительных антеннах. Разность фаз зависит от величины внешнего магнитного поля.

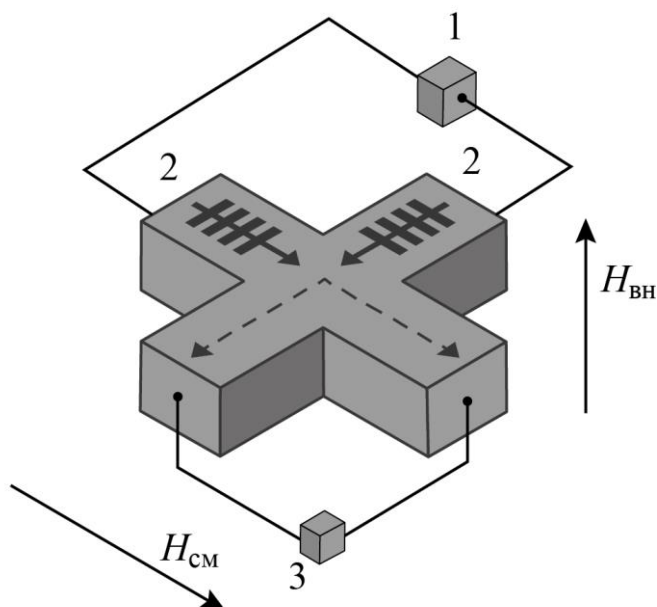


Рисунок 1.11 – Схематичное представление датчика на основе спин-волнового интерферометра (1 – Источник возбуждения, 2 – антенны возбуждения, 3 – детектор фазового сдвига)

Будучи относительно новым видом магнитометрии, датчик магнитного поля на основе спиновых волн имеет огромный потенциал для оптимизации, например, в отношении геометрии чувствительного элемента. Авторы [87] утверждают о возможности детектирования внешнего поля до 0,1 пТл при уровне шума 1 аТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при нормальной температуре, что сравнимо с самыми чувствительными SQUID-магнитометрами. Магнитометр, представленный в работе [88] демонстрирует чувствительность 5000 В/Тл с уровнем шума 2 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при нормальной температуре.

В литературе пока не описан опыт применения датчиков подобного типа для измерения биомагнитных полей. Однако, по результатам опубликованных работ, можно заключить, что в ближайшем будущем датчик может быть проверен на применимость в данной области.

1.10 Магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе (NV-центр)

Другой метод измерения магнитных полей, нашедший применения относительно недавно, основан на использовании азотно-замещенной вакансии в алмазе (NV-центр) [89-90]. NV центр – это дефект в кристаллической решетке алмаза, вызванный удалением из кристаллической решетки атома углерода и его замене атомом азота. В таком состоянии, дефект ведет себя как атом, «замороженный» в кристаллической решетке. Электронный спин такого атома без противодействий манипулируется электромагнитной волной или магнитными полями [91-92].

Кристаллический дефект создает один лишний электрон в кристаллической решетке, из-за которого общий заряд кристалла отрицательный. В кристалле образуется два спин-триплетных состояния (квантовое число спина может быть 0, ± 1) и одно метастабильное состояние (квантовое число спина 0). При воздействии внешнего магнитного поля, происходит расщепление атомных спектральных линий и изменение энергии электронов из-за эффекта Зеебека. При этом, электроны в возбужденном состоянии со спиновым числом ± 1

вероятнее всего перейдут в метастабильное состояние, а возбужденные электроны с квантовым числом 0, перейдут в основное состояние излучив при этом квант света. Следовательно, под действием магнитного поля можно детектировать уменьшение или увеличение люминесценции кристалла. Существует 2 схемы детектирования магнитного поля таким датчиком. Первый заключается в продолжительной оптической накачке кристалла и детектировании фотолюминесценции – рисунок 1.12-а. [93]. Второй подразумевает оценку резонансной релаксации кристалла под действием импульсных оптических воздействий – рисунок 1.12-б.

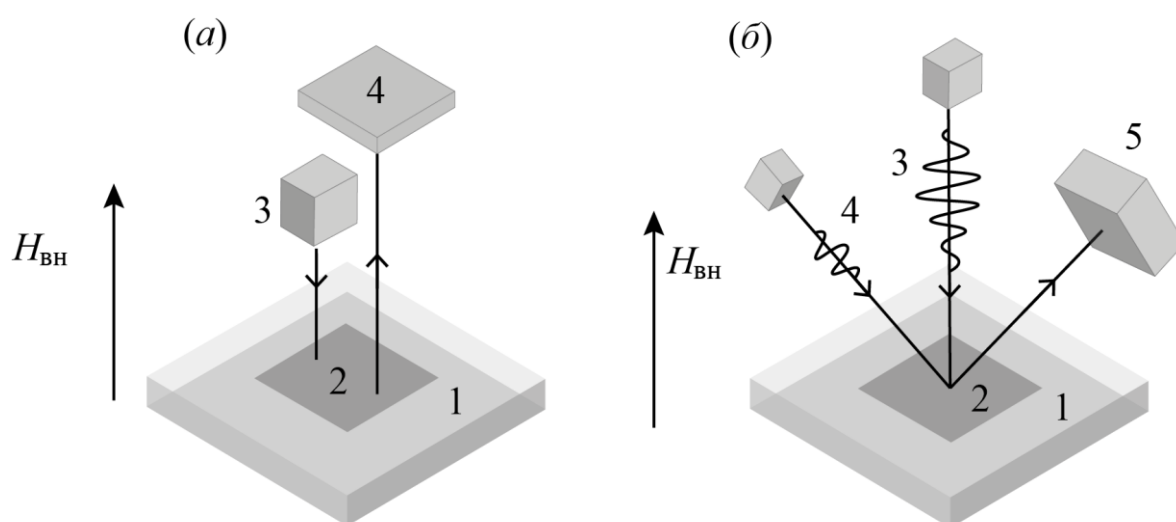


Рисунок 1.12 – Схематичное представление схем детектирования магнитного поля на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе

Основными преимуществами данных датчиков являются сверхмалые габариты (десятки нанометров) и низкий уровень шума при нормальной температуре [94]. Теоретический предел измерения составляет порядка $1 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$, а методика измерения магнитных полей этими датчиками получила название «оптически детектируемый магнитный резонанс».

На текущий момент, ключевым недостатком магнитометров на основе азотно-замещенной вакансии является ослабление чувствительности в области низких частот. Так, в работе [95] описаны результаты измерения сигналов

мозга мыши. Полоса пропускания разработанного датчика находится в диапазоне 30-170 Гц при пределе измерения порядка 200 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

1.11 Датчики на основе эффекта Холла

Принцип работы датчиков Холла основан на возникновении поперечного напряжения на стенках полупроводникового материала. Такая разность потенциала возникает из-за действия внешнего магнитного поля, действующего на носители заряда и смещающего их в направлении, перпендикулярном течению тока – рисунок 1.13 [96].

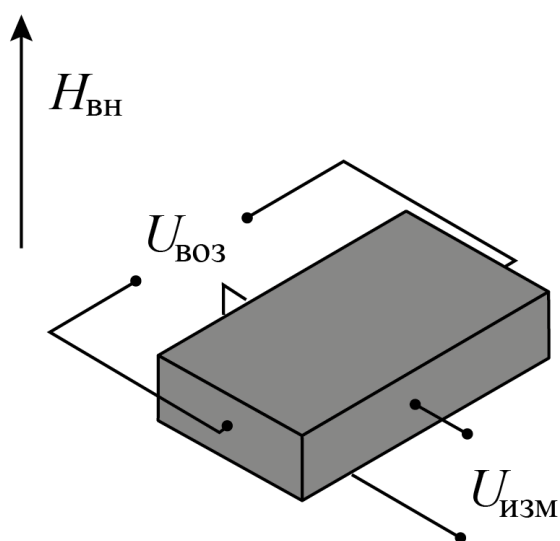


Рисунок 1.13 – Схематичное представление датчика Холла

Существенными преимуществами датчиков Холла являются низкое энергопотребление, простота изготовления и использования. Последние результаты разработки таких датчиков показывают возможность измерения магнитного поля величиной десятки нТл при уровне шумов порядка 100 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в диапазоне частот биосигналов [97-98] с чувствительностью до 11 В/Тл.

Из-за невысокой чувствительности датчиков подобного типа для исследований в области биомагнитных полей в литературе описаны лишь результаты применения датчиков Холла для детектирования биомаркеров [99].

1.12 Магнитоупругие магнитометры

Магнитоупругие датчики привлекли большое внимание в области биомедицинской инженерии из-за возможности создания беспроводных, а также, пассивных устройств для изучения различных биологических параметров [100-101]. Как правило данный тип датчиков изготавливаются из ферромагнитных лент, имеющих большую константу магнитострикции. Схематическое изображение чувствительного элемента такого датчика показано на рисунке 1.14.

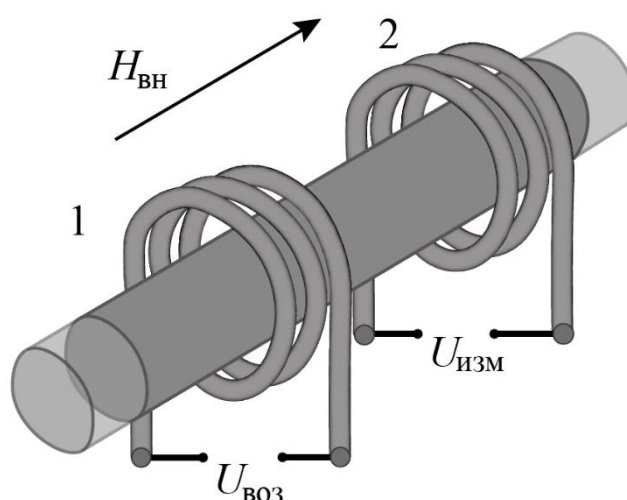


Рисунок 1.14 – Схематичное представление магнитоупругого датчика

Принцип работы датчика основан на изменении восприимчивости, а, следовательно, и проницаемости материала при механическом воздействии (эффект Виллари или обратный магнитострикционный эффект). Если на магнитоупругий материал воздействует переменное во времени магнитное поле, магнитный поток, проходящий через этот материал, изменяется пропорционально приложенному механическому напряжению и, затем, может быть обнаружен с помощью чувствительных катушек в виде измеряемого переменного электрического напряжения.

Поскольку этот тип датчика требует приложения механического напряжения, он не используется для обнаружения магнитных биосигналов. Однако,

магнитоупругие датчики нашли применение в качестве тензодатчиков для изучения деформации кости под действием приложенной нагрузки.

1.13 Феррозонды

Феррозонды или феррозондовые преобразователи являются одними из самых распространенных в различных областях (геофизика, космос, дефектоскопия, неразрушающий контроль и т.д.) типов датчиков магнитного поля [102-103]. В настоящее время, чувствительность таких датчиков достигает порядка 1 пТл [104].

Принцип действия типового феррозондового датчика описан в труде [105]. В двух параллельных одинаковых сердечниках создается встречное переменное магнитное поле. Оба сердечника охвачены измерительной катушкой – рисунок 1.15. При отсутствии внешнего магнитного поля, из-за равенства магнитных потоков в сердечниках, в измерительной обмотке нет тока. В случае, если сердечники находятся в области действия внешнего магнитного поля, то поле в одном из сердечников увеличивается, а в другом уменьшается из-за сложения/вычитания магнитных потоков. В таком случае, сигнал в измерительной обмотке становится отличным от нуля и изменяется с частотой, равной удвоенной частоте сигнала возбуждения. Амплитуда измеряемого сигнала будет пропорциональна величине внешнего поля.

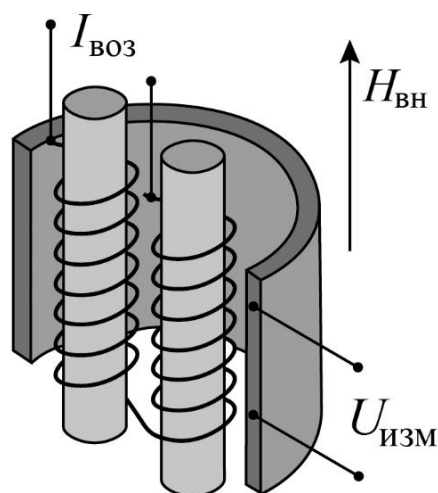


Рисунок 1.15 – Схематичное представление феррозондового датчика

В работе [106] описана система состоящая из 32 датчиков, которые в экранированной комнате отчетливо детектировали QRS-комплекс и T-зубец при частоте возбуждения 100 кГц. Уровень шумов в такой системе составил 7-8 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц. В работе [107] достигнут уровень шумов 1 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц и также получен QRS-комплекс. В докладе [108] представлен портативный монитор сердечного ритма на основе феррозонда. Коэффициент детерминации датчика составил 0,9967 при измерении сердечного ритма в диапазоне от 30 до 235 ударов в секунду.

К недостаткам типового феррозонда как намоточного изделия стоит отнести достаточно большие габариты, а также наводку магнитных помех, что также ограничивает его применение в системах магнитного вакуума.

1.14 Сравнение датчиков сверхслабых магнитных полей

Как было отмечено выше для систем магнитного вакуума работоспособностью и приемлемой чувствительностью обладают датчики трех типов: феррозондовые, магниторезистивные и СКВИДы.

Для измерения биомагнитных полей наибольшей чувствительностью обладают СКВИДы и магнитометры с оптической накачкой – рисунок 1.16, однако, магнитометры с оптической накачкой не позволяют определить направление магнитного поля. Следующими датчиками по чувствительности являются магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе и феррозонды.

Магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии являются дорогостоящими устройствами, как из-за технологии создания датчика, так из-за высокочастотных схем возбуждения и обработки информации.

Феррозонд по своей сути является достаточно простым технологически и недорогим датчиком, имеющим потенциал совершенствования с точки зрения повышения чувствительности, миниатюризации и пространственного разрешения для измерения трехмерной картины распространения магнитных полей.

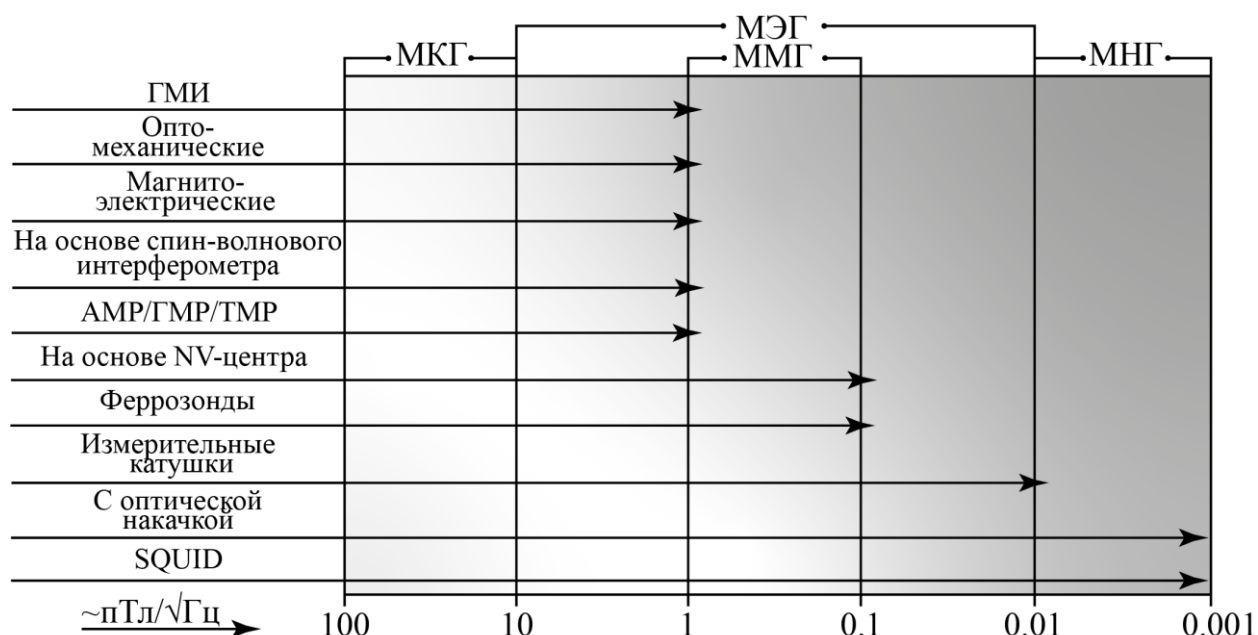


Рисунок 1.16 – Сравнение датчиков сверхслабых магнитных полей

В настоящее время разработку, внедрение и коммерческое использование феррозондов осуществляют множество государственных предприятий, корпораций и частных фирм. Передовые разработки феррозондовых магнитометров принадлежат фирмам: Samsung Electronics CO., LTD; Siemens AG; Bartington Instruments; Magson GmbH; Wuntronic GmbH; Autonnic; ООО "НПО ЭНТ"; Applied Physics Systems; Institute Dr. Forster; Ebinger GmbH; Vallon; Schontedt Instrument Co.; Laboratory of Electromagnetic Innovations (LEMI); Furuno Electric CO., LTD и др. [109-114].

1.15 Пути совершенствования феррозондов

Совершенствование феррозондов может идти по трем направлениям: миниатюризации и оптимизация геометрии преобразователя; совершенствование способов возбуждения и обработки измерительной информации; применения новых материалов в качестве магнитного сердечника феррозонда.

В последние годы, существует тенденция отказа отмоточных феррозондов в пользу планарных, выполненных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) или по технологии травления печатных плат [115-118].

В работе [119] описан феррозонд с улучшенными характеристиками, выполненный по технологии МЭМС – рисунок 1.17).

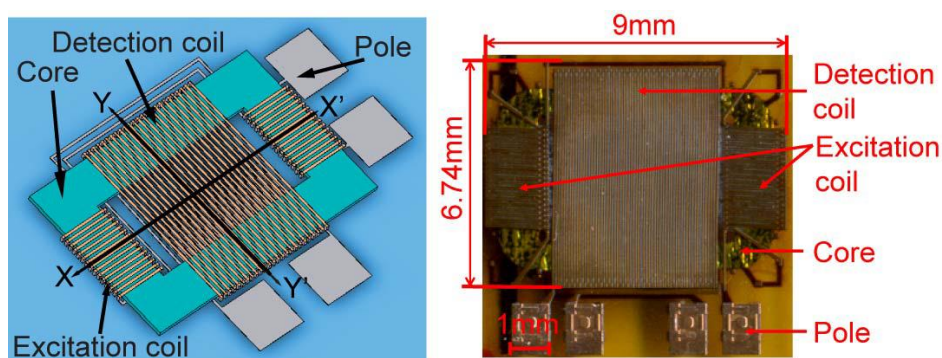


Рисунок 1.17 – МЭМС-феррозонд с улучшенными характеристиками

Так как в феррозонде разрешающая способность ограничивается собственным шумом сердечника, авторы [119] применили в качестве материала сердечника двухслойную ленту из аморфного магнитомягкого материала. По сравнению с гальваническим или напыленным материалом сердечника аморфные ленты с мягким магнитным сплавом обладают лучшими магнитными свойствами, более высокой рабочей частотой и имеют более высокую толщину, что выгодно для характеристик датчика. Конструкция такого МЭМС магнитометра показана на рисунке 1.18.

Характеристики данного феррозонда: коэффициент преобразования 3165 В/Тл, уровень собственных шумов 0,5 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, потребляемая мощность 183 мВт. Катушка возбуждения содержит 42 витка, измерительная катушка состоит из 63 витка. Размеры датчика 6,74 × 9 мм.

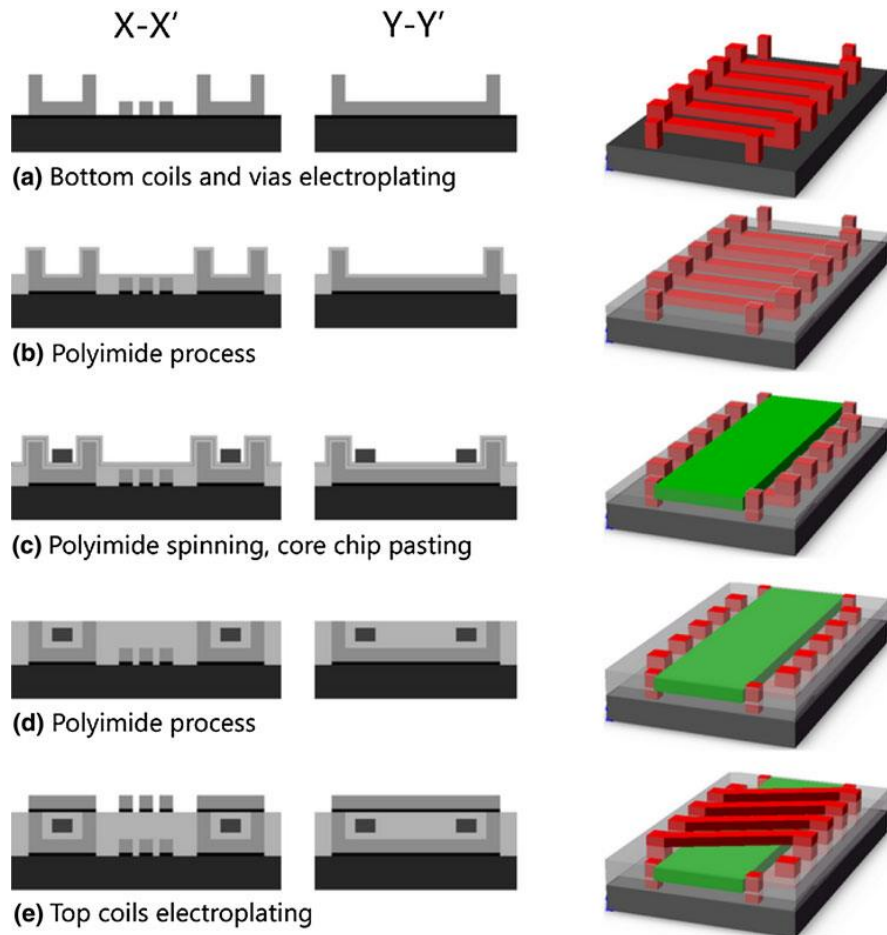


Рисунок 1.18 – МЭМС феррозонд с сердечником из двухслойной ленты аморфного магнитомягкого материала

В работе [120] предложен ортогональный феррозонд (рисунок 1.19). Датчик изготовлен методами ультрафиолетовой литографии. Сердечник предварительно был изготовлен путем химического травления ленты аморфного магнитомягкого материала толщиной 20 мкм.

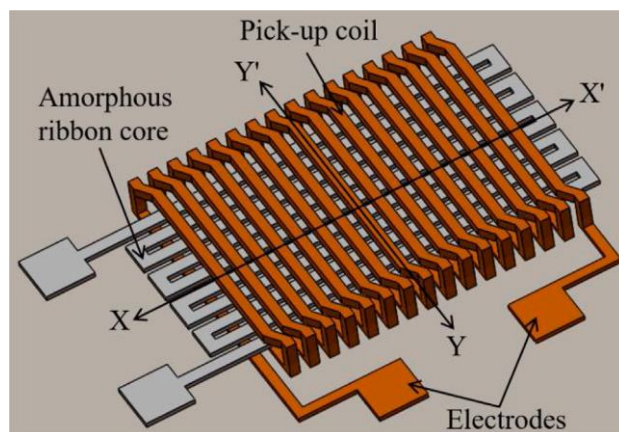


Рисунок 1.19 – МЭМС феррозонд ортогональной конфигурации

Характеристики данного МЭМС феррозонда: коэффициент преобразования 575 В/Тл, уровень собственных шумов 0,2 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Катушка возбуждения содержит 52 витка, измерительная катушка состоит из 60 витка. Размеры сенсора $6,4 \times 9,4$ мм.

Последовательность шагов изготовления показана на рисунке 1.20.

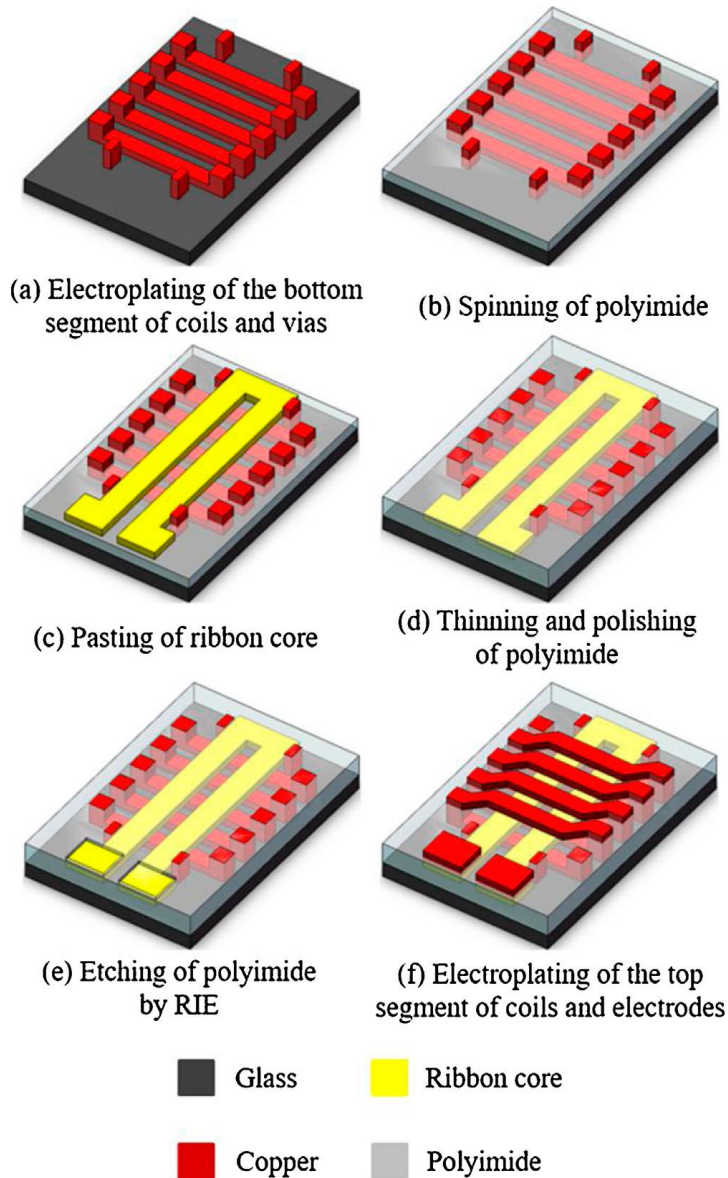


Рисунок 1.20 – Последовательность шагов изготовления ортогонального МЭМС-феррозонда

Авторы [121] предложили конструкцию двухосевого МЭМС феррозонда (рисунок 1.21).

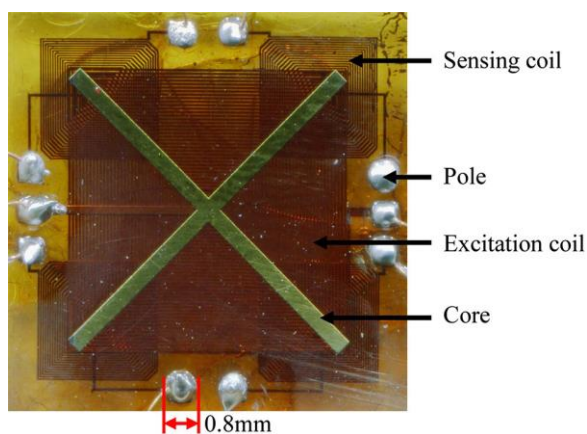
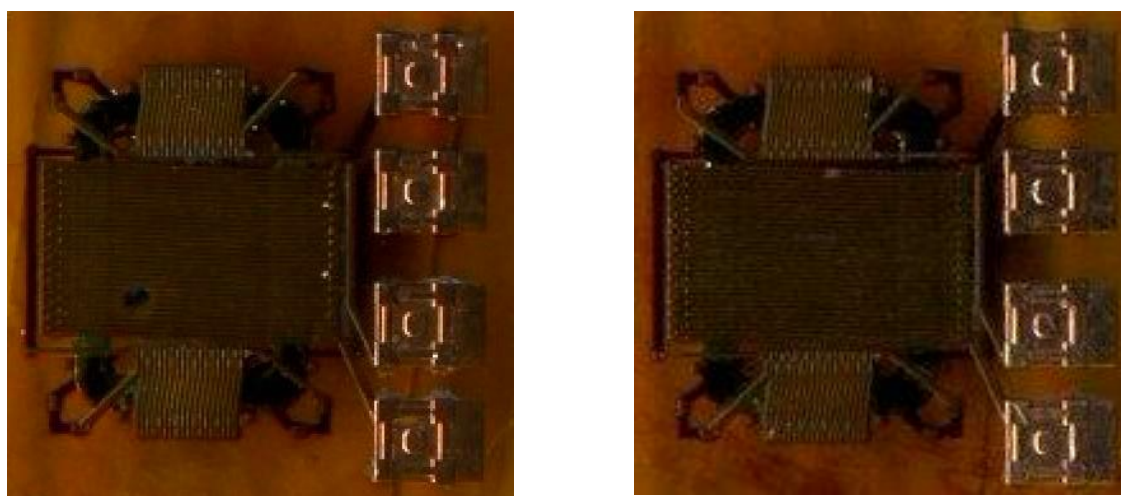


Рисунок 1.21 – Двухосевой МЭМС феррозонд

Сенсор изготовлен методами ультрафиолетовой литографии. Обмотки изготовлены электроосаждением меди, сердечник электроосаждением пермаллового сплава. Характеристики двухосевого МЭМС феррозонда: коэффициент преобразования 238 В/Тл, уровень собственных шумов 3,6 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, потребляемая мощность 193 мВт.

Авторы [122] провели сравнительное исследование двух МЭМС феррозондов с разными типами сердечников, из пермаллоя и нанокристаллина. Оба исследуемых датчика имеют одинаковые геометрические размеры и изготавливаются по одной технологии методами ультрафиолетовой фотолитографии и электроосаждением материала сердечника – рисунок 1.22).



а)

б)

Рисунок 1.22 – МЭМС феррозонды с сердечником из: а) пермаллоя, б) нанокристаллина

Результаты исследований показали, что датчик с сердечником из пермаллоя обладает коэффициентом преобразования 265 В/Тл и потребляет мощность 48,6 мВт. МЭМС феррозонд с сердечником из нанокристаллина обладает коэффициентом преобразования 522 В/Тл и потребляет мощность 21,6 мВт.

В работе [123] также подтверждается, что применение аморфных сплавов для изготовления сердечника феррозонда, например, нанокристаллина, по сравнению с традиционными материалами сердечников, такими как пермаллой и феррит, позволяет повысить коэффициент преобразования, снизить потребляемую мощность и уровень шумов, за счет возбуждения на более высоких частотах. Кроме того, более высокое удельное сопротивление аморфных сплавов может уменьшить потери от вихревых токов.

К недостаткам МЭМС технологии следует отнести необходимость в дорогостоящем оборудовании и сложности технологического процесса, что затрудняет и значительно удорожает этап экспериментальной апробации при оптимизации конструкции датчика от образца к образцу.

Промежуточным звеном между моточными феррозондами и МЭМС феррозондами являются датчики, изготовленные по технологии печатных плат.

Ряд исследователей [116, 124-125] изготавливали одно, двух и даже трехосевые датчики по технологии печатных плат – рисунки 1.23-1.25.

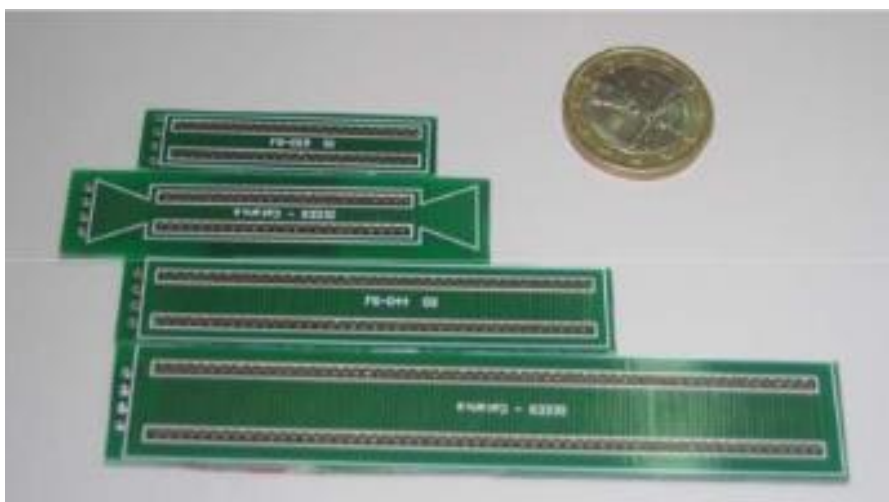


Рисунок 1.23 – Внешний вид феррозондов, изготовленных по технологии печатных плат

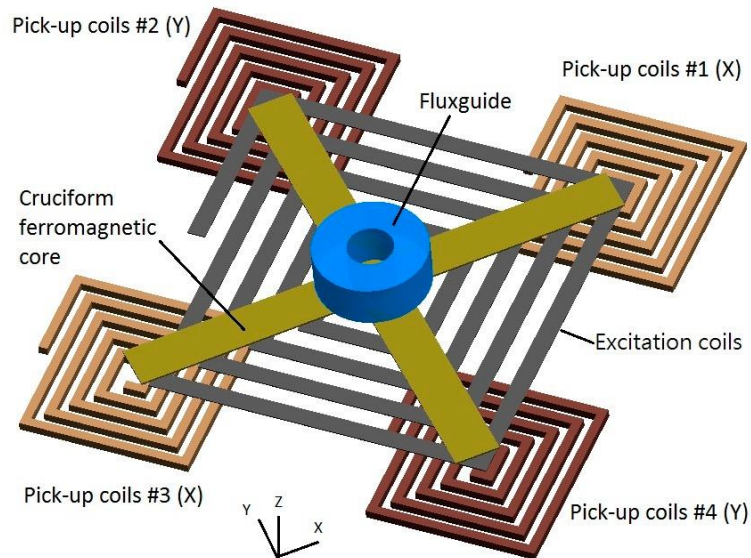


Рисунок 1.24– Конструкция трехосевого феррозонда

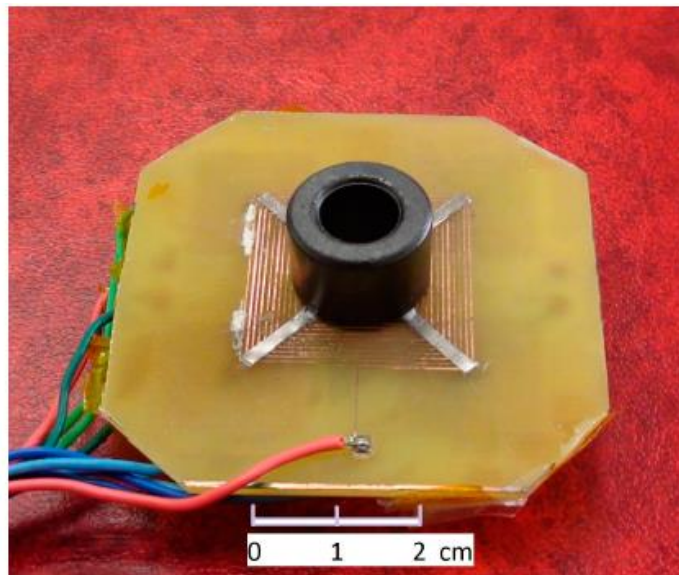


Рисунок 1.25 – Внешний вид трехосевого феррозонда

Феррозонд, изображенный на рисунке 1.25, обладает следующими характеристиками: коэффициент преобразования 122 В/Тл, уровень собственных шумов 0,11 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Как отмечалось выше, материал сердечника во многом определяет итоговую чувствительность феррозонда. При выборе и изготовлении сердечника следует учитывать следующие параметры материала:

- высокая магнитная проницаемость;

- низкая коэрцитивная сила;
- форма кривой намагничивания;
- слабая магнитострикция;
- слабое влияние эффекта Баркгаузена;
- отсутствие внутренних дефектов и напряжений;
- гладкая поверхность;
- минимальная индукция насыщения;
- высокое удельное сопротивление.

Магнитная проницаемость является ключевым параметром, определяющим чувствительность датчика. Благодаря высокому показателю магнитной проницаемости, слабые магнитные поля создают большой магнитный поток в сердечнике. Таким образом, повышается способность датчика детектировать эти поля, а также снижается энергопотребление благодаря тому факту, что для ввода сердечника в область насыщения необходим меньший ток.

Коэрцитивная сила во многом определяет гистерезисные свойства сердечника. Чем коэрцитивная сила ниже, тем уже будет петля гистерезиса, тем меньше будет влияние гистерезиса на измерение. Большинство используемых в литературе моделей не учитывает гистерезисные свойства сердечника, следовательно, при неверном выборе материала существует вероятность возникновения погрешности, связанной неоднородностью свойств сердечника при намагничивании током разной полярности. Помимо этого, сердечник с низкой коэрцитивной силой меньше будет подвержен эффекту намагничивания.

Под формой кривой намагниченности, в основном, понимается остаточная намагниченность. По соотношению остаточной намагниченности к индукции насыщения судят о степени прямоугольности петли гистерезиса. Произведение коэрцитивной силы и остаточной намагниченности

пропорционально площади петли гистерезиса и служит мерой потерь на гистерезис.

Магнитострикция – эффект, связанный с относительным удлинением магнитопровода под действием магнитного поля. Фактически, это преобразования энергии магнитного поля в механическую энергию расширения. Помимо того факта, что возникновение магнитострикции приводит к снижению эффективности сердечника, это приводит к ненужным вибрациям и деформациям сердечника, которые будут искажать сигнал.

Эффект Баркгаузена – скачкообразное изменение намагниченности ферромагнитного вещества при непрерывном изменении внешнего магнитного поля. Эффект связан с особой структурой ферромагнитных веществ, состоящих из доменов. При наличии неоднородностей в структуре сердечника, при появлении внешнего поля, границы доменов перестают перемещать свои границы встречаясь с неоднородностью. Только при достижении некоторого увеличенного уровня внешнего поля, домен рывком преодолевает препятствие. Это приводит к ступенчатости кривой намагничивания и появлению шумов в выходном сигнале.

Из условия существования эффекта Баркгаузена возникают серьезные требования к отсутствию внутренних неоднородностей и напряжений. Магнитные материалы крайне чувствительны к технологии обработки и изготовления. Нарушение технологического процесса изготовления сердечника способно в серьезной степени испортить работу датчика.

Гладкая поверхность, а точнее отсутствие острых кромок и шероховатостей позволяет избежать локальных концентраций напряженности магнитного поля, а значит сохранить однородность поля внутри сердечника. Плохо обработанная конструкция сердечника может привести к возникновению шумов в выходном сигнале.

Величина индукции насыщения определяет необходимую энергию для перехода сердечника в режим насыщения. Низкая индукция насыщения позволяет уменьшить ток возбуждения, что в свою очередь позволяет

уменьшить сечение провода катушки возбуждения и уменьшить габариты датчика.

Высокое удельное сопротивление влияет на возникновение вихревых токов в сердечнике, которые могут повлиять на тепловыделение, а, следовательно, на температурные характеристики. К тому же, вихревые токи способны создавать собственное магнитное поле, которое будет противодействовать внешнему возбуждающему полю. Это тоже приведет к снижению чувствительности датчика.

Относительно недавно появились исследования по созданию одностречневых феррозондов, основанных не на измерение амплитуды второй гармоники, а на измерение разности временных интервалов между максимальным и минимальным значениями амплитуды ЭДС в выходном сигнале феррозонда за один период. В мировой литературе разность временных интервалов между максимальным и минимальным значениями амплитуды ЭДС за один период получила сокращенное обозначение RTD (от. англ. residence times difference - разница во времени пребывания) [126-127]. Эффект появления разности временных интервалов обусловлен тем, что, фактически, сердечник намагничен в одном направлении больше времени, чем в обратном из-за существования внешнего постоянного магнитного поля. Поэтому в качестве измеряемого параметра в выходной ЭДС феррозонда может быть принята разность временных интервалов между максимальным и минимальным значениями амплитуды ЭДС за один период.

RTD-феррозонд представляет из себя одиночный сердечник с высоким коэффициентом магнитной проницаемости, который охвачен и измерительной обмоткой, и обмоткой возбуждения – рисунок 1.26. В обмотку возбуждения подается сигнал, амплитуда которого достаточна, чтобы ввести сердечник в область насыщения. Закон намагниченности сердечника принимает форму, похожую на меандр. Так как ЭДС, индуцируемая на измерительной обмотке пропорциональна производной магнитного потока через сердечник, график за-

висимости выходного сигнала от времени будет представлять из себя чередующиеся разнополярные импульсы с выраженными пиками. При отсутствии внешнего магнитного поля, промежуток времени от отрицательного пика до положительного T_+ и от положительного до отрицательного T_- равны [128].

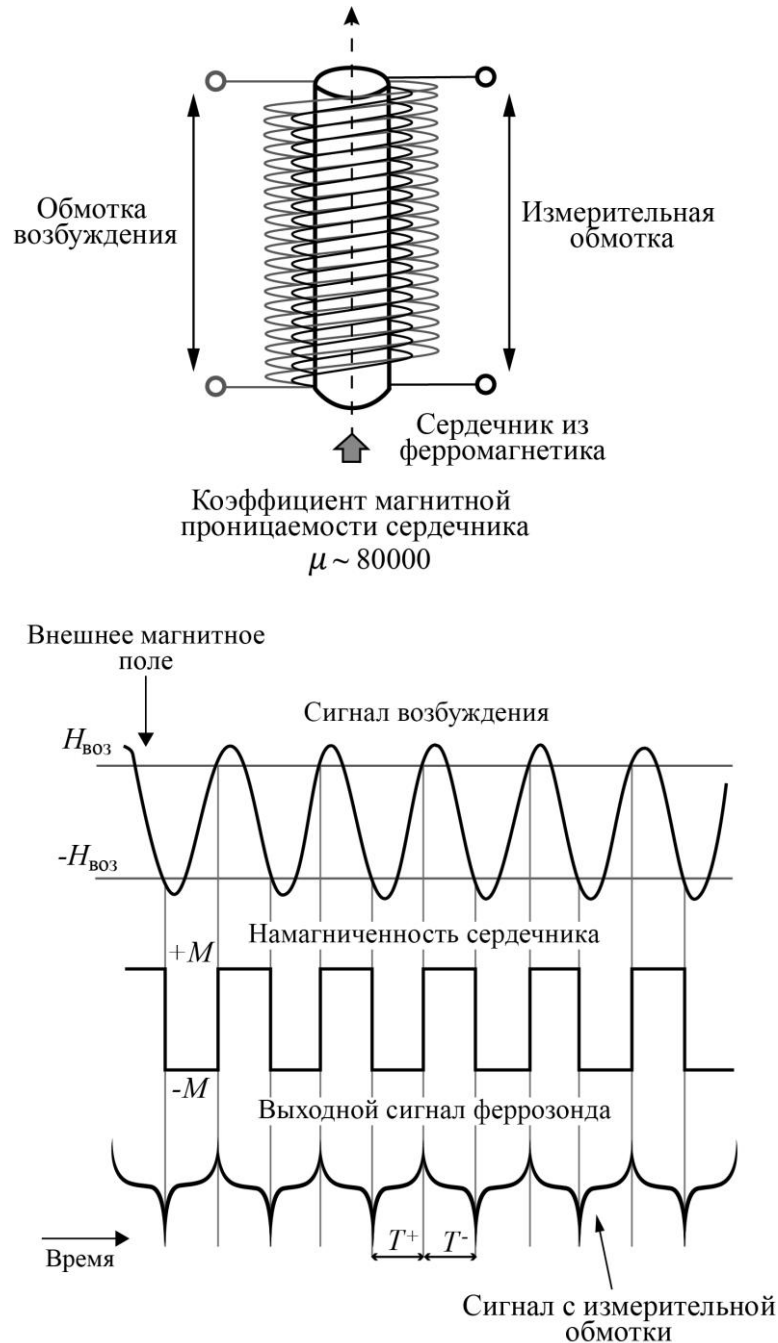


Рисунок 1.26 – Структурная схема RTD-феррозонда и основные временные диаграммы

При возникновении внешнего квазистационарного магнитного поля, напряженность магнитного поля смещается в положительном или отрицательном направлении на величину внешнего поля. Тогда, при том же токе возбуждения, напряженность поля в сердечнике будет являться суммой этих напряженностей (рисунок 1.27 (а)). Вследствие этого, сердечник будет намагничен до насыщения полем одной полярности дольше, чем полем другой (рисунок 1.27 (б, в)). Это значит, что промежутки времени между переходом из одного насыщения в другое будут разными (рисунок 1.27 (г)) при общем постоянном периоде сигнала. Разность между T^+ и T^- будет пропорциональна величине внешнего поля [102].

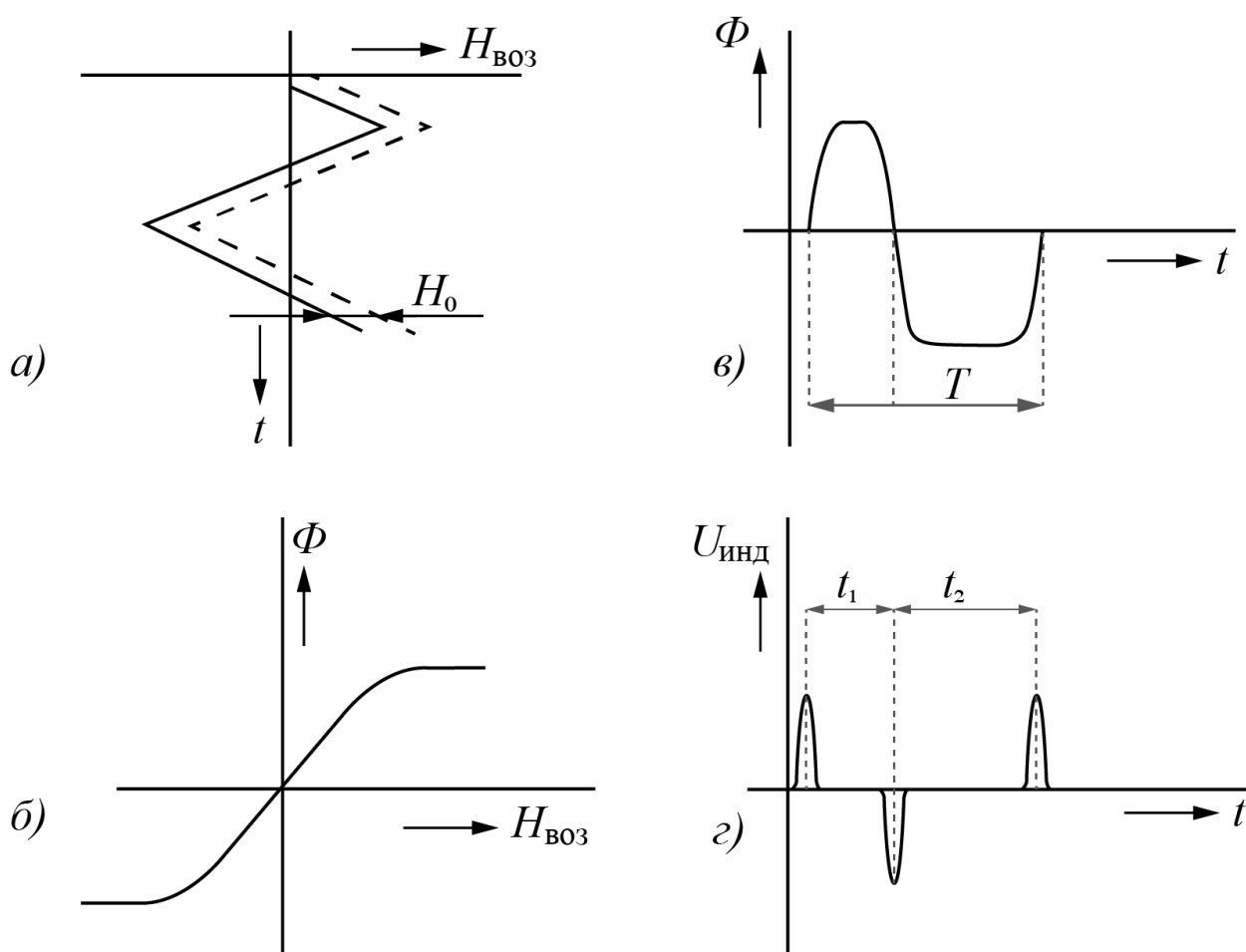


Рисунок 1.27 – Основные зависимости RTD-феррозонда: а) возбуждающее поле смещается постоянным внешним полем; б) намагниченность; в) зависимость потока от времени; г) зависимость индуцированного напряжения от времени

Преимуществом данного метода является тот факт, что амплитуда измеряемого сигнала почти не меняется от внешнего поля. Независимо от внешнего поля (при условии, что оно достаточно мало) параметры сердечника остаются постоянными. Это позволяет предусмотреть в принципе работы измерительной системы моменты времени, когда выходной сигнал достигает пика по амплитуде. Измеряя промежутки времени между пиками, можно обеспечить лучшие метрологические характеристики, нежели чем при постоянном измерении амплитуды выходного сигнала.

Разрешающая способность такого датчика может достигать 10 пТл и более. Так, в работе [129] описан датчик с коэффициентом преобразования 0,68 мкс/Тл. RTD-феррозонды уже нашли применение в качестве чувствительных элементов для диагностики заболеваний мозга [130-131] и могут быть использованы и для других приложений в области биомагнитных измерений, а за счет минимизации тепловыделения заменить традиционные феррозонды в системах магнитного вакуума.

1.16 Выводы к главе 1

1. Проведенный обзор современных датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей показывает, что по совокупности рассматриваемых характеристик феррозонды, основанные на измерение временных интервалов, являются наиболее предпочтительными для широкого спектра биомагнитных измерений и использования в составе систем магнитного вакуума квантового компьютера.

2. Так как RTD-феррозонды являются относительно новым типом датчиков, в отечественных и зарубежных публикациях отсутствуют полноценные математические модели, описывающие их работу в зависимости от параметров тока возбуждения и формы кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.

3. Одним из направлений совершенствования RTD-феррозондовых магнитометров является оптимизация конструкции, для быстрого прототипирования и экспериментальной проверки датчиков возможно применение технологии изготовления печатных плат.

4. В ходе диссертационной работы должны быть проведены разработка, аппаратно-программная реализация и экспериментальное исследование RTD-феррозондовых датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей. Для достижения этой цели будут решены следующие задачи:

- Разработка аналитической модели RTD-феррозонда, связывающей параметры тока возбуждения с ЭДС, наводимой в измерительной обмотке и учитывающей аналитическое описание кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.
- Анализ работы RTD-феррозонда с учетом параметров тока возбуждения, амплитуды измеряемого магнитного поля и параметров кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.
- Разработка конструкций RTD-феррозондов, изготавливаемых по технологии печатных плат и их конечно-элементный анализ.
- Изготовление и исследование RTD-феррозондовых датчиков для измерения сверхслабых постоянных магнитных полей и магнитных полей, имитирующих магнитное поле сердца человека.

ГЛАВА 2

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В этой главе проведен математический анализ работы RTD-феррозондового преобразователя. Предложена математическая модель RTD-феррозонда, связывающая параметры тока возбуждения с ЭДС, наводимой в измерительной обмотке с учетом аналитического описания кривой намагничивания ферромагнитного сердечника. Описана разработанная программа экспресс-калькулятора для оценки характеристик RTD-феррозонда при различных наборах входных параметров и методика конечно-элементного анализа RTD-феррозонда, позволяющая провести моделирование работы датчика в зависимости от конструктивных особенностей и свойств всех материалов, входящих в конструкцию.

2.1 Математическая модель RTD-феррозонда

Независимо от способа обработки измерительной информации с выходной обмотки феррозонда, его работа обусловлена наличием двух магнитных полей: постоянного или переменного измеряемого магнитного поля и вспомогательного магнитного поля возбуждения, создаваемого переменным током, протекающим по обмотке возбуждения. Параметры тока возбуждения (амплитуда, частота, форма сигнала), свойства материала ферромагнитного сердечника (параметры кривой намагничивания) и конструктивные особенности в совокупности определяют метрологические характеристики феррозондового преобразователя.

Для проектирования феррозондовых преобразователей необходимо создание математической модели, связывающей параметры тока возбуждения с ЭДС, наводимой в измерительные обмотки, с учетом аналитического описания кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.

2.1.1 Кривая намагниченности ферромагнитного сердечника

Для создания математической модели феррозондового преобразователя необходимо аналитически описать кривую намагниченности материала ферромагнитного сердечника. Традиционно используются или интерполяционные зависимости, основанные на экспериментальных данных, или аналитическая модель в виде степенного полинома [132].

Недостатком первого подхода является необходимость в экспериментальном получении для каждого материала большого объема данных с достаточной для анализа точностью. При этом ключевую роль играет гладкость интерполяционной кривой, так как это напрямую влияет на точность и сходимость решения дифференциальных уравнений.

При описании кривой намагниченности с помощью степенного полинома возникают сложности, связанные с подбором параметров полиномов высокой степени. С другой стороны, использование полиномов невысокой степени позволяет проводить только качественный, а не количественный анализ работы феррозондового преобразователя. Еще одним недостатком использования степенных полиномов является то, что степенная функция стремится к бесконечности, что не соответствует реальным свойствам материала.

Помимо рассмотренных выше подходов к аналитическому описанию кривой намагниченности, существует модель Джилса-Атертона [133], которая позволяет описать материал, включая его гистерезисные свойства. Преимуществами данной модели являются неразрывность и гладкость на всем диапазоне возможных величин напряженности магнитного поля. Недостатком модели Джилса-Атертона является сложность точной настройки петли гистерезиса, так как модель описывается пятью взаимосвязанными параметрами и значительно повышающаяся сложность аналитического получения ЭДС в измерительной обмотке из-за гистерезисных свойств.

В настоящей работе для аналитического описания кривой намагничивания сердечника предлагается использовать функцию корневой сигмоиды.

Преимуществом данного подхода является простота вычисления и наличие горизонтальной асимптоты, соответствующей индукции насыщения ферромагнитного материала. Следовательно, для любого значения напряженности поля, существует конечное значение магнитной индукции, которое может быть рассчитано аналитически. График функции кривой намагниченности, основанной на корневой сигмоиде представлен на рисунке 2.1.

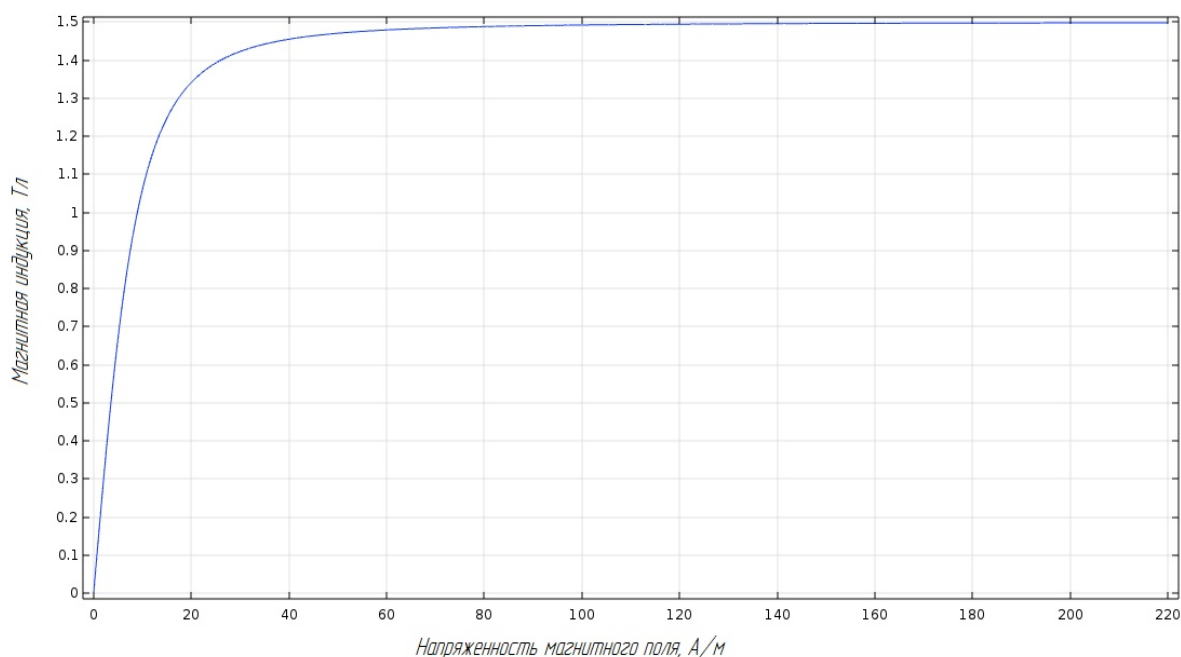


Рисунок 2.1 – Кривая намагниченности материала, основанная на корневой сигмоиде

2.1.2 Аналитическое описание работы RTD-феррозондового преобразователя

Для анализа принципов работы RTD-феррозондового преобразователя и способов измерения магнитной индукции через временные интервалы в выходной ЭДС была разработана математическая модель. Пусть RTD-феррозондовый преобразователь выполнен в виде однострежневого феррозондового преобразователя, как показано на рисунке 2.2, а для описания кривой намагниченности материала сердечника использована функция корневой сигмоиды.

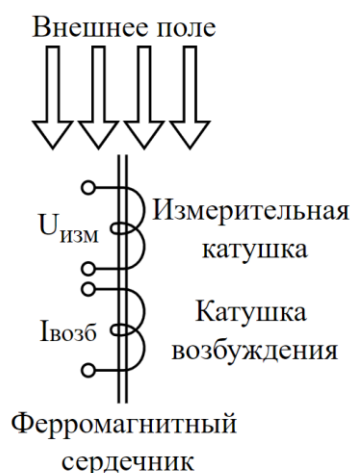


Рисунок 2.2 – Конструкция RTD-феррозондового преобразователя

Если в обмотке возбуждения индуцируется переменное магнитное поле от источника тока синусоидальной формы:

$$H(t) = H_m \sin(2\pi f \cdot t), \quad (2.1)$$

где f – частота сигнала возбуждения, Гц;

H_m – амплитуда сигнала возбуждения, А/м,

то магнитная индукция в сердечнике изменяется по закону:

$$B(t) = \frac{P_1(H(t) + H_{\text{const}})}{\sqrt{P_2 + (H(t) + H_{\text{const}})^2}}, \quad (2.2)$$

где P_1 – параметр, определяющий индукцию насыщения материала ферромагнитного сердечника;

P_2 – параметр, определяющий наклон кривой намагниченности ферромагнитного сердечника.

ЭДС, индуцируемая на измерительной обмотке феррозондового преобразователя, может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon(t) = -w_2 \cdot S \cdot \frac{dB(t)}{dt}, \quad (2.3)$$

где w_2 – число витков в измерительной обмотке;

S – площадь поперечного сечения сердечника, мм².

Подставив формулу (2.2) в выражение (2.3) и совершив необходимые преобразования, можно получить закон, определяющий значение ЭДС в измерительной обмотке:

$$\varepsilon(t) = -w_2 \cdot S \cdot 2\pi f \cdot H_m \cdot P_1 \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2}} - \frac{(H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2}{(P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (2.4)$$

На рисунке 2.3 представлены сфазированные временные диаграммы магнитной индукции в сердечнике и наводимой ЭДС в измерительной обмотке RTD-феррозондового преобразователя, рассчитанные по формулам (2.2) и (2.4) соответственно.

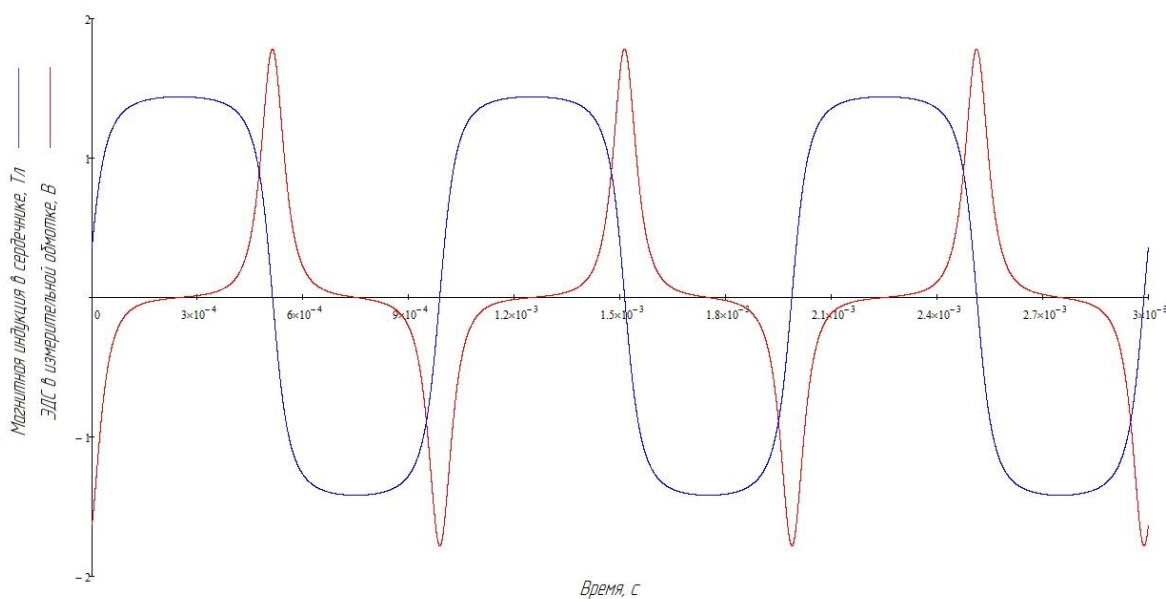


Рисунок 2.3 – Сфазированные диаграммы магнитной индукции в сердечнике и индуцируемая ЭДС

Математически, пики ЭДС являются экстремумами. Это означает, что производная ЭДС по времени в этих точках должна равняться нулю. Проведем дифференцирование функции ЭДС в измерительной обмотке (2.4) по времени:

$$\begin{aligned}
\frac{d\varepsilon}{dt} = & -w_2 \cdot S \cdot 2\pi f \cdot H_m \cdot P_1 \cdot \left(\frac{2\pi f \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \cdot (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2}{(P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2)^{\frac{3}{2}}} - \right. \\
& - \frac{2\pi f \cdot \sin(2\pi f \cdot t)}{\sqrt{P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2}} + \\
& + \frac{6\pi f \cdot H_m \cdot (\cos(2\pi f \cdot t))^2 \cdot (P_1 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2)^3}{(P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2)^{\frac{5}{2}}} - \\
& \left. - \frac{6\pi f \cdot H_m \cdot (\cos(2\pi f \cdot t))^2 \cdot (P_1 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2)}{(P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (2.5)
\end{aligned}$$

После ряда преобразований уравнение (2.5) можно привести к более наглядному виду:

$$\begin{aligned}
\frac{d\varepsilon}{dt} = & \frac{8\sqrt{2} \cdot w_2 \cdot S \cdot (\pi f)^2 \cdot H_m \cdot P_1 \cdot P_2}{(2 \cdot P_2 + 2 \cdot H_{const}^2 - H_m^2 \cdot \cos(4\pi f \cdot t) + 4 \cdot H_{const} \cdot H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^{\frac{5}{2}}} \cdot \\
& \cdot (5 \cdot H_{const} \cdot H_m + 2 \cdot P_2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + 2 \cdot H_{const}^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + \\
& + 2 \cdot H_m^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + H_m^2 \cdot \sin(6\pi f \cdot t) + H_{const} \cdot H_m \cdot \cos(4\pi f \cdot t)) = 0 \quad (2.6)
\end{aligned}$$

Корни уравнения (2.6) определяют моменты времени, в которые производная от ЭДС равняется нулю. При наличии внешнего магнитного поля эти значения будут отличаться от моментов времени определяющих половину периода и целый период. Следовательно, необходимо определить корни данного уравнения. В выражение (2.6) дробная часть (2.7) принципиально больше 0:

$$\frac{8\sqrt{2} \cdot w_2 \cdot S \cdot (\pi f)^2 \cdot H_m \cdot P_1 \cdot P_2}{(2 \cdot P_2 + 2 \cdot H_{const}^2 - H_m^2 \cdot \cos(4\pi f \cdot t) + 4 \cdot H_{const} \cdot H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^{\frac{5}{2}}} > 0 \quad (2.7)$$

Это обусловлено следующими факторами: во-первых, ни один из параметров в числителе не может быть отрицательным или равным нулю по определению. Во-вторых, выражение, находящееся в скобках в знаменателе, не может иметь отрицательное значение, так как это давало бы комплексный результат. В-третьих, знаменатель в выражение (2.6), полученный в результате поиска общего знаменателя для выражения (2.5), строго больше нуля, так как:

$$P_2 + (H_{const} + H_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t))^2 > 0 \quad (2.8)$$

и данное неравенство выполняется в случае, если:

$$\begin{cases} P_2 > 0 \\ P_2 \in R \end{cases} \quad (2.9)$$

Таким образом, для дальнейшего поиска корней уравнения, разделим (2.6) на левую часть неравенства (2.7) – см. выражение (2.10):

$$\begin{aligned} & 5 \cdot H_{const} \cdot H_m + 2 \cdot P_2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + 2 \cdot H_{const}^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + \\ & + 2 \cdot H_m^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + H_m^2 \cdot \sin(6\pi f \cdot t) + H_{const} \cdot H_m \cdot \cos(4\pi f \cdot t) = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Выразим все тригонометрические функции в (2.10) через $\sin(2\pi f \cdot t)$.

После преобразований, получим:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot H_m^2 \cdot (\sin(2\pi f \cdot t))^3 - H_{const} \cdot H_m \cdot (\sin(2\pi f \cdot t))^2 + \\ & + (H_{const}^2 + 3 \cdot H_m^2 + P_2) \cdot \sin(2\pi f \cdot t) + 3 \cdot H_{const} \cdot H_m = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) является полиномом третьей степени, где переменная определяется синусоидальной функцией. Проведем замену:

$$x = \sin(2\pi f \cdot t)$$

тогда (2.11) примет вид:

$$-2 \cdot H_m^2 \cdot x^3 - H_{const} \cdot H_m \cdot x^2 + (H_{const}^2 + 3 \cdot H_m^2 + P_2) \cdot x + 3 \cdot H_{const} \cdot H_m = 0 \quad (2.12)$$

Прежде чем искать корни уравнения (2.12) в общем виде, докажем, что $RTD = 0$ при $H_{const} = 0$. Уравнение (2.12) примет вид:

$$x \cdot (-2 \cdot H_m^2 \cdot x^2 + 3 \cdot H_m^2 + P_2) = 0 \quad (2.13)$$

Очевидно, что один из корней равняется:

$$x_1 = 0$$

Остальные два корня определяются из уравнения:

$$-2 \cdot H_m^2 \cdot x^2 + 3 \cdot H_m^2 + P_2 = 0$$

$$x^2 = \frac{3 \cdot H_m^2 + P_2}{2 \cdot H_m^2}$$

$$x^2 = \frac{3}{2} + \frac{P_2}{2 \cdot H_m^2}$$

$$x_{2,3} = \pm \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{P_2}{2 \cdot H_m^2}} \quad (2.14)$$

Из (2.14) следует, что при любых значениях параметров:

$$x_2 \geq 1.225$$

$$x_3 \leq 1.225$$

Проводя обратную замену, оказывается, что второй и третий корень не дают вещественного решения, так как синусоидальная функция по модулю не может быть больше единицы. Следовательно, решение имеет только первый корень. В полном виде, решение при отсутствии внешнего магнитного поля может быть записано в виде:

$$t = \frac{k}{2f}$$

или

$$t = \frac{T}{2} \cdot k \quad (2.15)$$

где T – период возбуждающего сигнала;
 k – любое целое число.

Решение уравнения (2.15) показывает, что корни уравнения периодические и повторяются каждую половину периода. Таким образом при отсутствии измеряемого внешнего магнитного поля временная разность $RTD = 0$.

Вернемся к поиску корней уравнения (2.11). Поиск корней полиномов третьей степени сводится к применению формулы Кардано. Формула Кардано это формула для нахождения корней канонической формы кубического уравнения

$$y^3 + py + q = 0 \quad (2.16)$$

над полем комплексных чисел.

Любое кубическое уравнение общего вида

$$a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d = 0 \quad (2.17)$$

при помощи замены переменной

$$x = y - \frac{b}{3a} \quad (2.18)$$

может быть приведено к канонической форме (2.16) с коэффициентами

$$p = \frac{3ac - b^2}{3a^2} \quad (2.19)$$

$$q = \frac{2b^3 - 9abc + 27a^2d}{27a^3}$$

По формуле Кардано, корни кубического уравнения в канонической форме равны:

$$y_1 = \alpha + \beta, \quad (2.20)$$

$$y_{2,3} = -\frac{\alpha + \beta}{2} \pm i \frac{\alpha - \beta}{2} \sqrt{3}$$

где

$$\alpha = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}, \quad (2.21)$$

$$\beta = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \quad (2.22)$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 \quad (2.23)$$

Определим знак дискриминанта уравнения (2.23). Знак дискриминанта определяет количество корней уравнения. Для этого определим значения коэффициентов (2.19) подставив множители (2.11) и упростив вид дроби:

$$p = -\frac{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2}{12 \cdot H_m^2} \quad (2.24)$$

$$q = \frac{H_{const} \cdot (10 \cdot H_{const}^2 - 18 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)}{108 \cdot H_{const}^3}$$

Тогда (2.23) равняется:

$$Q = \frac{\left(-\frac{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2}{12 \cdot H_m^2}\right)^3}{3^3} - \frac{\left(\frac{H_{const} \cdot (10 \cdot H_{const}^2 - 18 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)}{108 \cdot H_{const}^3}\right)^2}{2^2}$$

и после ряда упрощений получим:

$$Q = \frac{1}{(6 \cdot H_m)^6} \cdot \left[H_{const}^2 \cdot (10 \cdot H_{const}^2 - 135 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)^2 - \right. \\ \left. - (7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2)^3 \right] \quad (2.25)$$

Знак выражения (2.25) определяется знаком второго множителя этого выражения. Оценим этот знак, раскрыв скобки:

$$H_{const}^2 \cdot (10 \cdot H_{const}^2 - 135 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)^2 - (7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2)^3 = \\ = 11421 \cdot H_{const}^2 \cdot H_m^4 - 5346 \cdot H_{const}^4 \cdot H_m^2 - 5346 \cdot H_{const}^4 \cdot P_2 - \\ - 243 \cdot H_{const}^6 - 6966 \cdot H_{const}^2 \cdot H_m^2 \cdot P_2 - 675 \cdot H_{const}^2 \cdot P_2^2 - \\ - 5832 \cdot H_m^4 \cdot P_2 - 1944 \cdot H_m^2 \cdot P_2^2 - 216 \cdot P_2^3 \quad (2.26)$$

В полученном многочлене (2.26) только первый член положительный. Чтобы знак дискриминанта был больше или равен нулю, нужно, чтобы первый член был больше суммы остальных. Из (2.9) известно, что параметр P_2 всегда больше нуля, но для упрощения предположим, что:

$$P_2 \ll H_{const}; P_2 \ll H_m; P_2 \approx 0 \quad (2.27)$$

а внешнее и возбуждающее поле связаны некоторым соотношением:

$$H_{const} = k \cdot H_m \neq 0 \quad (2.28)$$

тогда (2.26) можно упростить до вида:

$$Q = -243 \cdot H_m^6 \cdot (k^2 - 1)^2 \cdot (k^2 + 24) \quad (2.29)$$

Анализируя (2.29) понятно, что дискриминант представляет собой параболу, ветви которой направлены вниз. У выражения (2.29) три пары корней, из которых одна комплексная и одна отрицательная. Последняя пара корней при $k = 1$. Это говорит о том, что парабола только касается одной точкой оси абсцисс. Другими словами, существует только один вариант, при котором дискриминант равен нулю. Во всех остальных случаях, дискриминант отрицательный. А если учесть, что выполняется условие (2.9), то дискриминант отрицательный при любых параметрах. Таким образом, уравнение (2.11) имеет три вещественных корня.

Выразим и упростим (2.21) и (2.22). Так как из (2.29) нам известно, что дискриминант отрицательный, запишем его в виде:

$$Q = i\sqrt{-Q} \quad (2.30)$$

Тогда (2.21) примет вид:

$$\alpha = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + i\sqrt{-Q}} \quad (2.31)$$

Выражение (2.31) представляет собой кубический корень из комплексного числа. В математике существует алгоритм извлечения кубического корня из комплексного числа. В общем виде, алгоритм выглядит следующим образом:

$$\sqrt[3]{\text{Re} + i\text{Im}} = \sqrt[3]{r} \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{3} + i \sin \frac{\varphi}{3} \right), \quad (2.32)$$

где

$$r = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad (2.33)$$

$$\varphi = \text{arctg} \left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right) \quad (2.34)$$

тогда, (2.21) можно переписать в виде:

$$\alpha = \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \sqrt[3]{-10 \cdot H_{const}^3 - 9 \cdot H_{const} \cdot P_2 + 135 \cdot H_{const} \cdot H_m^2 + \dots} \quad (2.35)$$

$$\sqrt[3]{\dots + i\sqrt{(7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2)^3 - H_{const}^2 (10 \cdot H_{const}^2 - 18 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)^2}}$$

Выведем (2.33) из (2.35)

$$r = \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \quad (2.36)$$

А также угол (2.34) из (2.35)

$$\varphi = \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{(7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2)^3}{H_{const}^2 (10 \cdot H_{const}^2 - 135 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)^2} - 1} \right) \quad (2.37)$$

Теперь (2.35) можно переписать в виде:

$$\alpha = \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{3} + i \sin \frac{\varphi}{3} \right) \quad (2.38)$$

Аналогично, упростив и преобразовав (2.22), получим:

$$\beta = \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{3} - i \sin \frac{\varphi}{3} \right) \quad (2.39)$$

Получив все необходимые значения, определим корни кубического уравнения в канонической форме из (2.20):

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} \\ y_2 &= \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \left(-\cos \frac{\varphi}{3} - \sqrt{3} \cdot \sin \frac{\varphi}{3} \right) \\ y_3 &= \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \left(-\cos \frac{\varphi}{3} + \sqrt{3} \cdot \sin \frac{\varphi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Применив метод вспомогательного угла, упростим (2.40):

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} \\ y_2 &= -\frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \\ y_3 &= -\frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6} \right) \end{aligned} \quad (2.41)$$

совершим обратную замену (2.41) в (2.18) и получим корни уравнения (2.12)

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} - \frac{H_{const}}{6 \cdot H_m} \\ x_2 &= -\frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) - \frac{H_{const}}{6 \cdot H_m} \\ x_3 &= -\frac{1}{3 \cdot H_m} \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6} \right) - \frac{H_{const}}{6 \cdot H_m} \end{aligned}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} - H_{const} \right) \\ x_2 &= -\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \right) \\ x_3 &= -\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

Вновь проведем обратную замену из (2.42) в (2.11):

$$\begin{aligned}\sin(2\pi f \cdot t_1) &= \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} - H_{const} \right) \\ \sin(2\pi f \cdot t_2) &= -\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \right) \\ \sin(2\pi f \cdot t_3) &= -\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6} \right) \right)\end{aligned}\quad (2.43)$$

Для того, чтобы определить время пика ЭДС, необходимо вычислить арксинус из полученных в (2.43) выражений. Таким образом, время пика ЭДС будет определяться по формуле:

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin \left[\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} - H_{const} \right) \right] \\ t_2 &= \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin \left[-\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \right) \right] \\ t_3 &= \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin \left[-\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6} \right) \right) \right]\end{aligned}\quad (2.44)$$

Для получения вещественного результата, аргумент арксинуса должен находиться в диапазоне от минус единицы до плюс единицы. Значение аргумента арксинуса во многом определяется от значений множителей второго слагаемого аргумента, содержащего тригонометрическую функцию. В свою очередь, значение тригонометрической функции зависит от значения угла φ , который рассчитывается по формуле (2.37). Значения (2.37) всегда находится в диапазоне:

$$\varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.45)$$

Рассмотрим частные случаи для соотношений между параметром P_2 , определяющим наклон кривой намагниченности ферромагнитного сердечника, напряжённостями поля возбуждения и измеряемого поля

Рассмотрим случай

$$P_2 \gg H_m; P_2 \gg H_{const} \quad (2.46)$$

Тогда, согласно (2.37)

$$\varphi \rightarrow -\frac{\pi}{2} \quad (2.47)$$

Поочередно разберем корни уравнения (2.42):

$$\cos \frac{\varphi}{3} \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.48)$$

$$2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \rightarrow 2 \cdot \sqrt{6 \cdot P_2} \quad (2.49)$$

и так как:

$$\frac{P_2}{H_m} \gg 1 \quad (2.50)$$

$$x_1 = \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(\sqrt{3} \cdot \sqrt{6 \cdot P_2} - H_{const} \right) \gg 1 \quad (2.51)$$

Следовательно, данный случай для первого корня решения не имеет.

Рассмотрим второй корень уравнения (2.42):

$$\sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \rightarrow 0 \quad (2.52)$$

при малых значениях угла:

$$\sin \left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \rightarrow \frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) = \frac{1}{3} \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \left(\sqrt{\frac{(7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2)^3}{H_{const}^2 \cdot (10 \cdot H_{const}^2 - 135 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)^2} - 1} \right) \right] \approx \\ &\approx \frac{1}{3} \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{(7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2)^3}{H_{const}^2 \cdot (10 \cdot H_{const}^2 - 135 \cdot H_m^2 + 9 \cdot P_2)^2} - 1}} \right] \approx \frac{H_{const}}{2\sqrt{6 \cdot P_2}} \end{aligned} \quad (2.54)$$

Использував выражение (2.46), получим значение второго корня:

$$x_2 = \frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(\frac{2\sqrt{6 \cdot P_2} \cdot H_{const}}{2\sqrt{6 \cdot P_2}} + H_{const} \right) = \frac{H_{const}}{3 \cdot H_m} \quad (2.55)$$

Решение (2.55) существует пока:

$$H_{const} \leq 3 \cdot H_m \quad (2.56)$$

Рассмотрим третий корень уравнения (2.42):

$$\sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6}\right) \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.57)$$

Дальнейшие вычисления будут аналогичны вычислениям значения первого корня, за исключением того, что результат будет обратный по знаку. Следовательно, третий корень не имеет решений.

Стоит отметить, что когда параметр P_2 много больше всех остальных, на практике будет соответствовать тому, что сердечник либо отсутствует, либо насыщается очень слабыми токами в очень слабом внешнем магнитном поле и по сути датчик не пригоден для измерения.

Рассмотрим обратный случай:

$$P_2 \ll H_m; P_2 \ll H_{const}; \frac{H_m}{H_{const}} = 1 \quad (2.58)$$

Тогда, согласно (2.37) $\varphi \rightarrow 0$

Поочередно разберем корни уравнения (2.42):

$$\begin{aligned} \cos\frac{\varphi}{3} &\rightarrow 1 \\ 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} &\rightarrow 2 \cdot \sqrt{25 \cdot H_{const}^2} \rightarrow 10 \cdot H_{const} \end{aligned} \quad (2.59)$$

Тогда

$$x_1 = \frac{9 \cdot H_{const}}{6 \cdot H_m} \gg 1.5 \quad (2.60)$$

Следовательно, данный случай для первого корня решения не имеет.

Рассмотрим второй корень уравнения (2.42):

$$\sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) \rightarrow \frac{1}{2} \quad (2.61)$$

Тогда

$$x_2 = -\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot (5 \cdot H_{const} + H_m) = -1 \quad (2.62)$$

Здесь важно отметить, что если

$$\frac{H_m}{H_{const}} \neq 1 \quad (2.63)$$

то уравнение теряет решение. Следовательно, это единственный возможный вариант, который имеет решение.

Рассмотрим третий корень уравнения (2.42):

$$\sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6}\right) \rightarrow \frac{1}{2} \quad (2.63)$$

Дальнейшие вычисления будут аналогичны вычислениям значения второго корня. Следовательно, уравнение имеет вещественные корни в очень узком диапазоне параметров.

Наиболее приближенным к реальному случаю практической реализации феррозонда будет вариант, когда параметр P_2 соответствует какому-то реальному материалу, а измеряемое поле будет относительно малым по отношению к параметру P_2 и напряжённости поля возбуждения. Пусть:

$$H_{const} < H_m; H_{const} < P_2; P_2 < 15 \cdot H_m^2 \quad (2.64)$$

Последнее условие обусловлено тем, что его невыполнение в (2.37) приведет к смене знака и отсутствию решения. Физически, это можно объяснить следующим образом. Увеличение параметра P_2 приводит к тому, что чтобы насытить сердечник, необходимо приложить больший ток. В противном случае, перемагничивание сердечника будет осуществляться в линейной области и не позволит реализовать измерение временных интервалов.

Подставляя значения параметров в (2.37) и (2.42), примем, что для соблюдения вышеобъявленных условий:

$$\varphi \rightarrow -\frac{\pi}{2} \quad (2.65)$$

Тогда первый и второй корни уравнения больше единицы по модулю, следовательно, не имеют вещественных решений:

$$\cos\frac{\varphi}{3} \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} x_1 &> 1 \\ \sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) &\rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} \\ x_2 &< -1 \end{aligned}$$

Тригонометрическая функция в третьем корне принимает малые, но не равные нулю значения:

$$\sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6}\right) \rightarrow 0 \quad (2.67)$$

Таким образом, решения третьего корня уравнения можно записать в упрощенном виде:

$$t_3 = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(-\frac{H_{const}}{6 \cdot H_m}\right) \quad (2.68)$$

Выражение (2.68) показывает временную координату пика ЭДС, полученного в результате воздействия на датчик внешнего магнитного поля. Для того, чтобы получить значение разности временных интервалов, дополним формулу (2.68):

$$RTD = \frac{k \cdot T}{2} + (-1)^k \cdot \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(-\frac{H_{const}}{6 \cdot H_m}\right) \quad (2.69)$$

Или в полном виде:

$$\begin{aligned} RTD = \frac{k \cdot T}{2} + (-1)^k \cdot \frac{1}{2\pi f} \cdot \\ \cdot \arcsin\left[-\frac{1}{6 \cdot H_m} \cdot \left(H_{const} + 2 \cdot \sqrt{7 \cdot H_{const}^2 + 18 \cdot H_m^2 + 6 \cdot P_2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{5\pi}{6}\right)\right)\right] \end{aligned} \quad (2.70)$$

Выражение (2.70) показывает, что при измерение слабых и сверхслабых магнитных полей и значительно превращающем поле возбуждения, значение разности временных интервалов прямо пропорционально измеряемому магнитному полю, так как значение арксинуса малого аргумента стремится к значению аргумента.

Если принять катушку, возбуждающую магнитное поле в датчике, цилиндрической, то можно записать формулу, связывающую ток возбуждения и напряженность возбуждающего магнитного поля через выражение:

$$H_m(t) = \frac{I(t) \cdot n}{l} \quad (2.71)$$

где $I(t)$ – сила тока в обмотке возбуждения, А;

n – количество витков в обмотке возбуждения;

l – длина обмотки возбуждения, м.

Подставив (2.71) в (2.69), получим:

$$RTD = \frac{k \cdot T}{2} + (-1)^k \cdot \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(-\frac{H_{const} \cdot l}{6 \cdot I \cdot n}\right) \quad (2.72).$$

На рисунке 2.4 приведены графики ЭДС, наводимой в измерительной обмотке RTD-феррозонда, при различных значениях измеряемого постоянного магнитного поля, полученные в результате расчетов по формуле (2.72).

В случае отсутствия измеряемого магнитного поля график имеет центральную симметрию относительно точки перехода сигнала через ось абсцисс. Между положительным и отрицательным экстремумом проходят равные интервалы времени.

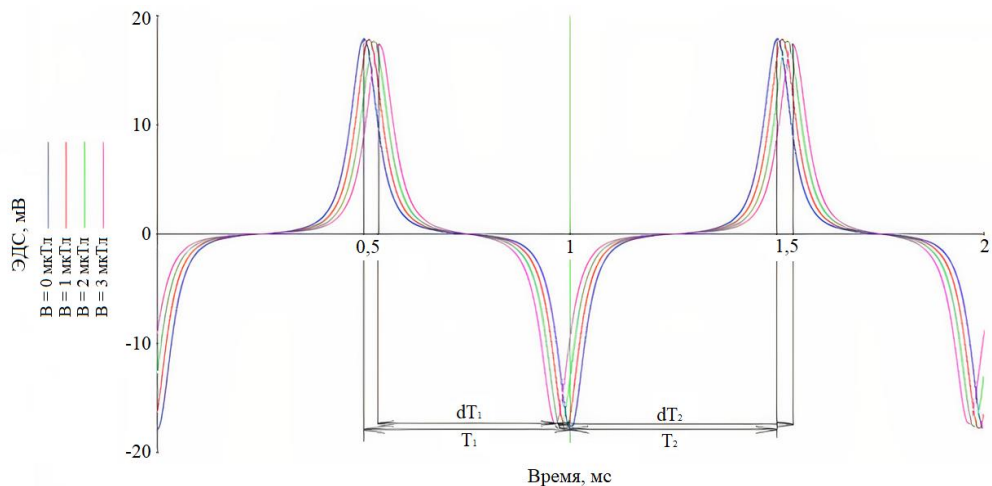


Рисунок 2.4 – Сравнение ЭДС в измерительной обмотке при различных значениях измеряемого магнитного поля.

При наличии измеряемого магнитного поля происходит смещение пиков ЭДС, появляется ненулевое значение при измерении времени между пиками ЭДС:

$$dT_1 - dT_2 \neq 0. \quad (2.73)$$

Причем, знак разности временных интервалов показывает направление внешнего магнитного поля.

2.2 Экспресс-калькулятор RTD-феррозонда

На основе выражений, полученных в разделе 2.1, в среде графического программирования LabVIEW была разработана компьютерная программа экспресс-калькулятора для оценки характеристик RTD-феррозонда при различных наборах входных параметров. Графический код программы представлен на рисунке 2.5.

Экспресс-калькулятор представляет из себя набор команд для обработки и вывода данных, полученных в результате математического моделирования RTD-феррозондового преобразователя. Помимо решения уравнений, представленных в предыдущем разделе, данная программа представляет возможность графического отображения расчетных параметров чувствительности и диапазона линейности RTD-феррозондового преобразователя. Реализована функция линейной аппроксимации решения уравнения (2.70) для заданного диапазона, измеряемого внешнего магнитного поля.

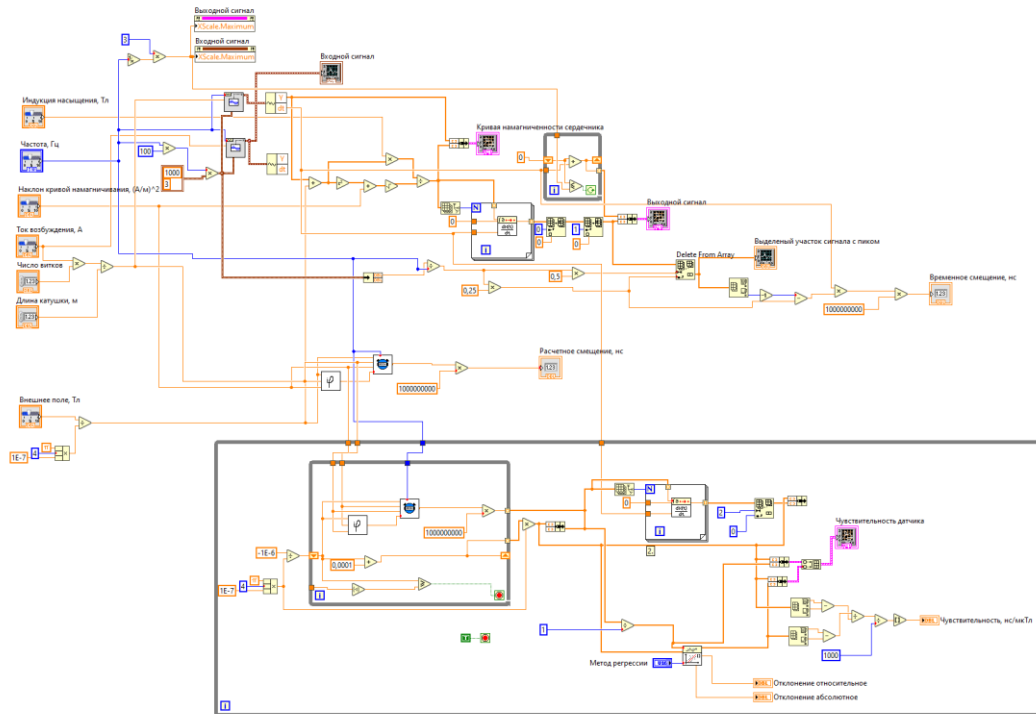


Рисунок 2.5 – Графический код экспресс-калькулятора

На рисунке 2.6 представлен интерфейс программы.

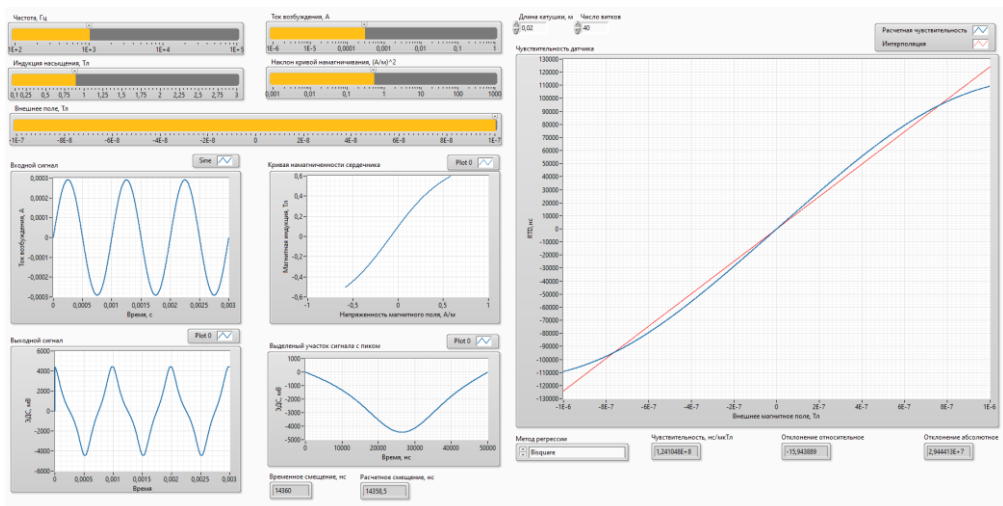


Рисунок 2.6 – Интерфейс разработанного экспресс-калькулятора

Интерфейс программы экспресс-калькулятора представляет из себя набор интуитивно понятных управляющих элементов, позволяющих однозначно задать входные параметры для математической модели. Графическое представление и числовые индикаторы наглядно представляют полную выходную информацию о результатах расчета. Рассмотрим элементы интерфейса более подробно.

На рисунке 2.7 представлены элементы управления входными параметрами математической модели.

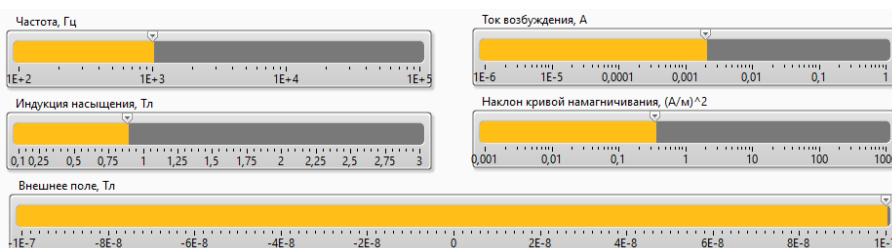


Рисунок 2.7 – Элементы управления экспресс-калькулятора

Элемент «Частота» позволяет выбрать частоту тока возбуждения в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц. Элемент «Ток возбуждения» позволяет задать амплитуду тока возбуждающего сигнала в диапазоне от 1 мкА до 1 А. Этот параметр пересчитывается в напряженность магнитного поля возбуждения H_m . Элемент «Индукция насыщения» позволяет задать параметр P_1 , что соответствует индукции насыщения материала ферромагнитного сердечника. Элемент «Наклон кривой намагничивания» позволяет задать параметр P_2 , что позволяет задать наклон кривой намагничивания. Этот параметр условно принят как параметр обратно пропорциональный магнитной проницаемости материала сердечника. Последний элемент управления – «Внешнее поле» – задается в диапазоне от минус 0,1 мкТл до плюс 0,1 мкТл, и характеризует значение измеряемого магнитного поля. Далее, этот параметр пересчитывается в напряженность измеряемого магнитного поля H_{const} .

После задания входных параметров для математической модели осуществляется автоматический расчет выходных параметров. В специальных окнах экспресс-калькулятора отображаются графики: тока, протекающего через обмотку возбуждения, от времени; кривой намагниченности ферромагнитного материала сердечника; ЭДС, наводимой в измерительной обмотке, и увеличенный участок экстремумов на графике ЭДС и результаты расчета временной разности RTD при различных значениях измеряемого магнитного поля. Для полученных значений временной разности RTD рассчитываются параметры

линейной аппроксимационной модели, которые позволяют судить о диапазоне линейности RTD-феррозондового преобразователя. В окнах экспресс-калькулятора отображаются расчетные значения: временной разности RTD при заданном значении измеряемого магнитного поля; чувствительности сенсора и параметры линейной аппроксимационной модели.

Таким образом, разработанный экспресс-калькулятор позволяет при проектировании RTD-феррозондового преобразователя провести предварительный качественный анализ его метрологических характеристик в зависимости от параметров кривой намагничивания сердечника и параметров тока возбуждения.

2.3 Конечно-элементная модель RTD-феррозонда

При проектировании феррозондовых преобразователей необходимо учитывать электромагнитные, электростатические, тепловые свойства используемых материалов и их взаимодействия в зависимости от геометрии конструкции сенсора. Аналитически решить эти задачи не представляется возможным. Успешная разработка RTD-феррозонда требует физического и имитационного моделирования для более точного прогнозирования режимов функционирования сенсора и достижимости метрологических характеристик проектируемого магнитометра на его основе. Одним из способов решения данной задачи является конечно-элементное моделирование, которое позволяет проанализировать объект, сокращая долю экспериментальных исследований, прогнозировать свойства феррозонда при изменении исходных параметров, значительно сокращая общее время, стоимость проектирования и прототипирования [134-136].

Ниже приводится разработанная в системе мультифизического моделирования Comsol Multiphysics методика конечно-элементного анализа RTD-феррозонда на примере датчика сложной конструкции.

Рассматриваемый конструкционный вариант модели RTD-феррозонда имеет в своем составе плоский броневой сердечник, внешние стойки которого

охватывают 2 катушки возбуждения. На центральную стойку сердечника наматывается измерительная обмотка. На практике, такая конструкция позволяет добиваться глубокого насыщения сердечника при меньших значениях тока, чем традиционная одностержневая конструкция.

Геометрия модели представлена на рисунке 2.8. Ширина стоек сердечника 3 мм. Габаритный размер сердечника $18 \times 18 \times 0,48$ мм.

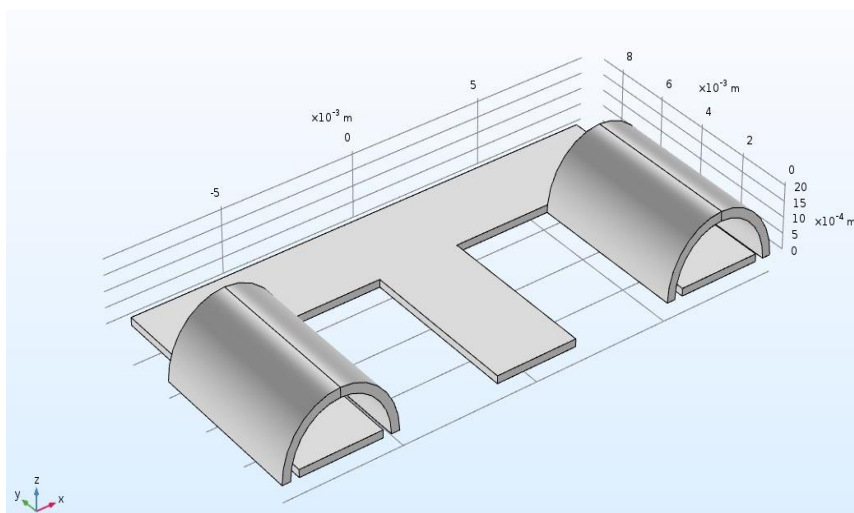


Рисунок 2.8 – 3D модель RTD феррозонда

Для упрощения расчета в симуляции участвует четверть модели, так как остальные части расчетно дублируют информацию и увеличивают время расчета. Геометрия катушек упрощена до цилиндрической.

Источником внешнего постоянного поля будет являться проводник, находящийся на удалении от RTD-феррозонда.

Гистерезисная модель намагничивания сердечника

При создании конечно-элементной модели RTD-феррозонда задаются свойства материалов, из которых он состоит. В описании конечно-элементной модели использованы три типа материалов: воздух (окружающая среда для модели), медь (материал обмоток сенсора, источника измеряемого магнитного поля) и ферромагнитный материал сердечника. Гистерезисные свойства ферромагнитного материала сердечника описаны моделью Джилса-Атертона

[109]. Модель Джилса-Атертона – математическая модель, позволяющая с помощью пяти параметров описать с высокой точностью любой ферромагнитный материал с учетом нелинейности и анизотропии

Параметры модели Джилса-Атертона определены в виде диагональных матриц и представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры модели Джилса-Атертона для материала сердечника типа Finemet

Параметр	Значение	Единица измерения
Междоменная связь: α	{4.33, 3.952, 4.33}	$\cdot 10^{-6}$
Максимальная намагниченность: M_s	{1.31, 1.33, 1.31}	А/мм
Параметр формы функция Ланжевена: a	{3.8, 3.11, 3.8}	А/м
Обратимость: c	{736, 652, 736}	$\cdot 10^{-3}$
Постоянная необратимой деформации доменных стенок: k	{4.11, 3.38, 4.11}	А/м

Полученная зависимость магнитной индукции в сердечнике от напряженности магнитного поля представлена на рисунке 2.9.

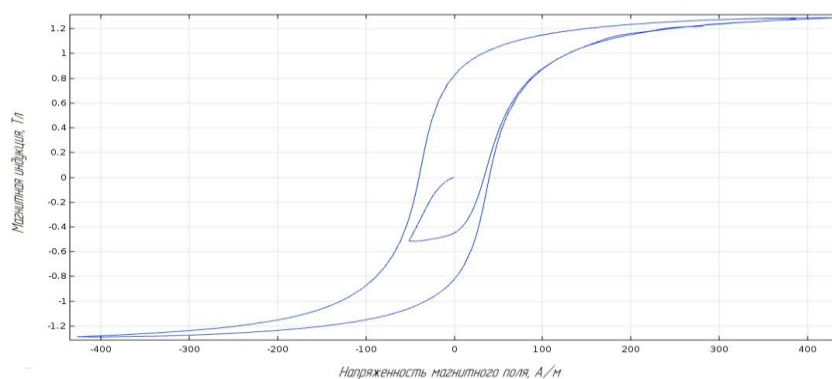


Рисунок 2.9 – Кривая намагниченности модели сердечника с учетом гистерезисных свойств

Настройка физики

Для описания физических процессов, связанных с измерением магнитного поля, а также направлением потока магнитной индукции в материалах, была использована физика "Magnetic Fields". По умолчанию "Magnetic Fields"

имеет квадратичную дискретизацию, но это требует значительного объема (не менее 64 Гб) оперативной и постоянной памяти для вычислений. Для уменьшения требований к вычислительным мощностям была выбрана линейная дискретизация. Отдельным условием "Ampere's Law" описана зависимость магнитной индукции в ферромагнитном сердечнике от напряженности магнитного поля, для этого указано "NB curve" в свойствах "Constitutive relation". Магнитное поле создают обмотки феррозондового преобразователя, по которым протекает ток. Свойства обмоток феррозондового преобразователя, число витков и направление тока описывает условие "Coil". На решение нелинейной задачи наложены дополнительные условия калибровки векторного потенциала, которые позволяют однозначно вычислить векторный потенциал электромагнитного поля. Так как модель симметричная и разбита на части, дополнительно на плоскости симметрии наложены условия "Perfect Magnetic Conductor" и "Magnetic Insulation". "Magnetic Insulation" не пропускает силовые линии магнитного поля и направляет их параллельно плоскости симметрии. "Perfect Magnetic Conductor" наоборот идеально пропускает магнитный поток и силовые линии перпендикулярно плоскости симметрии.

Формирование конечно-элементной сетки

Следующим важным этапом решения задачи, связанной с проектированием RTD-феррозонда методами конечно-элементного анализа, является формирование конечно-элементной сетки. Так как феррозонд возбуждается переменным полем достаточно большое значение имеет скин-эффект. Для этого при построении сердечника феррозондового преобразователя дополнительно введены граничные слои "Boundary Layers". Толщина элементов этих слоев напрямую зависит от частоты тока возбуждения и рассчитывается по стандартной формуле для скин-эффекта.

Конечно-элементная сетка для создаваемой модели состоит из 55169 элементов и представлена на рисунке 2.10. Сетка уточнена в области сердечника, так как это область представляет наибольший интерес для моделирования. Максимальный размер элементов принят как 1/15 часть ширины стойки

магнитопровода. Во всех остальных объектах модели сетка сгенерирована без дополнительных настроек.

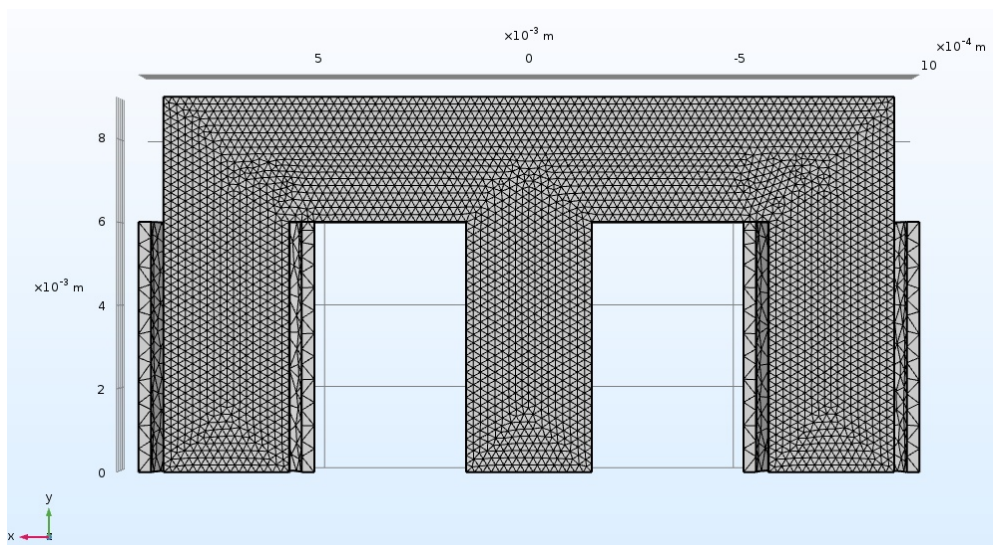


Рисунок 2.10 – Конечно-элементная сетка модели

Настройка решателя

Так как результат моделирования зависит от времени, решение задачи конечно-элементного моделирования RTD-феррозонда состоит из трех этапов моделирования: "Coil geometry analysis", "Stationary" и "Time-dependent". На первом этапе идет расчет обмоток возбуждения и измерительной обмотки, на втором этапе решается стационарная задача в отсутствии переменного поля возбуждения и на третьем этапе моделируется процесс работы феррозондового преобразователя при возбуждении переменным током заданной амплитуды и частоты. Для того, чтобы улучшить сходимость решения, тип линейного решателя был установлен как "Direct". Такой тип решателя больше подходит для задач, связанных с моделированием магнитного поля. Параметр "Jacobian update" был установлен в состояние "on every iteration". Нелинейный метод был установлен как "Constant (Newton)". Значение параметра "Maximum number of iterations" устанавливалось не менее 25. Класс точности выбирался в зависимости от требуемой точности исследования, но не менее 0,1 %. Временной диапазон и шаг моделирования устанавливался таким образом, чтобы

с удовлетворительной точностью отображать данные на исследуемых частотах. Для периодического сигнала на каждый период задавалось не менее 100 расчетных точек. Для временной области пиков задавался шаг моделирования в 1000 расчетных точек.

Основой для расчета конечно-элементной модели RTD-феррозонда является теорема о циркуляции магнитного поля. Для повышения точности вычисления к модели применена калибровка векторного потенциала, позволяющая однозначно вычислить векторный магнитный потенциал. Две последовательно включенные катушки возбуждения описаны таким образом, чтобы создавать магнитный поток в едином направлении. На катушки подается ток возбуждения синусоидальной формы, амплитуда тока возбуждения зависит от геометрии сердечника, числа витков и определяется по результатам предварительного моделирования в экспресс-калькуляторе. Для рассматриваемой модели RTD-феррозондового преобразователя амплитуда тока возбуждения была определена в диапазоне от 100 до 150 мА.

Результаты моделирования

После проведения расчетов был получен график распределения магнитной индукции по объёму анализируемого пространства, который дополнен стрелочными отображениями направления потока магнитной индукции и индуцированных токов. Для оценки степени насыщения сердечника графики распределения магнитной индукции плотности по объёму анализируемого пространства получены при максимальном и минимальном токах в катушках возбуждения (см. рисунок 2.11).

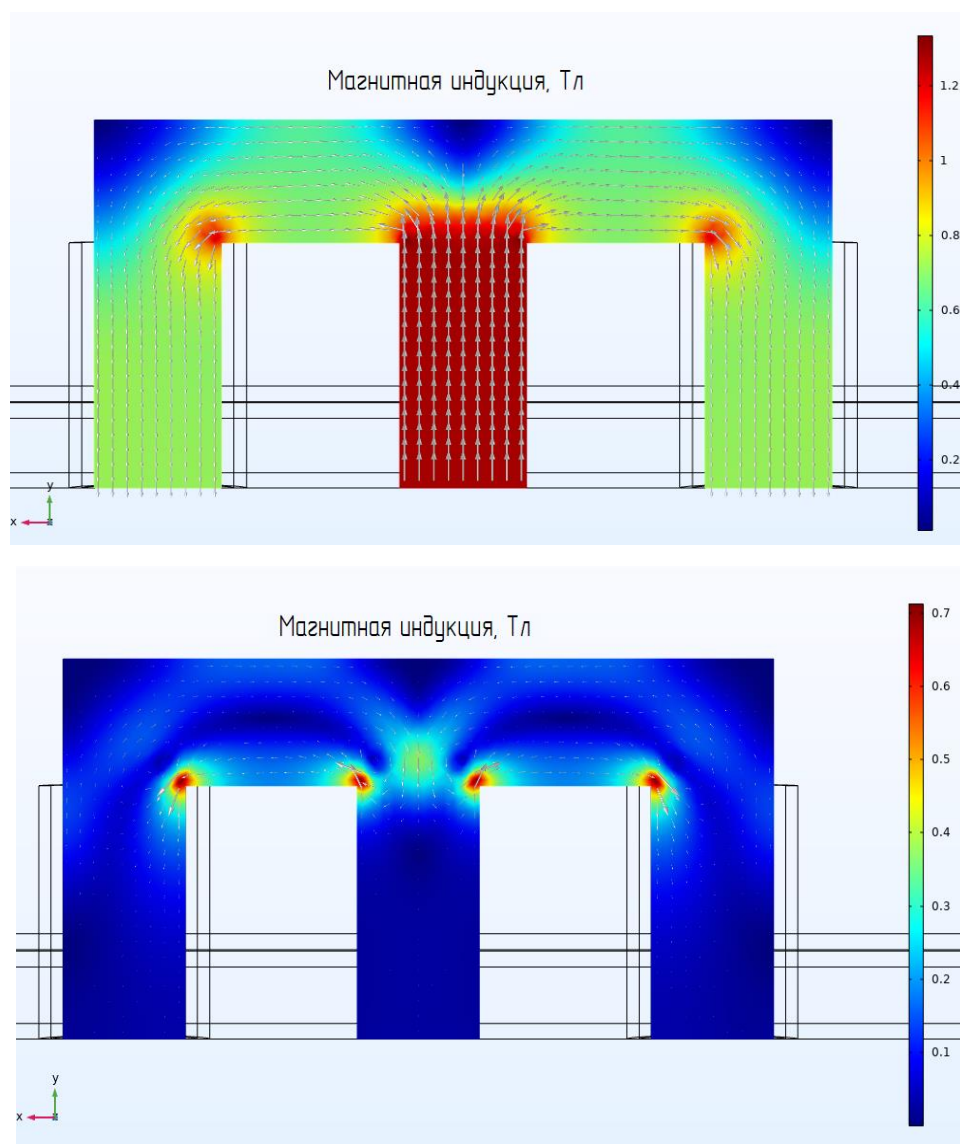


Рисунок 2.11 – График распределения магнитной индукции в сердечнике при максимальном (вверху) и минимальном (внизу) токах в катушках возбуждения

Наведенная ЭДС в измерительной катушке будет определяться как производная от магнитного потока, пронизывающего центральную стойку магнитопровода с измерительной катушкой. График ЭДС в измерительной катушке, полученный в результате моделирования приведен на рисунке 2.12.

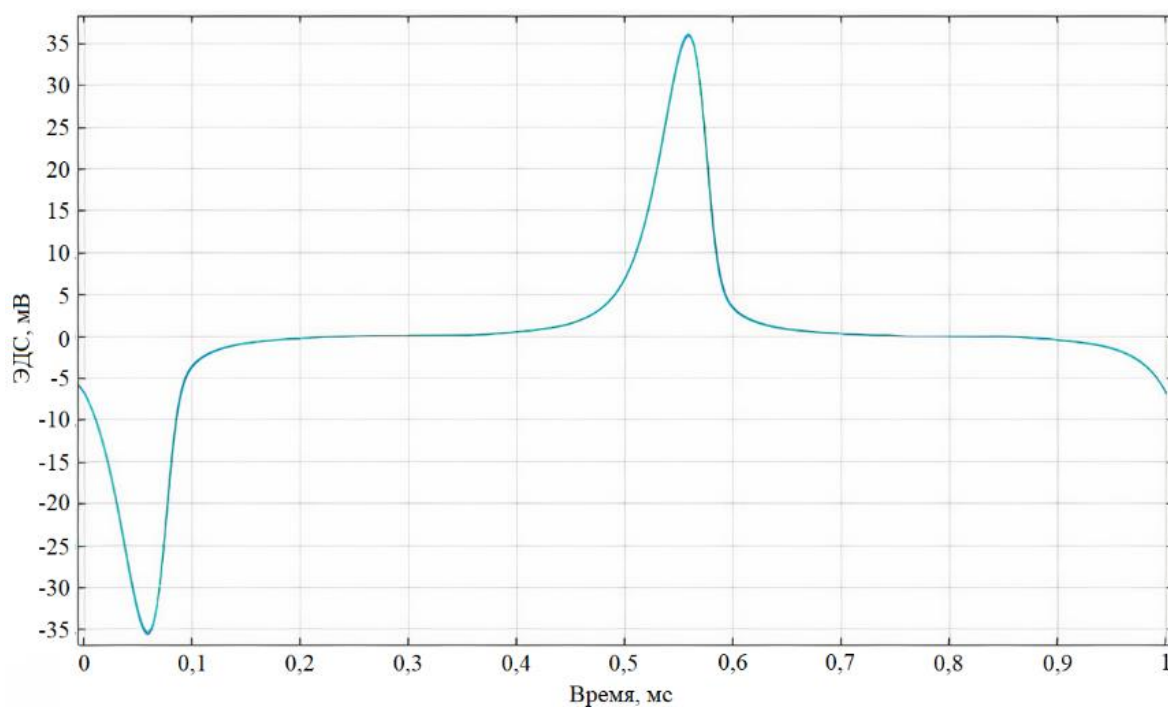


Рисунок 2.12 – ЭДС в измерительной катушке с учетом гистерезисных свойств сердечника

Следует отметить, что на графике рисунка 2.12 сфазированы результаты моделирования для полей 0 Тл, 0,5 нТл, 5 нТл и 50 нТл. Из графика видно, что визуально результаты почти неразличимы без масштабирования. Также необходимо отметить, что в результатах наблюдается временная задержка появления пика даже при отсутствии магнитного поля. Это вызвано гистерезисными и индукционными свойствами датчика.

Для оценки появления временных интервалов между пиками амплитуды в выходной ЭДС при различных значениях измеряемой магнитной индукции внешнего поля рассмотрим графики ЭДС в увеличенном масштабе – рисунок 2.13.

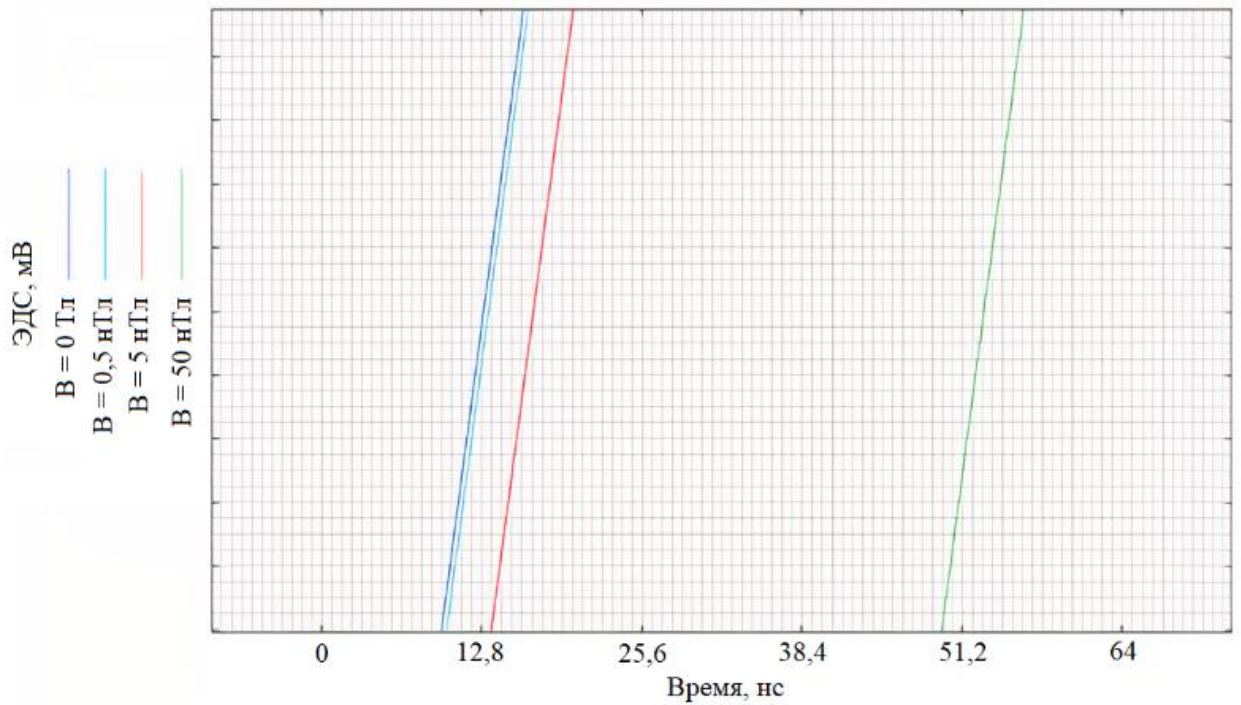
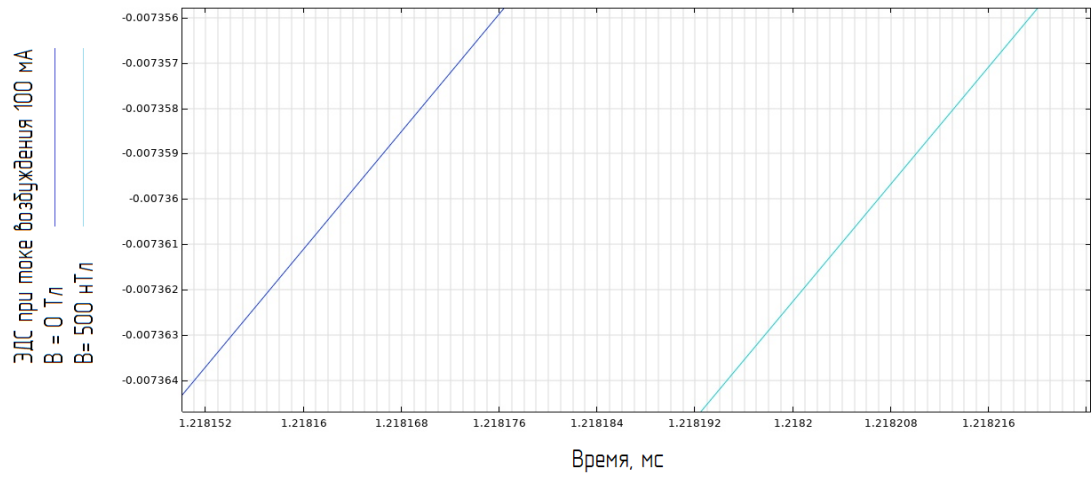


Рисунок 2.13 – Сравнение ЭДС в измерительной обмотке при различных значениях измеряемой магнитной индукции

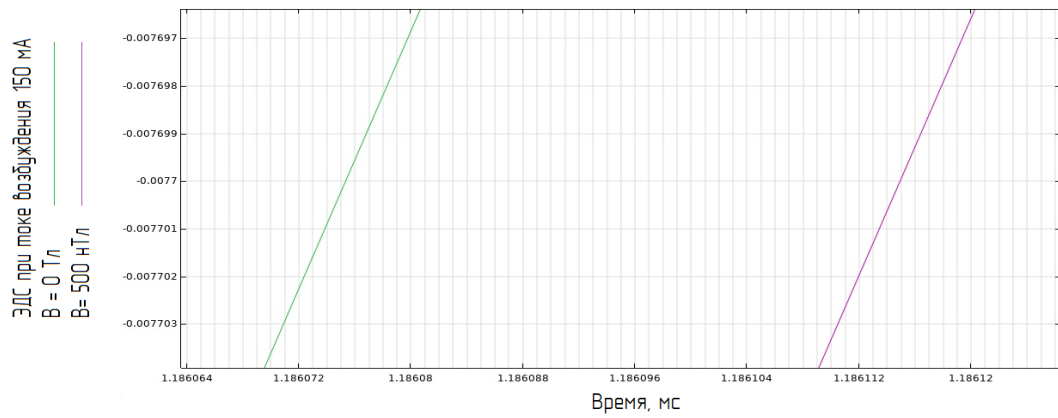
Результаты моделирования показывают, что на исследованном диапазоне измеряемого магнитного поля величина смещения ЭДС пропорциональна величине индукции внешнего поля. Другими словами, изменение магнитной индукции внешнего поля в 10 раз приводит к изменению временных интервалов в 10 раз.

Рассмотрим влияние амплитуды тока возбуждения на изменение временных интервалов в выходной ЭДС. Результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения представлены на рисунке 2.14.

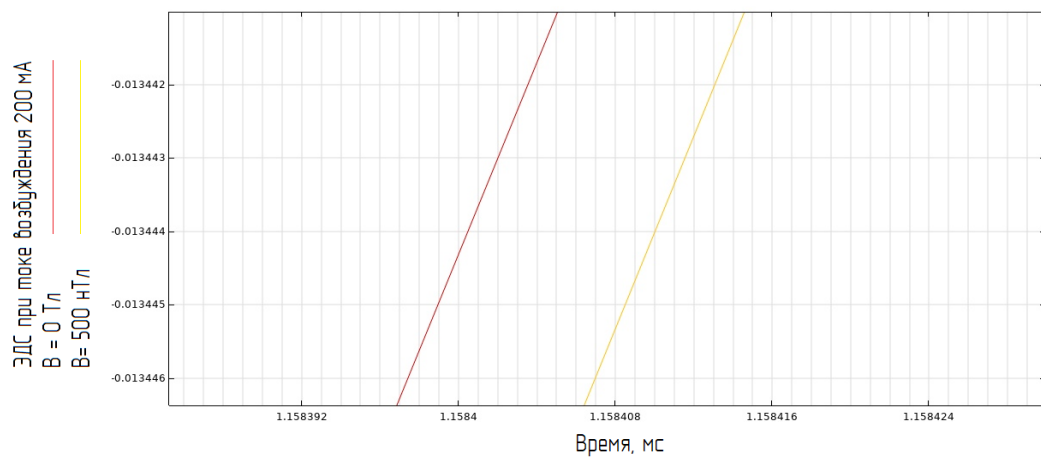
Совместив результаты моделирований при различных значениях тока возбуждения, получены зависимости изменения временных интервалов в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего поля, представленные на рисунке 2.15.



а



б



в

Рисунок 2.14 – Изменение временных интервалов в выходной ЭДС при:
 а – токе возбуждения 100 мА; б – токе возбуждения 150 мА
 в – токе возбуждения 200 мА

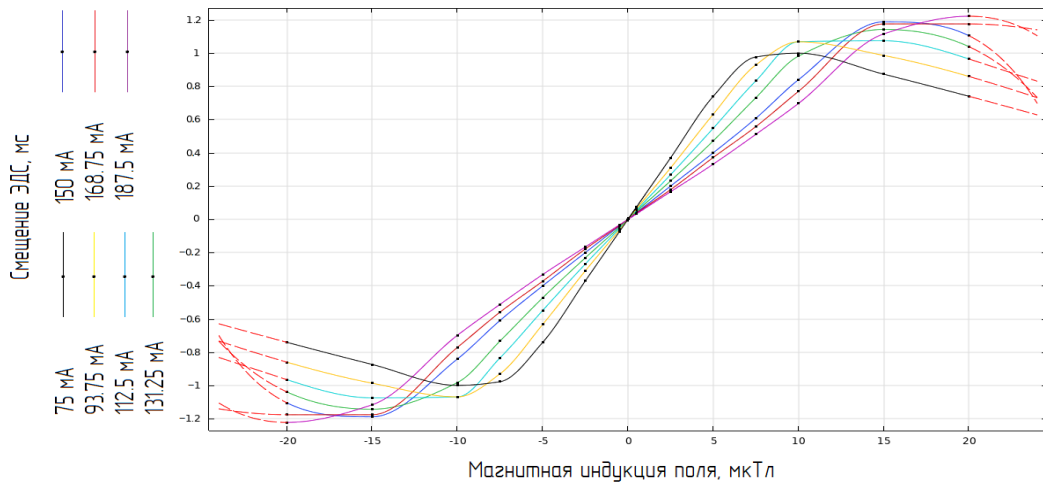


Рисунок 2.15 – Зависимости изменения временных интервалов в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего поля

Из зависимостей на рисунке 2.15 следует, что для большинства значений тока возбуждения зона линейности моделируемого RTD-феррозонда находится в диапазоне от минус 10 мкТл до 10 мкТл. Примечательно, что внутри диапазона характеристики линейны вплоть до 50 пТл. Важно отметить, что с уменьшением тока возбуждения изменяется значение амплитуды выходной ЭДС. На рисунке 2.16 представлено сравнение максимальной ЭДС (амплитуда пика) при различных значениях тока возбуждения и фиксированного значения измеряемой магнитной индукции в 5 нТл.

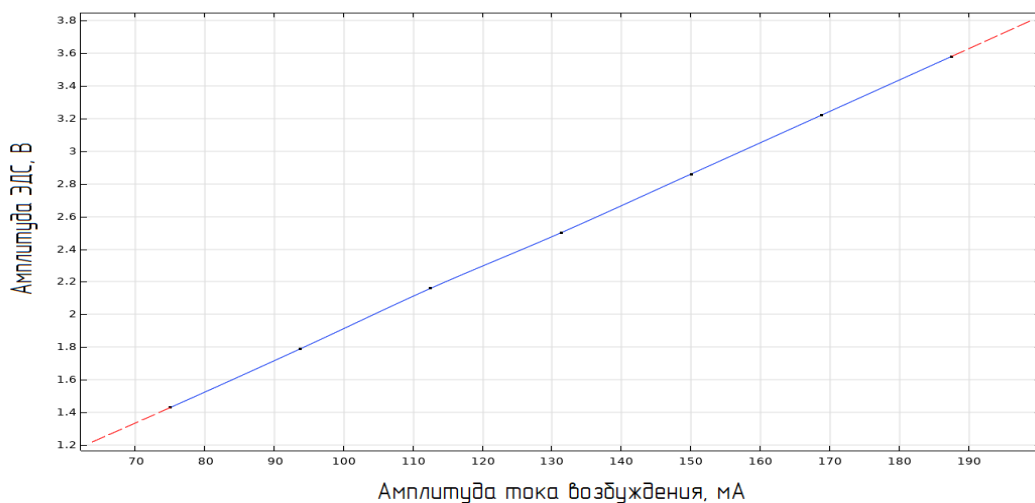


Рисунок 2.16 – Зависимость амплитуды ЭДС в измерительной обмотке от амплитуды тока возбуждения

Из зависимости на рисунке 2.16 следует, что на исследованном участке амплитуда пика ЭДС линейно зависит от амплитуды тока возбуждения. В целом, получается ситуация, когда следует выбрать оптимальный вариант тока возбуждения из двух условий. С одной стороны, слабый ток возбуждения повышает чувствительность RTD-феррозонда. С другой стороны, при уменьшении тока возбуждения, пропорционально изменяется амплитуда выходного сигнала, а пик ЭДС становится менее явным, что осложняет его точное измерение во времени.

Для рассматриваемой конструкции RTD-феррозонда, на основе перечисленных выше условий, за оптимальное значение тока возбуждения можно принять ток равный 131,25 мА.

Тогда на основе полученных в результате моделирования выходных характеристик, определим чувствительность RTD-феррозонда в линейном диапазоне измерений для тока 131,25 мА. Если,

$$RTD = 4dt = B \cdot s \quad (2.73)$$

то

$$s = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{B_2 - B_1} = \frac{(4.72 - 0.47) \cdot 10^{-4}}{(5 - 0.5) \cdot 10^{-6}} = 94444 \text{ [нс/мкТл]} \quad (2.74)$$

В свою очередь разность временных интервалов обратно пропорциональна частоте сигнала возбуждения и току возбуждения, а также зависит от свойств материала сердечника. Таким образом,

$$s \approx \frac{f(M_s, a, c, k, \alpha)}{I \cdot \omega} \quad (2.75)$$

где $f(M_s, a, c, k, \alpha)$ – сложная функция модели Джилса-Атертона, определяющая свойства материала;

I – ток возбуждения,

ω – частота тока возбуждения.

2.4 Выводы к главе 2

1. Разработана аналитическая модель RTD-феррозонда, связывающая параметры тока возбуждения с ЭДС, наводимой в измерительной обмотке, и учитывающая аналитическое описание кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.

2. На основе аналитической модели в среде графического программирования LabVIEW разработана компьютерная программа экспресс-калькулятора для оценки характеристик RTD-феррозонда при различных наборах входных параметров, позволяющая проводить анализ работы датчика с учетом параметров тока возбуждения, амплитуды измеряемого магнитного поля и параметров кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.

3. В системе мультифизического моделирования Comsol Multiphysics разработана методика конечно-элементного анализа RTD-феррозонда, в которой сердечник феррозонда, описывается с помощью модели Джилса-Атертона, такой подход позволяет проводить физическое моделирование датчика сложной конструкции с учетом гистерезисных и индукционных свойств сердечника.

ГЛАВА 3

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ

В этой главе приведено описание шести разработанных конструкций RTD-феррозондовых датчиков. Проведен конечно-элементный анализ в среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics предложенных конструкций. На основании результатов моделирования сделаны выводы о необходимых параметрах тока возбуждения для рассматриваемых форм сердечников с учетом геометрических особенностей датчиков. Приведено описание процедуры изготовления макетных образцов RTD-феррозондовых датчиков по технологии печатных плат.

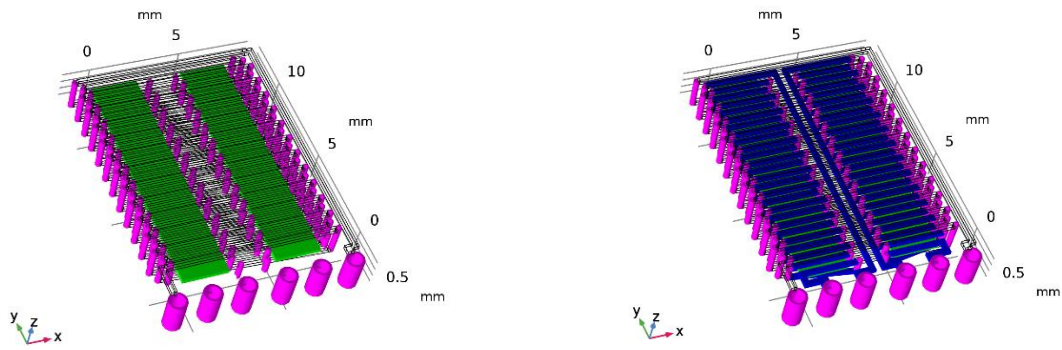
3.1 Разработка конструкций RTD-феррозондовых датчиков

Конструктивное исполнение любого феррозонда напрямую влияет как на его метрологические характеристики, так и на требования к параметрам тока возбуждения (амплитуда и частота). В связи с этим было предложено 6 конструкций образцов RTD-феррозондовых датчиков, которые дают возможность провести их сравнительный анализ, оценить преимущества и недостатки каждой конструкции, отработать технологию изготовления и на практике определить применимость для измерения сверхслабых магнитных полей.

Образец 1

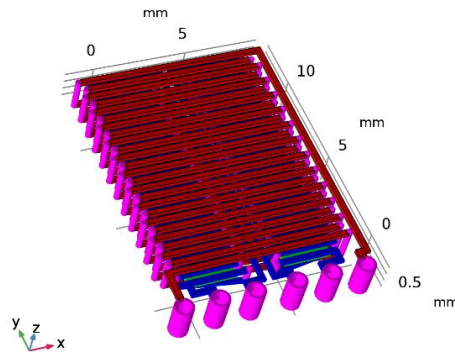
Образец 1: выполнен на основе двух симметричных стержневых сердечников – рисунок 3.1. Габаритные размеры сердечников $12,5 \times 2,5 \times 0,2$ мм. Каждый сердечник охватывает отдельная катушка обмотки возбуждения, состоящая из 26 витков. Витки образуются соединением через переходные отверстия проводников, находящихся на двух печатных платах. Снаружи всю конструкцию охватывают 26 витков измерительной обмотки, образованных

соединением проводников через переходные отверстия на внешних печатных платах.



а) – сердечники

б) – катушки обмотки возбуждения



в) – измерительная обмотка

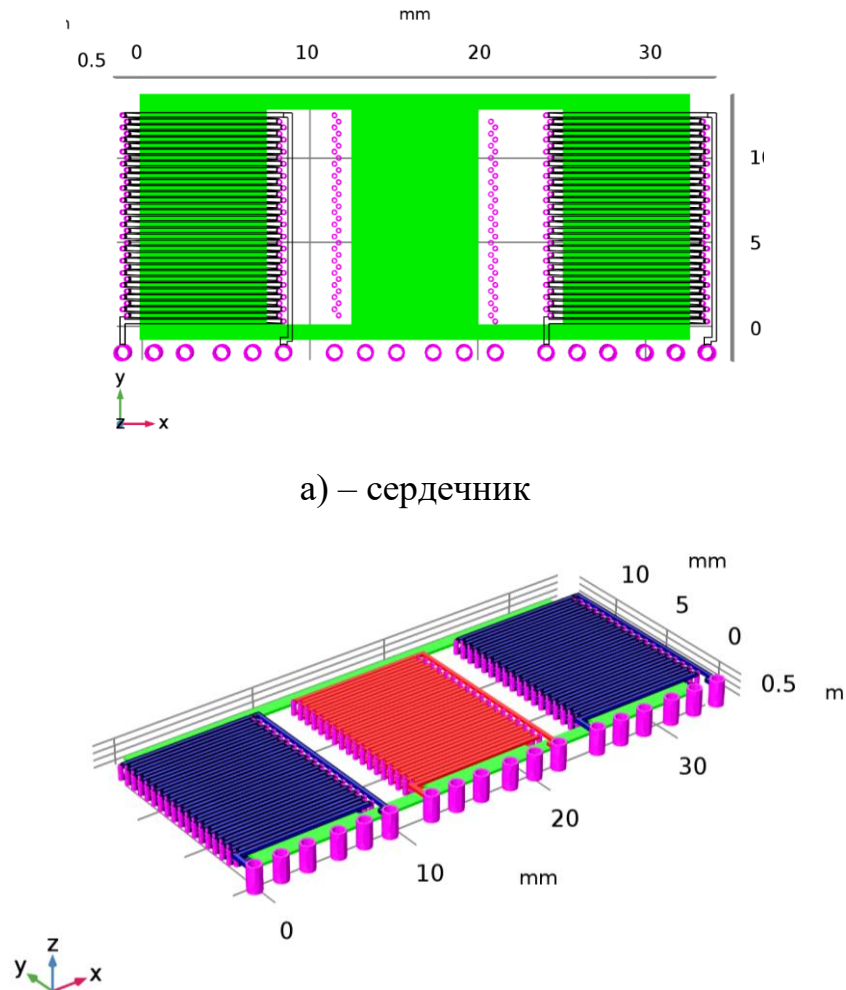
Рисунок 3.1 – Конструкция образца 1 RTD-феррозонда

Преимуществом такой геометрии датчика является то, что при встречном включении обмоток возбуждения, его можно использовать как классический дифференциальный феррозонд. Разомкнутый сердечник должен обладать большей чувствительностью в сравнении с замкнутым, но при этом, для его возбуждения требуется больший ток.

Образец 2

Образец 2: выполнен на основе плоского броневое сердечника. Габаритные размеры сердечника $15 \times 35 \times 0,2$ мм. Каждую стойку сердечника охва-

тывает отдельная обмотка, состоящая из 26 витков. Витки образуются соединением через переходные отверстия проводников, находящихся на двух печатных платах. Боковые катушки включены последовательно в цепь возбуждения и образуют обмотку возбуждения. Катушка, охватывающая центральную стойку сердечника, включена в цепь измерения. Геометрия датчика представлена на рисунке 3.2.



а) – сердечник

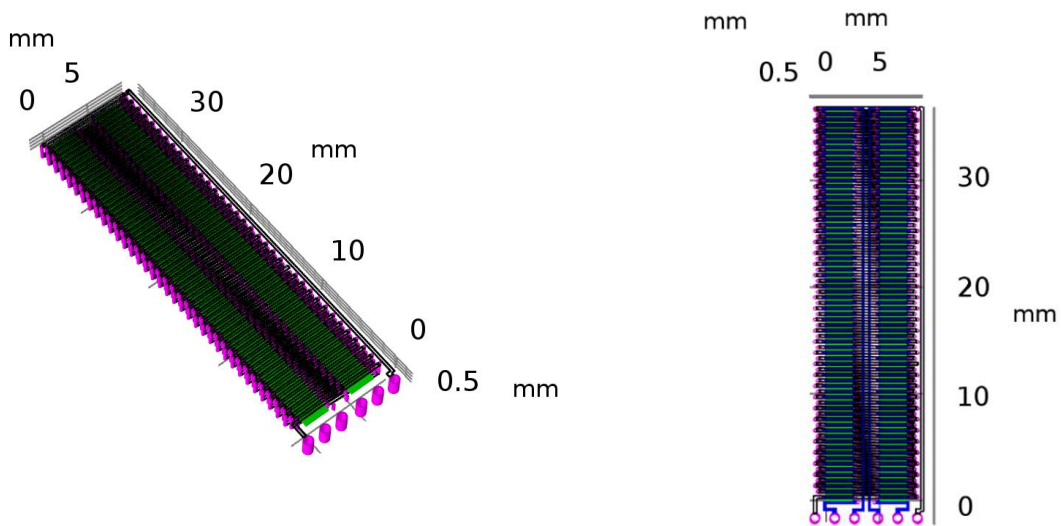
б) – катушки обмотки возбуждения и измерительная обмотка (в центре)

Рисунок 3.2 – Конструкция образца 2 RTD-феррозонда

Для возбуждения такого датчика может потребоваться меньший ток из-за того, что в центральной стойке магнитные потоки складываются от двух обмоток возбуждения. Чувствительность может быть ограничена вследствие формы сердечника и малого числа витков в измерительной обмотке.

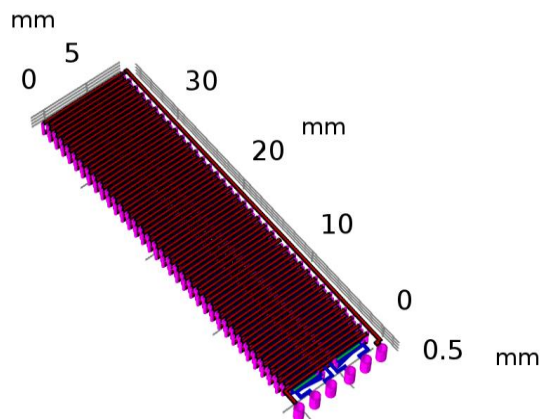
Образец 3

Образец 3: выполнен на основе двух симметричных стержневых сердечников. Габаритные размеры сердечников $36,5 \times 2,5 \times 0,2$ мм. Каждый сердечник охватывает отдельная катушка обмотки возбуждения, состоящая из 78 витков. Витки образуются соединением через переходные отверстия проводников, находящихся на двух печатных платах. Снаружи всю конструкцию охватывают 78 витков измерительной обмотки, образованных соединением проводников через переходные отверстия на внешних печатных платах. Геометрия датчика представлена на рисунке 3.3.



а) – сердечники

б) – катушки обмотки возбуждения



в) – измерительная обмотка

Рисунок 3.3 – Конструкция образца 3 RTD-феррозонда

Преимущества такой геометрии датчика повторяют преимущества образца 1. Недостатки скомпенсированы увеличением числа витков в катушках.

Образец 4

Образец 4: выполнен на основе плоского броневого сердечника. Габаритные размеры сердечника $38 \times 35 \times 0,2$ мм. Каждую стойку сердечника охватывает отдельная катушка, состоящая из 78 витков. Витки образуются соединением через переходные отверстия проводников, находящихся на двух печатных платах. Боковые катушки включены последовательно в цепь возбуждения и образуют обмотку возбуждения. Катушка, охватывающая центральную стойку сердечника, включена в цепь измерения. Геометрия датчика представлена на рисунке 3.4.

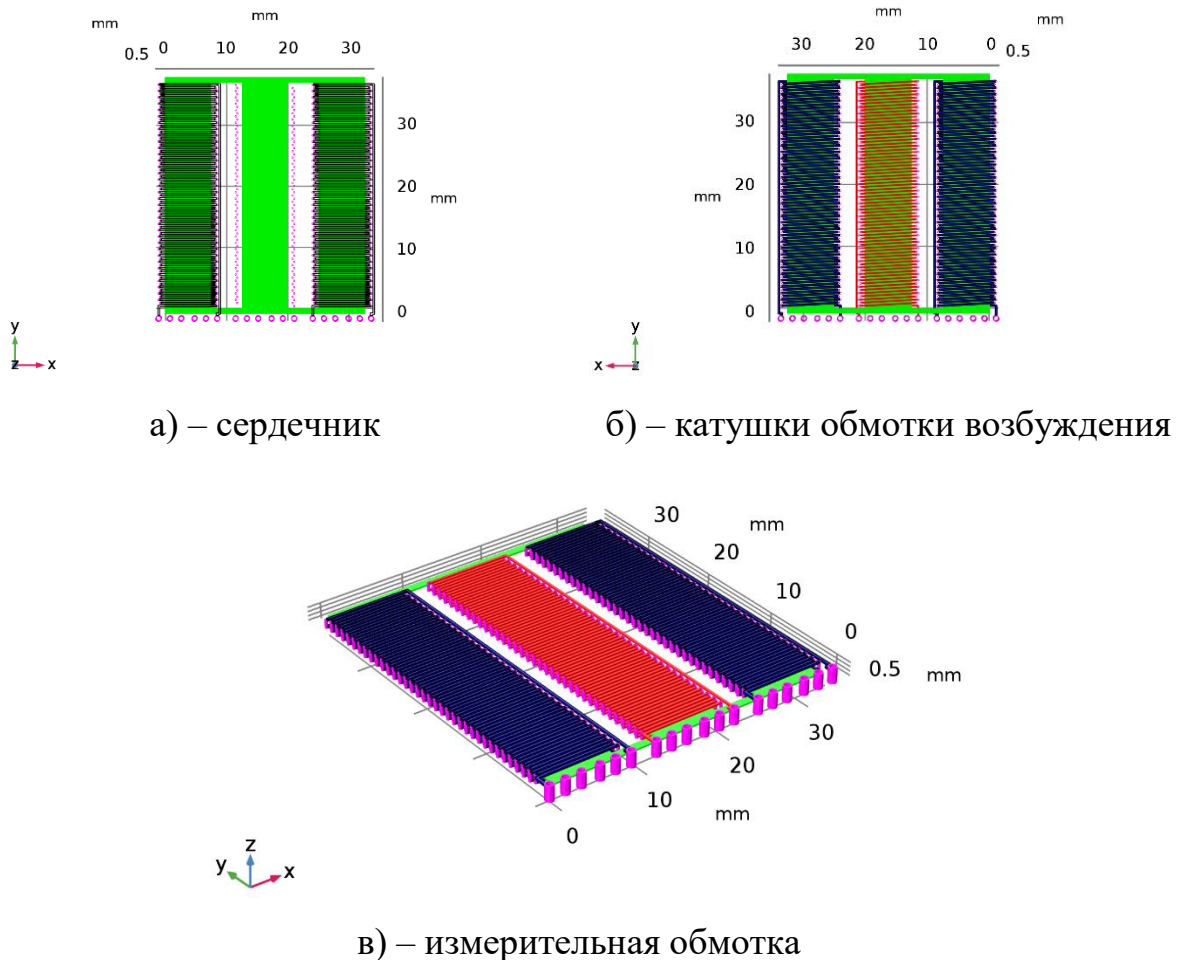
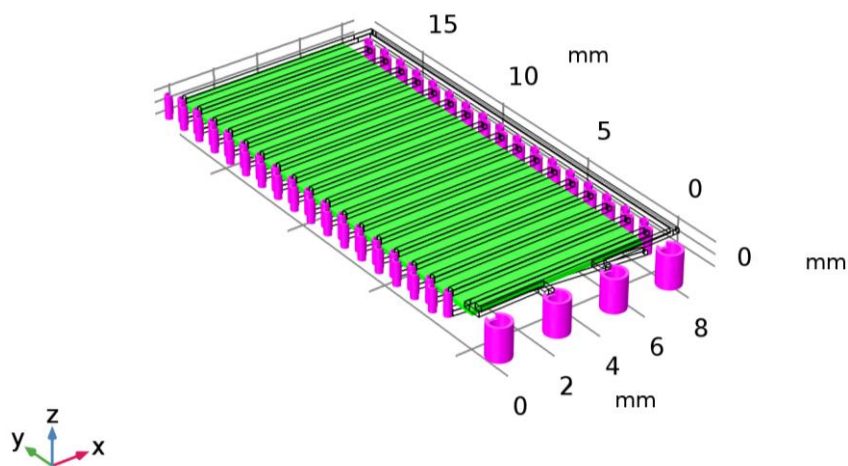


Рисунок 3.4 – Конструкция образца 4 RTD-феррозонда

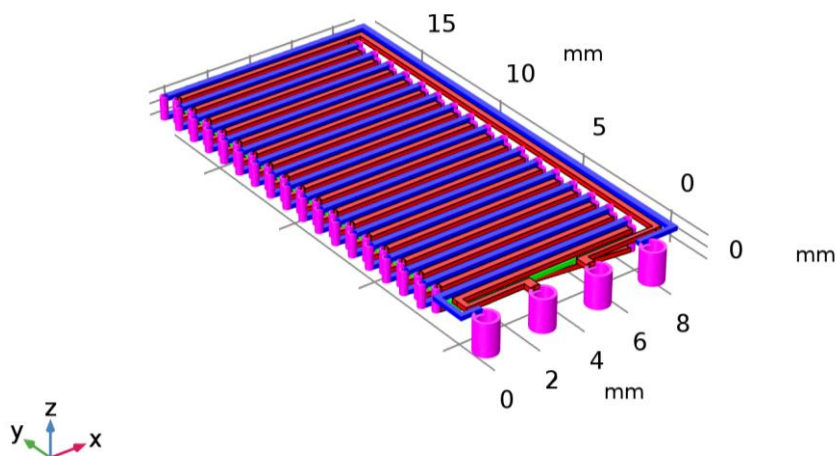
Преимущества такой геометрии датчика повторяют преимущества образца 2. Недостатки скомпенсированы большим числом витков в катушках.

Образец 5

Образец 5: выполнен на основе одностержневого сердечника. Габаритные размеры сердечника $18 \times 7,5 \times 0,2$ мм. Обмотки возбуждения и измерения имеют по 18 витков, витки разных обмоток чередуются друг за другом. Витки образуются соединением через переходные отверстия проводников, находящихся на двух печатных платах. Геометрия датчика представлена на рисунке – 3.5.



а) – сердечник



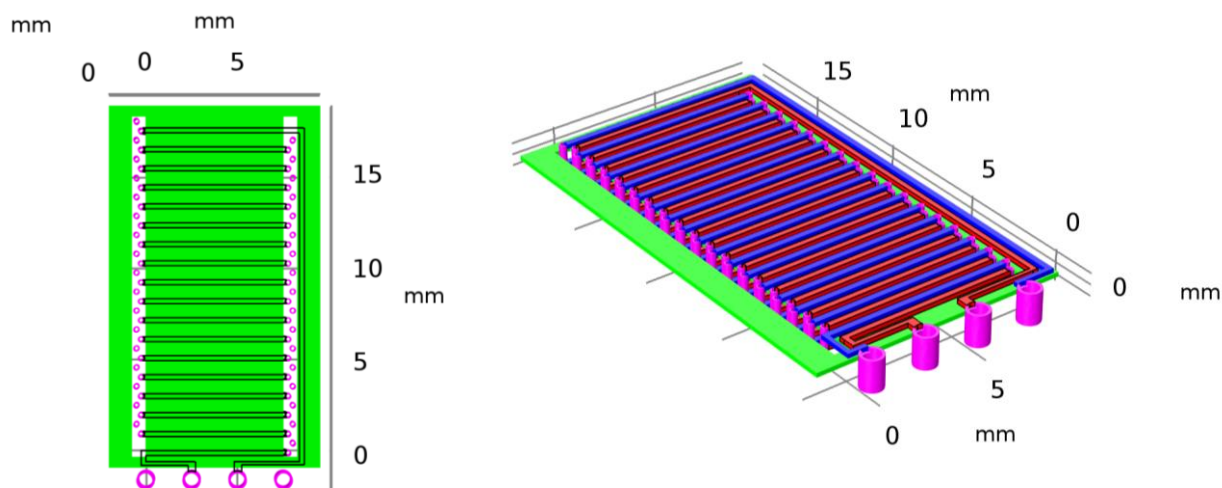
б) – катушки обмотки возбуждения и измерительная обмотка

Рисунок 3.5 – Конструкция образца 5 RTD-феррозонда

Данный вариант геометрии датчика обладает меньшим числом витков в контуре возбуждения и в контуре измерения, по сравнению с предыдущими конструкциями. Однако, такой датчик намного проще в изготовлении, так как состоит только из двух печатных плат. Разомкнутый сердечник должен обладать большей чувствительностью в сравнении с разомкнутым, но при этом, для его возбуждения требуется больший ток.

Образец 6

Образец 6: выполнен на основе плоского броневое сердечника. Габаритные размеры сердечника $12,5 \times 20 \times 0,2$ мм. Центральную стойку сердечника охватывают обмотка измерения и возбуждения, состоящие из 18 витков каждая. Витки образуются соединением через переходные отверстия проводников, находящихся на двух печатных платах. Геометрия датчика представлена на рисунке 3.6.



а) – сердечник

б) – обмотка возбуждения и измерительная обмотка

Рисунок 3.6 – Конструкция образца 6 RTD-феррозонда

Данный вариант, также, как и образец 5, обладает меньшим числом витков в контуре возбуждения и в контуре измерения. Однако, замкнутая форма сердечника позволяет снизить амплитуду тока возбуждения.

3.2 Моделирование конструкций RTD-феррозондовых датчиков

Моделирование осуществлялось по методике, описанной в Главе 2. Для проведения моделирования все геометрии конструкций датчиков претерпели ряд упрощений не влияющих на результаты расчетов. В частности, отдельные витки были заменены на цилиндрические обмотки. Также каждая конструкция была разделена на 4 симметричные части в плоскостях осей XZ и XY , три из четырех частей были удалены и расчеты велись только для последней. Такие изменения позволили снизить число конечных элементов и ускорить расчет без потери точности расчетов.

В таблице 3.1 приведены параметры модели Джилса-Атертона для материала ферромагнитного сердечника типа Finemet FT-3H в виде диагональных матриц. Так как в открытых источниках для данного типа материала отсутствуют параметры модели Джилса-Атертона, то они были определены в процессе итерационного моделирования. Верификация результатов моделирования проведена на основе сравнения с графо-аналитическими данными, представленными в документации на материал производителем.

Таблица 3.1 – Параметры модели Джилса-Атертона для материала сердечника типа Finemet FT-3H

Параметр	Значение	Единица измерения
Междоменная связь: α	{0.81, 0.74, 0.81}	$\cdot 10^{-6}$
Максимальная намагниченность: M_s	{1.11, 0.98, 1.11}	$\cdot 10^6$ А/мм
Параметр формы функция Ланжевена: a	{1.05, 0.92, 1.05}	А/м
Обратимость: c	{512, 481, 512}	$\cdot 10^{-3}$
Постоянная необратимой деформации доменных стенок: k	{0.90, 0.73, 0.90}	А/м

Полученная зависимость магнитной индукции в сердечнике от напряженности магнитного поля представлена на рисунке 3.7.

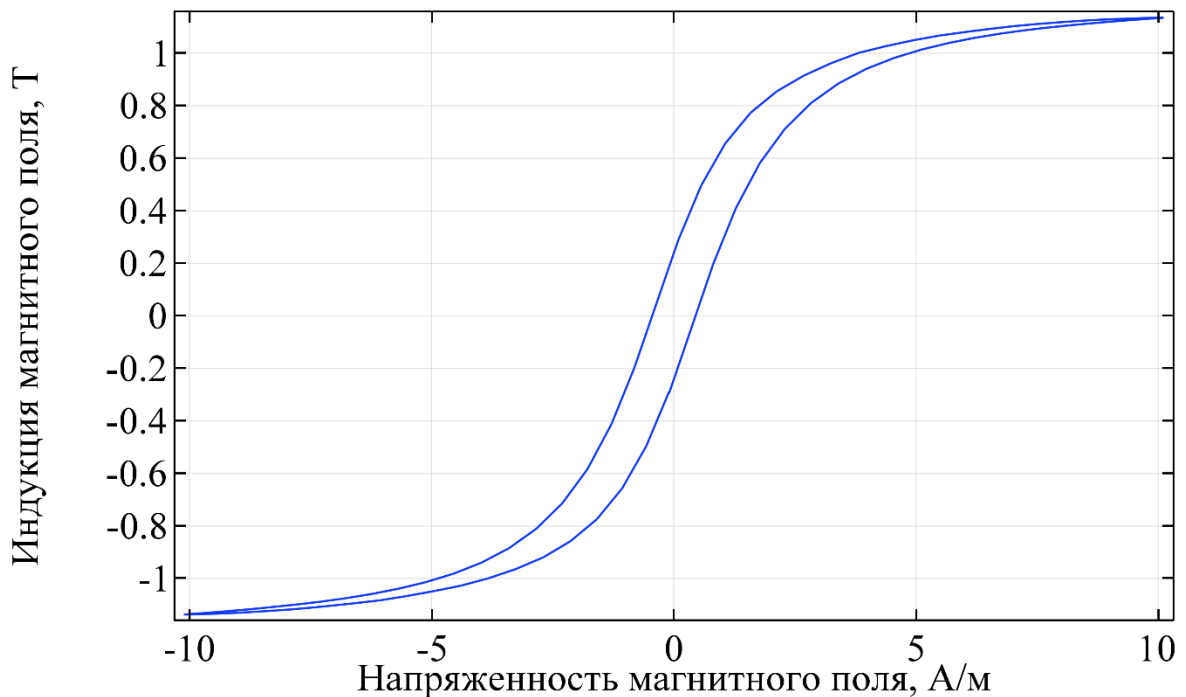


Рисунок 3.7 – Кривая намагниченности модели сердечника с учетом гистерезисных свойств

После проведения расчетов был получен набор данных, анализируя который, можно судить о чувствительности разработанных образцов к воздействию внешнего магнитного поля. Результаты моделирования сгруппированы по образцам.

Образец 1

На рисунке 3.8 представлено распределение индукции магнитного поля в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г) образца 1. Цветовая шкала показывает величину модуля индукции магнитного поля в каждой точке. Стрелки показывают направление магнитного потока. Результаты представлены для значения внешнего магнитного поля 100 мкТл при токе возбуждения 750 мА.

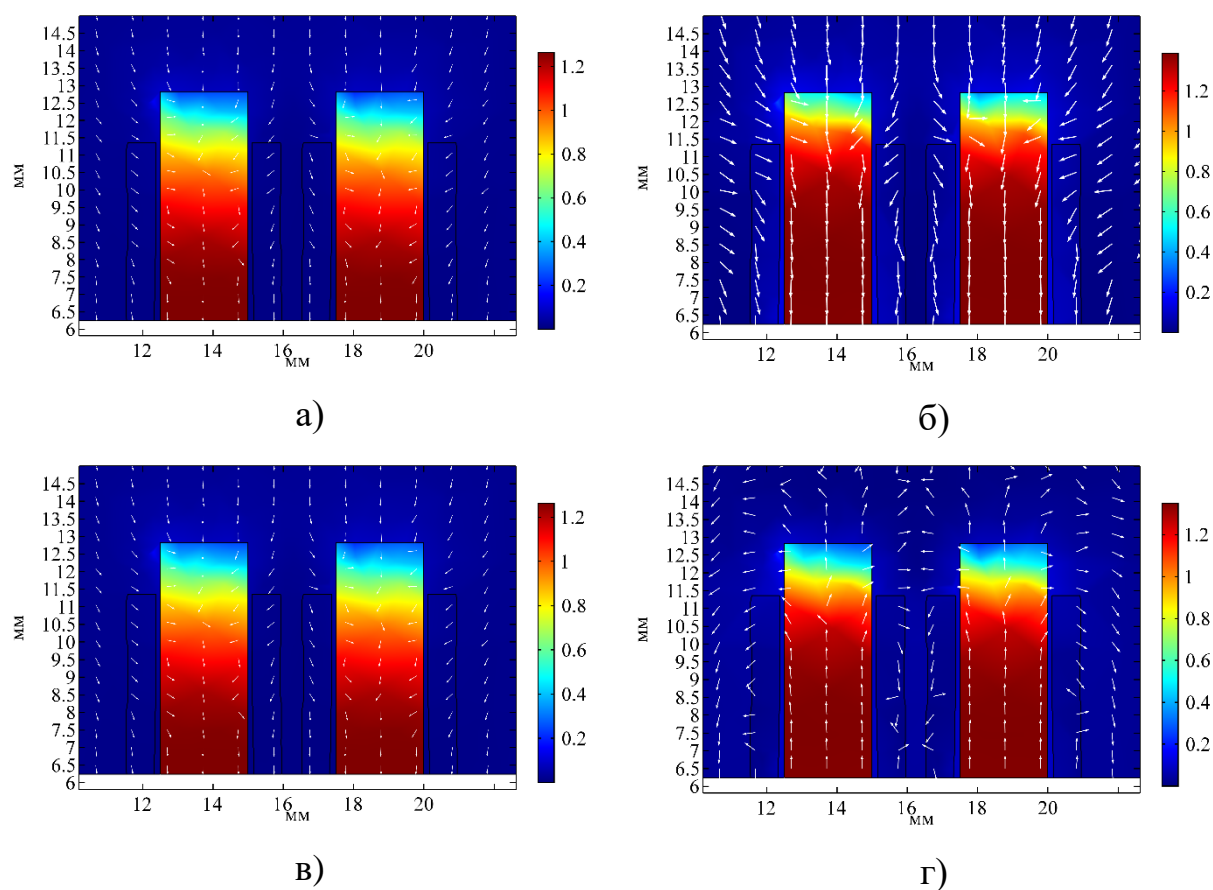
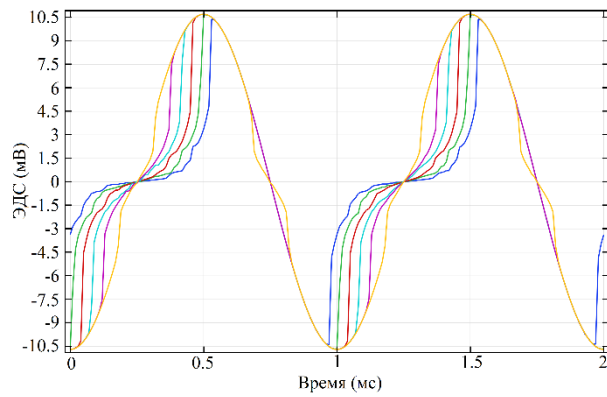


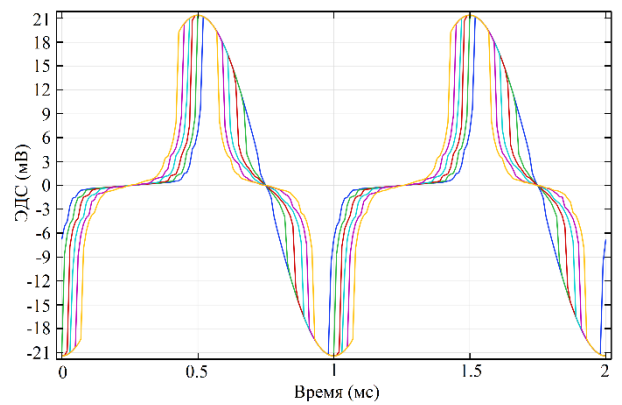
Рисунок 3.8 – График распределения магнитной индукции в сердечнике образца 1 в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г)

Наведенная ЭДС в измерительной катушке образца 1 будет определяться как производная от магнитного потока, пронизывающего центральную стойку магнитопровода с измерительной катушкой. Моделирование проведено для значений внешнего магнитного поля: 10 нТл, 100 нТл, 500 нТл, 1 мкТл, 5 мкТл, 10 мкТл, 20 мкТл, 40 мкТл, 60 мкТл, 80 мкТл и 100 мкТл.

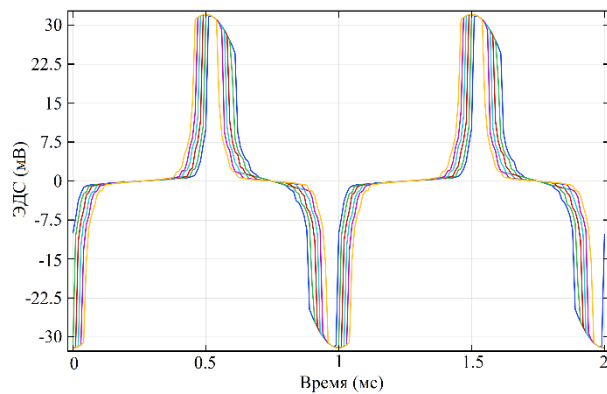
Графики ЭДС в измерительной катушке при различных значениях внешнего магнитного поля, полученные в результате моделирования приведены на рисунке 3.9.



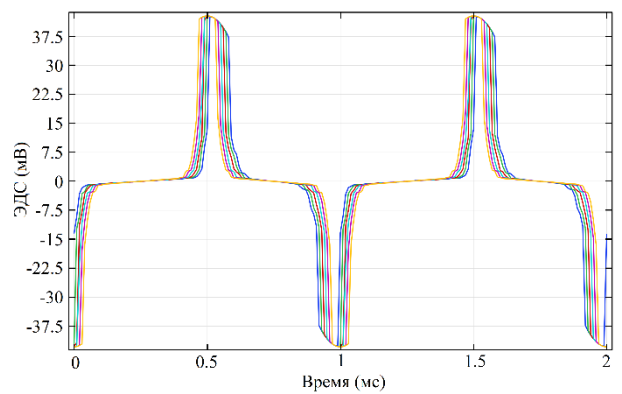
а) – ток возбуждения 125 мА



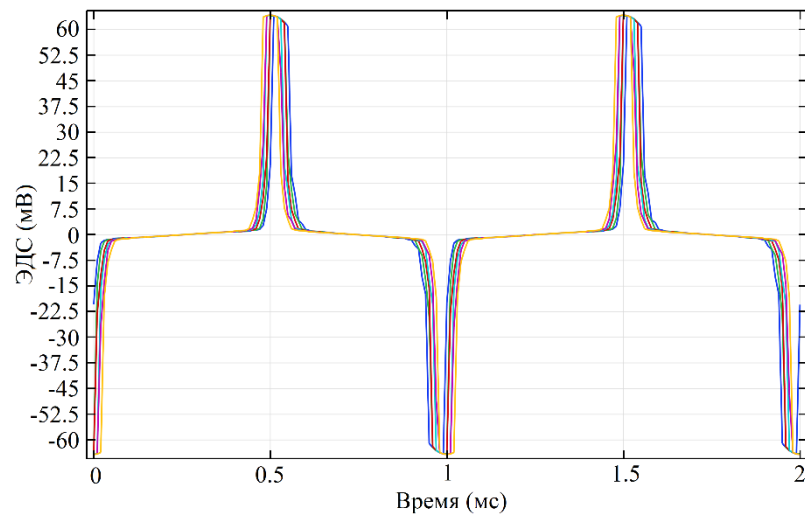
б) – ток возбуждения 250 мА



в) – ток возбуждения 375 мА



г) – ток возбуждения 500 мА



д) – ток возбуждения 750 мА

Рисунок 3.9 – ЭДС в измерительной катушке образца 1 с учетом гистерезисных свойств сердечника при различных значениях внешнего магнитного поля (желтый – 0 мкТл, розовый – 20 мкТл, голубой – 40 мкТл, красный – 60 мкТл, зеленый – 80 мкТл, синий – 100 мкТл)

Результаты моделирования показали, что при отсутствии внешнего магнитного поля, выходной сигнал представляет из себя синусоиду, искаженную из-за насыщения сердечника. Искажение синусоиды происходит симметрично относительно нуля ЭДС. При возникновении внешнего магнитного поля искажения проявляются несимметрично относительно половины периода.

Совместив результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения, получили зависимости изменения временных интервалов (RTD-смещения) в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего магнитного поля.

Зависимости RTD-смещения в образце 1 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл приведены на рисунке 3.10, для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл приведены на рисунке 3.11

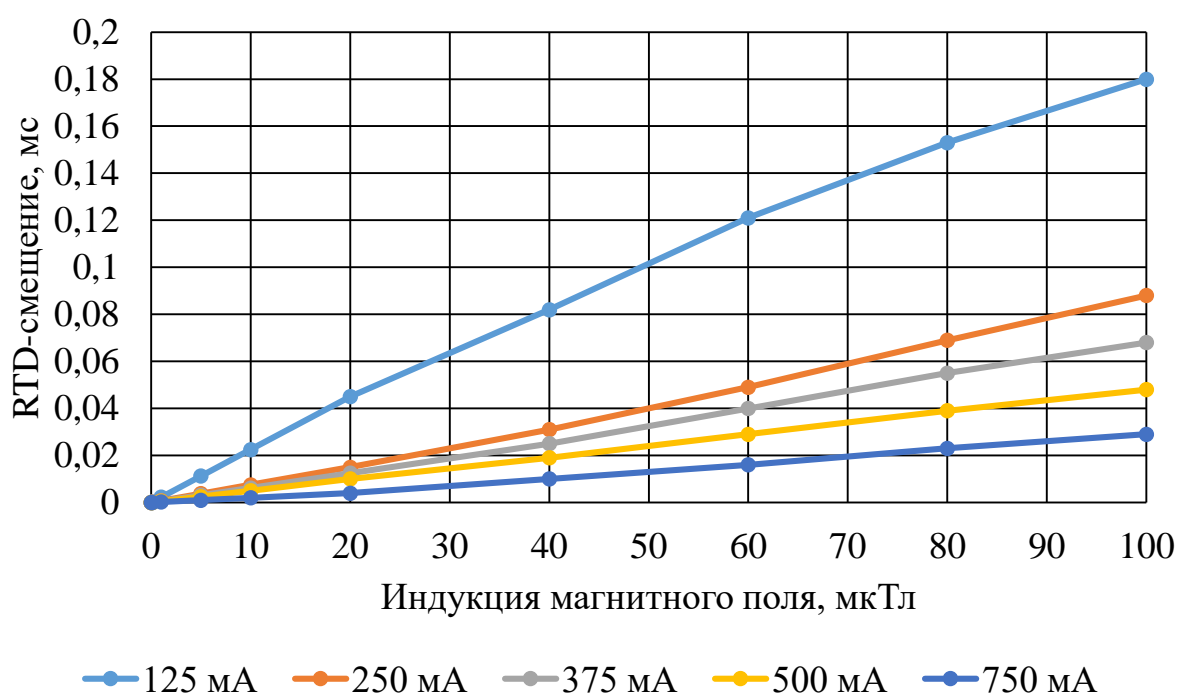


Рисунок 3.10 – Зависимости RTD-смещения в образце 1 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.

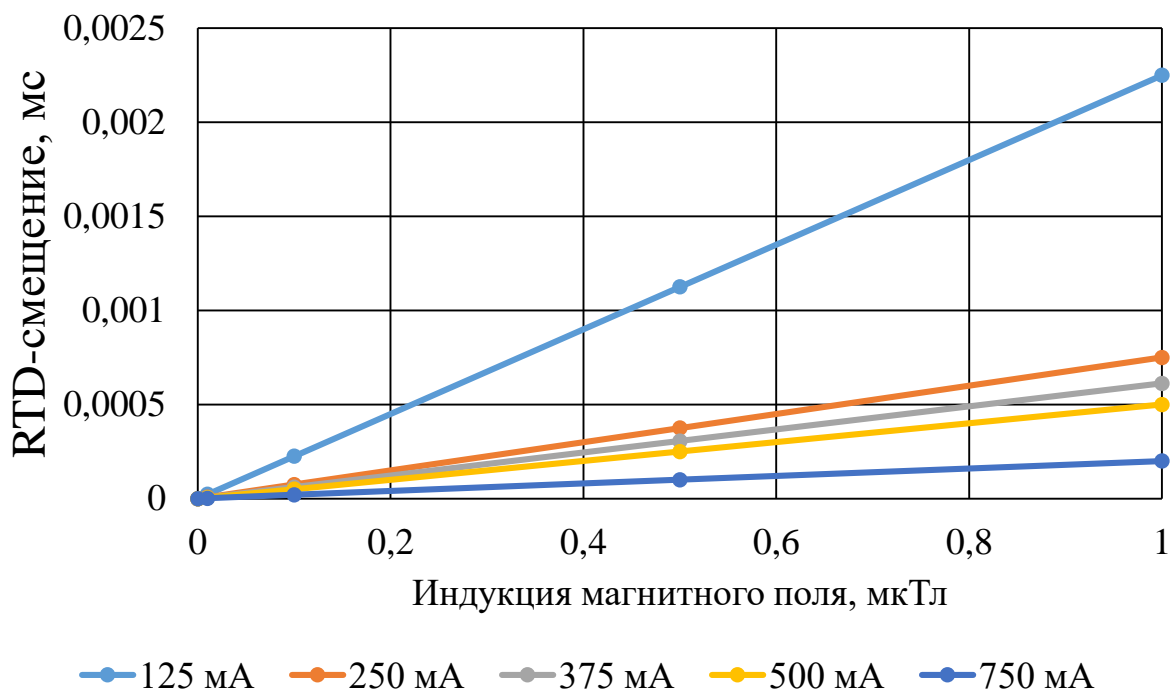


Рисунок 3.11 – Зависимости RTD-смещения в образце 1 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.

Моделирование показывает, что в области больших значений измеряемого магнитного поля возникает нелинейность зависимости RTD-смещения, что сопровождается уменьшением амплитуды выходного сигнала. В области меньших значений измеряемого магнитного поля зависимость становится строго линейной. Большой относительный шаг изменения магнитного поля при моделировании RTD-феррозондового преобразователя в слабом поле обусловлен растущей вычислительной мощностью, необходимой при моделировании слабых полей. Для обеспечения отображаемого результата моделирования при поле 10 нТл, требуется проводить моделирование с шагом, обеспечивающим 10^8 точек на период. Итоговое моделирование занимает около 20 часов для одного значения тока, а объем полученных данных составляет порядка 100 Гб.

Чувствительность образца 1 при различных значениях тока в диапазоне от 0 до 10 мкТл сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Аппроксимированные значения чувствительности образца 1 при разных значениях тока возбуждения

Ток возбуждения, мА	125	250	375	500	750
Чувствительность, с/Тл	2,26	0,751	0,62	0,498	0,199

Согласно выводам, описанным в Главе 2, чувствительность датчика возрастает при снижении тока возбуждения. Однако, при этом уменьшается амплитуда выходного сигнала. Снижение амплитуды выходного сигнала до уровня шумов значительно усложняет возможность получения достоверного результата и увеличивает погрешность измерения. На рисунке 3.12 представлена зависимость ЭДС выходного сигнала от тока возбуждения.

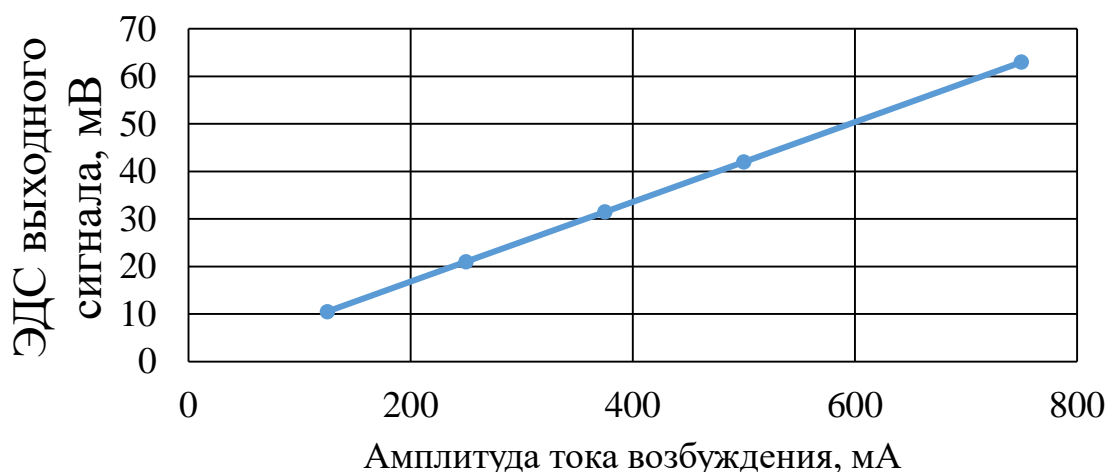


Рисунок 3.12 – Зависимость ЭДС выходного сигнала от амплитуды тока возбуждения образца 1

Таким образом, для рассматриваемой конструкции RTD-феррозондового преобразователя рекомендуемым будет ток возбуждения амплитудой около 125 мА.

Образец 2

На рисунке 3.13 представлено распределение индукции магнитного поля в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и

через три четверти периода (г) образца 2. Цветовая шкала показывает величину модуля индукции магнитного поля в каждой точке. Стрелки показывают направление магнитного потока. Результаты представлены для значения внешнего магнитного поля 100 мкТл при токе возбуждения 150 мА.

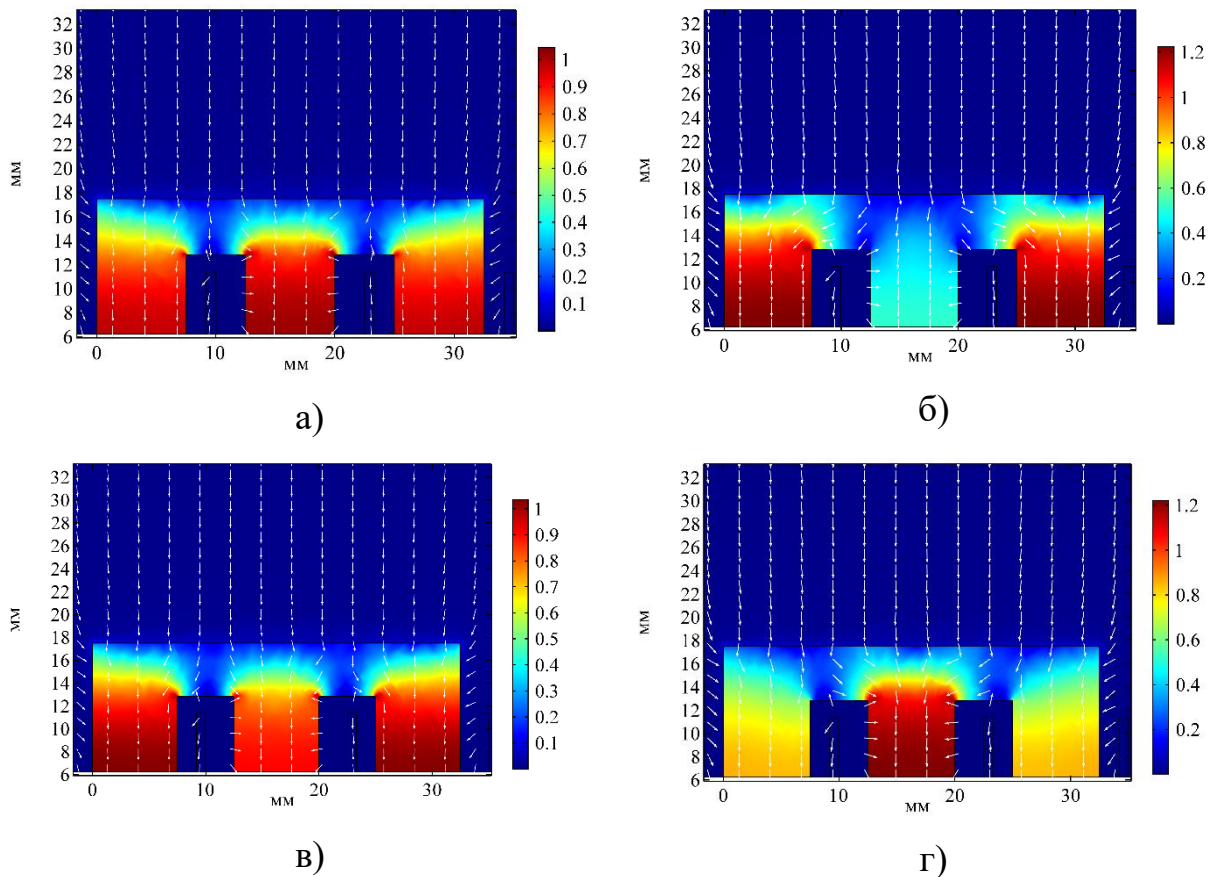
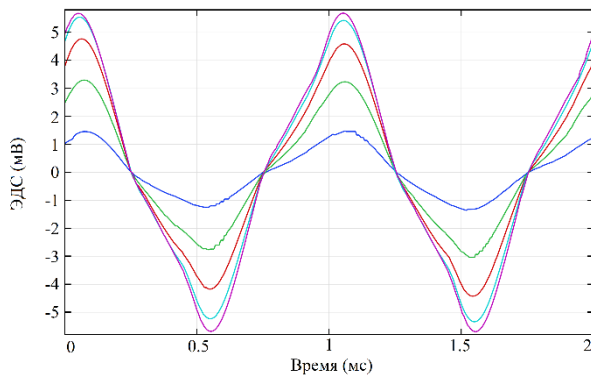
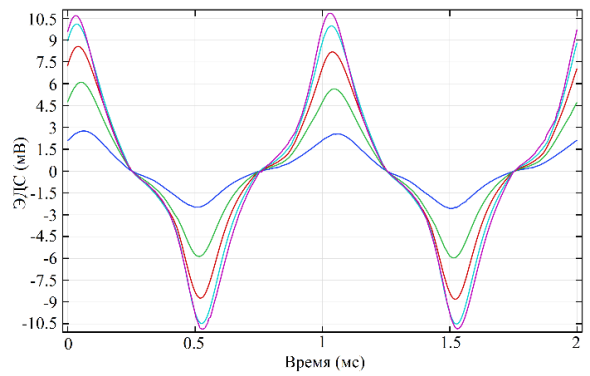


Рисунок 3.13 – График распределения магнитной индукции в сердечнике образца 2 в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г)

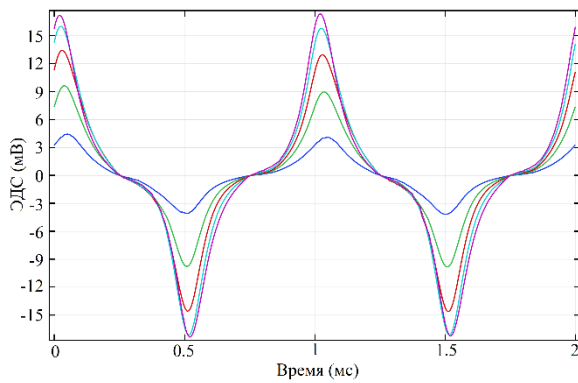
Графики ЭДС в измерительной катушке при различных значениях внешнего магнитного поля, полученные в результате моделирования приведены на рисунке 3.14. Моделирование проведено для значений внешнего магнитного поля: 10 нТл, 100 нТл, 500 нТл, 1 мкТл, 5 мкТл, 10 мкТл, 25 мкТл, 50 мкТл, 75 мкТл и 100 мкТл



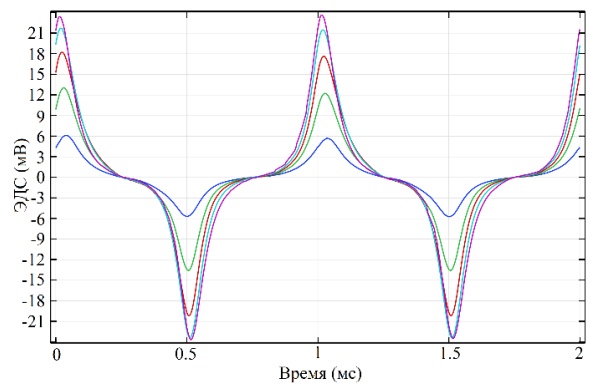
а) – ток возбуждения 25 мА



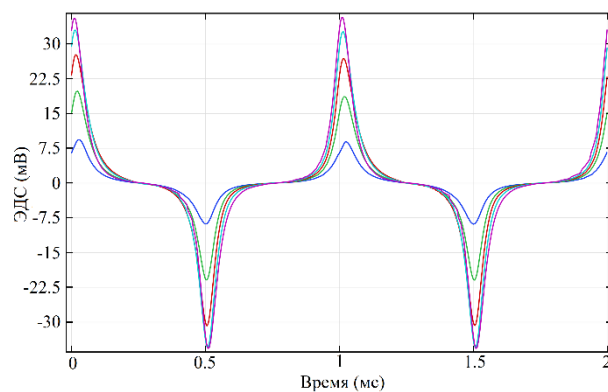
б) – ток возбуждения 50 мА



в) – ток возбуждения 75 мА



г) – ток возбуждения 100 мА



д) – ток возбуждения 150 мА

Рисунок 3.14 – ЭДС в измерительной катушке образца 2 с учетом гистерезисных свойств сердечника при различных значениях внешнего магнитного поля (розовый – 0 мкТл, голубой – 25 мкТл, красный – 50 мкТл, зеленый – 75 мкТл, синий – 100 мкТл)

Совместив результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения, получили зависимости изменения временных интервалов

(RTD-смещения) в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего магнитного поля.

Зависимости RTD-смещения в образце 2 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл приведены на рисунке 3.15, для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл приведены на рисунке 3.16

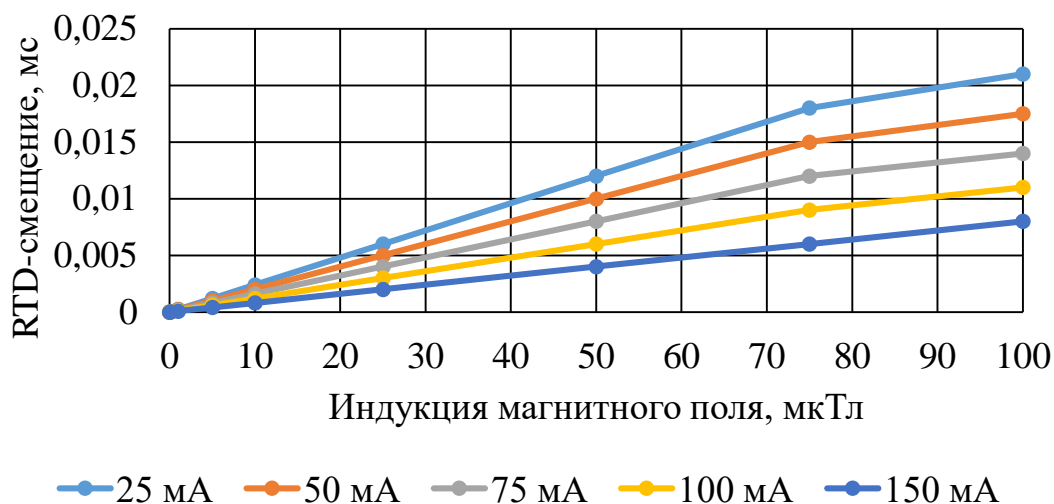


Рисунок 3.15 – Зависимости RTD-смещения в образце 2 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.

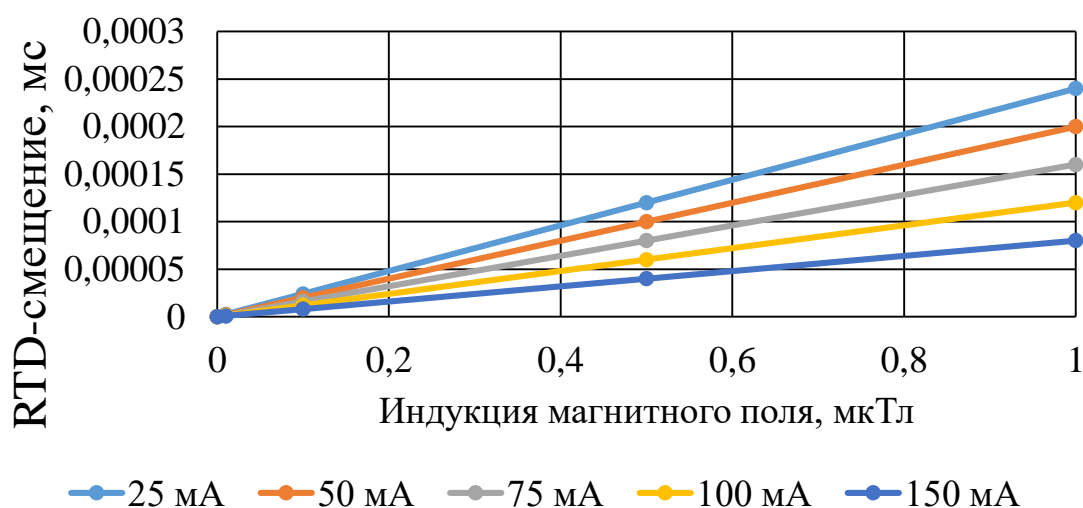


Рисунок 3.16 – Зависимости RTD-смещения в образце 2 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.

Чувствительность образца 2 при различных значениях тока в диапазоне от 0 до 10 мкТл сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Аппроксимированные значения чувствительности образца 2 при разных значениях тока возбуждения

Ток возбуждения, мА	25	50	75	100	150
Чувствительность, с/Тл	0,244	0,207	0,151	0,119	0,078

На рисунке 3.17 представлена зависимость ЭДС выходного сигнала от тока возбуждения для образца 2.

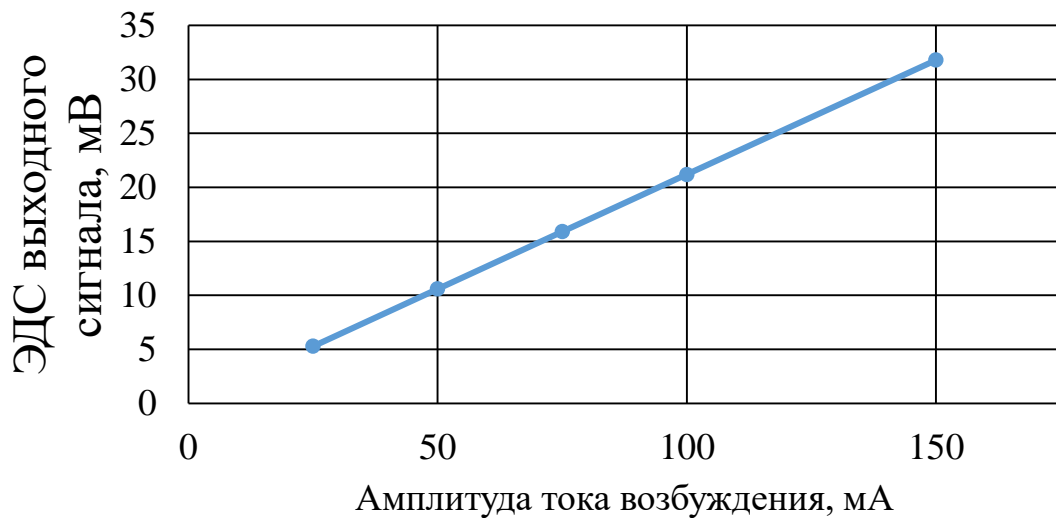


Рисунок 3.17 – Зависимость ЭДС выходного сигнала от амплитуды тока возбуждения образца 2

Таким образом, для рассматриваемой конструкции RTD-феррозондового преобразователя рекомендуемым будет ток возбуждения амплитудой 25-50 мА.

Образец 3

На рисунке 3.18 представлено распределение индукции магнитного поля в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и

через три четверти периода (г) образца 3. Цветовая шкала показывает величину модуля индукции магнитного поля в каждой точке. Стрелки показывают направление магнитного потока. Результаты представлены для значения внешнего магнитного поля 100 мкТл при токе возбуждения 750 мА.

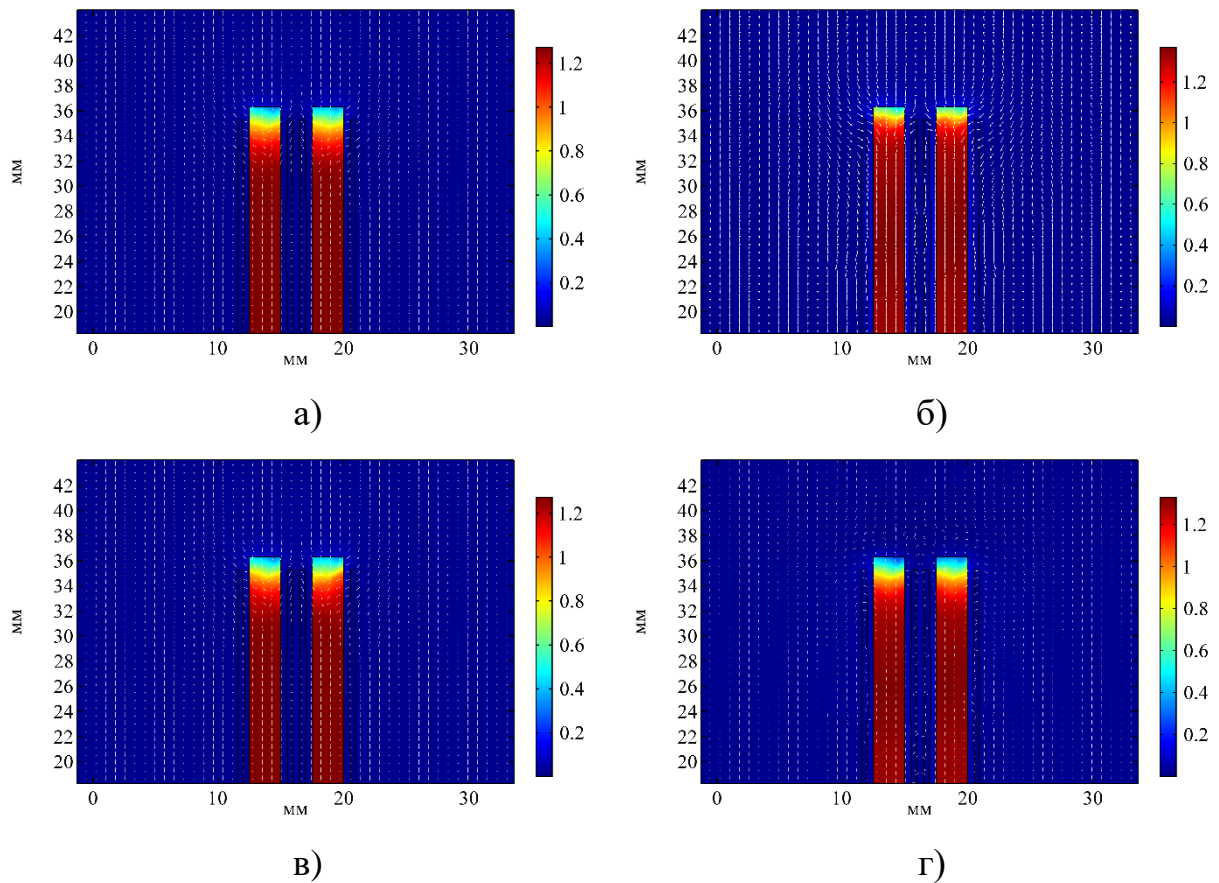
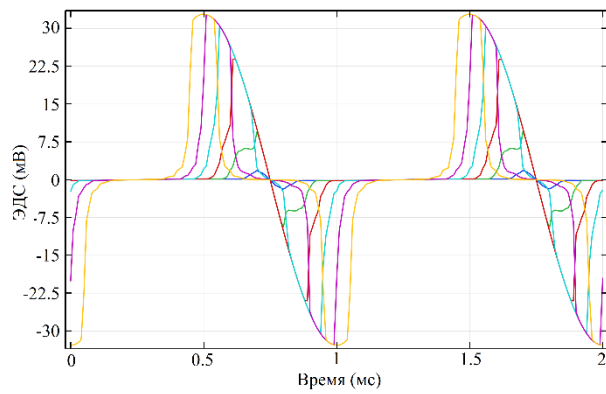
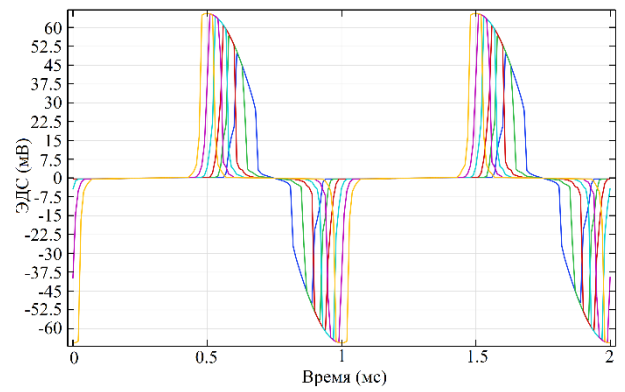


Рисунок 3.18 – График распределения магнитной индукции в сердечнике образца 3 в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г)

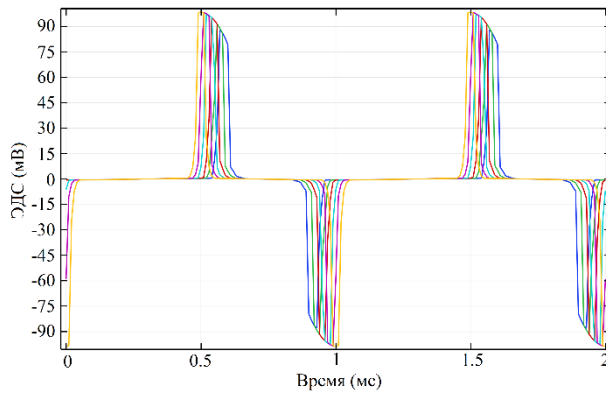
Графики ЭДС в измерительной катушке при различных значениях внешнего магнитного поля, полученные в результате моделирования приведены на рисунке 3.19. Моделирование проведено для значений внешнего магнитного поля: 10 нТл, 100 нТл, 500 нТл, 1 мкТл, 5 мкТл, 10 мкТл, 20 мкТл, 40 мкТл, 60 мкТл, 80 мкТл и 100 мкТл.



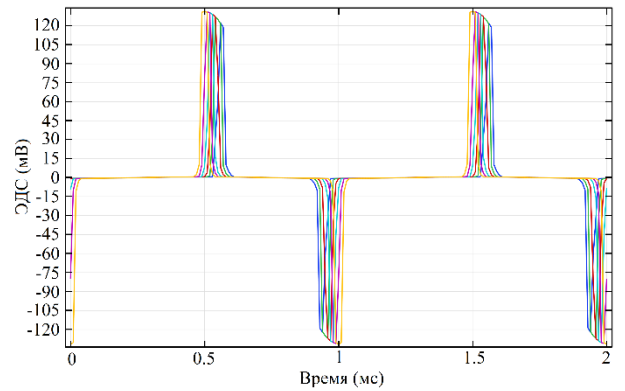
а) – ток возбуждения 125 мА



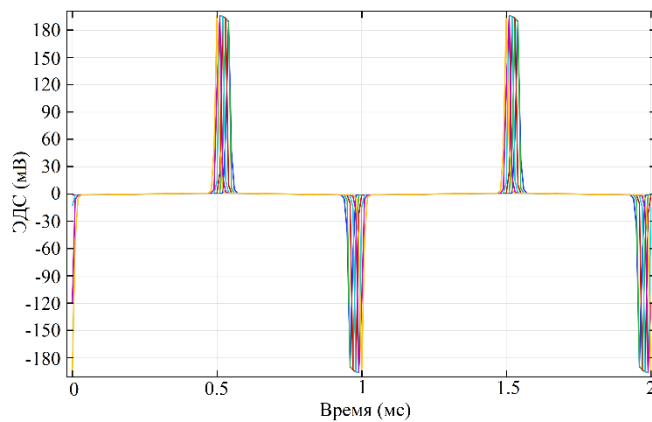
б) – ток возбуждения 250 мА



в) – ток возбуждения 375 мА



г) – ток возбуждения 500 мА



д) – ток возбуждения 750 мА

Рисунок 3.19 – ЭДС в измерительной катушке образца 3 с учетом гистерезисных свойств сердечника при различных значениях внешнего поля (желтый – 0 мкТл, розовый – 20 мкТл, голубой – 40 мкТл, красный – 60 мкТл, зеленый – 80 мкТл, синий – 100 мкТл)

Совместив результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения, получили зависимости изменения временных интервалов (RTD-

смещения) в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего магнитного поля.

Зависимости RTD-смещения в образце 3 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл приведены на рисунке 3.20, для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл приведены на рисунке 3.21

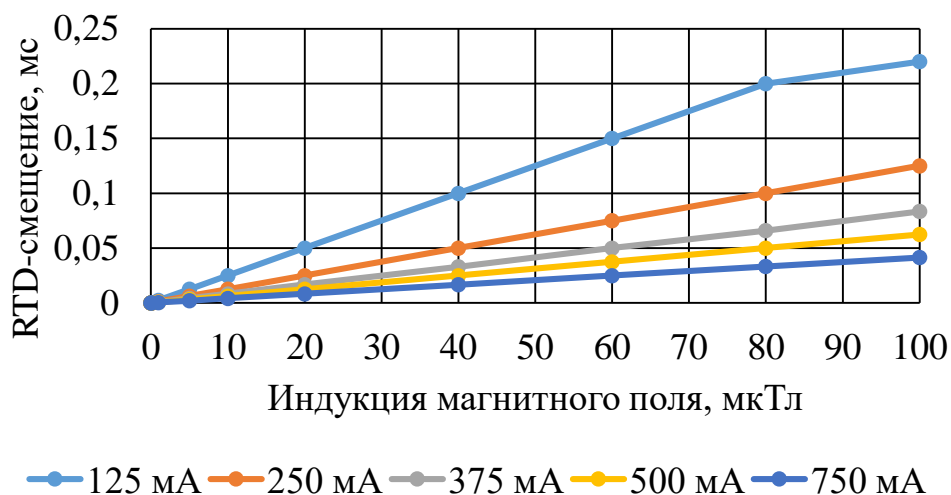


Рисунок 3.20 – Зависимости RTD-смещения в образце 3 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.

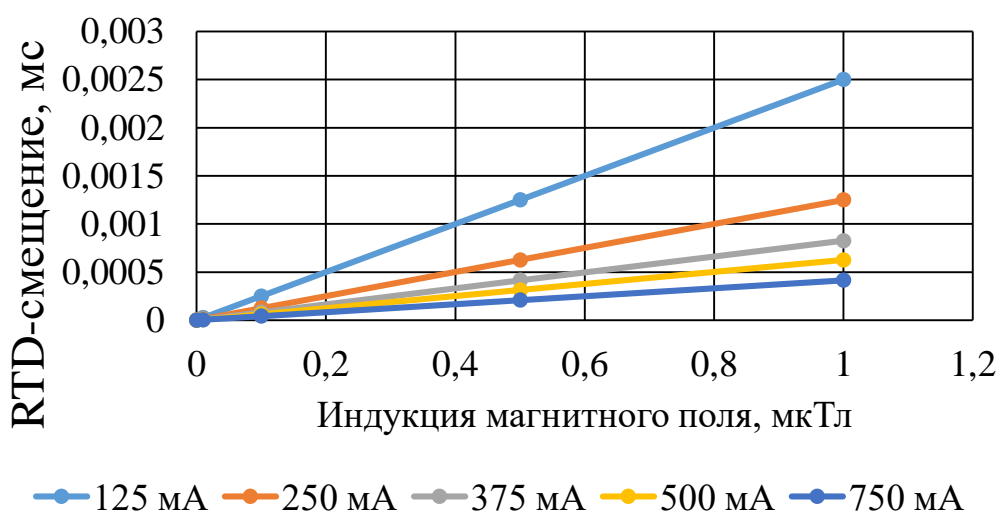


Рисунок 3.21 – Зависимости RTD-смещения в образце 3 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.

Чувствительность образца 3 при различных значениях тока в диапазоне от 0 до 10 мкТл сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Аппроксимированные значения чувствительности образца 3 при разных значениях тока возбуждения

Ток возбуждения, мА	125	250	375	500	750
Чувствительность, с/Тл	2,51	1,248	0,82	0,622	0,408

На рисунке 3.22 представлена зависимость ЭДС выходного сигнала от тока возбуждения для образца 3.

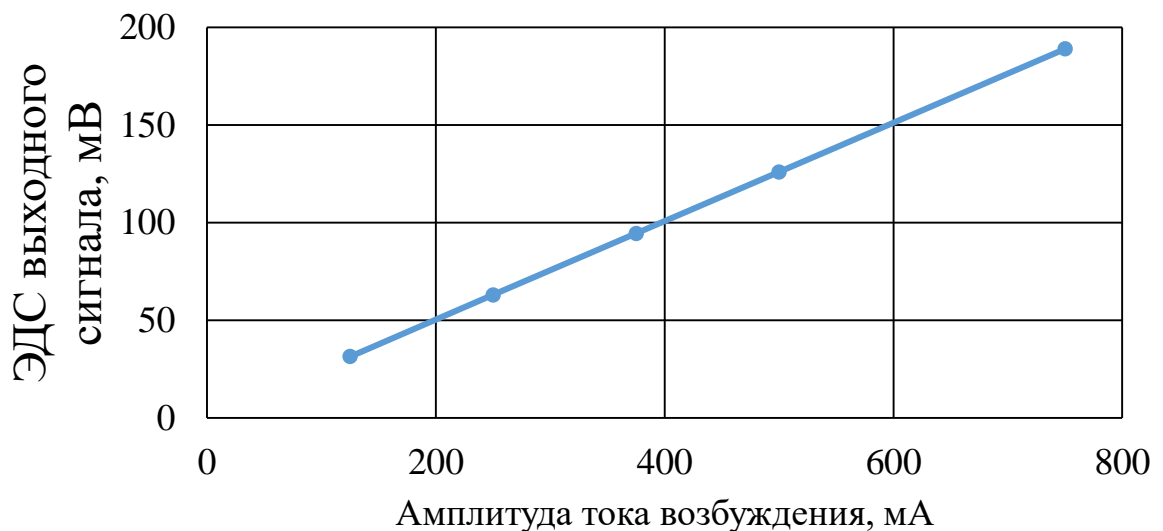


Рисунок 3.22 – Зависимость ЭДС выходного сигнала от амплитуды тока возбуждения образца 3

Таким образом, для рассматриваемой конструкции RTD-феррозондового преобразователя рекомендуемым будет ток возбуждения амплитудой 100-125 мА.

Образец 4

На рисунке 3.23 представлено распределение индукции магнитного поля в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и

через три четверти периода (г) образца 4. Цветовая шкала показывает величину модуля индукции магнитного поля в каждой точке. Стрелки показывают направление магнитного потока. Результаты представлены для значения внешнего магнитного поля 100 мкТл при токе возбуждения 150 мА.

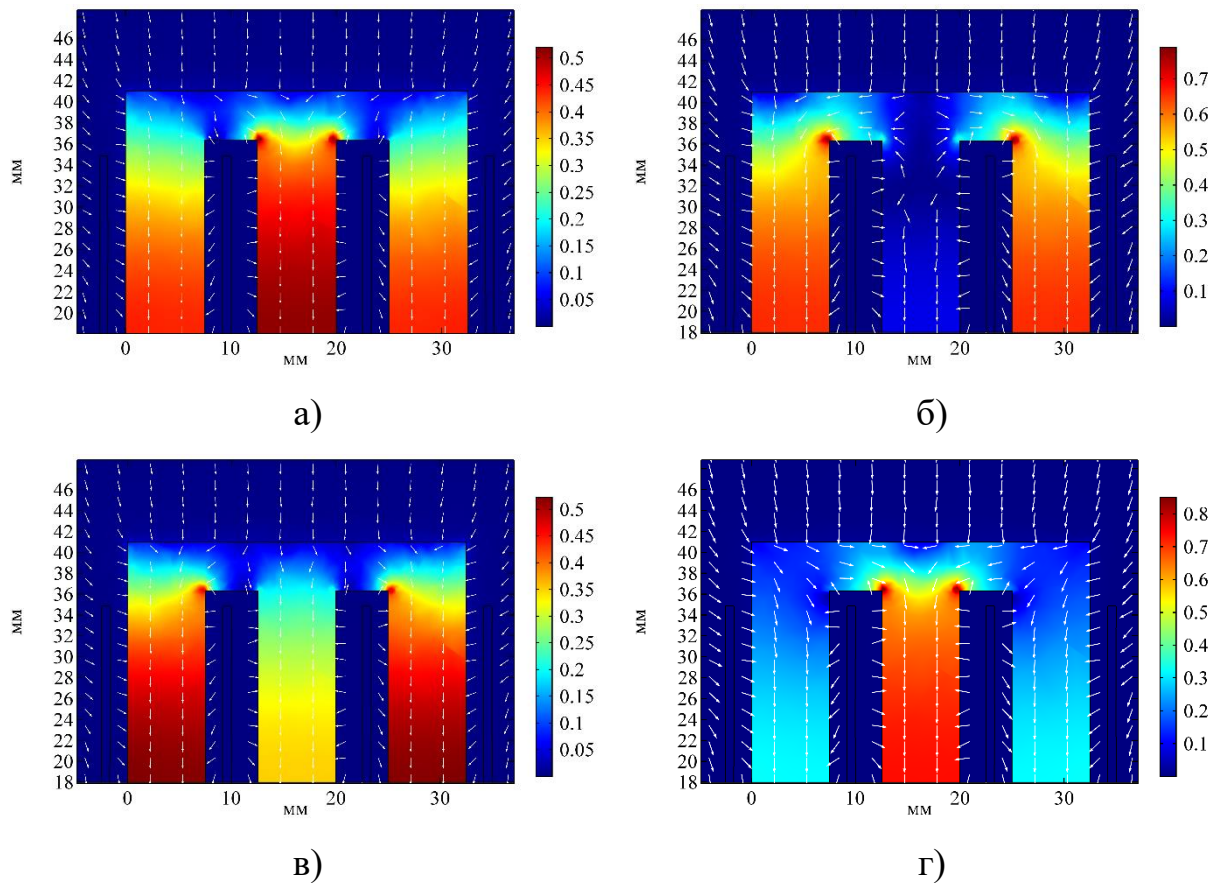
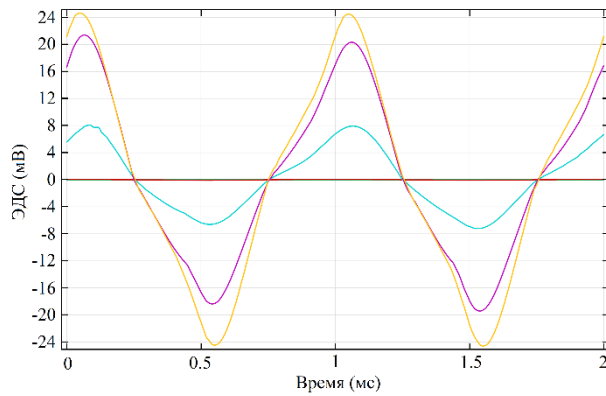
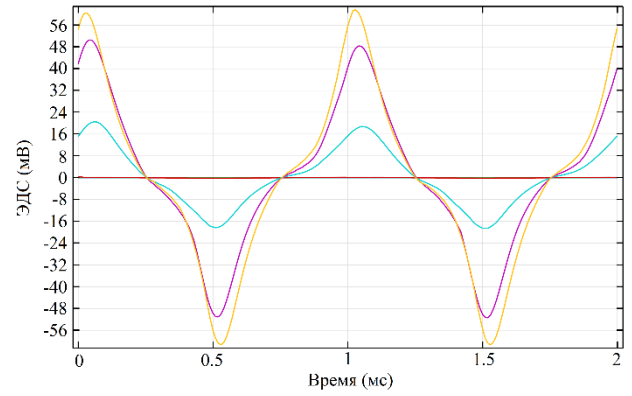


Рисунок 3.23 – График распределения магнитной индукции образца 4 в сердечнике в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г)

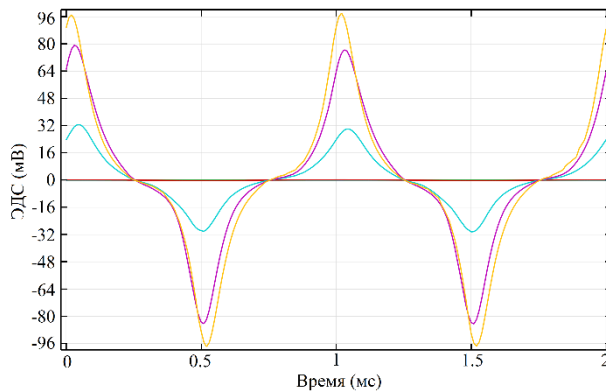
Графики ЭДС в измерительной катушке при различных значениях внешнего магнитного поля, полученные в результате моделирования приведены на рисунке 3.24. Моделирование проведено для значений внешнего магнитного поля: 10 нТл, 100 нТл, 500 нТл, 1 мкТл, 5 мкТл, 10 мкТл, 20 мкТл, 40 мкТл, 60 мкТл, 80 мкТл и 100 мкТл.



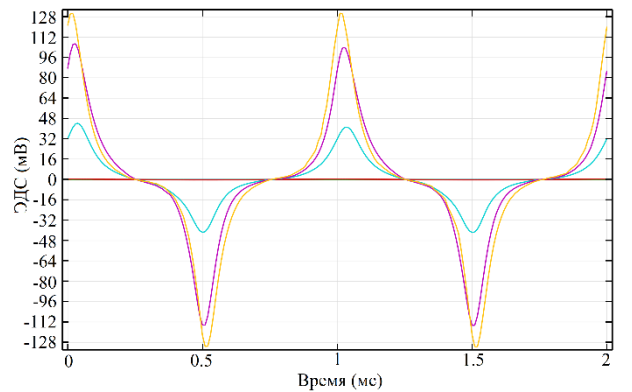
а) – ток возбуждения 25 мА



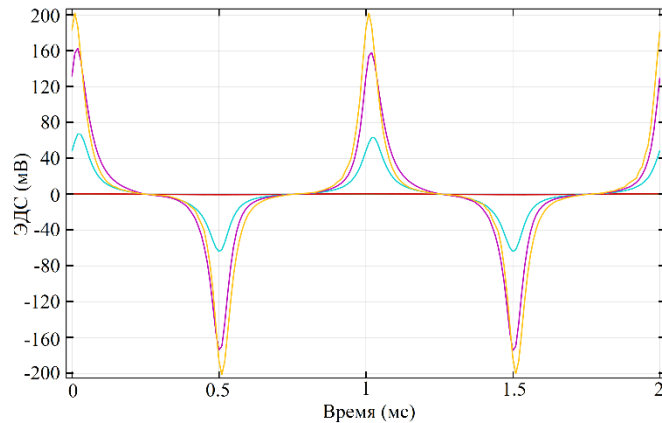
б) – ток возбуждения 50 мА



в) – ток возбуждения 75 мА



г) – ток возбуждения 100 мА



д) – ток возбуждения 150 мА

Рисунок 3.24 – ЭДС в измерительной катушке образца 4 с учетом гистерезисных свойств сердечника при различных значениях внешнего поля (желтый – 0 мкТл, розовый – 20 мкТл, голубой – 40 мкТл, красный – 60 мкТл, зеленый – 80 мкТл, синий – 100 мкТл)

Совместив результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения, получили зависимости изменения временных интервалов (RTD-

смещения) в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего магнитного поля.

Зависимости RTD-смещения в образце 4 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл приведены на рисунке 3.25, для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл приведены на рисунке 3.26

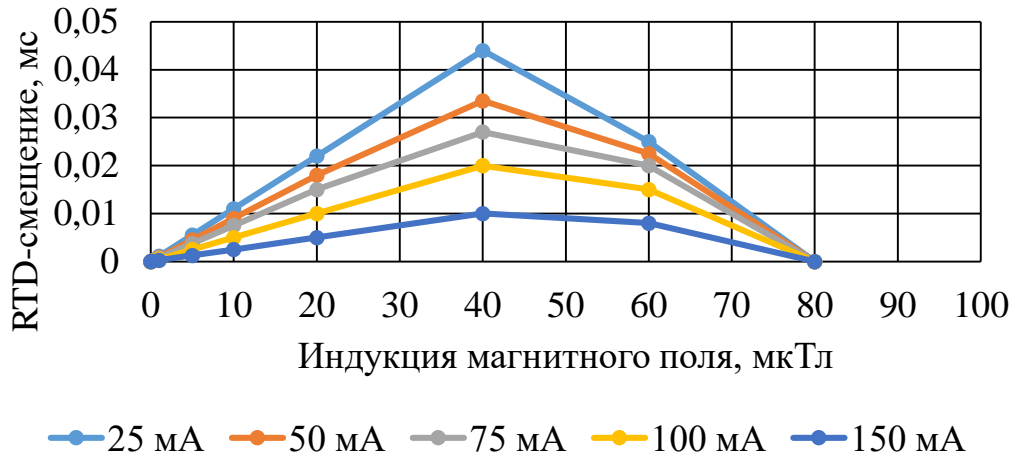


Рисунок 3.25 – Зависимости RTD-смещения в образце 4 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.

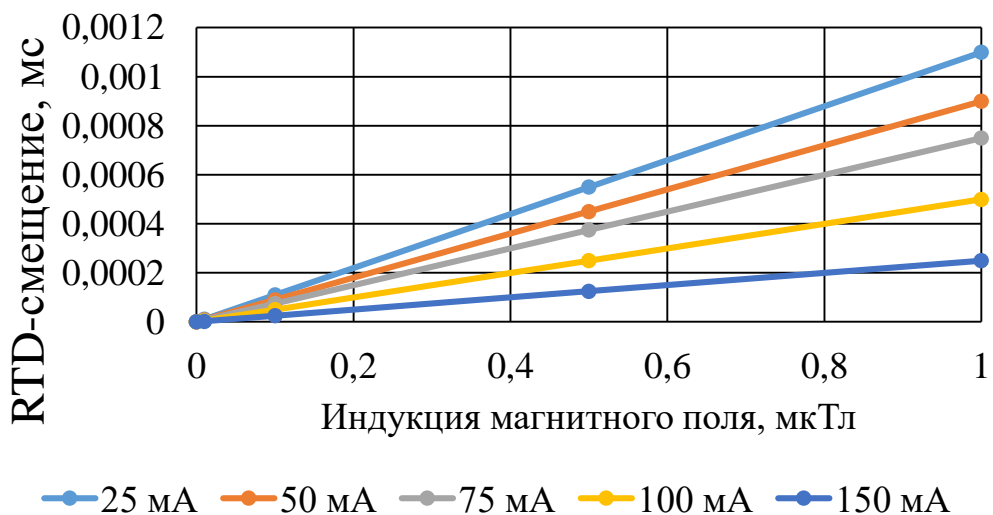


Рисунок 3.26 – Зависимости RTD-смещения в образце 4 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.

Чувствительность образца 4 при различных значениях тока в диапазоне от 0 до 10 мкТл сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Аппроксимированные значения чувствительности образца 4 при разных значениях тока возбуждения

Ток возбуждения, мА	25	50	75	100	150
Чувствительность, с/Тл	1,13	0,906	0,744	0,492	0,241

На рисунке 3.27 представлена зависимость ЭДС выходного сигнала от тока возбуждения для образца 4.

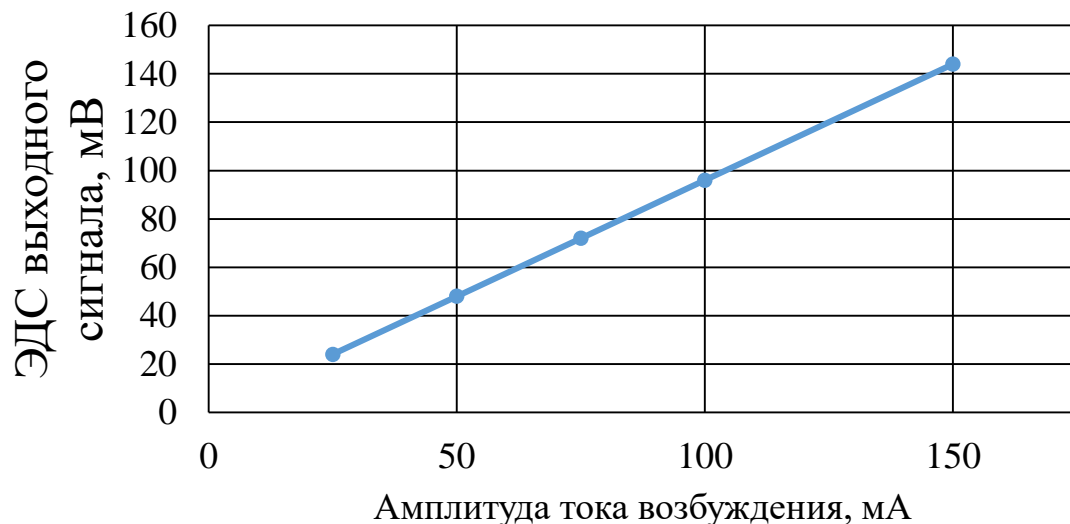


Рисунок 3.27 – Зависимость ЭДС выходного сигнала от амплитуды тока возбуждения образца 4

Для образца 4 рекомендуемым будет ток возбуждения амплитудой 25-50 мА. При этом воздействия внешнего магнитного поля выше 40 мкТл выводит датчик в нелинейную область чувствительности.

Образец 5

На рисунке 3.28 представлено распределение индукции магнитного поля в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и

через три четверти периода (г) образца 5. Цветовая шкала показывает величину модуля индукции магнитного поля в каждой точке. Стрелки показывают направление магнитного потока. Результаты представлены для значения внешнего магнитного поля 100 мкТл при токе возбуждения 750 мА.

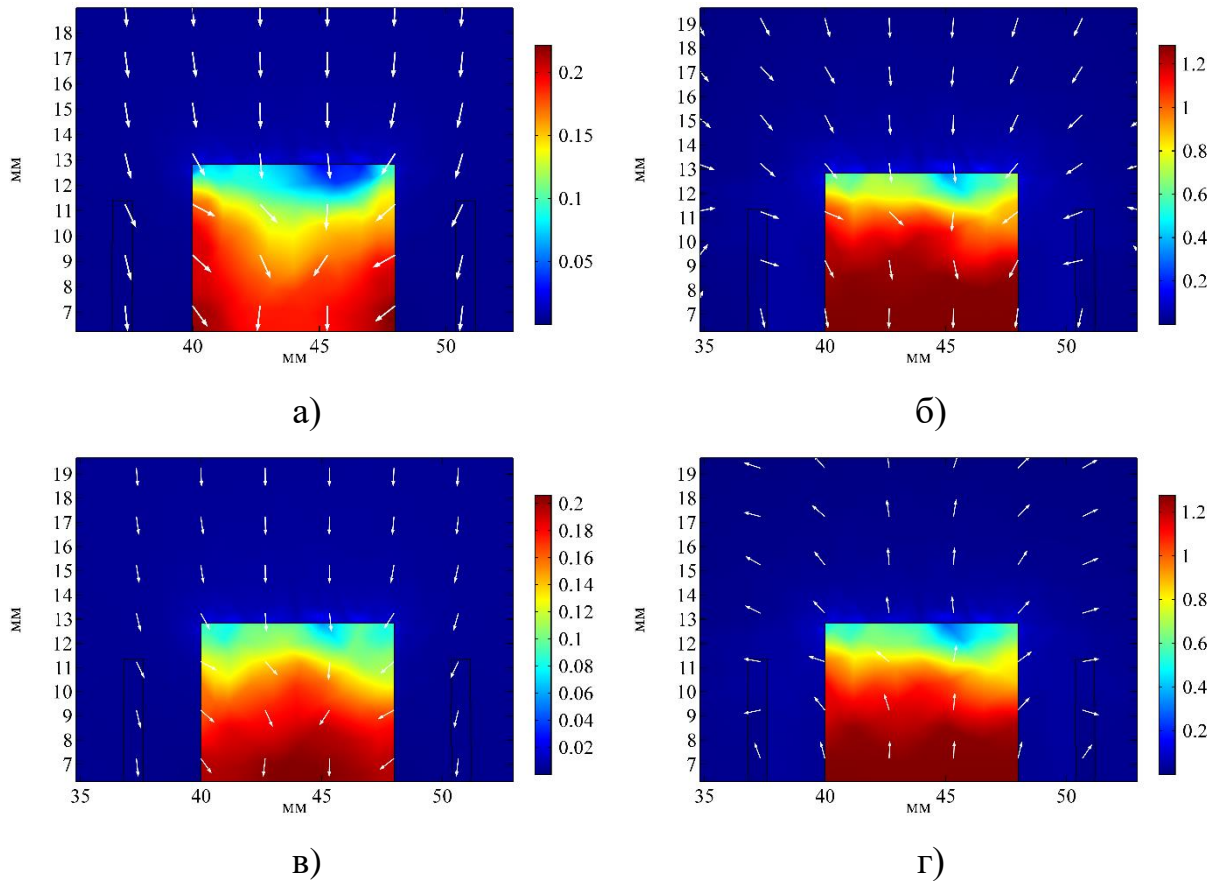
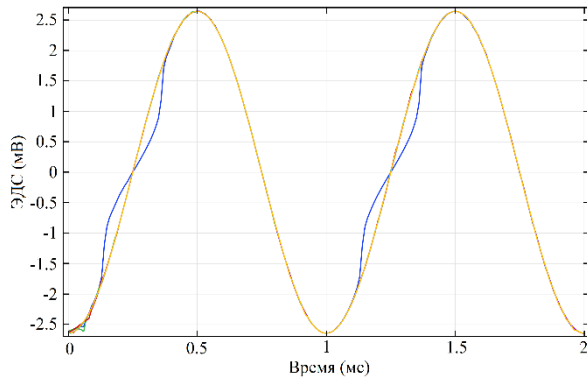
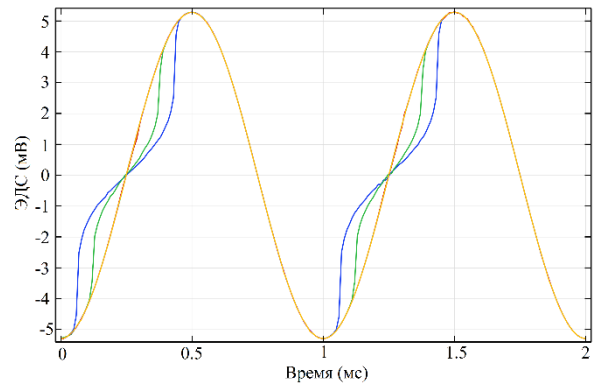


Рисунок 3.28 – График распределения магнитной индукции в сердечнике образца 5 в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г)

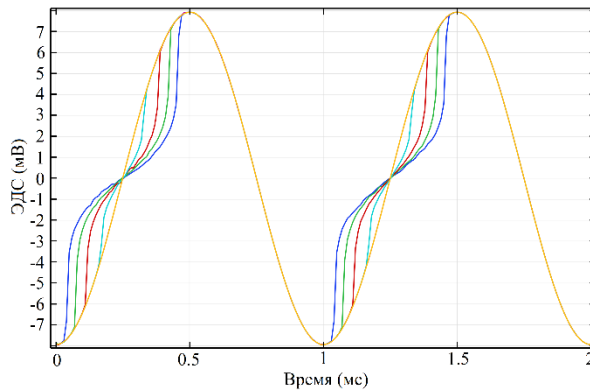
Графики ЭДС в измерительной катушке при различных значениях внешнего магнитного поля, полученные в результате моделирования приведены на рисунке 3.29. Моделирование проведено для значений внешнего магнитного поля: 10 нТл, 100 нТл, 500 нТл, 1 мкТл, 5 мкТл, 10 мкТл, 20 мкТл, 40 мкТл, 60 мкТл, 80 мкТл и 100 мкТл.



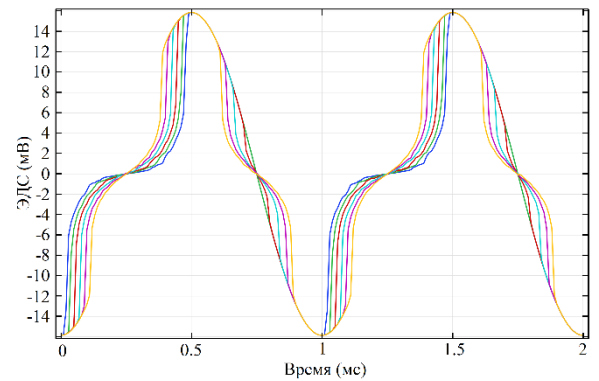
а) – ток возбуждения 125 мА



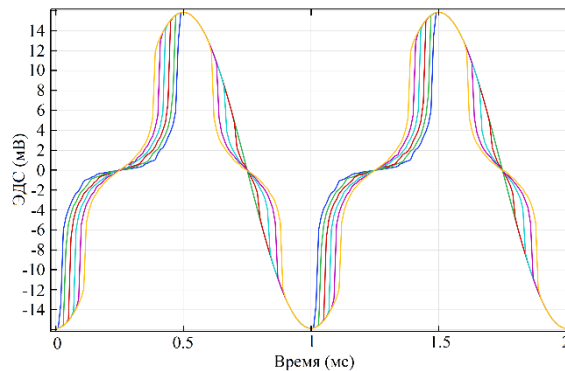
б) – ток возбуждения 250 мА



в) – ток возбуждения 375 мА



г) – ток возбуждения 500 мА



д) – ток возбуждения 750 мА

Рисунок 3.29 – ЭДС в измерительной катушке образца 5 с учетом гистерезисных свойств сердечника при различных значениях внешнего поля (желтый – 0 мкТл, розовый – 20 мкТл, голубой – 40 мкТл, красный – 60 мкТл, зеленый – 80 мкТл, синий – 100 мкТл)

Совместив результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения, получили зависимости изменения временных интервалов (RTD-

смещения) в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего магнитного поля.

Зависимости RTD-смещения в образце 5 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл приведены на рисунке 3.30, для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл приведены на рисунке 3.31

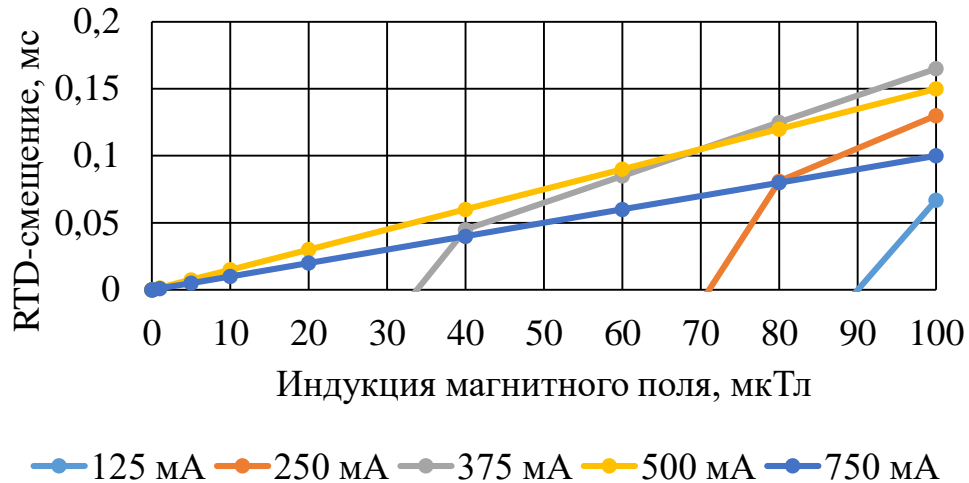


Рисунок 3.30 – Зависимости RTD-смещения в образце 5 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.

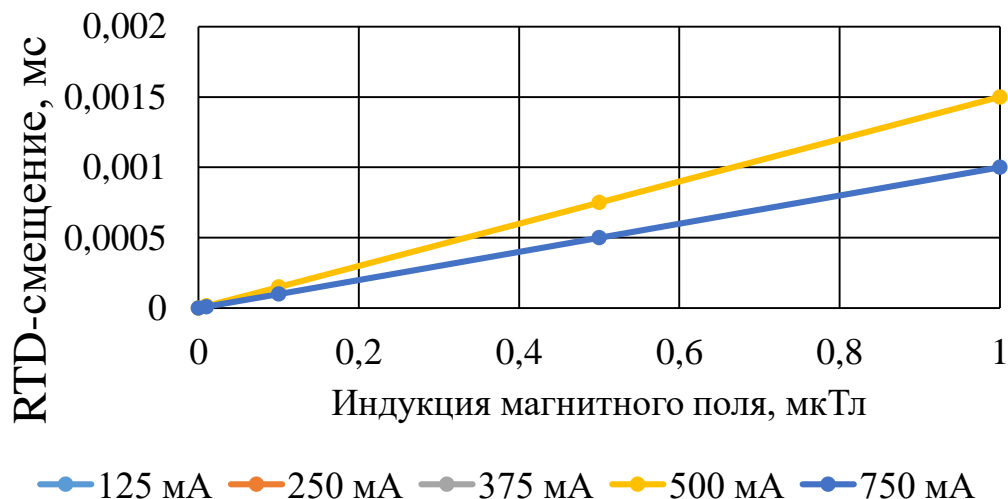


Рисунок 3.31 – Зависимости RTD-смещения в образце 5 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.

Чувствительность образца 5 при различных значениях тока в диапазоне от 0 до 10 мкТл сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Аппроксимированные значения чувствительности образца 5 при разных значениях тока возбуждения

Ток возбуждения, мА	125	250	375	500	750
Чувствительность, с/Тл	-	-	-	1,53	1,01

На рисунке 3.32 представлена зависимость ЭДС выходного сигнала от тока возбуждения для образца 5.

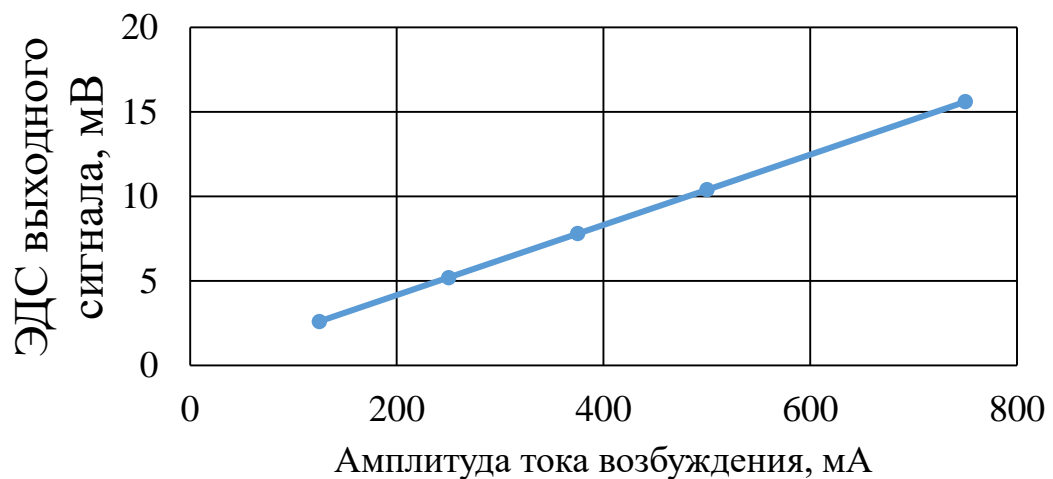


Рисунок 3.32 – Зависимость ЭДС выходного сигнала от амплитуды тока возбуждения образца 5

Конструкция образца 5 не позволяет вывести сердечник в насыщение в рассматриваемом диапазоне токов. Тем не менее, в отличие от образца 4 проявляется чувствительность в области больших магнитных полей. Измерение слабых магнитных полей при токе меньше 500 мА невозможно.

Образец 6

На рисунке 3.33 представлено распределение индукции магнитного поля в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и

через три четверти периода (г) образца 6. Цветовая шкала показывает величину модуля индукции магнитного поля в каждой точке. Стрелки показывают направление магнитного потока. Результаты представлены для значения внешнего магнитного поля 100 мкТл при токе возбуждения 300 мА.

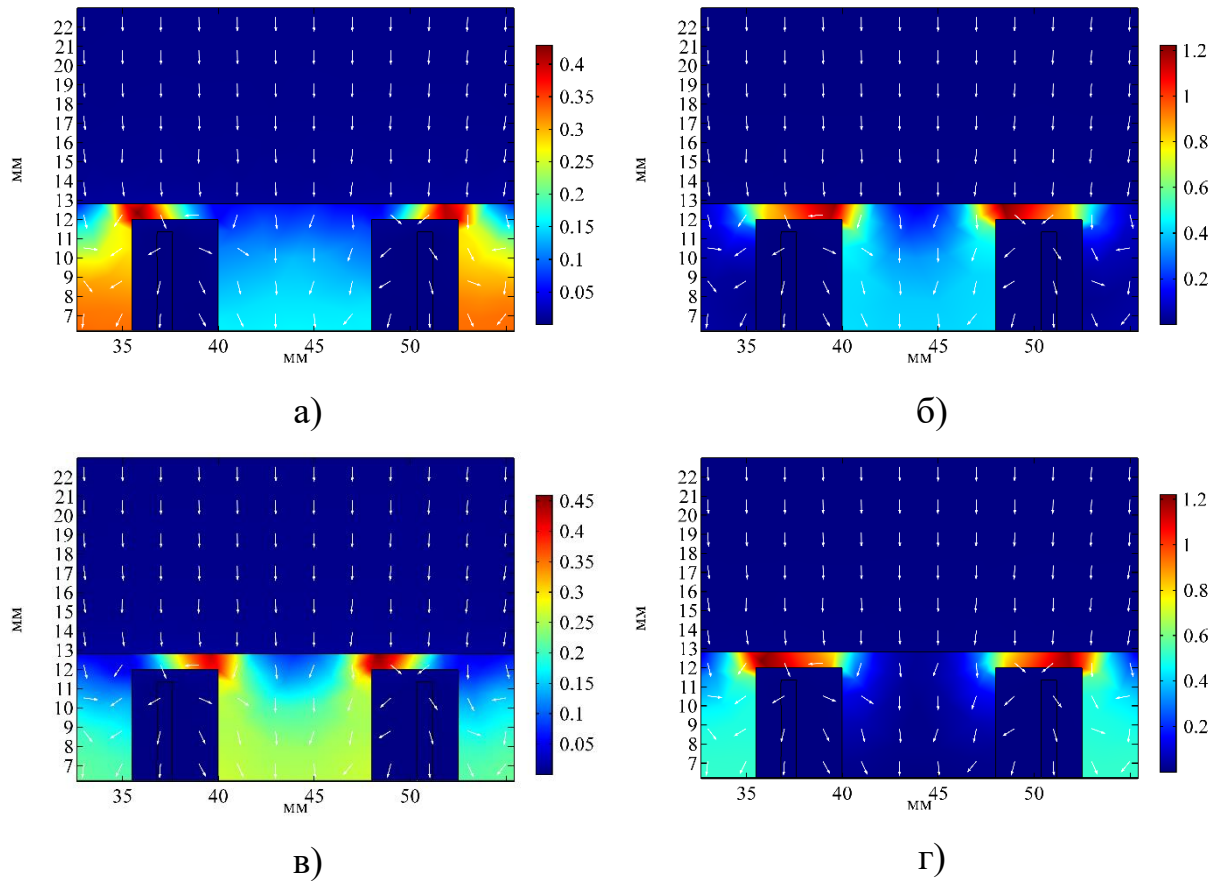
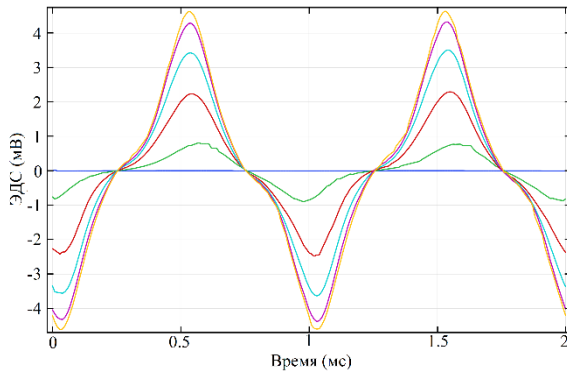
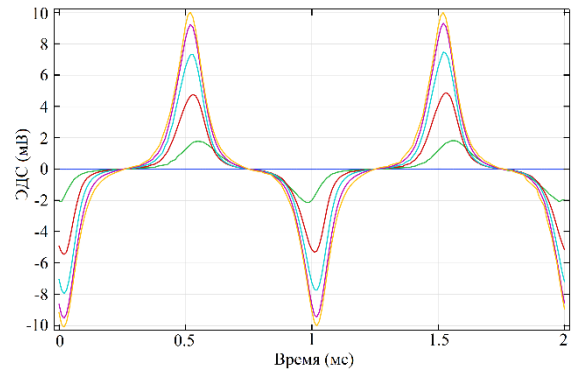


Рисунок 3.33 – График распределения магнитной индукции в сердечнике образца 6 в начале периода (а), через четверть периода (б), через пол периода (в) и через три четверти периода (г)

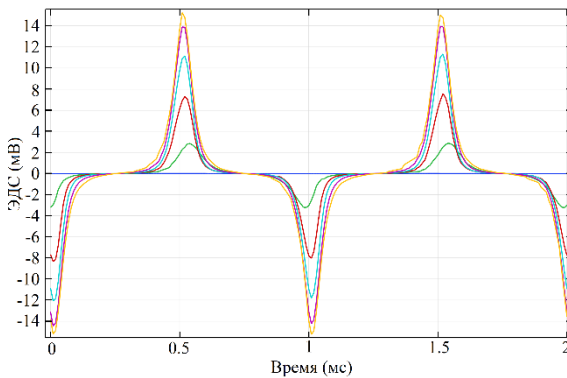
График ЭДС в измерительной катушке при различных значениях внешнего поля, полученный в результате моделирования приведен на рисунке 3.34. Моделирование проведено для значений внешнего магнитного поля: 10 нТл, 100 нТл, 500 нТл, 1 мкТл, 5 мкТл, 10 мкТл, 20 мкТл, 40 мкТл, 60 мкТл, 80 мкТл и 100 мкТл



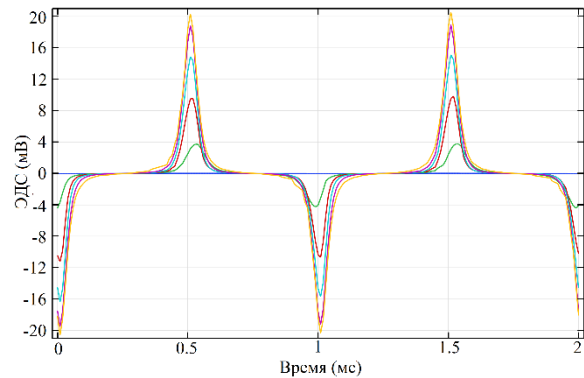
а) – ток возбуждения 50 мА



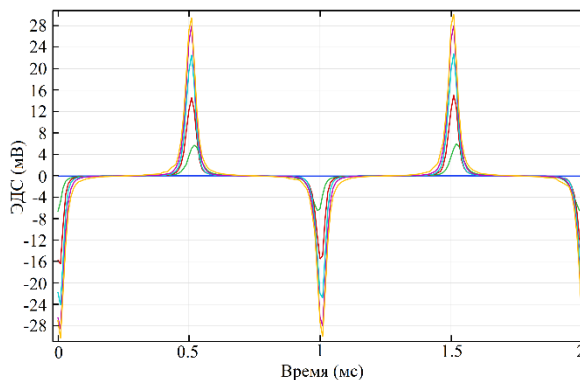
б) – ток возбуждения 100 мА



в) – ток возбуждения 150 мА



г) – ток возбуждения 200 мА



д) – ток возбуждения 300 мА

Рисунок 3.34 – ЭДС в измерительной катушке образца б с учетом гистерезисных свойств сердечника при различных значениях внешнего магнитного поля (желтый – 0 мкТл, розовый – 20 мкТл, голубой – 40 мкТл, красный – 60 мкТл, зеленый – 80 мкТл, синий – 100 мкТл)

Совместив результаты моделирования при различных значениях тока возбуждения, получили зависимости изменения временных интервалов

(RTD-смещения) в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего магнитного поля.

Зависимости RTD-смещения в образце 6 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл приведены на рисунке 3.35, для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл приведены на рисунке 3.36

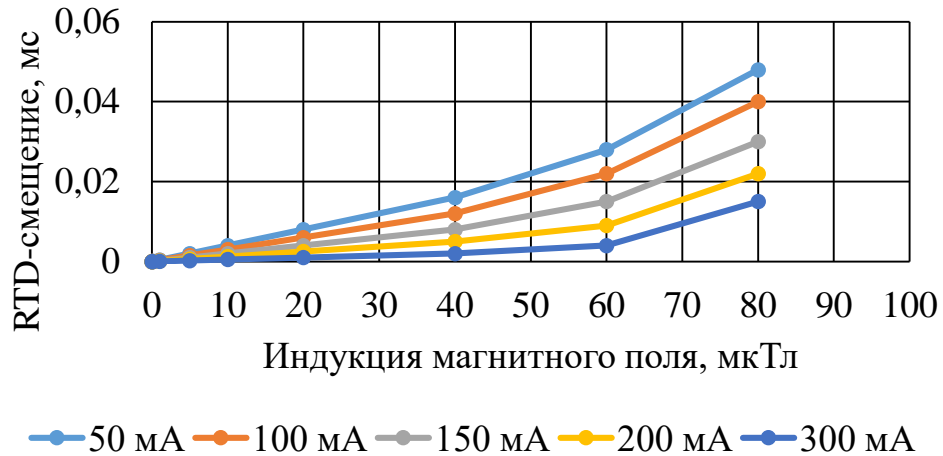


Рисунок 3.35 – Зависимости RTD-смещения в образце 6 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.

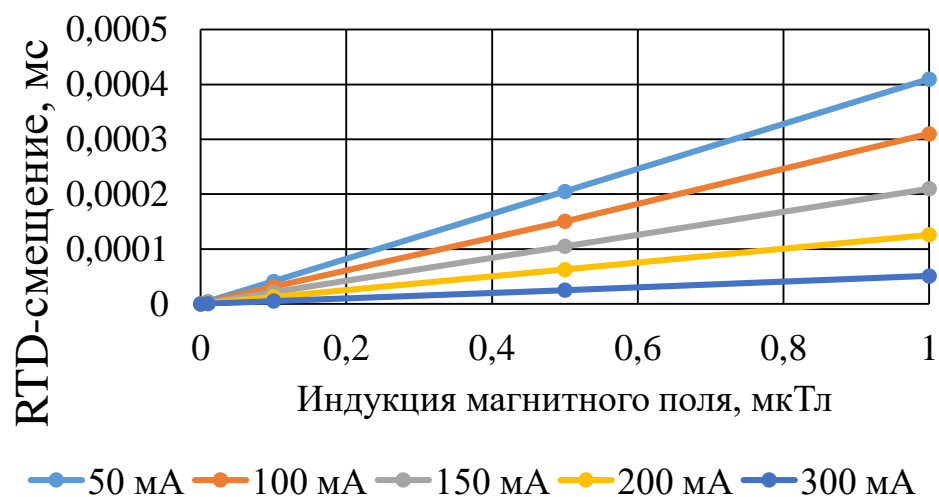


Рисунок 3.36 – Зависимости RTD-смещения в образце 6 от величины индукции внешнего магнитного поля и тока возбуждения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.

Чувствительность образца 6 при различных значениях тока в диапазоне от 0 до 10 мкТл сведены в таблицу 3.7

Таблица 3.7 – Аппроксимированные значения чувствительности образца 6 при разных значениях тока возбуждения

Ток возбуждения, мА	50	100	150	200	300
Чувствительность, с/Тл	0,413	0,314	0,211	0,126	0,051

На рисунке 3.37 представлена зависимость ЭДС выходного сигнала от тока возбуждения для образца 2.

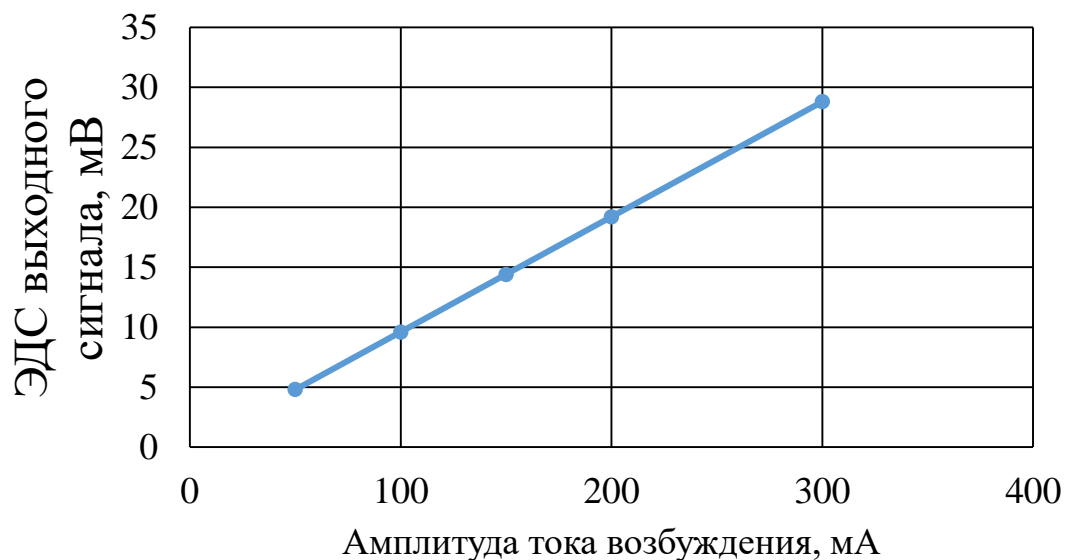


Рисунок 3.37 – Зависимость ЭДС выходного сигнала от амплитуды тока возбуждения образца 6

Образец 6 имеет более узкий обратный магнитопровод и только одну обмотку возбуждения. Комбинация этих факторов дает повышение чувствительности в более сильных магнитных полях. С другой стороны, в области слабых магнитных полей, чувствительность датчика сравнима с образцом 2.

Анализируя результаты моделирования можно сделать следующие выводы. Поведение всех образцов совпадает с предложенной математической

моделью. Образцы с разомкнутым сердечником по результатам моделирования показывают большую чувствительность, однако требуют большей амплитуды тока возбуждения. В свою очередь, образцы с замкнутым сердечником демонстрируют меньшую чувствительность (в 2-10 раз), но могут работать при значительно меньших токах, что уменьшает тепловыделение. Различие в результатах между образцом 2 и образцом 6, говорит о том, что форма обратного магнитопровода и расположение катушек имеет значительное влияние на итоговую чувствительность датчиков. Большая длина образцов 3 и 4 обеспечивает большую чувствительность в сравнении с образцами 1 и 2, при этом для образцов с разомкнутым сердечником изменение длины влияет в значительно меньшей степени, чем на образцы с замкнутым сердечником.

3.3 Изготовление RTD-феррозондовых преобразователей

Для изготовления прототипов RTD-феррозондовых датчиков была выбрана технология печатных плат (англ. PCB technology). Суть метода заключается в нанесении на диэлектрическую пластину тонких печатных дорожек и токопроводящих отверстий. Размещая на разных сторонах платы определенный рисунок и соединяя определенные точки проводниками и паяльными приспособлениями, можно достичь течения тока в заданном направлении [137].

В соответствии с предложенными конструкциями шести образцов RTD-феррозондовых датчиков, в среде автоматизированного проектирования электронных устройств EasyEDA была разработана топология печатных плат. EasyEDA – это среда автоматизированного проектирования электронных устройств, включающая в себя редактор топологии печатных плат.

Для сохранения технических характеристик плат, после изготовления каждая плата подвергалась процедуре безсвинцового горячего лужения (HASL от англ. Hot Air Solder Leveling). Данное финишное покрытие создано из комбинации сплавов Sn96 или Sn100 с Ag/CuO, Cu/Ni, Ag2/Ni и полностью удовлетворяет всем требованиям международной директивы RoHS.

Толщина медного слоя на печатной плате равняется 35 мкм. Ширина печатных проводников и зазор между печатными проводниками равен 0,254 мм.

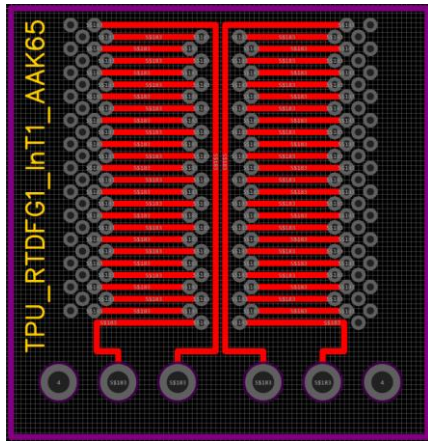
Процедура сборки датчиков может быть описана следующим образом. Перед началом работ, каждая плата обезжиривается техническим этиловым спиртом. Ферромагнитный сердечник заданной геометрической формы получали из листа материала Finemet типа FT-3H методом автоматизированного фрезерования. Затем вырезанный образец сердечника приклеивали на обратную сторону верхней платы с обмоткой возбуждения. Для фиксации сердечника использовали клей Stycast 2850 FT. Для отвердевания клея использовался отвердитель Catalist 24 LV в пропорции 100:6. Время окончательного отвердевания – около 36 ч. Процесс отвердевания производили в вакуумной камере с давлением менее 10^{-6} атм.

Для изготовления полноценной обмотки возбуждения на первую плату с обмоткой возбуждения и приклеенным сердечником, накладывалась вторая плата обмоткой возбуждения. Соединения обмоток возбуждения на двух платах осуществляли через переходные отверстия. Для этого, через переходные отверстия продеваются отрезки медной проволоки, длиной, приблизительно 15-20 мм, и диаметром 0,1 мм. После соединения медными проводниками все отверстия, медный провод фиксируется припоем Sn60Pb36Ag4 Tr ISO-Core "RA" (1,0 мм) при температуре 250 °C. После этого, лишние концы соединительных проводов срезаются. Качество электрического контакта проверяется с помощью мультиметра Agilent 3458A методом измерения сопротивления между выходными контактными площадками. Измерительные обмотки формируются аналогично. Датчик в сборе пропитывается клеем Stycast 2850 FT с последующим отвердеванием в вакуумной камере с давлением менее 10^{-6} атм.

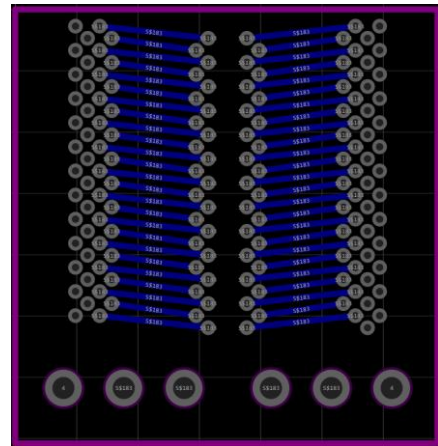
Образец 1

По технологии изготовления печатных плат на подложке из текстолита изготавливали 4 отдельных печатных платы, каждая толщиной 0,4 мм. Две

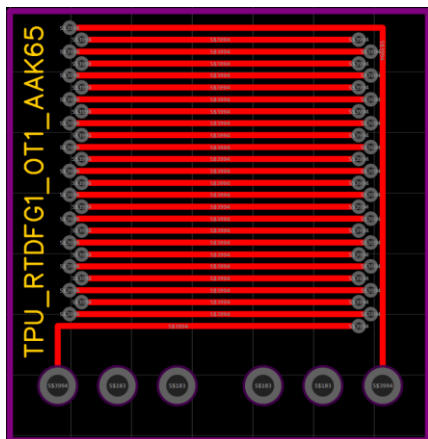
платы с полуобмотками возбуждения и две платы с измерительными полуобмотками. Топология обмоток возбуждения и измерения образца 1 представлена на рисунке 3.38, изготовленные печатные платы обмотки возбуждения и измерительной обмотки показаны на рисунке 3.39.



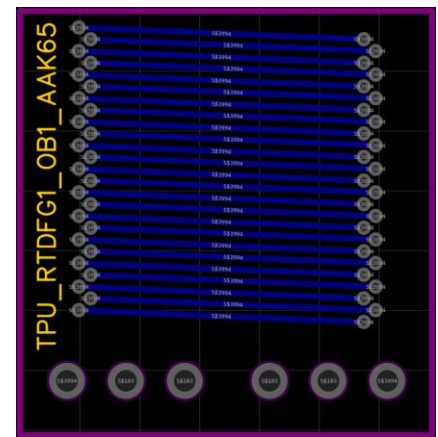
а)



б)



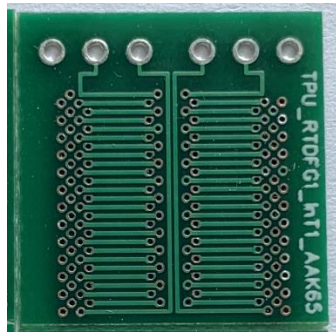
в)



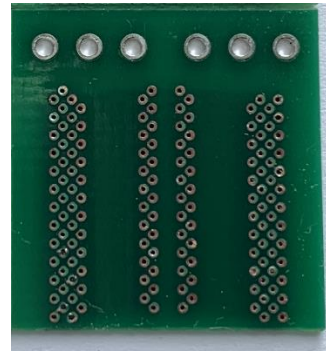
г)

Рисунок 3.38 – Образец 1. Топология обмоток возбуждения:
верхняя плата – а, нижняя плата – б; топология измерительных обмоток:
верхняя плата – в, нижняя плата – г.

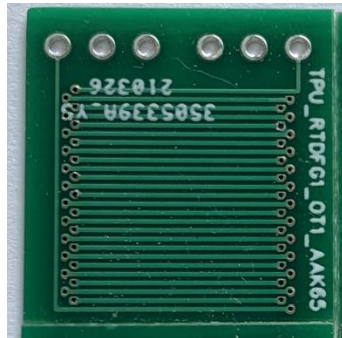
Изготовленный образец 1 RTD-феррозонда представлен на рисунке 3.40.



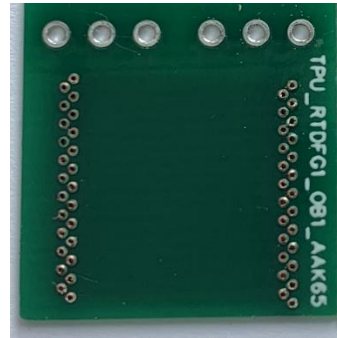
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.39 – Образец 1. Изготовленные печатные платы. Обмотка возбуждения: верхняя плата – а, нижняя плата – б; измерительная обмотка: верхняя плата – в, нижняя плата – г.

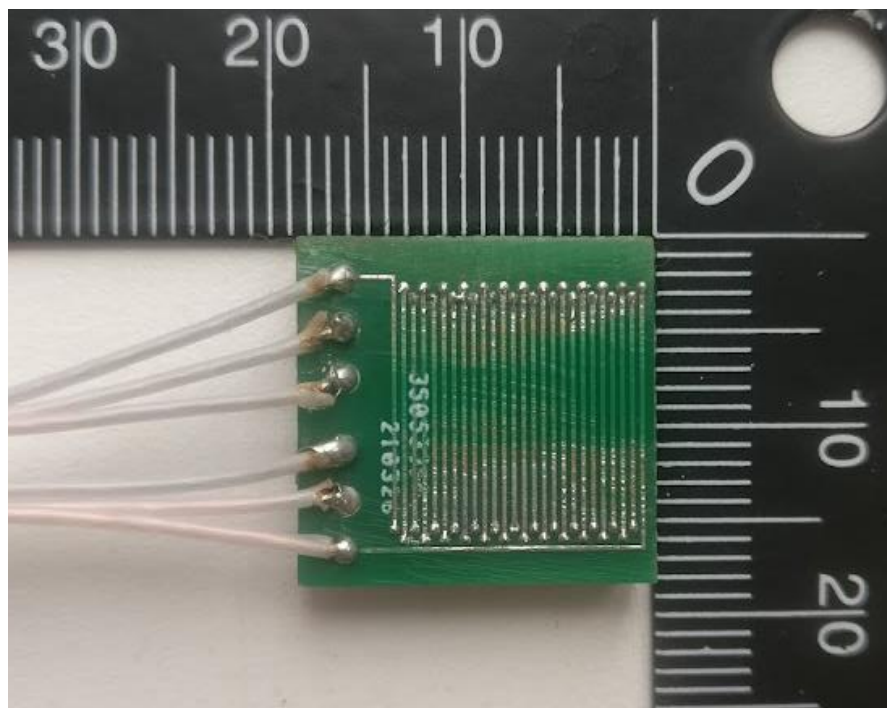


Рисунок 3.40 – Изготовленный образец 1 RTD-феррозонда

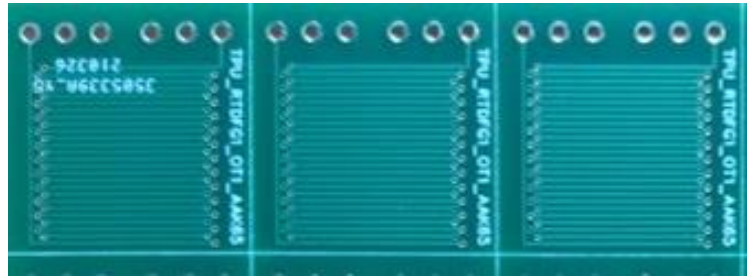
Конструктивно образец 1 представляет собой 2 пары зеркально расположенных симметричных полуобмоток, образующих 26 полных витков, каждая. На обратной стороне верхней платы полуобмотки возбуждения устанавливаются симметрично два одинаковых сердечника. Затем через переходные отверстия полуобмотки возбуждения верхней платы соединяются с полуобмотками возбуждения нижней платы, при этом нижняя плата зеркально развернута относительно верхней платы, таким образом, что при соединении верхней и нижней плат внутренними сторонами, переходные отверстия совпадают. После этого на верхнюю плату с полуобмоткой возбуждения накладывается верхняя плата с измерительной полуобмоткой, аналогичная операция повторяется с нижними платами, после чего измерительные полуобмотки также соединяются через переходные отверстия.

Образец 2

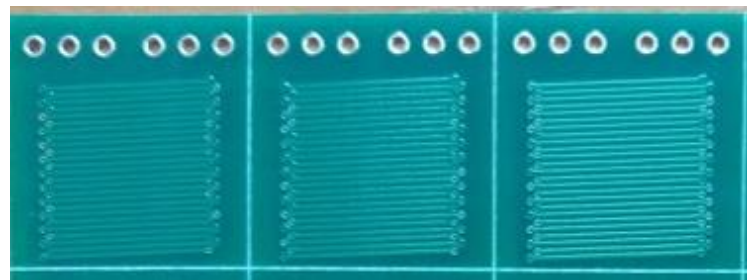
По технологии изготовления печатных плат на подложке из текстолита изготавливали 2 отдельных печатных платы, каждая толщиной 0,4 мм. На каждой плате расположено по две полуобмотки возбуждения и по одной измерительной полуобмотке. Топология полуобмоток возбуждения и измерения повторяют топологию полуобмоток измерения образца 1 – рисунок 3.38 (в, г).

На обратной стороне верхней платы устанавливается броневой замкнутый сердечник. Затем через переходные отверстия полуобмотки возбуждения верхней платы соединяются с полуобмотками возбуждения нижней платы, при этом нижняя плата зеркально развернута относительно верхней платы, таким образом при соединении верхней и нижней плат внутренними сторонами, переходные отверстия совпадают. Измерительные полуобмотки соединены аналогично.

Изготовленные печатные платы образца 2 показаны на рисунке 3.41. Изготовленный образец 2 RTD-феррозонда представлен на рисунке 3.42.



а) – верхняя плата



б) – нижняя плата

Рисунок 3.41 – Образец 2. Изготовленные печатные платы.

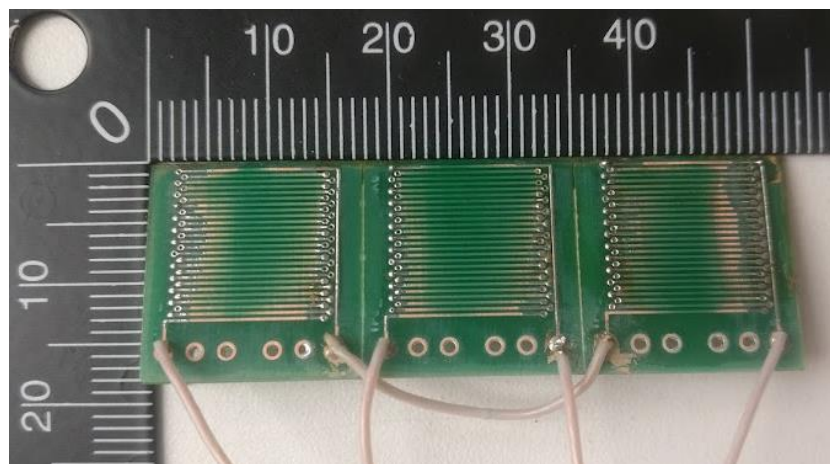


Рисунок 3.42 – Изготовленный образец 2 RTD-феррозонда

Образец 3

Конструктивно образец 3 представляет собой 2 пары зеркально расположенных симметричных полуобмоток, образующих 78 полных витков, каждая. Данный вариант датчика является удлиненной версией образца 1. Топология обмоток возбуждения и измерения образца 3 представлена на рисунке 3.43, изготовленные печатные платы обмотки возбуждения и измерительной обмотки показаны на рисунке 3.44. Образец 3 изготовлен аналогично образцу 1.

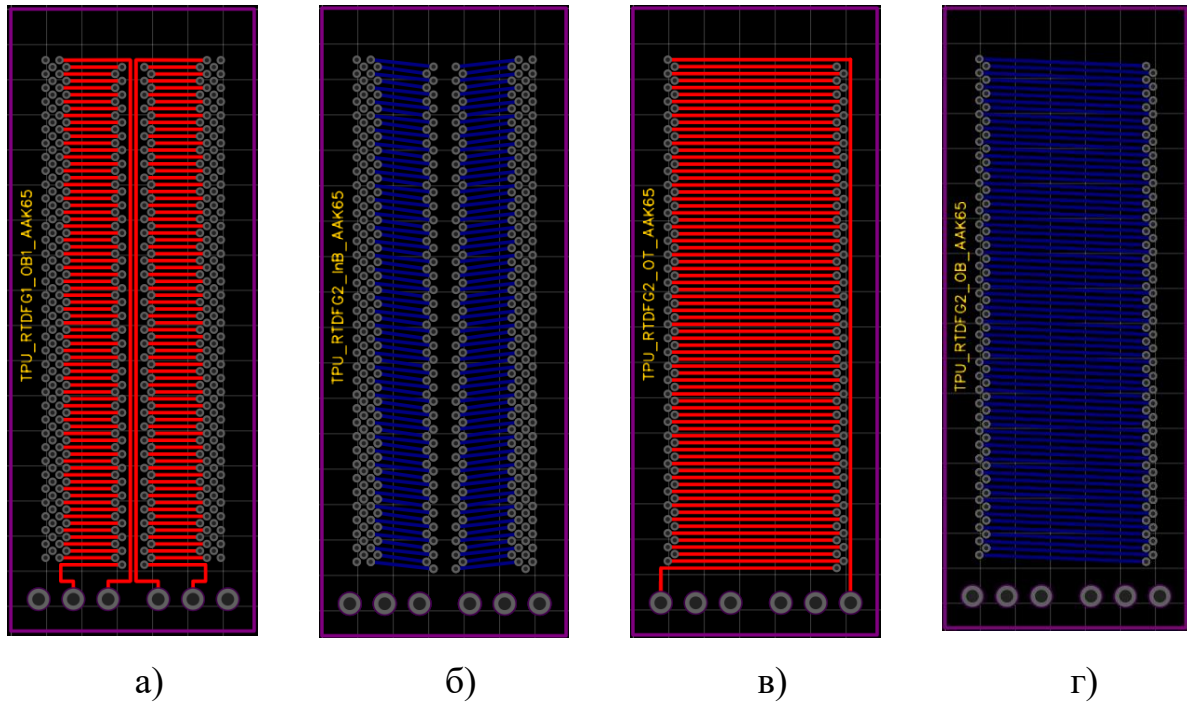


Рисунок 3.43 – Образец 3. Топология обмоток возбуждения: верхняя плата – а, нижняя плата – б; топология измерительных обмоток: верхняя плата – в, нижняя плата – г.

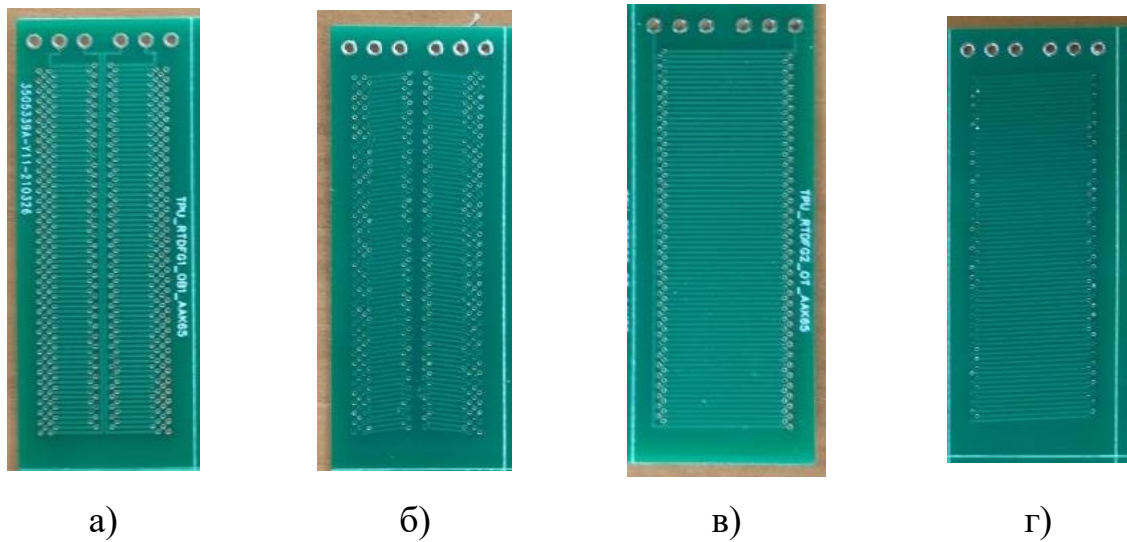


Рисунок 3.44 – Образец 3. Изготовленные печатные платы. Обмотка возбуждения: верхняя плата – а, нижняя плата – б; измерительная обмотка: верхняя плата – в, нижняя плата – г.

Изготовленный образец 3 RTD-феррозонда представлен на рисунке 3.45.

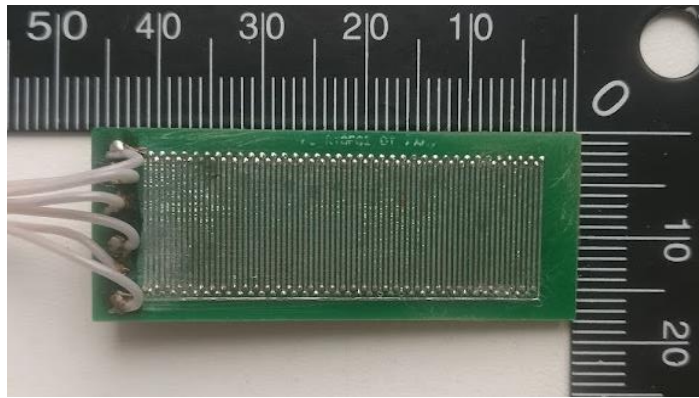
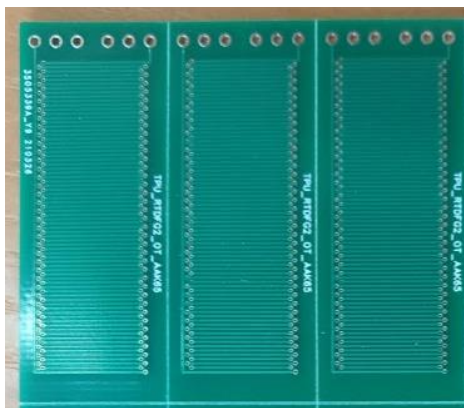


Рисунок 3.45 – Изготовленный образец 3 RTD-феррозонда

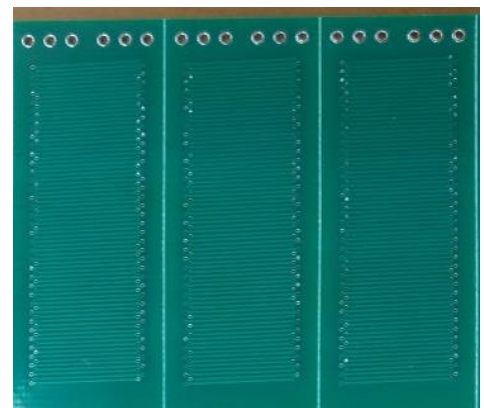
Образец 4

Конструктивно образец 4 представляет собой удлиненный вариант образца 2, с утроенным количеством витков в каждой катушке. Топология полуобмоток возбуждения и измерения повторяют топологию полуобмоток измерения образца 3 – рисунок 3.43 (в, г). Образец 4 изготовлен аналогично образцу 2.

Изготовленные печатные платы образца 4 показаны на рисунке 3.46.



а) – верхняя плата



б) – нижняя плата

Рисунок 3.46 – Образец 4. Изготовленные печатные платы.

Изготовленный образец 4 RTD-феррозонда представлен на рисунке 3.47.

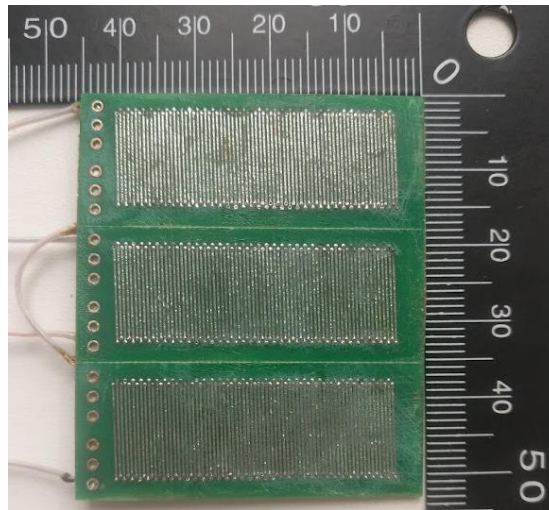
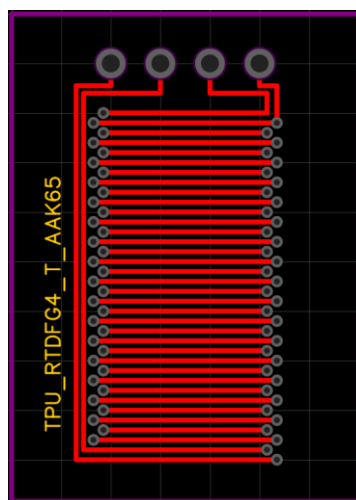


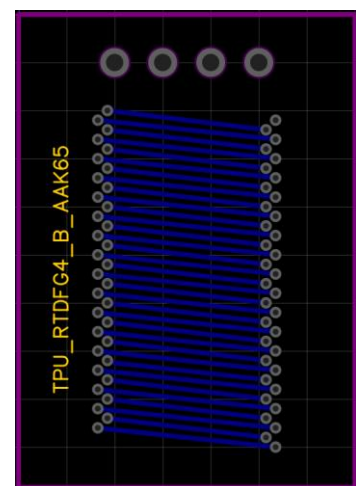
Рисунок 3.47 – Изготовленный образец 4 RTD-феррозонда

Образец 5

По технологии изготовления печатных плат на подложке из текстолита изготавливали 2 отдельных печатных платы, каждая толщиной 0,4 мм. На каждой плате расположено по одной полуобмотки возбуждения и по одной измерительной полуобмотки. Топология полуобмоток возбуждения и измерения образца 5 представлена на рисунке 3.48, изготовленные печатные платы показаны на рисунке 3.49.



а) – верхний слой платы



б) – нижний слой платы

Рисунок 3.48 – Образец 5. Топологии: полуобмотки возбуждения – а; измерительной полуобмотки – б.



а) – верхний слой платы



б) – нижний слой платы

Рисунок 3.49 – Образец 5. Изготовленные печатные платы.

Конструктивно образец 5 представляет собой 2 пары зеркально симметричных полуобмоток, образующих 18 полных витков в обмотке возбуждения и 18 полных витков в измерительной обмотке. На обратной стороне верхней платы устанавливаются одностержневой сердечник. Затем через переходные отверстия полуобмотка возбуждения и измерительная полуобмотка верхней платы соединяются с полуобмоткой возбуждения и измерительной полуобмоткой нижней платы, при этом нижняя плата зеркально развернута относительно верхней платы, таким образом, что при соединении верхней и нижней плат внутренними сторонами, переходные отверстия совпадают.

Изготовленный образец 5 RTD-феррозонда представлен на рисунке 3.50.

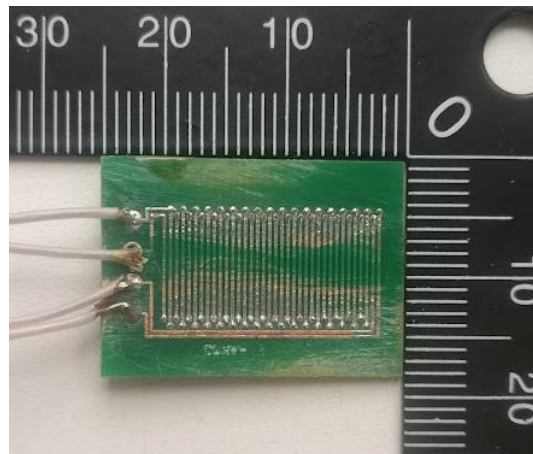


Рисунок 3.50 – Изготовленный образец 5 RTD-феррозонда

Образец 6

Образец 6 повторяет топологию образца 5, однако конструктивно его сердечник является не одностержневым, а броневым (см. рисунок 3.6-а). Обмотка возбуждения и измерительная обмотка охватывают центральную стойку сердечника.

Образец 7

Для проверки возможности повышения технологичности изготовления ферромагнитного сердечника был изготовлен образец 7, который конструктивно идентичен образцу 3. Отличие заключается в способе формирования сердечника, его на обратную сторону печатной платы с полуобмоткой возбуждения наносили методом магнетронного распыления. Магнетронное распыление – технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещённых полях. Напыление металлов происходило в среде аргона. Итоговая толщина сердечника составила 120-150 нм. Два симметрично расположенных, напыленных сердечника на печатной плате с полуобмоткой возбуждения показаны на рисунке 3.51.

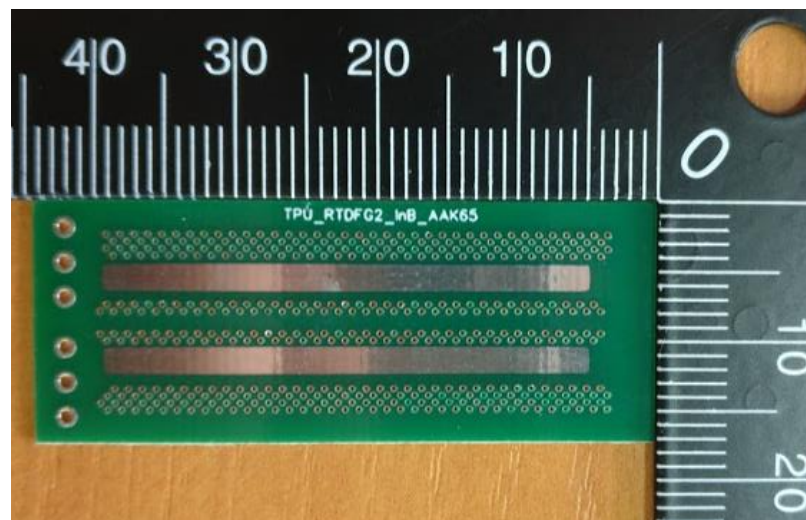


Рисунок 3.51 – Печатная плата полуобмотки возбуждения с двумя напыленными сердечниками

Таким образом, изготовлены 7 датчиков: по 1 датчику каждого образца с сердечником, полученным методом механического фрезерования и 1 датчик с сердечником, полученным методом магнетронного напыления.

3.4 Выводы к главе 3

1. Разработаны 6 конструкций RTD-феррозондовых датчиков. Две конструкции на основе двух симметричных стержневых сердечников, две конструкции на основе одного броневых сердечника с разнесёнными в плоскости датчика двумя обмотками возбуждения и одной измерительной обмоткой, одна конструкция на основе одностержневого сердечника и одна конструкция на основе броневых сердечника с размещёнными на центральной стойке обмоткой возбуждения и измерительной обмоткой.

2. Для всех конструкций RTD-феррозондов проведен конечно-элементный анализ в среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics. В результате получены модельные зависимости изменения временных интервалов в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего поля и зависимости амплитуды ЭДС в измерительной обмотке от амплитуды тока возбуждения, что позволяет проектировать схемы возбуждения и обработки сигналов для данных датчиков.

3. Описана технология изготовления предложенных конструкций RTD-феррозондовых датчиков методами производства печатных плат. Для каждой конструкции изготовлено по одному образцу с получением ферромагнитного сердечника фрезерованием из листа материала. Дополнительно изготовлен один образец для конструкции 3, в котором сердечник сформирован на печатной плате методом магнетронного напыления.

ГЛАВА 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ RTD-ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ

В настоящей главе приведено описание установки для создания измеряемого магнитного поля, схемы возбуждения RTD-феррозондовых датчиков, схемы и программное обеспечение для обработки и анализа измерительной информации с RTD-феррозондов. Для каждого изготовленного образца приводятся результаты определения чувствительности и диапазона измерений магнитной индукции в зависимости от амплитуды и частоты тока возбуждения, оценивается возможность измерения биосигналов на примере магнитокардиограммы.

4.1 Установка для создания измеряемого магнитного поля

Для проверки возможности измерения магнитного поля разработанными образцами датчиков, необходим источник однородного магнитного поля в заданном объеме. Для создания постоянного магнитного поля чаще всего используют катушки Гельмгольца. Катушки Гельмгольца представляют из себя две радиальные катушки радиусом R , находящиеся друг от друга на расстоянии R . Однако, несмотря на простоту изготовления, катушки Гельмгольца имеют ряд недостатков, к которым можно отнести большие габариты по отношению к области создаваемого однородного поля и недостаточно высокую однородность в рабочей области. Результаты измерения магнитного поля внутри такой системы могут быть искажены в следствие, например, физического перемещения датчика внутри рабочей области. Таким образом, катушки Гельмгольца могут быть использованы в случае, когда не предъявляются жесткие требования к контролируемому полю.

Получение магнитного поля с высокой степенью однородности в большем объеме, чем обеспечивают катушки Гельмгольца реализуется с помощью

увеличения числа катушек. В настоящей работе используется восьмикатушечная система для создания однородного магнитного поля (рисунок 4.1-а), описанная в работах [138-139], которая находится внутри магнитного экрана ММР-50 [140] (рисунок 4.1-б) в целях уменьшения влияния магнитного поля Земли и близлежащего электронного оборудования. Внутри системы, соосно восьмикатушечной системе и магнитному экрану, помещается датчик магнитометра Mag-01Н [141] для измерения магнитной индукции (рисунок 4.1-в). Общий вид установки представлен на рисунке 4.1-г.

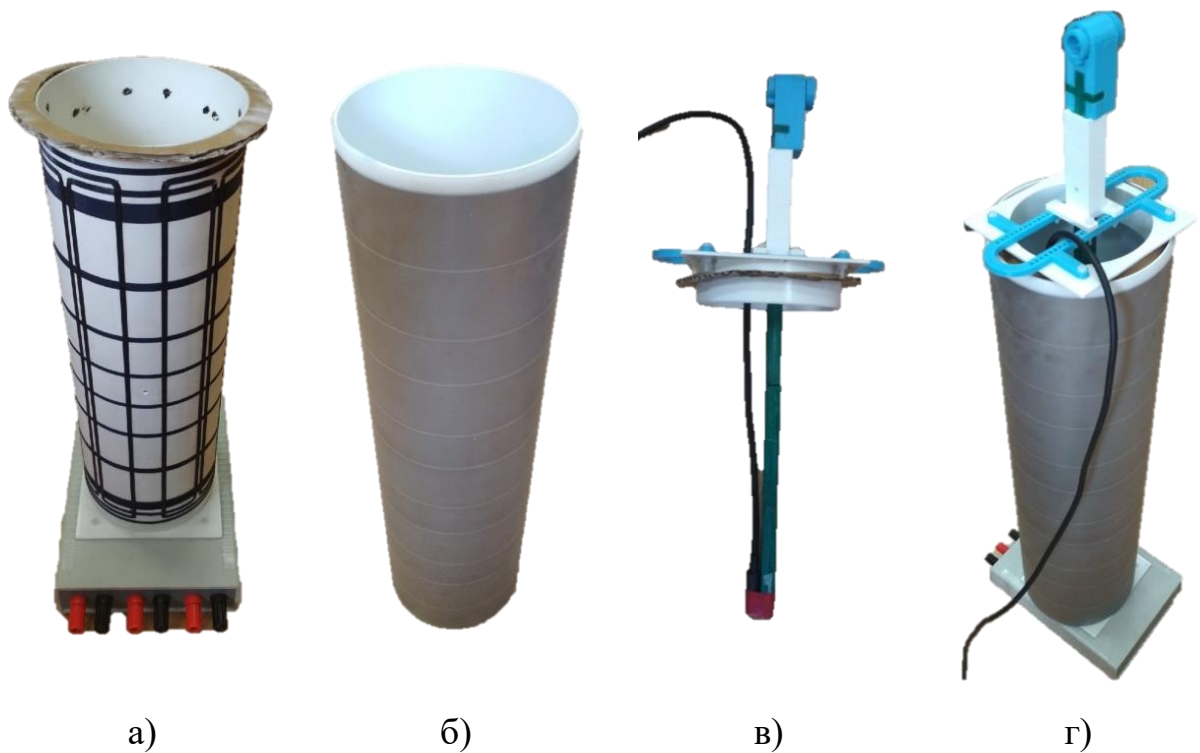


Рисунок 4.1 – Установка для создания магнитного поля

(а – восьмикатушечная система для создания однородного магнитного поля;
 б – магнитный экран ММР-50; в – датчик магнитометра Mag-01Н;
 г – общий вид измерительной установки)

В сравнении с катушками Гельмгольца, восьмикатушечная система имеет большую однородность магнитного поля в рабочей области, а также имеет более высокое соотношение эффективного объема рабочей области к габаритам самой установки.

Используя показания с магнитометра Mag-01H определяется и фиксируется положение установки таким образом, чтобы магнитное поле Земли оказывало минимальное влияние на результаты измерений.

Для создания однородного магнитного поля система катушек была подключена к лабораторному линейному источнику питания Matrix MPS-3005L-3, как показано на рисунке 4.2, в режиме стабилизации тока. Значение созданного магнитного поля определяли по показаниям магнитометра Mag-01H.



Рисунок 4.2 – Схема соединения установки для создания магнитного поля

4.2. Возбуждение RTD-феррозондовых датчиков

RTD-феррозонды возбуждаются переменным током синусоидальной формы с частотой от единиц до сотен килогерц. RTD-смещение, получаемое при такой низкой частоте возбуждения достаточно легко зафиксировать, так как, при прочих равных условиях (а также если не учитывать частотные свойства сердечника), величина смещения прямо пропорциональна частоте возбуждающего сигнала. Следовательно, при уменьшении частоты возбуждения в 10 раз, частота дискретизации обрабатывающего сигнал устройства тоже может быть уменьшена в 10 раз без потери точности измерения. С другой стороны, уменьшение частоты возбуждения приводит к уменьшению амплитуды

выходного сигнала, при этом теряется возможность измерять переменные магнитные поля. Последнее обусловлено тем что, фактически, частота сигнала в обмотке возбуждения будет являться частотой дискретизации измеряемого поля. Согласно принципу работы RTD-феррозонда, когда измеряется время между двумя соседними пиками ЭДС выходного сигнала, возможно оценить только величину поля один раз в половину периода. Таким образом, возбуждение RTD-феррозондовых датчиков сигналом низкой частоты, например, 100 Гц, позволяет оценить величину измеряемого поля только один раз в 5 мс (без учета времени, необходимого на фильтрацию и обработку сигнала). Увеличение частоты возбуждения, несмотря на более высокие требования к частоте дискретизации, позволяет получить более детальную информацию о флуктуациях магнитного поля.

В качестве источника сигнала для возбуждения образцов RTD-феррозондов взят генератор сигналов специальной формы АКИП-3407/1А. Данный генератор позволяет создавать сигналы разной формы в широком диапазоне амплитуд и частот. Однако, величина тока, выдаваемого таким генератором ограничена. Для обеспечения возможности получения достаточных значений силы тока, необходим усилитель, способный работать в требуемом частотном диапазоне. Для этого был сконструирован и реализован усилитель на основе микросхемы EL2099, подключаемый к выходу генератора сигналов [142]. Микросхема EL2099 является высокоскоростным операционным усилителем. Данный операционный усилитель способен выдавать до 800 мА при максимальной скорости нарастания напряжения порядка 1000 В/мкс. Граничная частота такого усилителя порядка 10 МГц, что полностью соответствует условиям поставленной задачи. Выходной сигнал с усилителя подается на обмотки возбуждения феррозонда, подключенные последовательно таким образом, чтобы поле, создаваемое в сердечниках, было направлено в одну и ту же сторону. Структурная схема возбуждения RTD-феррозонда представлена на рисунке 4.3. Решение по возбуждению феррозондового датчика защищено патентом РФ на изобретение (Приложение А).

Полученная схема обеспечивает необходимый диапазон частот и токов возбуждения, полученный в результате моделирования конструкций образцов RTD-феррозондов и позволяет провести необходимую оценку их характеристик.

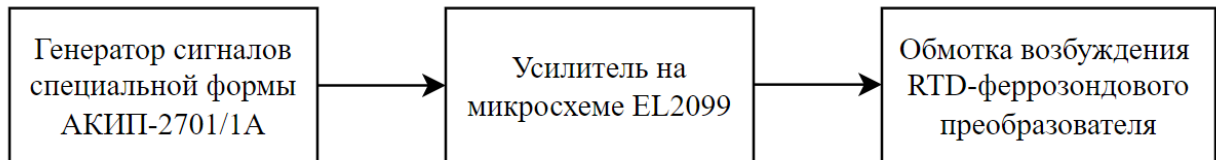


Рисунок 4.3 – Структурная схема возбуждения RTD-феррозондов

4.3. Обработка выходного сигнала RTD-феррозондовых датчиков

Для измерения RTD-смещения и определения измеряемого значения магнитной индукции с достаточной точностью необходимо осуществлять цифровую обработку выходного сигнала с датчика. Для этого реализована схема обработки выходного сигнала на основе модуля NI PXI-5122 платформы PXI-1042Q. Модуль NI PXI-5122 представляет собой двухканальный 14-битный осциллограф/дигитайзер с частотой дискретизации 100 МГц. Оцифрованные значения ЭДС с выхода RTD-феррозонда обрабатываются математически с помощью специально разработанного программного обеспечения в среде графического программирования LabVIEW.

Реализовано две независимых программы: первая программа реализует непосредственно управление модулем NI PXI-5122, оцифровку выходной ЭДС и вывод значения RTD-смещения; вторая программа разработана для обработки данных, накопленных в результате многократных измерений, и служит для получения численных характеристик по амплитуде измеряемого поля и оценке характеристик образцов.

Оцифровка выходной ЭДС RTD-феррозонда осуществляется следующим образом:

- а) задается магнитное поле внутри восьмикатушечной системы с помощью источника питания Matrix MPS-3005L-3 и контролируется с помощью эталонного магнитометра Mag01-Н;
- б) питание эталонного магнитометра отключается, чтобы не создавать помехи для работы RTD-феррозонда;
- в) с генератора задается значение частоты возбуждения и амплитуда тока возбуждения RTD-феррозонда;
- г) программа для обработки сигнала записывает в память 20 периодов сигнала со скоростью 100 МВыб/с;
- д) осуществляется цифровая фильтрация фильтром нижних частот, чтобы убрать высокочастотные помехи и наводки. Параметры фильтра: фильтр Баттерворта 10-го порядка, частота среза 100 кГц;
- е) сигнал раскладывается на периоды, периоды накладываются друг на друга и вычисляется средний сигнал за 50 периодов;
- ж) по полученному среднему сигналу определяется максимальное и минимальное значение (пики ЭДС) и их временные координаты;
- з) определяется временной интервал между пиками ЭДС за период. Разница между длительностью половины периода сигнала возбуждения и временем между пиками ЭДС это удвоенное значение RTD-смещения;
- и) значение RTD-смещения выводится на экран и записывается в память ЭВМ вместе с другими параметрами измерения (заданными магнитной индукцией, частотой сигнала возбуждения, амплитудой сигнала возбуждения и т.д.).

На рисунке 4.4 представлен фрагмент графического кода программы оцифровки.

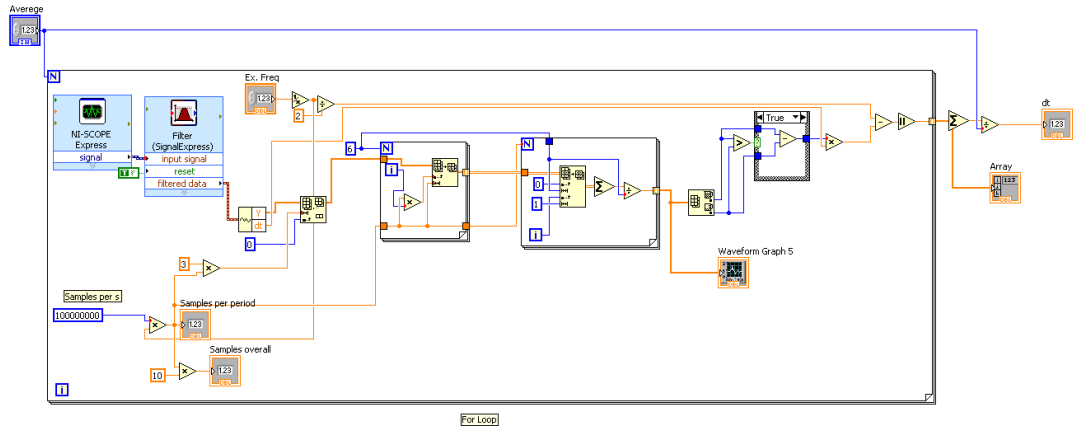


Рисунок 4.4 – Фрагмент графического кода программы

Интерфейс программы оцифровки представляет из себя окно для вывода одного периода усредненного сигнала, вывода значения измеренного RTD-смещения и поля, необходимые для ввода заданных параметров эксперимента для дальнейшей их записи в память ЭВМ. Параметр «Усреднение» (Average) позволяет задать количество измеряемых периодов для усреднения. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.5.

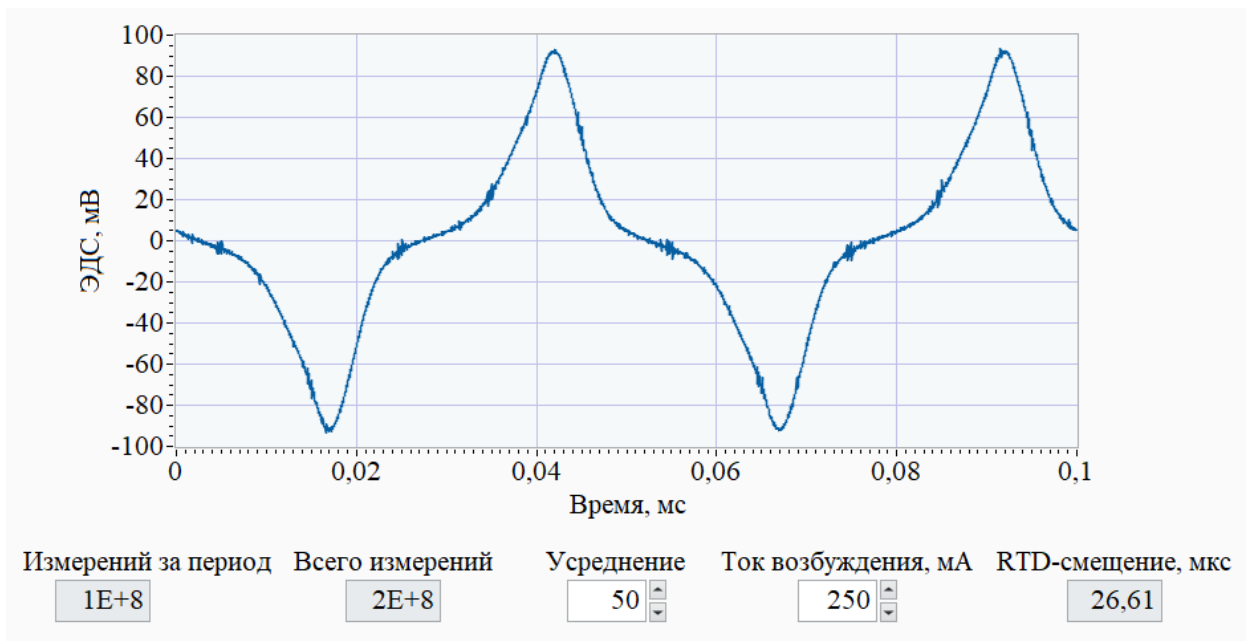


Рисунок 4.5 – Интерфейс программы для измерения RTD-смещения

Результат эксперимента записываются в файл в виде таблицы, структурированной для дальнейшей обработки.

Таблица, полученная после проведения экспериментов, загружается в другую программу, где происходит обработка полученных результатов. Обработка результатов измерения происходит по следующему алгоритму:

- а) из файла загружаются данные в виде двумерного массива, в каждой строке которого данные о проведенном эксперименте (измеренные значения RTD-смещения, частота возбуждения, амплитуда тока возбуждения, индукция заданного магнитного поля);
- б) массив разбивается на подмассивы по частотам сигнала возбуждения;
- в) подмассивы по частотам разбиваются на вектора по токам. Полученный вектор представляет из себя численное значение RTD-смещения при заданных значениях индукции магнитного поля;
- г) используя зависимость RTD-смещения от индукции магнитного поля, осуществляется линейная аппроксимация методом наименьших квадратов;
- д) полученные значения коэффициента пропорциональности фактически являются чувствительностью датчика к магнитному полю.

На рисунке 4.6 представлен фрагмент графического кода программы обработки данных.

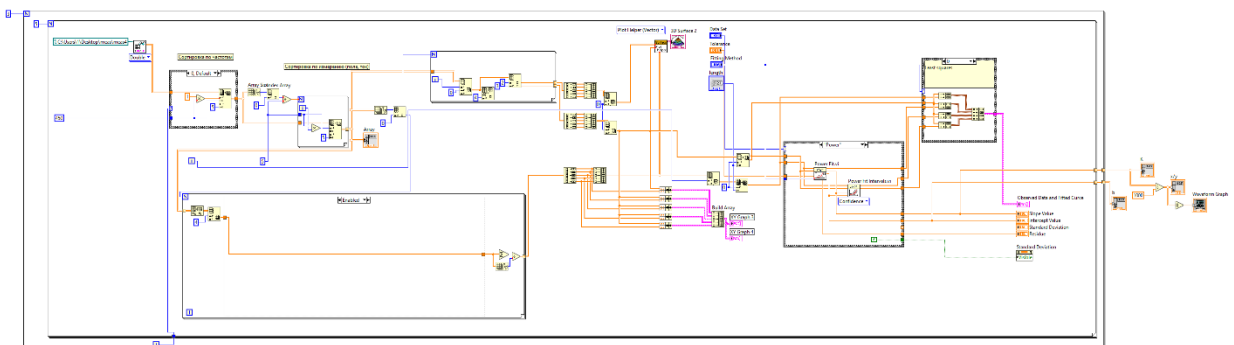


Рисунок 4.6 – Фрагмент графического кода программы обработки данных

Интерфейс программы обработки данных эксперимента состоит из нескольких элементов управления, позволяющих выбрать диапазон магнитного

поля для линейной аппроксимации, а также выводит промежуточные результаты расчета и графики. Полученные коэффициенты аппроксимации записываются в отдельный файл для возможности последующей обработки. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.7.

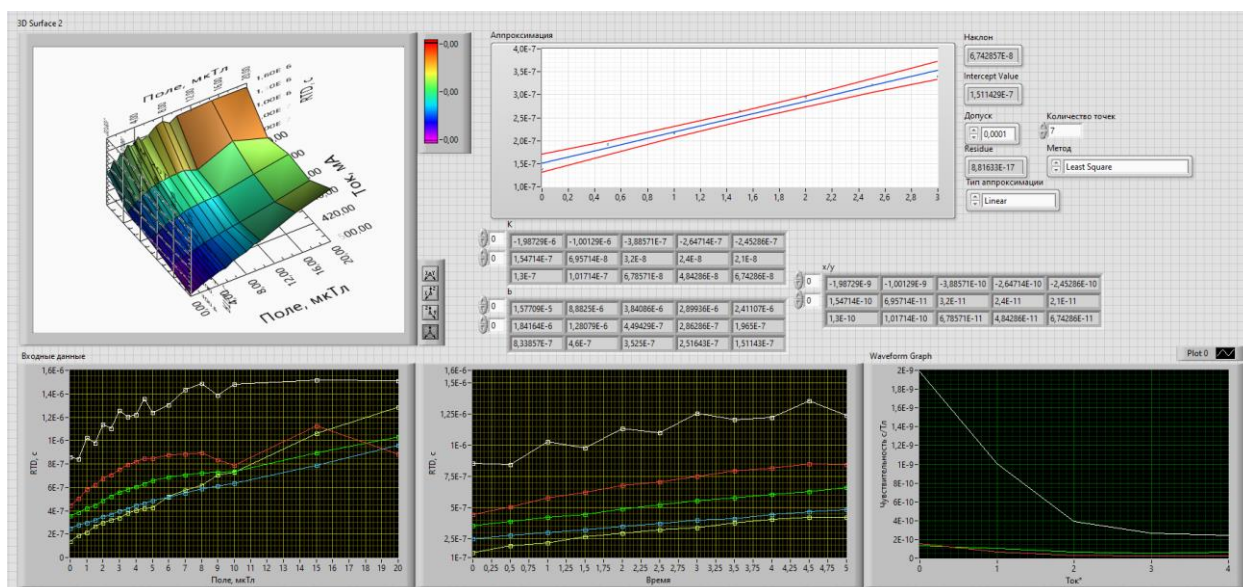


Рисунок 4.7 – Интерфейс программы обработки данных

4.4 Экспериментальные исследования изготовленных образцов RTD-феррозондов

Для оценки метрологических характеристик изготовленных образцов, RTD-феррозонды помещали в центр восьмикатушечной системы. С помощью источника тока, управляемого напряжением, задавали постоянную магнитную индукцию в центре системы в диапазоне от 10 нТл до 20 мкТл, значение магнитной индукции в центре калибровочной системы контролировали с помощью магнитометра Mag-01H.

Образец 1

Измеренные значения RTD-смещения образца 1 в зависимости от частоты, амплитуды тока возбуждения и величины индукции измеряемого магнитного поля представлены в таблице 4.1-4.4.

Таблица 4.1 – Результаты измерений для образца 1 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	80	160	240	320	400
0	1,135	3,824	2,909	2,282	2,399
0,01	0,909	4,649	3,277	2,616	2,435
0,03	0,740	4,828	3,595	2,895	2,377
0,05	0,712	4,994	3,715	3,024	2,383
0,1	0,686	5,031	3,816	3,034	2,375
0,5	0,711	5,110	3,987	3,132	2,402
1,0	0,720	5,206	4,054	3,255	2,447
1,5	0,726	5,206	4,150	3,440	2,544
2,0	0,746	5,264	4,294	3,550	2,599
2,5	0,754	5,361	4,419	3,662	2,659
3,0	0,761	5,458	4,492	3,724	2,748
3,5	0,778	5,551	4,557	3,782	2,819
4,0	0,822	5,524	4,650	3,975	2,860
4,5	0,859	5,637	4,729	4,148	2,877
5,0	0,856	5,755	4,824	4,297	2,947
6,0	0,952	5,841	4,906	4,557	3,098
7,0	1,012	6,043	5,174	4,744	3,240
8,0	1,036	6,041	5,434	5,037	3,343
9,0	1,119	6,227	5,642	5,256	3,458
10,0	1,170	6,177	5,796	5,545	3,543
12,5	1,217	6,364	6,250	6,227	3,836
15,0	1,309	6,741	6,614	6,858	4,120
20,0	3,951	10,619	9,283	8,102	5,907

Для большей наглядности данные из таблицы 4.1 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.8.

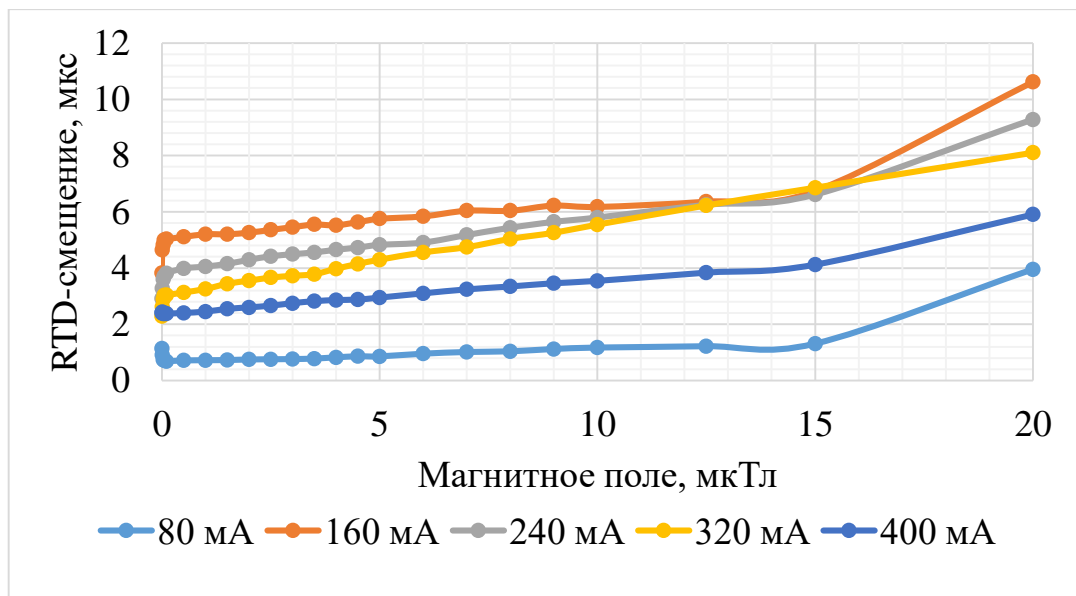


Рисунок 4.8 – Зависимости RTD-смещения образца 1 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.2 – Результаты измерений для образца 1 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	80	160	240	320	400
0	0,921	3,713	2,220	2,471	1,941
0,01	0,921	3,725	2,251	2,482	1,952
0,03	0,924	3,754	2,257	2,487	1,957
0,05	0,929	3,684	2,263	2,493	1,959
0,1	0,935	3,712	2,268	2,501	1,972
0,5	0,946	3,761	2,332	2,555	1,981
1,0	0,958	3,769	2,364	2,623	2,012
1,5	0,980	3,840	2,421	2,714	2,014
2,0	0,987	3,848	2,477	2,802	2,016
2,5	1,012	3,885	2,536	2,861	2,019
3,0	1,025	3,947	2,638	2,956	2,032
3,5	1,034	4,012	2,712	3,012	2,040
4,0	1,066	4,041	2,745	3,083	2,106
4,5	1,082	4,065	2,791	3,124	2,120
5,0	1,090	4,130	2,870	3,236	2,134
6,0	1,143	4,186	2,977	3,372	2,158
7,0	1,162	4,242	3,156	3,576	2,172
8,0	1,201	4,367	3,251	3,642	2,256
9,0	1,242	4,446	3,393	3,780	2,295
10,0	1,264	4,511	3,517	3,977	2,306
12,5	1,365	4,725	3,796	4,384	2,342
15,0	1,432	4,944	4,133	4,686	2,491
20,0	1,778	5,917	5,280	6,051	2,763

Данные из таблицы 4.2 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.9.

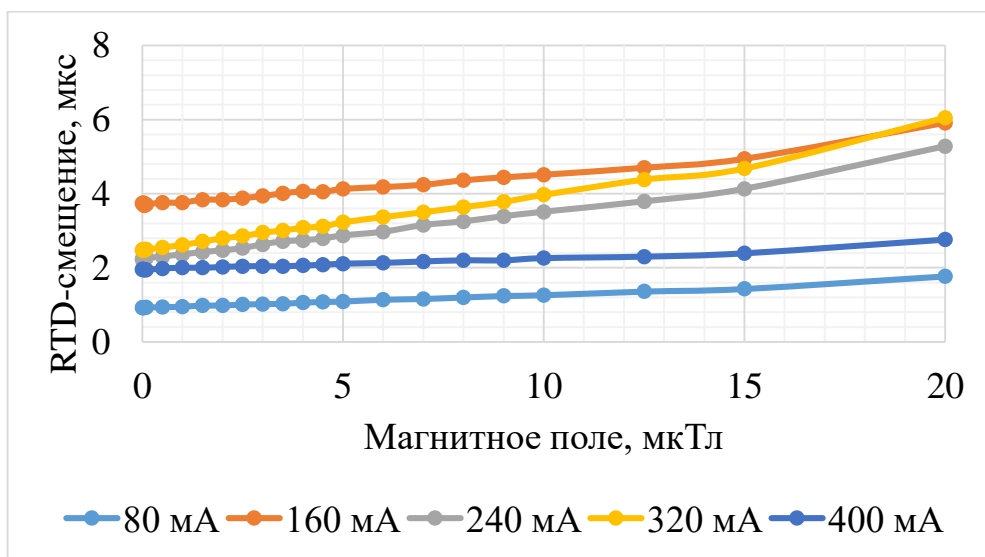


Рисунок 4.9 – Зависимости RTD-смещения образца 1 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.3 – Результаты измерений для образца 1 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	80	160	240	320	400
0	1,308	1,257	0,984	1,095	1,372
0,01	1,308	1,224	0,997	1,097	1,142
0,03	1,297	1,204	1,020	1,101	1,041
0,05	1,286	1,192	1,031	1,112	1,026
0,1	1,265	1,191	1,038	1,115	1,023
0,5	1,285	1,205	1,048	1,126	1,014
1,0	1,307	1,213	1,094	1,142	1,013
1,5	1,315	1,235	1,121	1,152	1,011
2,0	1,326	1,241	1,144	1,168	1,008
2,5	1,355	1,245	1,169	1,143	0,996
3,0	1,365	1,261	1,168	1,187	0,991
3,5	1,376	1,264	1,182	1,197	0,975
4,0	1,401	1,274	1,196	1,215	0,968
4,5	1,426	1,295	1,226	1,229	0,968
5,0	1,453	1,298	1,266	1,241	0,961
6,0	1,484	1,320	1,315	1,250	0,951
7,0	1,495	1,337	1,371	1,266	0,939
8,0	1,549	1,343	1,426	1,320	0,925
9,0	1,564	1,364	1,463	1,347	0,898
10,0	1,561	1,415	1,512	1,354	0,890
12,5	1,635	1,449	1,611	1,429	0,864
15,0	1,702	1,474	1,707	1,481	0,838
20,0	2,041	1,837	2,082	1,826	0,930

Данные из таблицы 4.3 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.10.

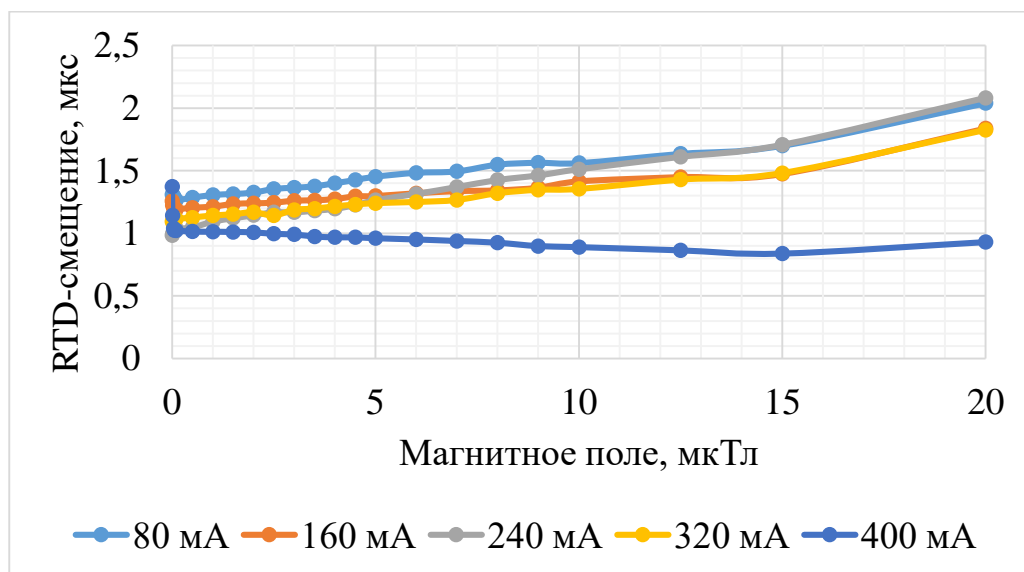


Рисунок 4.10 – Зависимости RTD-смещения образца 1 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.4 – Результаты измерений для образца 1 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	80	160	240	320	400
0	0,393	0,146	0,252	0,344	0,083
0,01	0,382	0,140	0,251	0,329	0,078
0,03	0,379	0,140	0,253	0,323	0,066
0,05	0,378	0,137	0,256	0,322	0,059
0,1	0,376	0,137	0,259	0,322	0,057
0,5	0,378	0,143	0,266	0,324	0,055
1,0	0,381	0,150	0,281	0,326	0,054
1,5	0,382	0,156	0,288	0,330	0,050
2,0	0,382	0,162	0,297	0,331	0,048
2,5	0,383	0,171	0,307	0,332	0,043
3,0	0,384	0,179	0,314	0,334	0,041
3,5	0,386	0,185	0,324	0,340	0,038
4,0	0,386	0,194	0,333	0,341	0,038
4,5	0,388	0,204	0,341	0,344	0,035
5,0	0,390	0,213	0,353	0,347	0,031
6,0	0,392	0,227	0,373	0,352	0,026
7,0	0,394	0,243	0,389	0,356	0,025
8,0	0,396	0,257	0,403	0,362	0,020
9,0	0,398	0,268	0,416	0,365	0,013
10,0	0,401	0,282	0,432	0,372	0,006
12,5	0,405	0,320	0,485	0,381	0,017
15,0	0,409	0,361	0,502	0,389	0,035
20,0	0,236	0,434	0,402	0,228	0,061

Данные из таблицы 4.4 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.11.

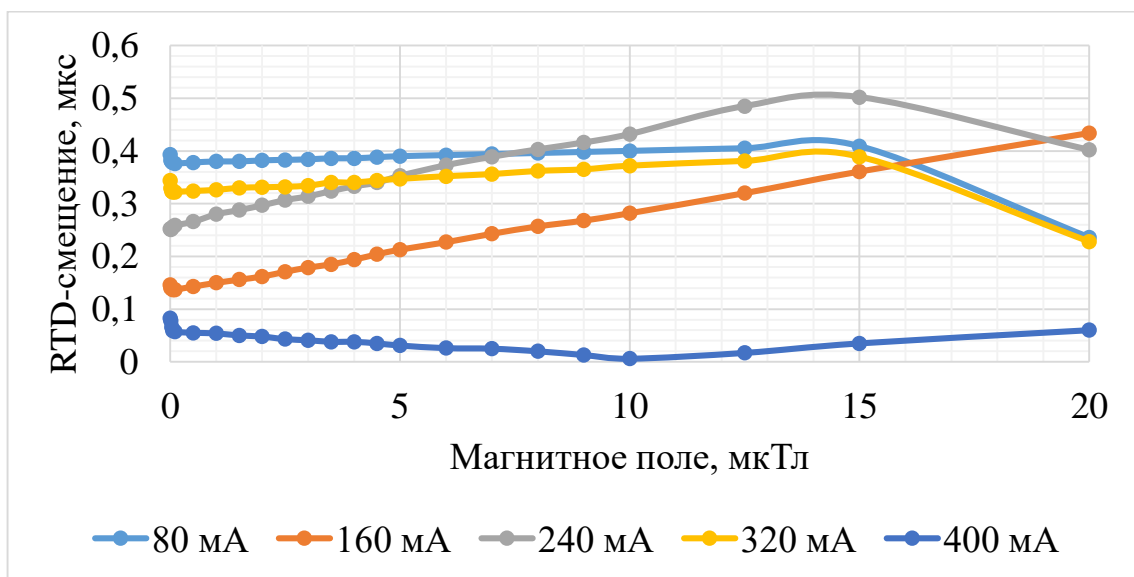


Рисунок 4.11 – Зависимости RTD-смещения образца 1 при частоте возбуждения 10 кГц

Образец 2

Измеренные значения RTD-смещения образца 2 представлены в таблице 4.5-4.8.

Таблица 4.5 – Результаты измерений для образца 2 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	40	80	120	160	200
0	6,894	4,208	2,955	3,073	3,736
0,01	6,887	4,228	2,973	3,100	3,748
0,03	6,885	4,212	2,968	3,098	3,770
0,05	6,854	4,233	2,956	3,095	3,759
0,1	6,919	4,238	2,941	3,105	3,780
0,5	6,933	4,270	2,948	3,103	3,771
1,0	7,047	4,325	2,927	3,118	3,764
1,5	7,258	4,371	2,908	3,142	3,771
2,0	7,357	4,435	2,883	3,142	3,780
2,5	7,452	4,488	2,885	3,145	3,805
3,0	7,590	4,517	2,839	3,152	3,806
3,5	7,695	4,558	2,833	3,178	3,817
4,0	7,805	4,629	2,814	3,162	3,811
4,5	7,972	4,674	2,773	3,176	3,826
5,0	8,045	4,739	2,796	3,185	3,815
6,0	8,280	4,810	2,774	3,195	3,857
7,0	8,453	4,917	2,702	3,237	3,867
8,0	8,816	5,025	2,707	3,238	3,869
9,0	8,901	5,166	2,885	3,277	3,888
10,0	9,210	5,209	3,045	3,287	3,903
12,5	9,770	5,505	3,681	3,494	3,915
15,0	10,038	5,570	4,585	4,232	4,305
20,0	10,484	5,724	5,871	5,220	5,012

Данные из таблицы 4.5 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.12.

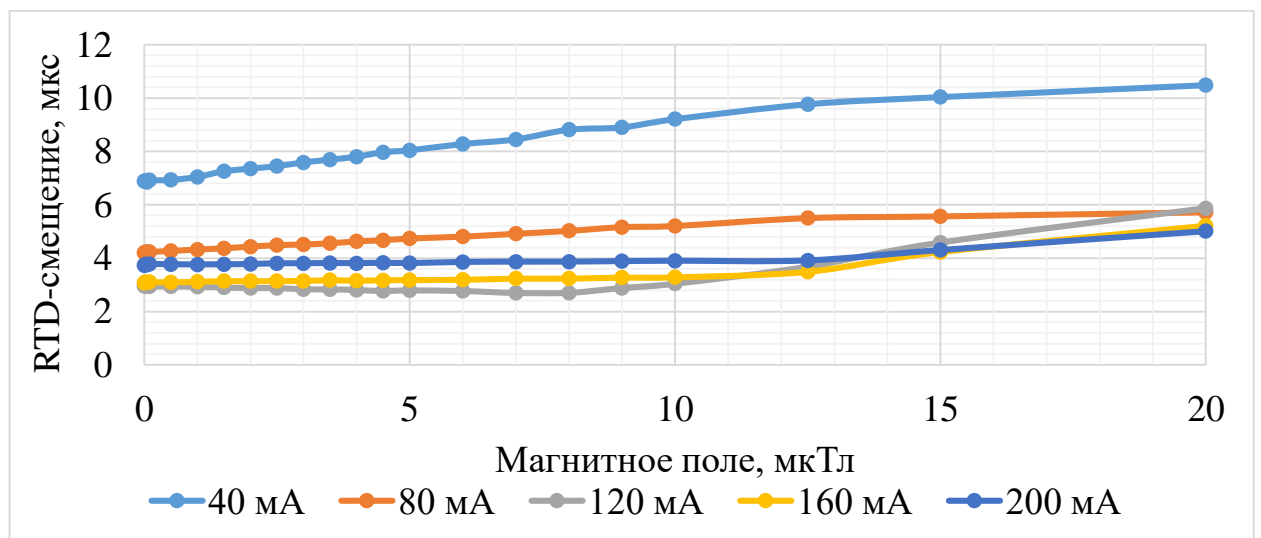


Рисунок 4.12 – Зависимости RTD-смещения образца 2 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.6 – Результаты измерений для образца 2 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	40	80	120	160	200
0	1,990	1,552	1,086	1,323	1,243
0,01	2,039	1,551	1,100	1,336	1,251
0,03	2,055	1,550	1,098	1,333	1,250
0,05	2,033	1,544	1,103	1,333	1,257
0,1	2,053	1,550	1,100	1,333	1,256
0,5	2,072	1,556	1,096	1,323	1,244
1,0	2,093	1,570	1,095	1,303	1,242
1,5	2,122	1,582	1,085	1,283	1,228
2,0	2,136	1,598	1,082	1,277	1,214
2,5	2,153	1,598	1,070	1,265	1,213
3,0	2,165	1,620	1,068	1,240	1,199
3,5	2,205	1,629	1,063	1,223	1,187
4,0	2,220	1,646	1,054	1,218	1,181
4,5	2,222	1,622	1,068	1,207	1,174
5,0	2,242	1,603	1,064	1,195	1,160
6,0	2,301	1,557	1,077	1,189	1,139
7,0	2,211	1,531	1,088	1,185	1,126
8,0	2,039	1,488	1,089	1,173	1,119
9,0	1,860	1,457	1,114	1,166	1,106
10,0	1,955	1,478	1,137	1,192	1,105
12,5	3,564	1,860	1,388	1,327	1,169
15,0	3,825	2,753	1,671	1,546	1,346
20,0	3,620	2,784	2,111	1,863	1,580

Данные из таблицы 4.6 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.13.

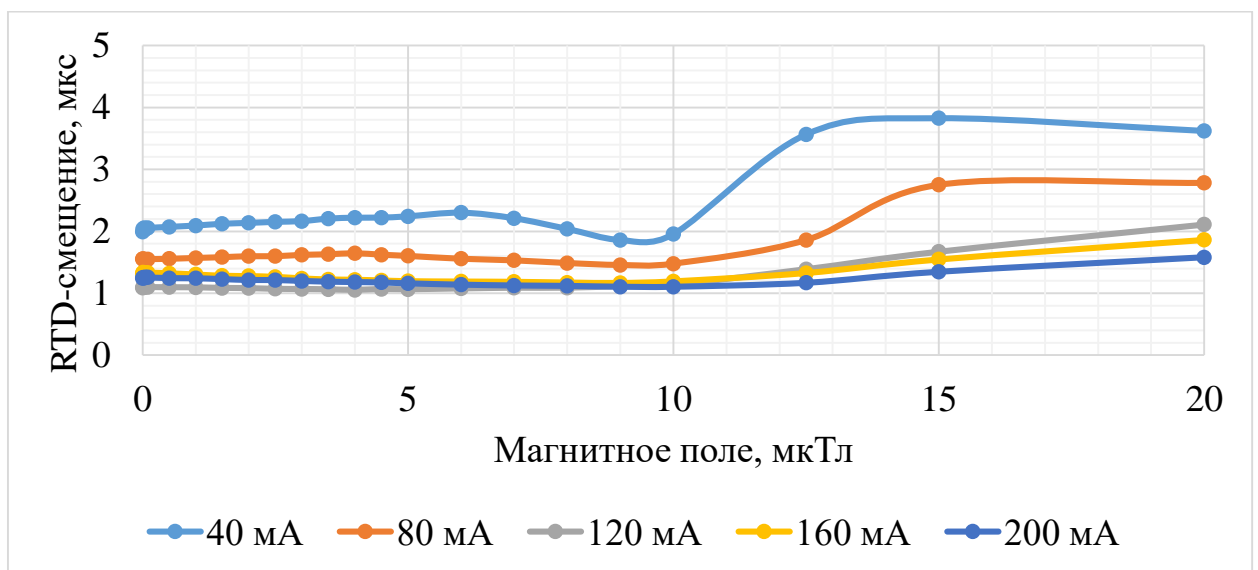


Рисунок 4.13 – Зависимости RTD-смещения образца 2 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.7 – Результаты измерений для образца 2 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	40	80	120	160	200
0	1,440	1,197	1,432	0,896	0,616
0,01	1,443	1,199	1,422	0,891	0,609
0,03	1,445	1,194	1,422	0,892	0,601
0,05	1,449	1,199	1,429	0,889	0,592
0,1	1,446	1,202	1,421	0,881	0,597
0,5	1,469	1,207	1,430	0,888	0,595
1,0	1,480	1,231	1,440	0,888	0,607
1,5	1,507	1,242	1,450	0,894	0,613
2,0	1,536	1,256	1,449	0,898	0,615
2,5	1,563	1,265	1,460	0,908	0,621
3,0	1,588	1,283	1,469	0,913	0,627
3,5	1,614	1,293	1,483	0,918	0,635
4,0	1,626	1,306	1,492	0,924	0,642
4,5	1,647	1,310	1,503	0,930	0,644
5,0	1,683	1,312	1,510	0,941	0,655
6,0	1,735	1,295	1,519	0,950	0,664
7,0	1,782	1,272	1,551	0,966	0,678
8,0	1,838	1,271	1,562	0,986	0,693
9,0	1,855	1,275	1,578	0,995	0,705
10,0	1,861	1,261	1,578	1,011	0,721
12,5	1,651	1,176	1,540	1,012	0,727
15,0	1,268	1,081	1,466	0,918	0,688
20,0	1,283	0,923	1,271	0,798	0,618

Данные из таблицы 4.7 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.14.

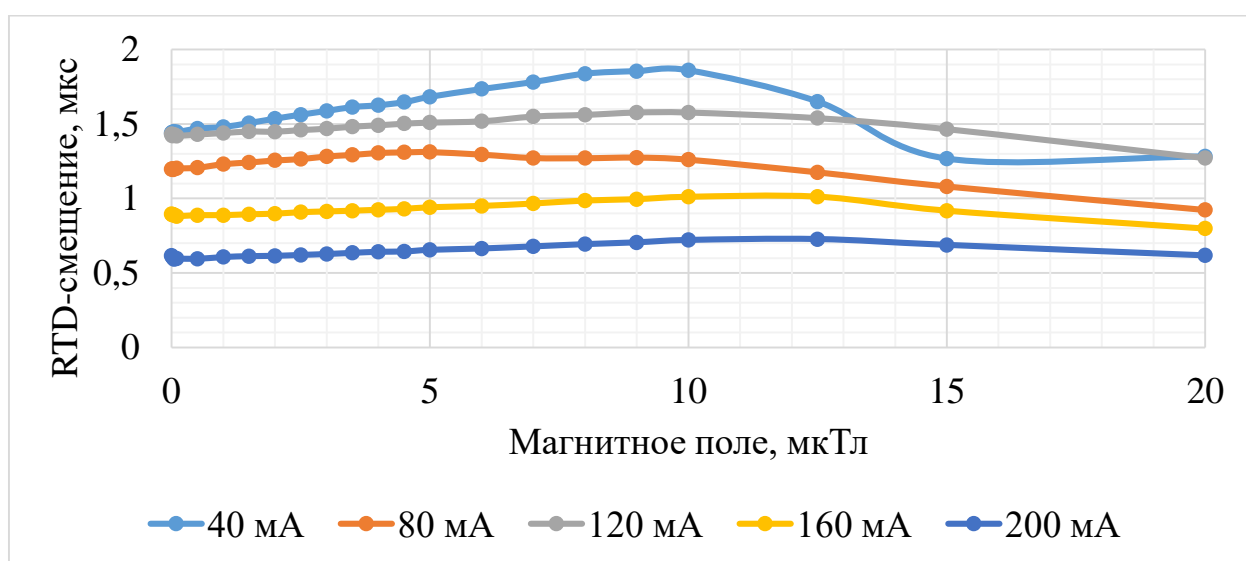


Рисунок 4.14 – Зависимости RTD-смещения образца 2 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.8 – Результаты измерений для образца 2 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	40	80	120	160	200
0	0,190	0,682	1,027	0,63	0,611
0,01	0,190	0,682	1,028	0,627	0,607
0,03	0,198	0,684	1,025	0,623	0,607
0,05	0,201	0,684	1,024	0,625	0,607
0,1	0,201	0,685	1,029	0,624	0,601
0,5	0,213	0,690	1,031	0,623	0,602
1,0	0,221	0,695	1,030	0,624	0,605
1,5	0,229	0,705	1,034	0,628	0,606
2,0	0,237	0,714	1,036	0,628	0,608
2,5	0,245	0,720	1,036	0,629	0,611
3,0	0,251	0,726	1,041	0,631	0,611
3,5	0,259	0,735	1,041	0,630	0,616
4,0	0,265	0,743	1,046	0,628	0,614
4,5	0,272	0,752	1,049	0,633	0,617
5,0	0,280	0,759	1,047	0,635	0,619
6,0	0,294	0,771	1,050	0,636	0,624
7,0	0,305	0,784	1,055	0,639	0,627
8,0	0,312	0,798	1,059	0,641	0,632
9,0	0,315	0,794	1,065	0,639	0,636
10,0	0,307	0,792	1,066	0,646	0,638
12,5	0,275	0,771	1,063	0,645	0,641
15,0	0,245	0,748	1,038	0,635	0,629
20,0	0,210	0,70	1,008	0,60	0,593

Данные из таблицы 4.8 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.15.

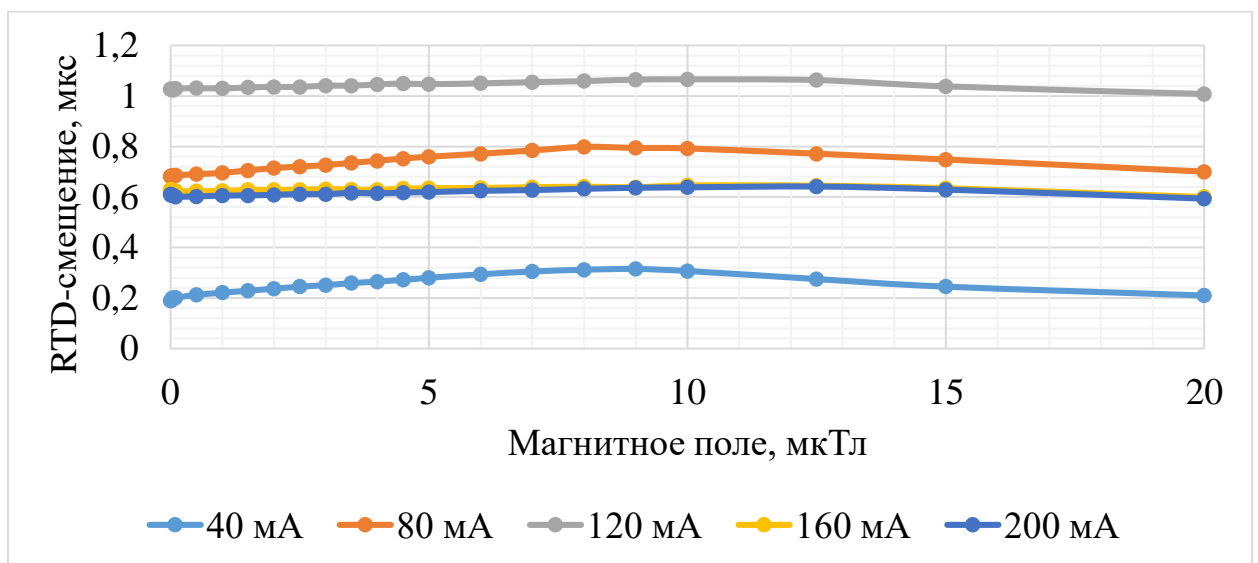


Рисунок 4.15 – Зависимости RTD-смещения образца 2 при частоте возбуждения 10 кГц

Образец 3

Измеренные значения RTD-смещения образца 3 представлены в таблице 4.9-4.12.

Таблица 4.9 – Результаты измерений для образца 3 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	60	120	180	240	300
0	9,279	11,022	9,804	6,439	6,208
0,01	9,033	12,165	10,264	6,795	6,260
0,03	8,800	12,368	10,657	7,270	6,066
0,05	8,771	12,368	10,980	7,342	6,205
0,1	8,727	12,529	11,050	7,424	6,136
0,5	8,749	12,746	11,309	7,600	6,125
1,0	8,763	12,855	11,233	7,696	6,177
1,5	8,778	12,766	11,507	7,872	6,208
2,0	8,777	12,820	11,721	8,014	6,418
2,5	8,803	12,916	11,801	8,214	6,409
3,0	8,817	13,129	12,000	8,301	6,522
3,5	8,857	13,054	12,033	8,461	6,633
4,0	8,909	13,187	11,958	8,664	6,740
4,5	8,961	13,242	12,284	8,896	6,753
5,0	8,919	13,425	12,300	8,922	6,744
6,0	9,070	13,609	12,365	9,425	6,801
7,0	9,142	13,730	12,921	9,739	7,272
8,0	9,192	14,026	13,109	10,116	7,468
9,0	9,275	14,214	13,410	10,329	7,496
10,0	9,362	14,017	13,664	10,517	7,632
12,5	9,429	14,270	14,250	11,455	7,982
15,0	9,554	14,603	14,488	12,305	8,502
20,0	12,894	19,960	18,141	13,786	10,627

Данные из таблицы 4.9 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.16.

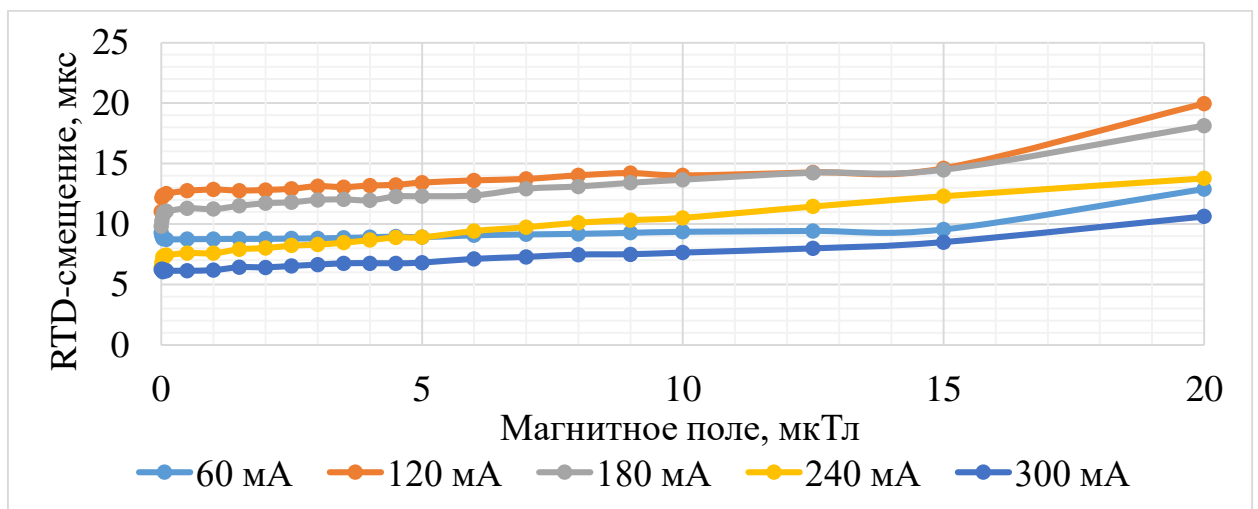


Рисунок 4.16 – Зависимости RTD-смещения образца 3 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.10 – Результаты измерений для образца 3 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	60	120	180	240	300
0	1,374	2,867	1,774	1,529	2,007
0,01	1,349	2,879	1,776	1,534	2
0,03	1,369	2,871	1,787	1,523	2,026
0,05	1,359	2,831	1,8	1,538	1,999
0,1	1,371	2,874	1,791	1,536	1,994
0,5	1,397	2,929	1,85	1,613	2,047
1,0	1,422	2,973	1,914	1,702	2,05
1,5	1,425	3,015	2,017	1,811	2,05
2,0	1,451	3,064	2,102	1,922	2,07
2,5	1,485	3,177	2,168	1,987	2,125
3,0	1,519	3,192	2,248	2,099	2,126
3,5	1,55	3,281	2,33	2,217	2,138
4,0	1,559	3,32	2,385	2,291	2,172
4,5	1,609	3,431	2,479	2,414	2,172
5,0	1,611	3,488	2,543	2,508	2,184
6,0	1,687	3,616	2,712	2,661	2,256
7,0	1,721	3,686	2,875	2,894	2,269
8,0	1,778	3,793	2,996	3,045	2,323
9,0	1,823	3,938	3,186	3,244	2,36
10,0	1,863	4,094	3,318	3,452	2,378
12,5	1,991	4,361	3,704	3,909	2,494
15,0	2,149	4,673	4,076	4,422	2,578
20,0	2,661	5,861	5,35	5,935	3,037

Данные из таблицы 4.10 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.17.

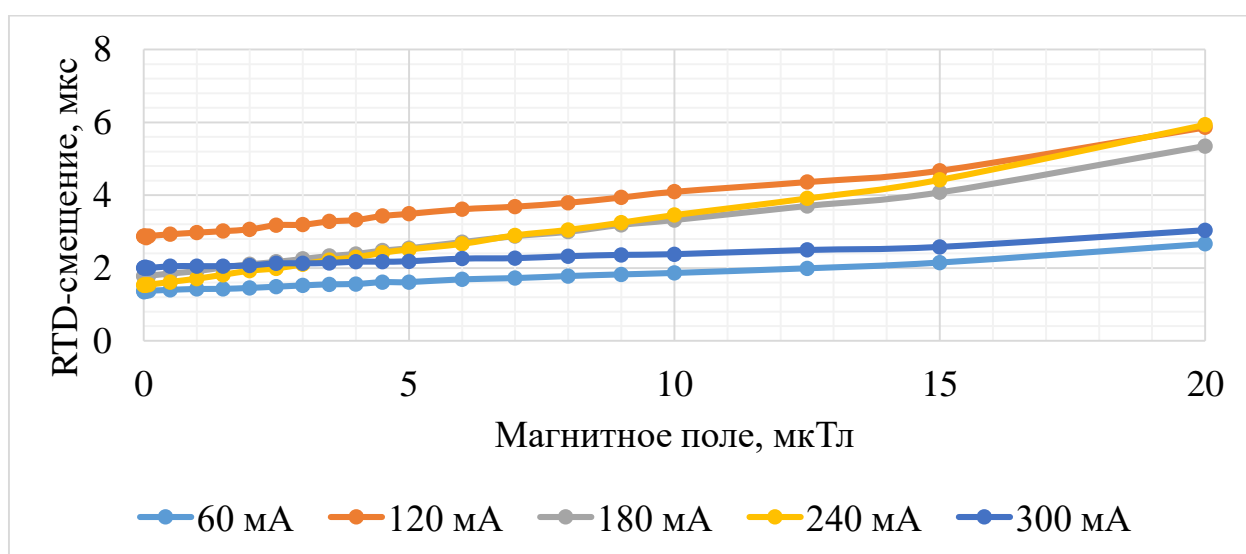


Рисунок 4.17 – Зависимости RTD-смещения образца 3 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.11 – Результаты измерений для образца 3 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	60	120	180	240	300
0	3,821	2,364	2,496	2,061	2,089
0,01	3,794	2,338	2,51	2,033	1,771
0,03	3,837	2,273	2,53	2,045	1,654
0,05	3,778	2,267	2,572	2,059	1,58
0,1	3,806	2,287	2,585	2,061	1,624
0,5	3,807	2,337	2,583	2,087	1,589
1,0	3,862	2,286	2,67	2,077	1,618
1,5	3,872	2,345	2,702	2,129	2,089
2,0	3,849	2,354	2,681	2,174	1,585
2,5	3,903	2,345	2,735	2,11	1,571
3,0	3,862	2,371	2,763	2,157	1,566
3,5	3,884	2,351	2,765	2,205	1,57
4,0	3,978	2,366	2,756	2,235	1,521
4,5	4,023	2,384	2,825	2,209	1,556
5,0	3,985	2,416	2,84	2,222	1,533
6,0	4,049	2,426	2,967	2,214	1,535
7,0	4,115	2,439	2,991	2,231	1,496
8,0	4,175	2,475	3,088	2,352	1,496
9,0	4,137	2,471	3,157	2,365	1,45
10,0	4,18	2,543	3,215	2,396	1,406
12,5	4,29	2,641	3,272	2,507	1,394
15,0	4,326	2,672	3,465	2,543	1,356
20,0	4,741	3,125	3,885	3,05	1,467

Данные из таблицы 4.11 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.18.

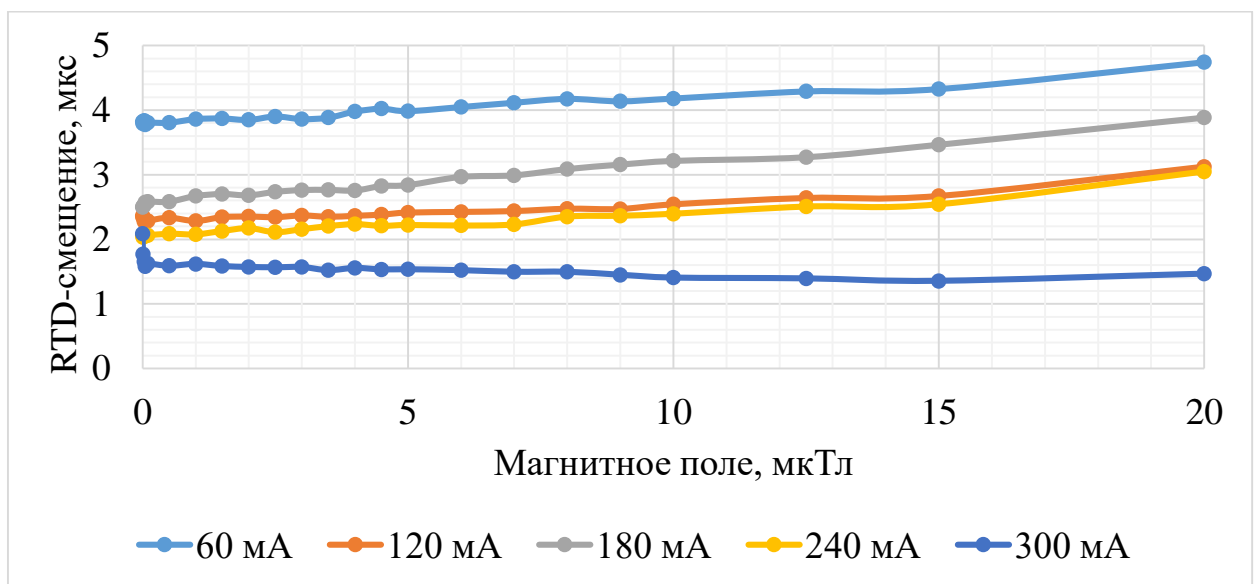


Рисунок 4.18 – Зависимости RTD-смещения образца 3 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.12 – Результаты измерений для образца 3 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	60	120	180	240	300
0	1,277	0,381	0,97	0,713	0,109
0,01	1,259	0,377	0,969	0,683	0,105
0,03	1,272	0,37	0,965	0,69	0,087
0,05	1,256	0,368	0,977	0,679	0,081
0,1	1,247	0,373	0,98	0,682	0,077
0,5	1,27	0,381	0,99	0,682	0,073
1,0	1,263	0,39	1,002	0,683	0,074
1,5	1,264	0,392	1,006	0,7	0,069
2,0	1,258	0,403	1,016	0,693	0,065
2,5	1,268	0,415	1,042	0,694	0,059
3,0	1,272	0,427	1,053	0,699	0,057
3,5	1,277	0,433	1,059	0,708	0,054
4,0	1,269	0,444	1,064	0,707	0,053
4,5	1,276	0,452	1,081	0,715	0,049
5,0	1,266	0,474	1,107	0,714	0,044
6,0	1,288	0,492	1,112	0,723	0,037
7,0	1,282	0,503	1,146	0,729	0,035
8,0	1,289	0,527	1,167	0,744	0,03
9,0	1,282	0,534	1,179	0,744	0,02
10,0	1,29	0,55	1,198	0,744	0,011
12,5	1,3	0,61	1,261	0,755	0,026
15,0	1,293	0,668	1,286	0,765	0,049
20,0	1,073	0,745	1,151	0,557	0,082

Данные из таблицы 4.12 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.19.

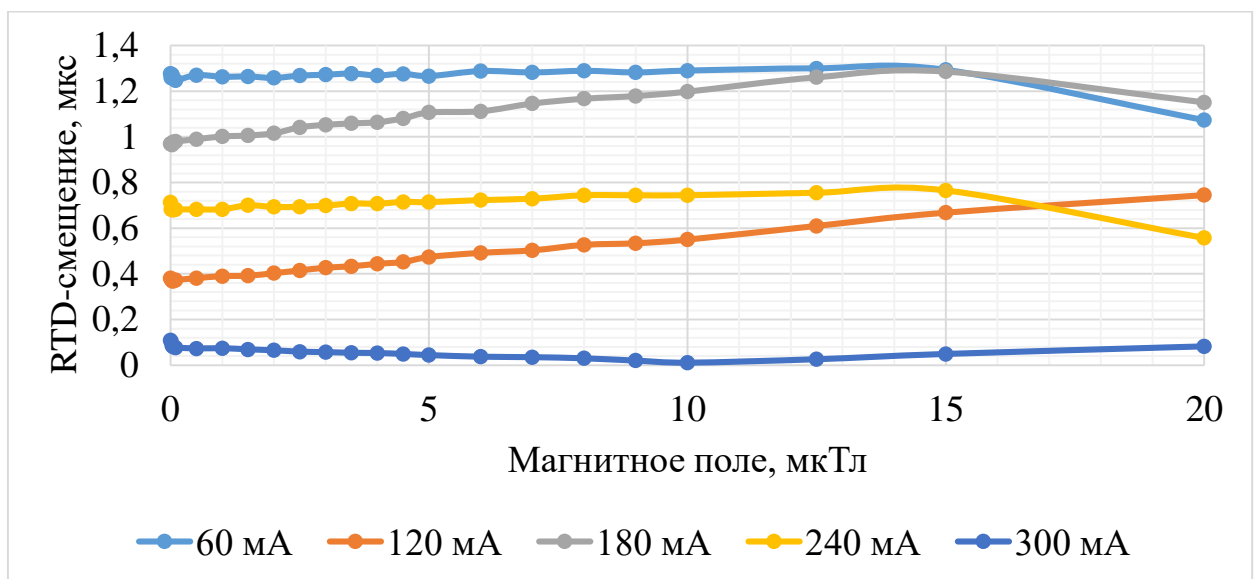


Рисунок 4.19 – Зависимости RTD-смещения образца 3 при частоте возбуждения 10 кГц

Образец 4

Измеренные значения RTD-смещения образца 4 представлены в таблице 4.13-4.16.

Таблица 4.13 – Результаты измерений для образца 4 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	30	60	90	120	150
0	25,241	13,532	13,561	12,025	9,882
0,01	25,271	13,694	13,555	12,095	10,094
0,03	25,297	13,704	13,559	12,106	10,139
0,05	25,300	13,726	13,553	12,112	10,172
0,1	25,425	13,739	13,533	12,112	10,183
0,5	25,851	13,939	13,418	12,137	10,193
1,0	26,361	14,173	13,344	12,177	10,222
1,5	26,982	14,448	13,281	12,240	10,259
2,0	27,545	14,629	13,228	12,269	10,272
2,5	28,025	14,892	13,145	12,311	10,317
3,0	28,578	15,088	13,065	12,365	10,336
3,5	28,983	15,269	12,964	12,414	10,374
4,0	29,753	15,482	12,926	12,450	10,407
4,5	30,270	15,777	12,782	12,484	10,414
5,0	30,628	16,093	12,706	12,577	10,442
6,0	31,878	16,411	12,606	12,628	10,536
7,0	32,702	16,826	12,427	12,714	10,584
8,0	34,196	17,438	12,478	12,801	10,642
9,0	34,727	18,034	13,190	12,918	10,700
10,0	36,095	18,275	13,899	13,013	10,767
12,5	38,740	19,613	16,836	13,946	10,912
15,0	39,990	19,939	21,057	17,368	12,659
20,0	42,022	20,654	27,035	21,945	15,937

Данные из таблицы 4.13 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.20.

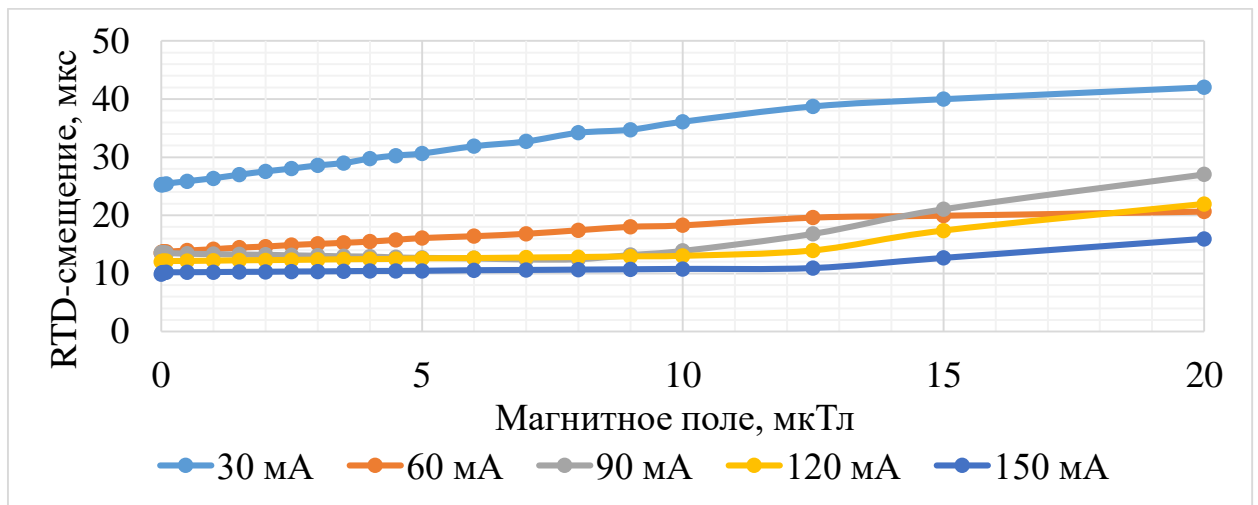


Рисунок 4.20 – Зависимости RTD-смещения образца 4 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.14 – Результаты измерений для образца 4 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	30	60	90	120	150
0	8,579	6,301	4,892	4,455	4,150
0,01	8,794	6,316	4,938	4,494	4,187
0,03	8,814	6,318	4,946	4,493	4,180
0,05	8,806	6,322	4,960	4,478	4,203
0,1	8,835	6,325	4,958	4,474	4,196
0,5	8,908	6,367	4,936	4,424	4,157
1,0	9,014	6,409	4,902	4,354	4,132
1,5	9,115	6,454	4,879	4,285	4,088
2,0	9,216	6,518	4,848	4,216	4,035
2,5	9,297	6,574	4,817	4,151	3,986
3,0	9,380	6,623	4,790	4,060	3,938
3,5	9,506	6,676	4,753	3,985	3,892
4,0	9,598	6,726	4,746	3,952	3,846
4,5	9,649	6,659	4,752	3,895	3,819
5,0	9,763	6,552	4,795	3,878	3,776
6,0	9,967	6,364	4,838	3,805	3,682
7,0	9,611	6,192	4,867	3,795	3,607
8,0	8,748	6,059	4,910	3,754	3,590
9,0	7,987	5,851	5,002	3,734	3,520
10,0	8,378	5,944	5,118	3,858	3,536
12,5	15,846	7,746	6,270	4,456	3,829
15,0	17,053	11,884	7,560	5,458	4,605
20,0	16,098	12,028	9,611	6,946	5,701

Данные из таблицы 4.14 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.21.

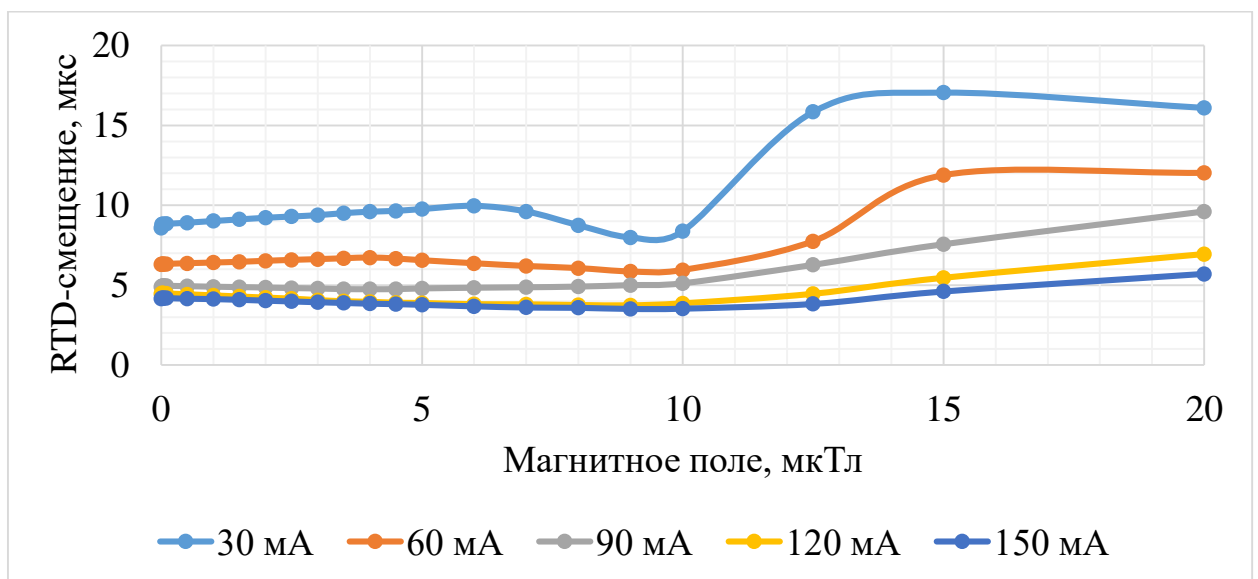


Рисунок 4.21 – Зависимости RTD-смещения образца 4 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.15 – Результаты измерений для образца 4 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	30	60	90	120	150
0	3,004	3,439	3,565	2,618	1,908
0,01	3,016	3,456	3,551	2,612	1,876
0,03	3,023	3,459	3,54	2,605	1,848
0,05	3,025	3,459	3,538	2,587	1,809
0,1	3,037	3,467	3,543	2,575	1,817
0,5	3,111	3,514	3,565	2,575	1,826
1,0	3,197	3,594	3,594	2,594	1,863
1,5	3,31	3,659	3,635	2,617	1,895
2,0	3,422	3,716	3,675	2,638	1,92
2,5	3,554	3,771	3,716	2,686	1,948
3,0	3,657	3,848	3,764	2,719	1,978
3,5	3,785	3,909	3,814	2,741	2,014
4,0	3,868	3,948	3,857	2,77	2,033
4,5	3,961	3,974	3,894	2,794	2,057
5,0	4,123	3,968	3,931	2,826	2,104
6,0	4,359	3,897	3,993	2,886	2,147
7,0	4,572	3,81	4,104	2,959	2,21
8,0	4,812	3,817	4,175	3,024	2,266
9,0	4,926	3,81	4,232	3,1	2,329
10,0	4,971	3,748	4,24	3,155	2,392
12,5	3,976	3,37	4,085	3,154	2,432
15,0	2,185	2,926	3,733	2,746	2,258
20,0	2,277	2,175	2,841	2,166	1,933

Данные из таблицы 4.15 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.22.

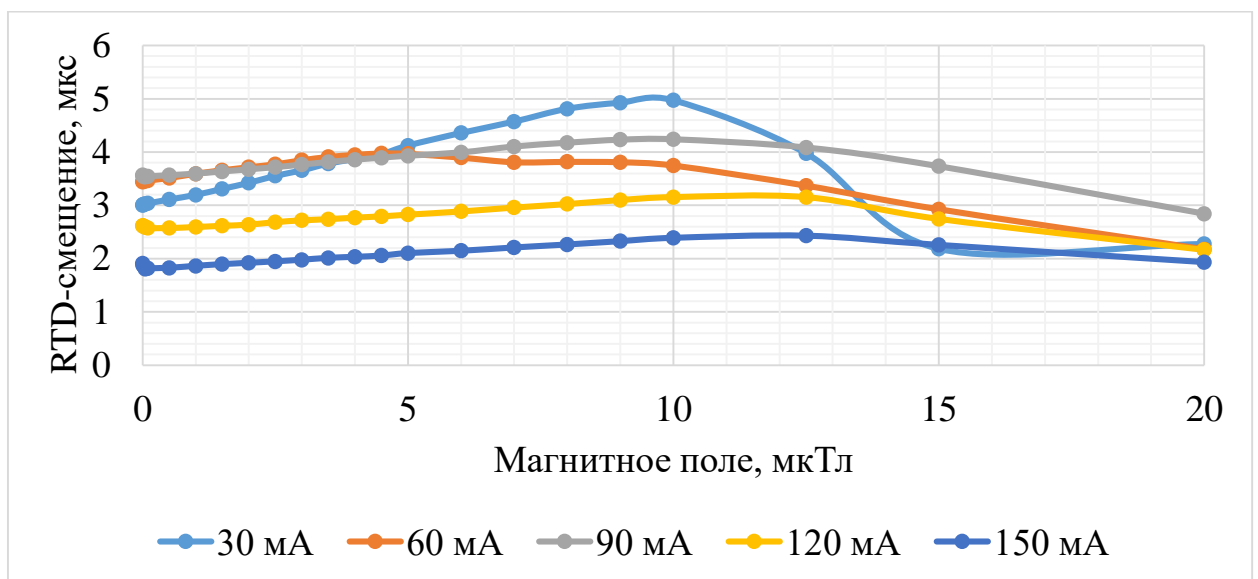


Рисунок 4.22 – Зависимости RTD-смещения образца 4 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.16 – Результаты измерений для образца 4 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	30	60	90	120	150
0	0,638	1,447	1,966	1,54	1,55
0,01	0,639	1,448	1,97	1,53	1,544
0,03	0,672	1,452	1,974	1,524	1,539
0,05	0,677	1,458	1,976	1,516	1,532
0,1	0,687	1,464	1,977	1,515	1,512
0,5	0,743	1,486	1,986	1,52	1,517
1,0	0,78	1,517	1,997	1,524	1,527
1,5	0,82	1,567	2,006	1,529	1,535
2,0	0,856	1,595	2,017	1,534	1,544
2,5	0,888	1,626	2,028	1,538	1,553
3,0	0,925	1,663	2,035	1,544	1,562
3,5	0,962	1,694	2,045	1,548	1,57
4,0	0,986	1,732	2,057	1,552	1,578
4,5	1,016	1,77	2,067	1,558	1,589
5,0	1,05	1,806	2,076	1,564	1,597
6,0	1,123	1,863	2,095	1,571	1,612
7,0	1,176	1,92	2,116	1,584	1,632
8,0	1,205	1,988	2,133	1,59	1,651
9,0	1,213	1,98	2,146	1,6	1,671
10,0	1,185	1,95	2,163	1,614	1,682
12,5	1,036	1,854	2,153	1,614	1,683
15,0	0,89	1,749	2,02	1,573	1,645
20,0	0,731	1,537	1,889	1,408	1,467

Данные из таблицы 4.16 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.23.

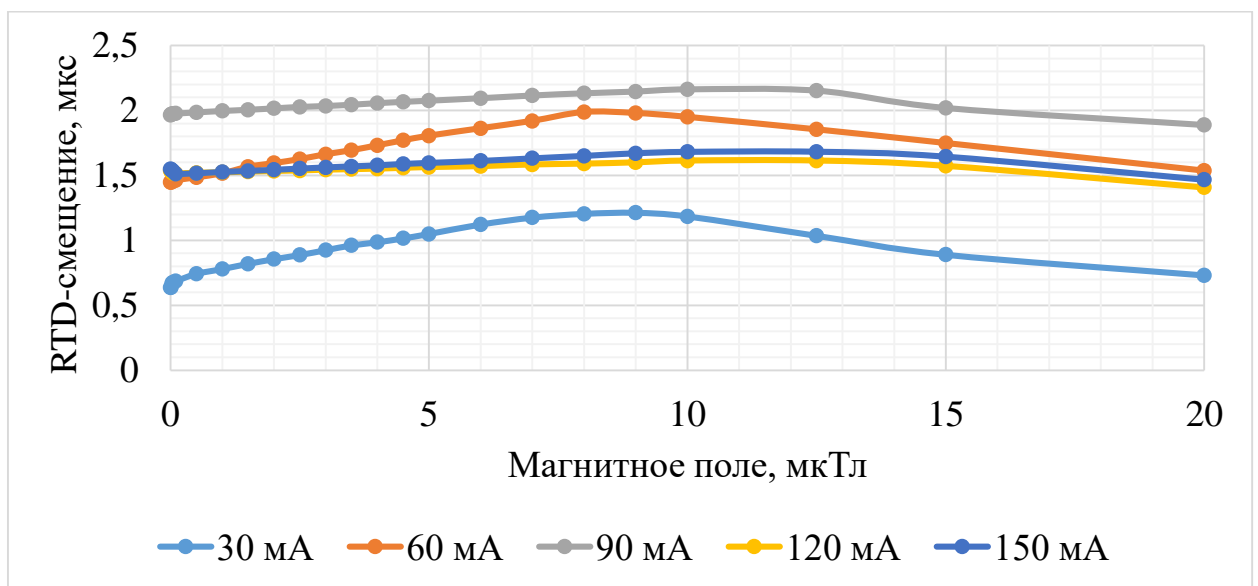


Рисунок 4.23 – Зависимости RTD-смещения образца 4 при частоте возбуждения 10 кГц

Образец 5

Измеренные значения RTD-смещения образца 5 представлены в таблице 4.17-4.20.

Таблица 4.17 – Результаты измерений для образца 5 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	30,45	40,58	45,1	45,05	48,61
0,01	30,16	39,49	46,8	44,05	51,85
0,03	29,35	41,13	44,4	48,49	49,53
0,05	29,96	40,1	44,71	46	48,36
0,1	31,18	40,16	47,17	48,05	47,41
0,5	30,27	38,32	44,03	46,81	49,85
1,0	31,57	40,16	45,31	44,46	49,03
1,5	30,35	38,25	45,02	48,55	51,19
2,0	31,59	38,53	44,75	48,49	48,83
2,5	29,4	41,61	47	48,23	50,97
3,0	29,29	40,19	46,27	44,5	50,7
3,5	29,66	42,09	43,22	46,42	50,46
4,0	29,4	42,03	43,36	48,22	50,95
4,5	30,93	39,11	44,79	47,01	51,91
5,0	29,48	38,59	45,03	48,32	47,62
6,0	29,96	41,8	46,94	47,53	50,15
7,0	30,58	42,56	44,4	47,65	49,55
8,0	29,56	40,21	46,37	48,99	49,26
9,0	30,6	42,48	43,86	47,38	50,45
10,0	29,45	41,81	45,75	46,92	49,2
12,5	29,61	40,44	47,92	48,93	48,64
15,0	31,86	42,31	45,8	48,17	53,38
20,0	34,38	46,66	53,31	55,28	57,98

Данные из таблицы 4.17 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.24.

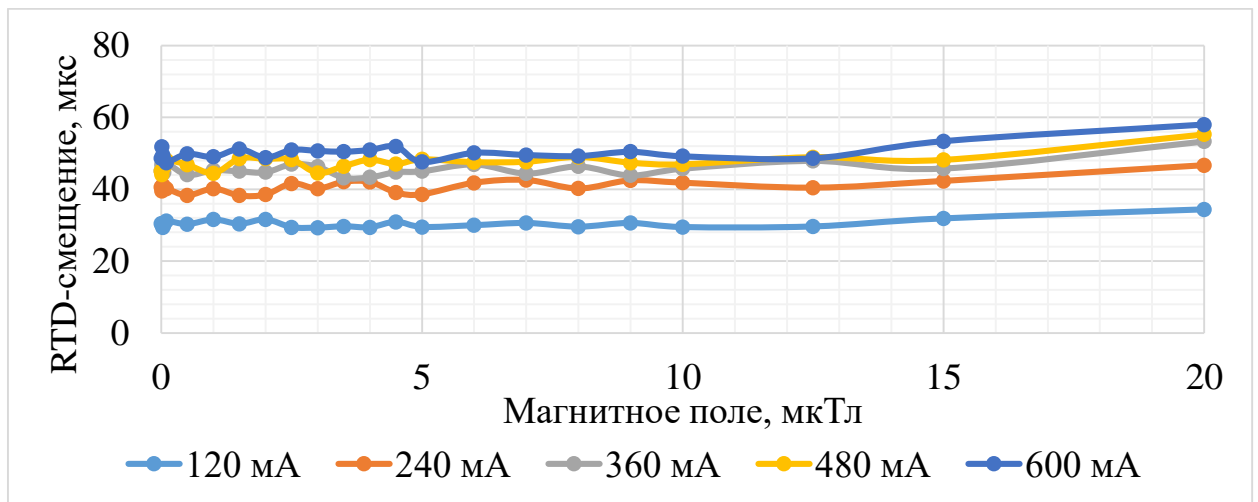


Рисунок 4.24 – Зависимости RTD-смещения образца 5 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.18 – Результаты измерений для образца 5 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ mA}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	12,72	20	17,05	5,156	2,638
0,01	13,01	19	17,54	5,226	2,732
0,03	13,04	20,1	17,82	5,092	2,827
0,05	13,63	19,48	18,56	5,159	2,706
0,1	13,03	18,53	17,99	5,074	2,733
0,5	12,72	20,21	17,76	5,151	2,838
1,0	13	20,46	17,7	5,242	2,656
1,5	13,27	19,92	16,81	4,809	2,857
2,0	13,23	20,4	17,35	5,191	2,594
2,5	13,83	19,57	17,34	4,818	2,723
3,0	12,72	18,6	17,5	5,175	2,568
3,5	13,2	18,65	17,08	4,82	2,641
4,0	12,81	19,16	17,34	5,038	2,543
4,5	13,2	18,68	17,19	5,034	2,528
5,0	13,6	19,1	16,71	4,878	2,743
6,0	13,31	18,85	17,78	4,912	2,506
7,0	13,19	20,11	17,3	4,909	2,509
8,0	13,41	18,55	16,8	4,766	2,569
9,0	12,98	19,97	17,43	4,626	2,422
10,0	13,86	19,34	16,42	4,99	2,423
12,5	13,74	19,09	17,14	4,592	2,468
15,0	14,02	18,7	16,32	4,495	2,336
20,0	15,85	22,02	18,6	5,134	2,318

Данные из таблицы 4.18 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.25.

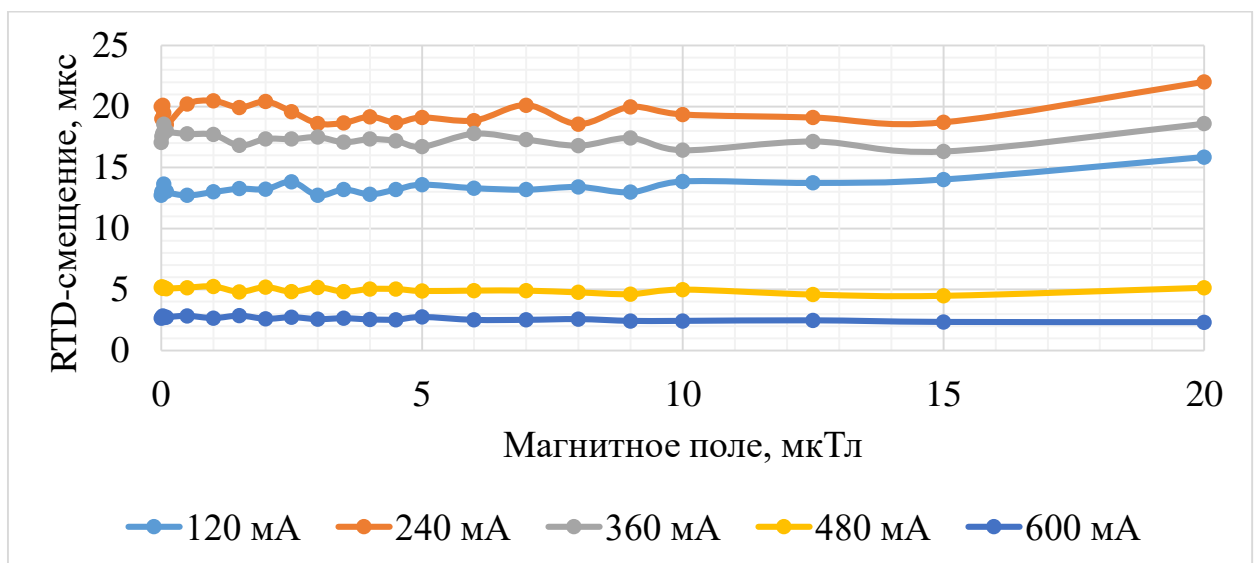


Рисунок 4.25 – Зависимости RTD-смещения образца 5 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.19 – Результаты измерений для образца 5 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	5,231	5,549	2,592	18,59	0,6798
0,01	5,97	4,746	3,807	16,97	1,104
0,03	5,843	4,991	3,195	18,12	0,1643
0,05	5,698	5,519	3,363	18,59	0,3905
0,1	4,838	5,723	3,436	16,93	1,782
0,5	6,023	5,169	2,826	17,92	0,4407
1,0	5,251	5,905	3,054	17,77	0,6842
1,5	5,685	4,284	3,137	17,45	1,595
2,0	5,082	5,587	3,741	17,36	1,104
2,5	6,443	5,602	3,297	18,4	1,114
3,0	4,673	4,24	4,393	17,87	0,2118
3,5	4,82	4,67	3,756	16,94	0,4918
4,0	5,292	4,513	3,232	17,36	0,6275
4,5	5,816	5,616	3,454	17,21	1,304
5,0	5,891	5,401	4,166	18,44	0,1606
6,0	4,633	4,417	3,097	18,37	1,432
7,0	4,678	4,959	4,088	18,29	1,226
8,0	5,693	4,767	2,557	17,1	0,2796
9,0	5,386	5,232	2,561	17,07	1,456
10,0	4,935	5,292	2,941	18,19	1,172
12,5	5,437	5,955	3,965	18,03	1,043
15,0	4,601	4,942	2,805	17,49	1,52
20,0	6,889	6,418	2,686	20,41	0,557

Данные из таблицы 4.19 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.26.

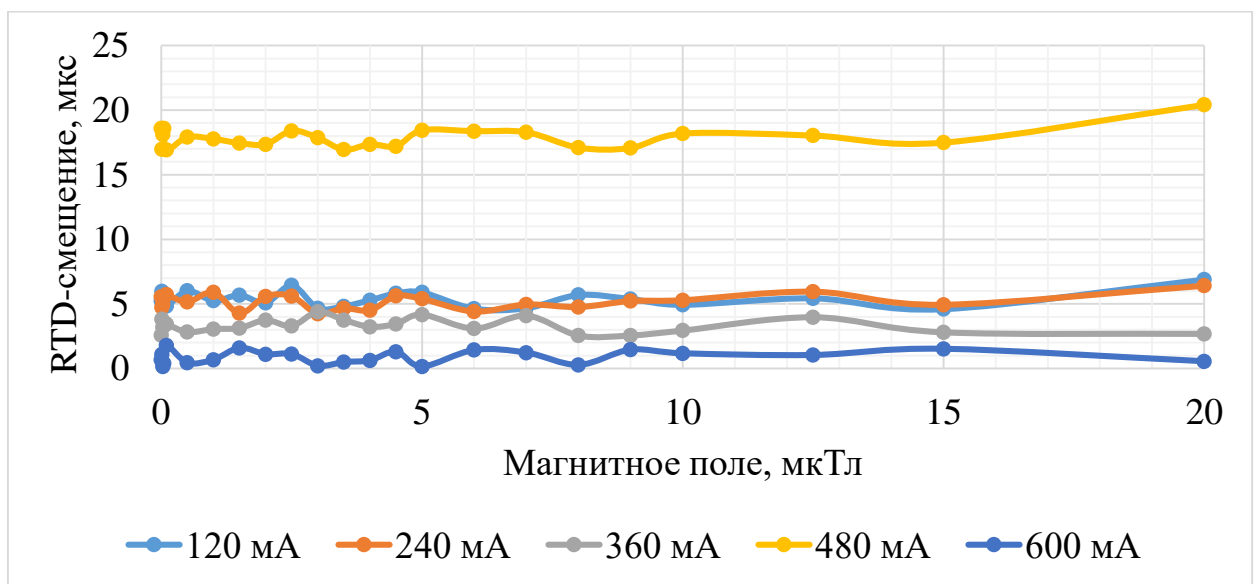


Рисунок 4.26 – Зависимости RTD-смещения образца 5 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.20 – Результаты измерений для образца 5 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	2,487	1,248	2,954	2,511	0,3751
0,01	2,349	1,292	2,885	2,534	0,8458
0,03	2,893	0,7145	2,794	2,403	1,053
0,05	2,151	1,019	3,339	2,461	0,5813
0,1	2,73	1,212	3,213	2,555	0,6149
0,5	2,569	0,8415	2,505	2,168	0,5359
1,0	2,311	0,7328	2,594	2,389	0,721
1,5	2,608	1,56	2,501	2,674	0,9691
2,0	2,377	1,473	2,502	2,488	0,2337
2,5	2,002	0,7487	2,898	2,159	0,5954
3,0	2,983	1,133	2,69	2,435	0,7383
3,5	2,977	0,9905	2,617	1,831	0,9313
4,0	2,038	1,243	3,052	2,728	0,6585
4,5	2,014	1,08	2,454	1,826	0,3997
5,0	2,588	0,7491	2,42	2,155	1,058
6,0	2,823	1,199	2,785	1,749	0,7913
7,0	2,827	0,9578	3,061	2,476	1,198
8,0	2,255	0,5663	2,433	2,296	0,3224
9,0	2,746	1,049	3,098	2,012	0,8024
10,0	2,427	1,503	2,462	2,504	0,4307
12,5	2,478	0,9413	3,016	2,623	1,184
15,0	2,321	0,853	2,889	1,888	0,8672
20,0	2,702	1,517	3,083	2,119	0,7415

Данные из таблицы 4.20 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.27.

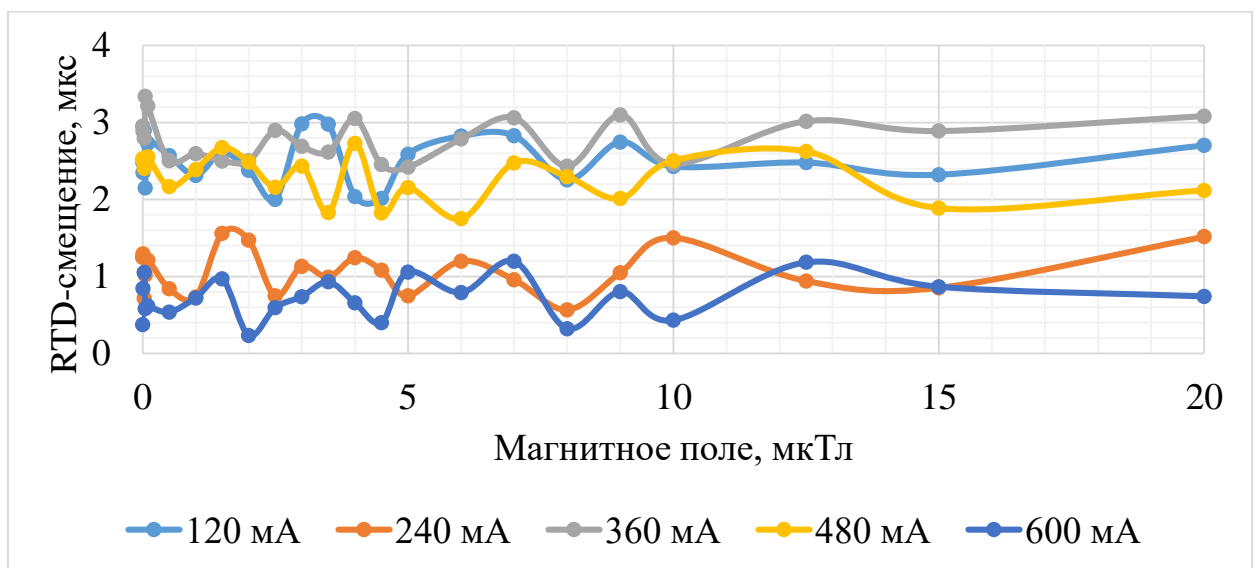


Рисунок 4.27 – Зависимости RTD-смещения образца 5 при частоте возбуждения 10 кГц

Образец 6

Измеренные значения RTD-смещения образца 6 представлены в таблице 4.21-4.24.

Таблица 4.21 – Результаты измерений для образца 6 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	3,724	5,942	8,534	2,939	0,444
0,01	3,614	5,857	8,54	3,006	0,51
0,03	3,289	6,541	8,548	2,977	0,551
0,05	2,046	6,89	8,563	2,962	0,549
0,1	2,051	6,959	8,585	2,956	0,557
0,5	2,137	6,91	8,682	2,881	0,533
1,0	2,324	6,851	8,656	2,793	0,45
1,5	2,519	6,803	8,745	2,608	0,405
2,0	2,626	6,757	8,757	2,581	0,384
2,5	2,799	6,744	8,67	2,376	0,331
3,0	2,977	6,718	8,745	2,29	0,207
3,5	3,121	6,652	8,844	1,968	0,144
4,0	3,265	6,547	8,758	1,921	0,098
4,5	3,577	6,518	8,962	1,825	0,087
5,0	3,614	6,506	8,954	1,798	0,045
6,0	3,916	6,397	8,889	1,512	0,107
7,0	4,39	6,307	9,026	1,103	0,227
8,0	4,591	6,206	8,952	0,966	0,304
9,0	4,954	6,129	9,117	0,734	0,466
10,0	5,39	5,972	9,013	0,362	0,612
12,5	6,292	5,764	9,019	0,283	0,992
15,0	7,031	5,554	9,148	0,052	1,348
20,0	8,177	5,032	9,033	1,95	2,378

Данные из таблицы 4.21 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.28.

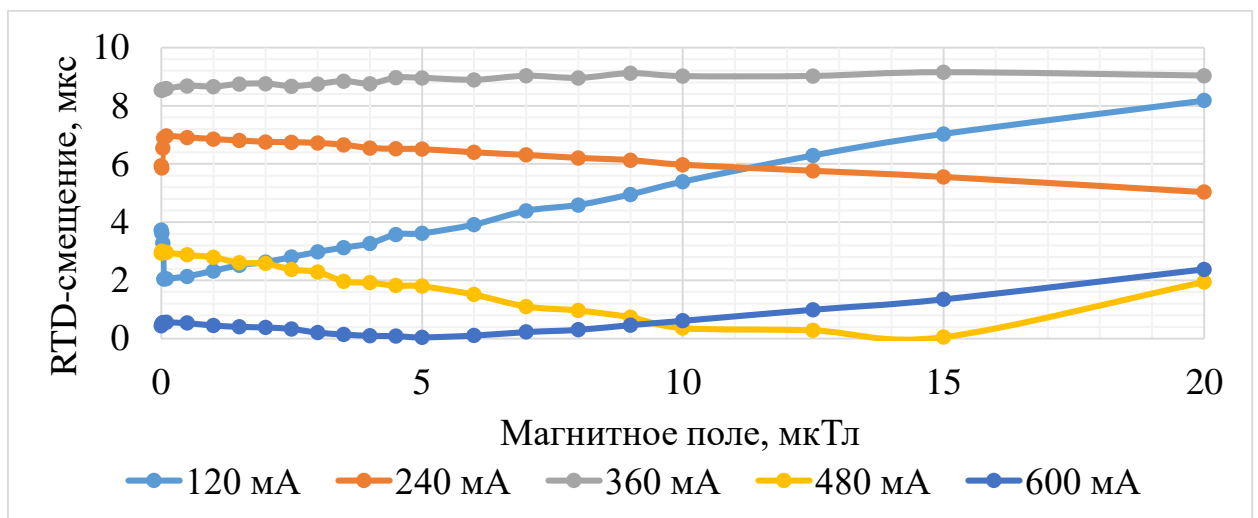


Рисунок 4.28 – Зависимости RTD-смещения образца 6 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.22 – Результаты измерений для образца 6 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	1,354	2,639	2,91	3,89	1,096
0,01	1,697	2,72	2,802	3,822	1,149
0,03	1,913	2,808	2,798	3,8	1,157
0,05	1,948	2,833	2,792	3,781	1,164
0,1	2,024	2,864	2,782	3,77	1,175
0,5	2,009	2,801	2,749	3,754	1,145
1,0	1,926	2,75	2,699	3,74	1,13
1,5	1,857	2,698	2,65	3,717	1,083
2,0	1,743	2,628	2,611	3,701	1,054
2,5	1,681	2,558	2,563	3,682	1,017
3,0	1,59	2,474	2,506	3,666	0,974
3,5	1,513	2,412	2,462	3,649	0,943
4,0	1,418	2,369	2,418	3,633	0,906
4,5	1,331	2,285	2,379	3,61	0,868
5,0	1,247	2,217	2,317	3,593	0,84
6,0	1,086	2,082	2,226	3,564	0,769
7,0	0,92	1,957	2,143	3,522	0,698
8,0	0,765	1,831	2,044	3,486	0,629
9,0	0,61	1,694	1,931	3,444	0,558
10,0	0,408	1,484	1,823	3,418	0,486
12,5	0,316	1,072	1,59	3,187	0,302
15,0	0,533	0,645	1,346	2,964	0,247
20,0	1,126	0,18	0,762	3,141	0,358

Данные из таблицы 4.22 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.29.

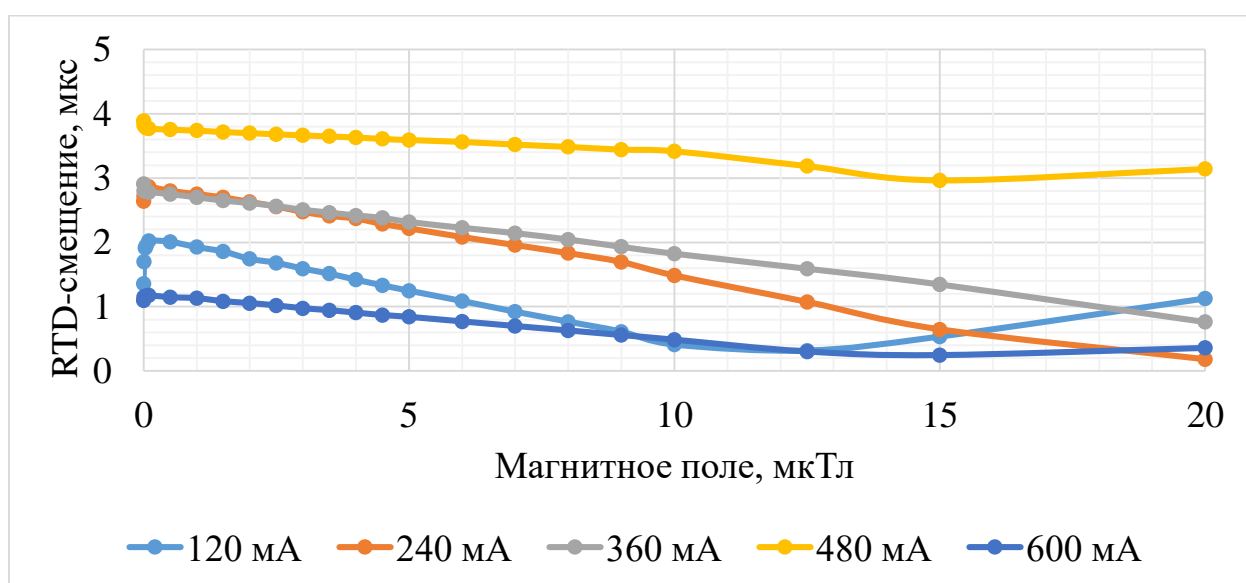


Рисунок 4.29 – Зависимости RTD-смещения образца 6 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.23 – Результаты измерений для образца 6 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	1,41	1,532	1,256	0,463	0,799
0,01	1,495	1,551	1,27	0,511	0,818
0,03	1,512	1,552	1,274	0,552	0,818
0,05	1,52	1,556	1,276	0,582	0,769
0,1	1,528	1,552	1,274	0,59	0,823
0,5	1,507	1,53	1,257	0,581	0,804
1,0	1,464	1,514	1,237	0,563	0,774
1,5	1,433	1,474	1,212	0,545	0,746
2,0	1,415	1,45	1,2	0,529	0,721
2,5	1,386	1,426	1,173	0,508	0,698
3,0	1,347	1,392	1,152	0,495	0,678
3,5	1,331	1,375	1,131	0,478	0,666
4,0	1,3	1,355	1,107	0,459	0,647
4,5	1,273	1,321	1,088	0,44	0,626
5,0	1,253	1,29	1,072	0,421	0,6
6,0	1,189	1,232	1,028	0,394	0,557
7,0	1,13	1,178	0,984	0,359	0,509
8,0	1,081	1,135	0,929	0,321	0,458
9,0	1,03	1,078	0,894	0,293	0,416
10,0	0,967	1,016	0,846	0,257	0,366
12,5	0,84	0,88	0,732	0,164	0,244
15,0	0,717	0,698	0,606	0,13	0,164
20,0	0,581	0,466	0,44	0,113	0,131

Данные из таблицы 4.23 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.30.

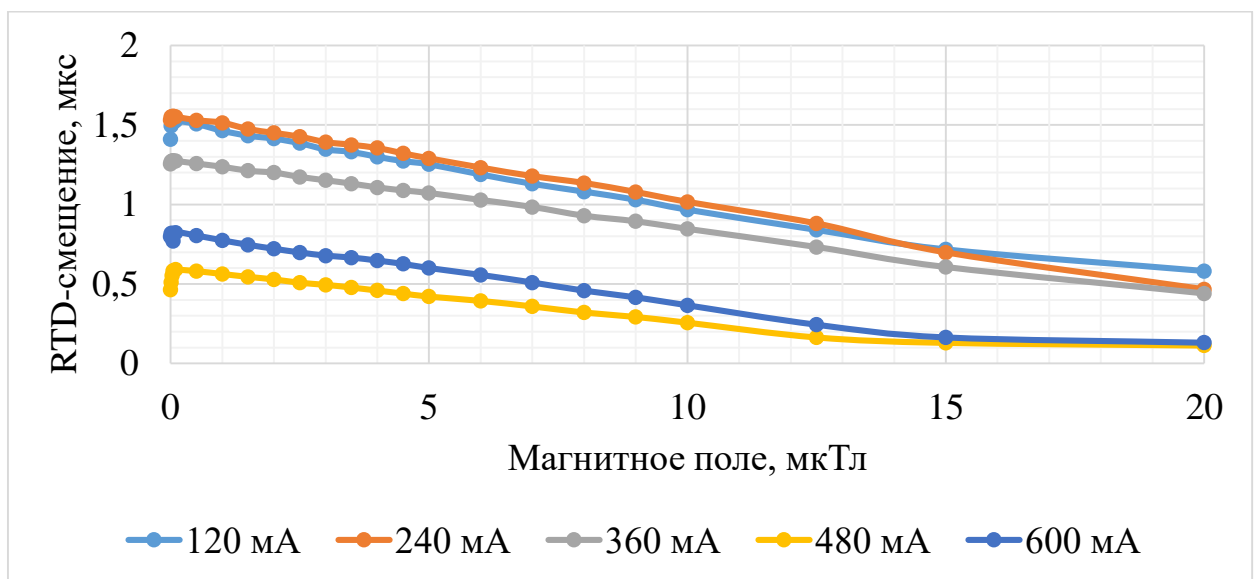


Рисунок 4.30 – Зависимости RTD-смещения образца 6 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.24 – Результаты измерений для образца 6 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	120	240	360	480	600
0	0,295	0,371	0,554	0,434	0,111
0,01	0,285	0,365	0,535	0,42	0,11
0,03	0,272	0,352	0,513	0,4	0,108
0,05	0,24	0,34	0,494	0,393	0,106
0,1	0,226	0,336	0,455	0,385	0,104
0,5	0,221	0,326	0,443	0,374	0,106
1,0	0,214	0,321	0,426	0,366	0,11
1,5	0,207	0,314	0,414	0,356	0,114
2,0	0,2	0,306	0,406	0,345	0,117
2,5	0,192	0,3	0,39	0,337	0,12
3,0	0,186	0,294	0,37	0,33	0,124
3,5	0,178	0,289	0,353	0,32	0,127
4,0	0,172	0,283	0,334	0,307	0,13
4,5	0,165	0,275	0,323	0,297	0,134
5,0	0,159	0,27	0,311	0,285	0,138
6,0	0,145	0,257	0,276	0,269	0,144
7,0	0,13	0,244	0,24	0,25	0,149
8,0	0,118	0,231	0,201	0,23	0,156
9,0	0,102	0,217	0,17	0,206	0,163
10,0	0,086	0,202	0,142	0,187	0,17
12,5	0,051	0,171	0,057	0,137	0,186
15,0	0,048	0,138	0,028	0,087	0,206
20,0	0,138	0,121	0,024	0,084	0,285

Данные из таблицы 4.24 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.31.

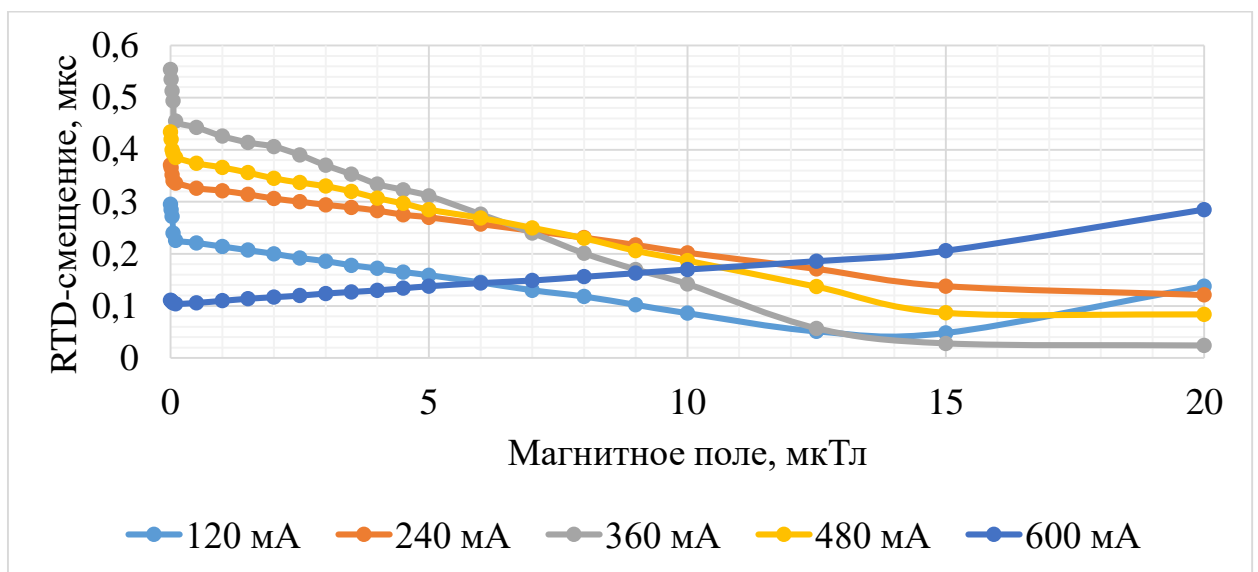


Рисунок 4.31 – Зависимости RTD-смещения образца 6 при частоте возбуждения 10 кГц

Образец 7

Измеренные значения RTD-смещения образца 7 представлены в таблице 4.25-4.28.

Таблица 4.25 – Результаты измерений для образца 7 при частоте 1 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	150	300	450	600	750
0	25,647	19,418	16,396	25,131	15,155
0,01	28,797	19,766	16,101	25,529	15,226
0,03	26,688	19,701	16,541	24,192	15,217
0,05	26,553	21,266	16,266	26,001	14,763
0,1	26,691	21,483	15,938	26,39	15,514
0,5	26,776	21,815	17,012	26,297	15,792
1,0	26,815	21,846	17,098	26,324	15,695
1,5	26,853	21,652	17,164	26,336	15,877
2,0	26,891	21,502	17,194	26,349	15,877
2,5	26,924	21,851	17,283	26,295	15,958
3,0	26,974	21,566	17,334	26,341	15,94
3,5	27,035	21,168	17,33	26,36	15,922
4,0	27,08	21,533	17,354	26,312	15,908
4,5	27,09	21,284	17,389	26,295	15,846
5,0	27,198	21,431	17,523	26,346	15,826
6,0	27,172	21,499	17,601	26,328	15,75
7,0	27,265	20,986	17,636	26,348	15,645
8,0	27,286	21,416	17,634	26,38	15,631
9,0	27,492	21,125	17,773	26,376	15,532
10,0	27,445	20,979	17,89	26,387	15,51
12,5	27,654	20,82	18,076	26,386	15,262
15,0	27,948	20,759	18,29	26,397	15,049
20,0	28,136	20,356	18,439	26,464	14,766

Данные из таблицы 4.25 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.32.

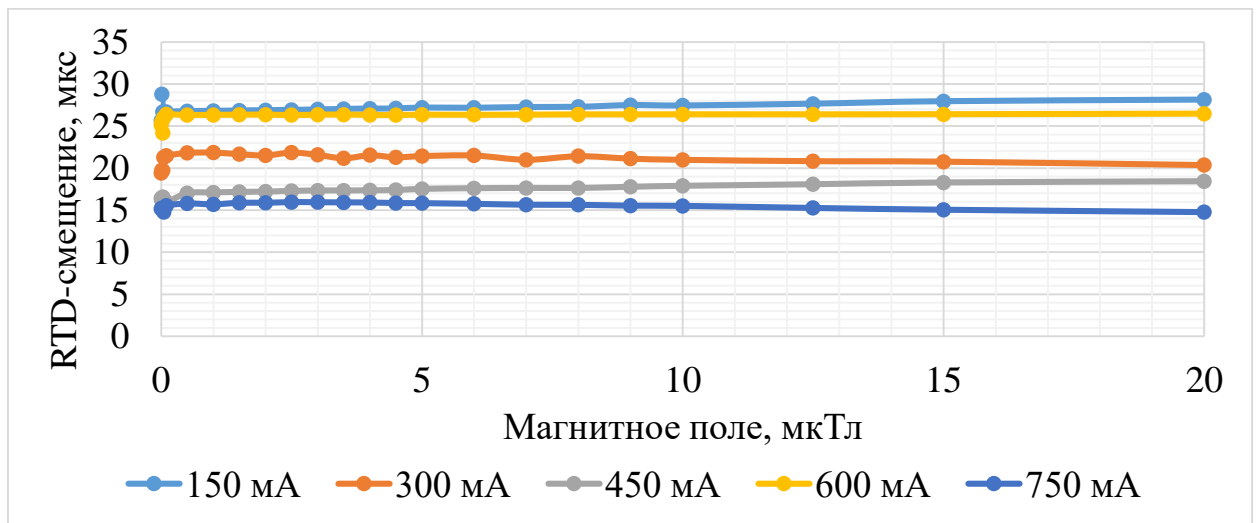


Рисунок 4.32 – Зависимости RTD-смещения образца 7 при частоте возбуждения 1 кГц

Таблица 4.26 – Результаты измерений для образца 7 при частоте 2,5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	150	300	450	600	750
0	10,11	4,17	3,687	8,614	9,184
0,01	9,898	4,437	3,701	8,542	9,424
0,03	8,883	4,354	3,588	8,921	9,325
0,05	8,806	4,388	3,582	8,58	9,34
0,1	8,989	4,215	3,7	8,894	9,42
0,5	8,804	4,458	3,75	8,982	9,727
1,0	8,812	4,474	3,708	9,082	9,668
1,5	8,83	4,519	3,703	9,07	9,678
2,0	8,727	4,517	3,746	9,036	9,685
2,5	8,691	4,527	3,779	9,14	9,694
3,0	8,676	4,554	3,764	8,99	9,689
3,5	8,652	4,561	3,82	9,09	9,683
4,0	8,589	4,582	3,81	9,052	9,697
4,5	8,588	4,57	3,816	9,162	9,702
5,0	8,573	4,606	3,838	9,158	9,696
6,0	8,604	4,649	3,818	9,293	9,712
7,0	8,641	4,648	3,837	9,157	9,705
8,0	8,643	4,658	3,895	9,237	9,738
9,0	8,596	4,684	3,91	9,388	9,716
10,0	8,568	4,691	3,948	9,29	9,701
12,5	8,513	4,721	3,983	9,564	9,688
15,0	8,454	4,751	4,01	9,491	9,631
20,0	8,406	4,764	4,107	9,421	9,579

Данные из таблицы 4.26 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.33.

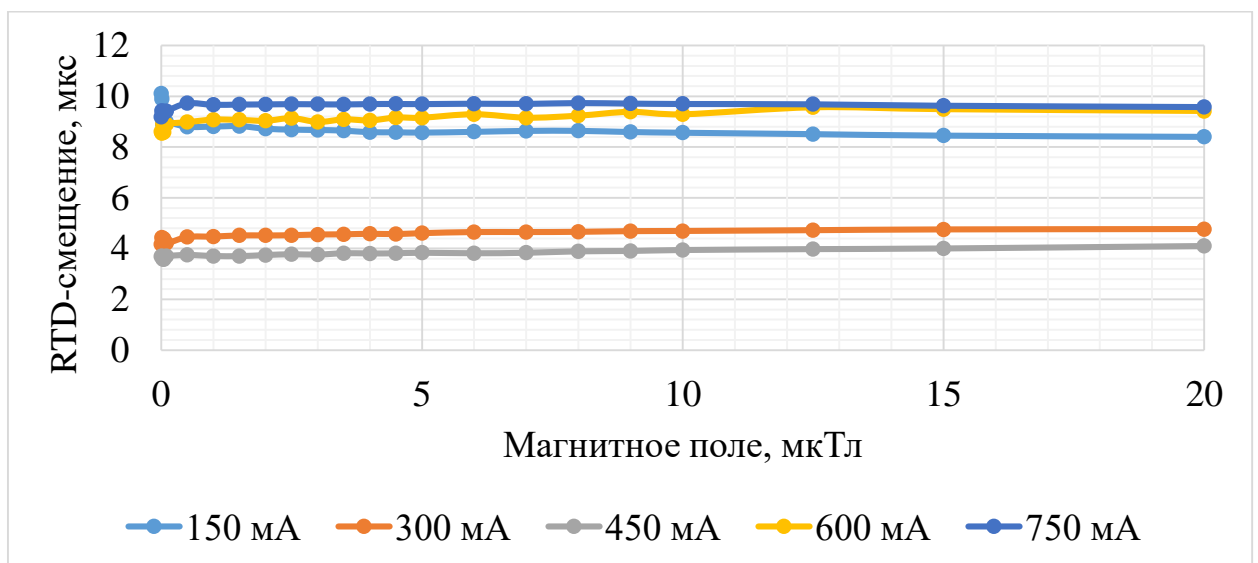


Рисунок 4.33 – Зависимости RTD-смещения образца 7 при частоте возбуждения 2,5 кГц

Таблица 4.27 – Результаты измерений для образца 7 при частоте 5 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	150	300	450	600	750
0	2,272	0,954	5,057	2,304	2,17
0,01	2,293	0,91	5,242	2,452	2,328
0,03	2,11	0,943	5,336	2,479	2,377
0,05	2,013	0,918	5,271	2,505	2,388
0,1	2,246	0,844	5,235	2,621	2,449
0,5	2,255	0,977	5,352	2,626	2,48
1,0	2,332	0,938	5,374	2,637	2,464
1,5	2,404	0,992	5,361	2,608	2,495
2,0	2,454	1,002	5,368	2,619	2,496
2,5	2,508	1,02	5,37	2,616	2,497
3,0	2,532	0,986	5,382	2,608	2,496
3,5	2,613	1,013	5,374	2,603	2,509
4,0	2,665	0,985	5,373	2,588	2,518
4,5	2,652	1,003	5,368	2,589	2,524
5,0	2,708	0,98	5,351	2,6	2,527
6,0	2,737	1,016	5,36	2,58	2,527
7,0	2,77	1,033	5,358	2,586	2,542
8,0	2,806	1,043	5,369	2,564	2,551
9,0	2,892	1,058	5,365	2,566	2,536
10,0	2,957	1,074	5,352	2,537	2,562
12,5	2,93	1,098	5,352	2,424	2,506
15,0	2,784	1,094	5,33	2,242	2,364
20,0	2,271	1,079	5,306	1,908	2,13

Данные из таблицы 4.27 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.34.

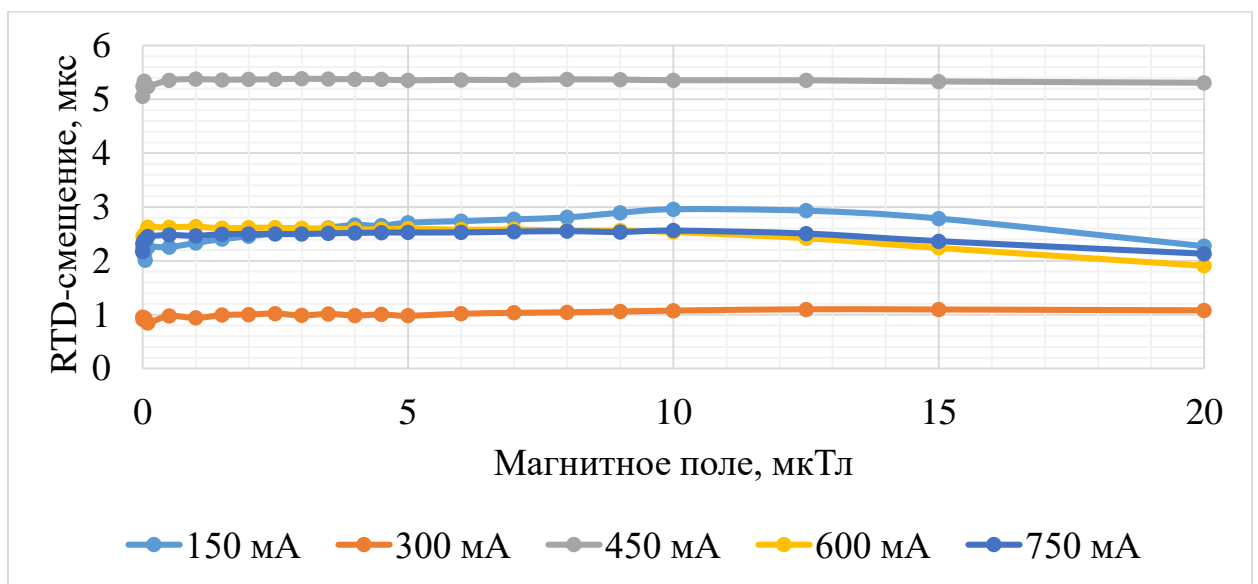


Рисунок 4.34 – Зависимости RTD-смещения образца 7 при частоте возбуждения 5 кГц

Таблица 4.28 – Результаты измерений для образца 7 при частоте 10 кГц

$I, \text{ мА}$ $B, \text{ мкТл}$	150	300	450	600	750
0	0,956	0,778	2,492	1,262	1,698
0,01	1,038	0,785	2,56	1,31	1,788
0,03	1,031	0,809	2,61	1,322	1,783
0,05	1,061	0,904	2,618	1,366	1,855
0,1	1,066	0,793	2,61	1,374	1,843
0,5	1,13	0,797	2,625	1,386	1,862
1,0	1,147	0,814	2,631	1,392	1,85
1,5	1,144	0,821	2,647	1,394	1,847
2,0	1,153	0,824	2,651	1,398	1,858
2,5	1,156	0,836	2,665	1,401	1,863
3,0	1,184	0,839	2,667	1,405	1,875
3,5	1,177	0,845	2,671	1,413	1,865
4,0	1,198	0,856	2,677	1,412	1,871
4,5	1,207	0,862	2,676	1,413	1,878
5,0	1,212	0,882	2,676	1,416	1,886
6,0	1,233	0,894	2,674	1,414	1,889
7,0	1,245	0,915	2,67	1,404	1,883
8,0	1,279	0,915	2,653	1,395	1,874
9,0	1,276	0,937	2,639	1,384	1,886
10,0	1,311	0,942	2,618	1,365	1,876
12,5	1,192	0,938	2,549	1,294	1,835
15,0	1,145	0,864	2,445	1,204	1,77
20,0	1,07	0,65	2,341	1,034	1,621

Данные из таблицы 4.28 представлены в виде зависимостей на рисунке 4.35.

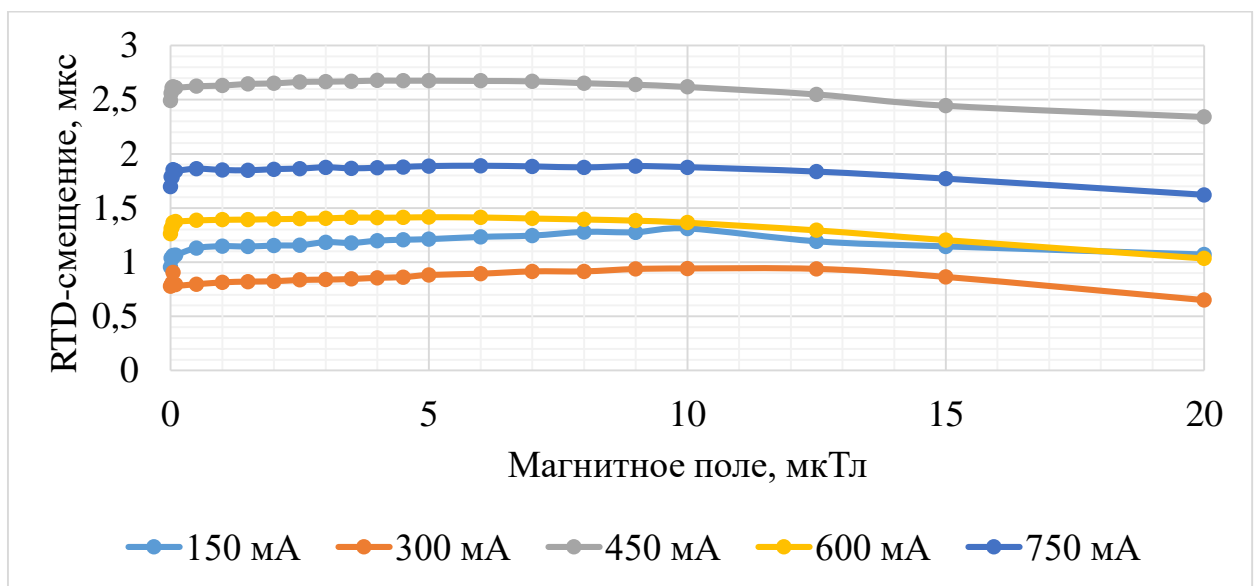


Рисунок 4.35 – Зависимости RTD-смещения образца 7 при частоте возбуждения 10 кГц

Анализ экспериментальных данных показал, что образцы 5, 6 и 7 имеют малый коэффициент преобразования, менее 10 нс/мкТл, вследствие чего при использовании для обработки выходной информации модуля NI PXI-5122 с частотой дискретизации 100 МГц принципиально невозможно оценить метрологические характеристики данных образцов в области слабых полей. Низкий коэффициент преобразования обусловлен малым количеством витков в измерительных катушках феррозондов, увеличить коэффициент преобразования возможно за счет снижения частоты возбуждения, однако это потребует увеличения амплитуды тока возбуждения и повышения требований к объему памяти при накоплении данных при сохранении частоты дискретизации.

Образцы 1-4 пригодны для оценки метрологических характеристик.

Для экспериментально апробированных образцов 1-4 в зависимости от амплитуды и частоты тока возбуждения были получены градуировочные характеристики вида:

$$RTD = aB + b, \quad (4.1)$$

где B – заданное значение измеряемой магнитной индукции, Тл;

RTD – разность временных интервалов за период (RTD -смещение), с;

a, b – коэффициенты линейной аппроксимации.

Для получения уравнения градуировочной характеристики в зависимости от амплитуды и частоты тока возбуждения для каждого образца определяли диапазон актуальных измеренных значений RTD -смещения от заданных значений магнитной индукции по значению коэффициента детерминации R^2 . Сужали диапазон измерений сверху и снизу до тех пор, пока значение коэффициента детерминации R^2 не становилось больше или равным 0,99. При этом от всех результатов измерений было вычтено значение RTD -смещения при нулевом значении заданной измеряемой магнитной индукции.

По полученным уравнениям градуировочной характеристики решали обратную задачу по расчету магнитной индукции в соответствии с выражением (4.2):

$$B_{\text{изм}} = \frac{(RTD_{\text{изм}} - b)}{a} \quad (4.2)$$

где $RTD_{\text{изм}}$ – измеренная образцами разность временных интервалов за период (RTD -смещение), с;

Относительную погрешность измерения магнитной индукции определяли как:

$$\gamma = \frac{(B_{\text{изм}} - B)}{B} \cdot 100 \% \quad (4.3)$$

Таким образом для экспериментально апробированных образцов 1-4 были определены: рабочие амплитуда и частота тока возбуждения, рабочий диапазон измерений, максимальная относительная погрешность измерений и коэффициент преобразования (коэффициент чувствительности).

Результаты определения сведены в таблицу 4.29.

Таблица 4.29 – Результаты определения метрологических характеристик образцов

Образец 1							
Ток возбуждения, мА	320	240	320	240	320	160	240
Частота возбуждения, кГц	1	2,5	2,5	5	5	10	10
Диапазон измерений, мкТл	1-20	0,5-15	0,5-15	3-15	3-15	0,5-20	1,5-15
Максимальная, погрешность, %	8,1	8,2	10,2	10,1	10,9	9,6	10,3
Коэффициент преобразования, мкс/мкТл	0,254	0,126	0,148	0,047	0,025	0,018	0,015
Образец 2							
Ток возбуждения, мА	80	40	80	40	80	40	80
Частота возбуждения, кГц	1	2,5	2,5	5	5	10	10
Диапазон измерений, мкТл	0,5-10	0,5-6	0,5-4	0,1-9	1-4,5	0,5-8	0,5-8
Максимальная, погрешность, %	5,6	9,9	8,5	8,3	9,6	11,2	13,2
Коэффициент преобразования, мкс/мкТл	0,101	0,041	0,025	0,048	0,028	0,015	0,015
Образец 3							
Ток возбуждения, мА	240	180	240	120	180	120	180
Частота возбуждения, кГц	1	2,5	2,5	5	5	10	10
Диапазон измерений, мкТл	0,5-20	0,5-20	0,5-20	2,5-15	2,5-15	2,5-15	2,5-15
Максимальная, погрешность, %	5,1	10,5	7,7	12,1	8,0	13,8	12,8
Коэффициент преобразования, мкс/мкТл	0,326	0,154	0,192	0,026	0,061	0,023	0,019

Образец 4							
Ток возбуждения, мА	60	30	60	30	60	30	60
Частота возбуждения, кГц	1	2,5	2,5	5	5	10	10
Диапазон измерений, мкТл	0,1-15	0,1-6	0,5-4	0,5-10	0,5-4,5	0,5-8	0,5-8
Максимальная, погрешность, %	3,2	5,1	8,8	9,8	9,7	10,7	11,2
Коэффициент преобразования, мкс/мкТл	0,464	0,192	0,093	0,221	0,127	0,068	0,068

Из результатов определения метрологических характеристик образцов следует, что коэффициент преобразования уменьшается с ростом частоты, это подтверждают теоретические выкладки, полученные в главе 2 и результаты конечно-элементного моделирования, представленные в главе 3. Относительная погрешность измерений практически на всем диапазоне не превышает 1-3 %, а максимальные значения погрешности 7-13 % получены для одного, двух результатов измерений на нижней границе диапазона измерений, данную погрешность возможно снизить увеличив частоту дискретизации сигнала с измерительной катушки феррозонда.

С увеличением частоты возбуждения феррозонда требуется меньшая амплитуда тока возбуждения для получения приемлемых результатов измерений, таким образом повышение частоты возбуждения позволяет уменьшить тепловыделение феррозонда.

Образцы 1 и 3 (конструкции с разомкнутым сердечником) обладают большим линейным диапазоном измерений, чем образцы 2 и 4 (конструкции с замкнутым сердечником), однако образцы 2 и 4 позволяют измерять более слабые магнитные поля при значительно меньшей амплитуде тока возбуждения.

Для всех четырех образцов характерно, что увеличение числа витков в образце позволяет увеличить коэффициент преобразования и уменьшить амплитуду тока возбуждения, что так же коррелирует с результатами, полученными в главах 2 и 3. Следует отметить, что все апробированные образцы на практике показали меньший коэффициент преобразования по сравнению с результатами, полученными в ходе конечно-элементного моделирования, это обусловлено тем, что при моделировании не учитывались, частотные свойства

ферромагнитного сердечника, а также из-за ручного изготовления образцов, что внесло дополнительные погрешности из-за неодинаковости сведения обмоток, механической резки и не симметричной приклейки сердечника и т.д., данные погрешности можно устранить при автоматизированном изготовлении.

4.5. Проверка возможности измерения сложного сигнала

Для определения возможности измерения индукции магнитного поля сложной формы была собрана измерительная установка, схема которой представлена на рисунке 4.36. внешний вид установки представлен на рисунке 4.37.

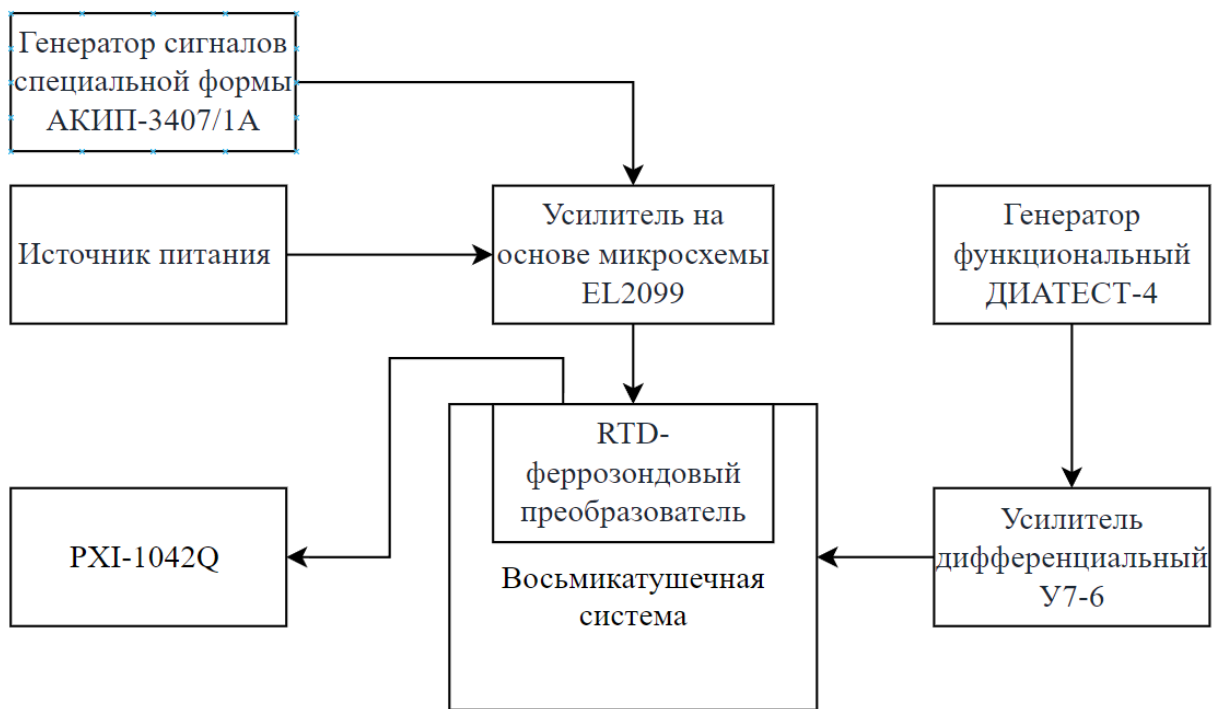


Рисунок 4.36 – Схема измерения магнитного поля сложной формы

Для имитации магнитных полей, создаваемых биотоками в теле человека, на калибровочную систему подавался сигнал ЭКГ от генератора функционального Диатест-4 [143, 144] через усилитель У7-6. Генератор Диатест-4 предназначен для формирования прецизионных калибровочных сигналов для первичной и периодической поверки электрокардиографических, электроэн-

цефалографических, электромиографических и реографических приборов. Таким образом с помощью изготовленной калибровочной системы реализуется преобразование сигналов напряжения заданной амплитуды, частоты и формы с выхода генератора в изменение амплитуды магнитной индукции внутри системы катушек с сохранением частоты и формы исходного сигнала.

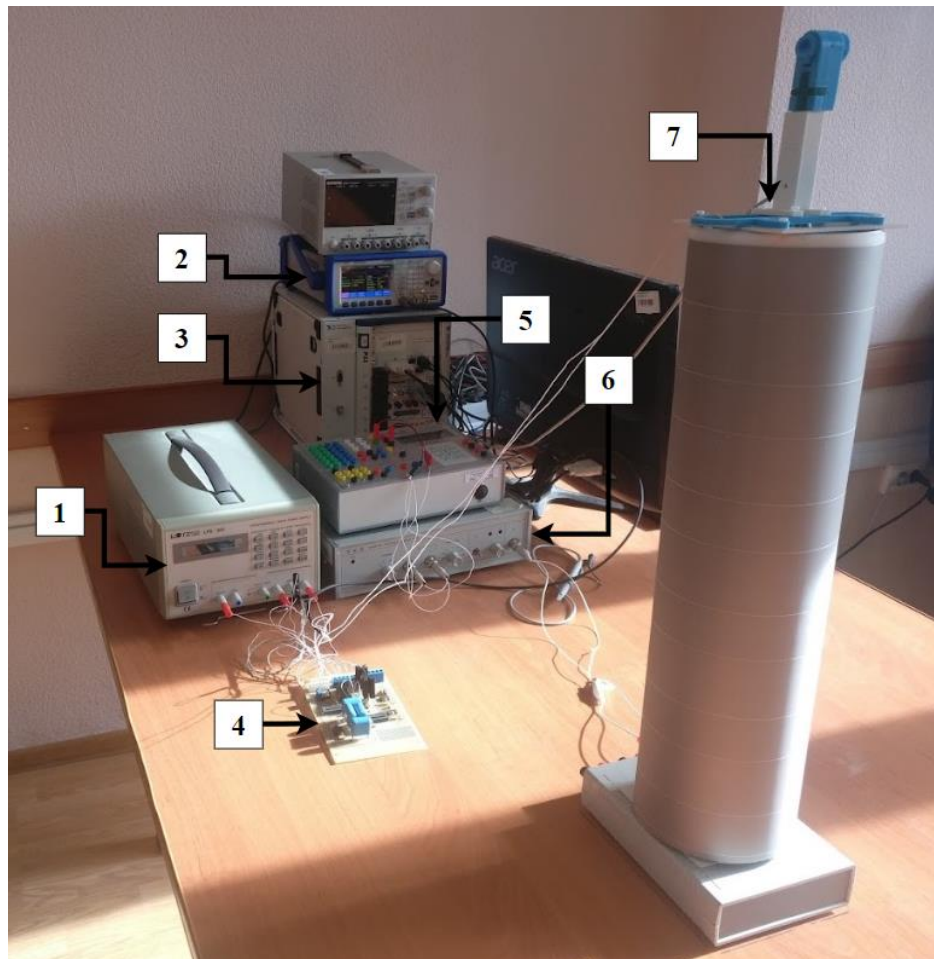
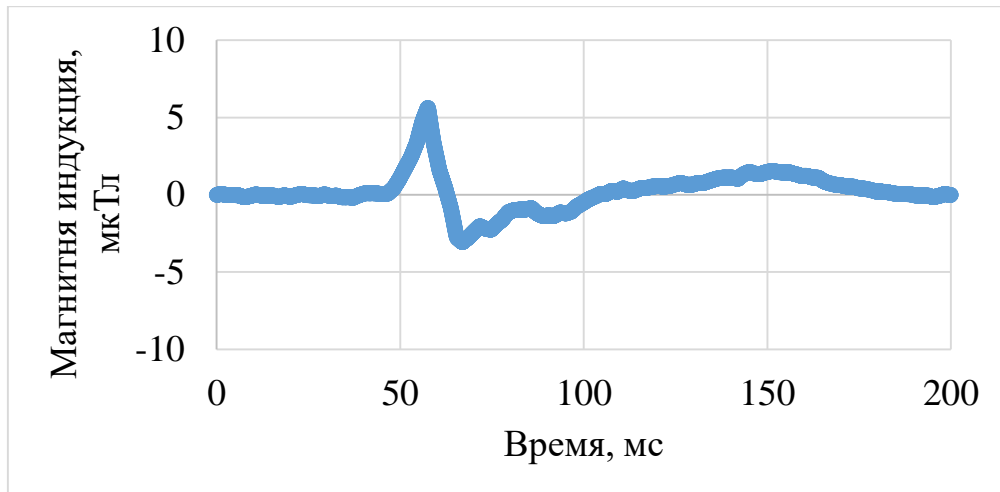


Рисунок 4.37 – Внешний вид установки измерения переменного магнитного поля сложной формы

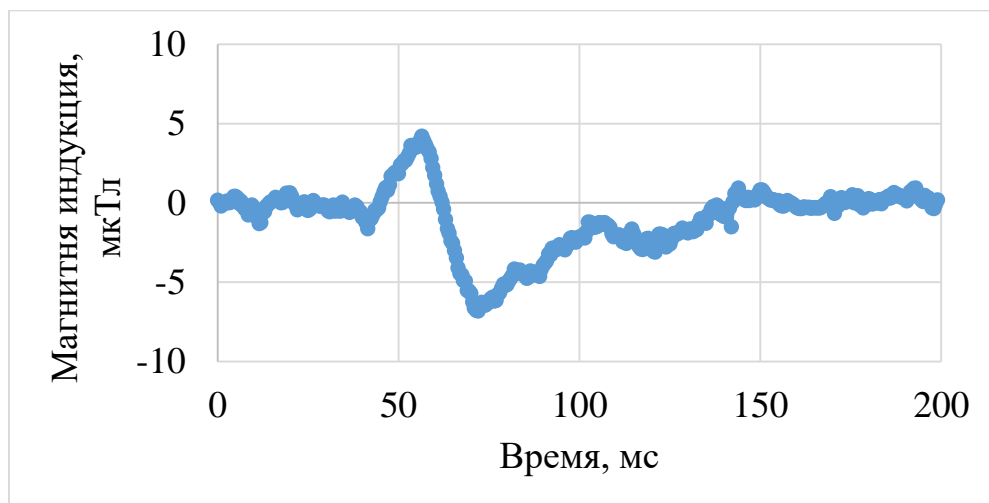
- 1 – источник питания, 2 – Генератор сигналов специальной формы АКПП-3407/1А,
 3 – Платформа PXI-1042Q с модулем NI PXI-5122, 4 – Усилитель EL2099,
 5 – Генератор Диатест-4, 6 – Усилитель У7-6, 7 – Восьмикатушечная система

Был проведен эксперимент для оценки способности датчика детектировать биоманнитные сигналы. С помощью генератора Диатест-4 задавали магнитную индукцию пропорциональную поверочному электрокардиосиг-

налу с максимальной амплитудой зубцов 5,7 мкТл. Измерение проводили образцом 4 при амплитуде тока возбуждения 60 мА и частоте возбуждения 1 кГц и с помощью магнитометром Mag-01Н. Результаты получены на основе усреднения 500 циклов измерений. Результаты эксперимента представлены на рисунке 4.38.



а)



б)

Рисунок 4.38 – Результаты измерения кардиосигнала:
(а) магнитокардиограмма, полученная магнитометром Mag-01Н;
(б) магнитокардиограмма, полученная образцом 4

Результаты эксперимента показали, что изготовленный RTD-феррозондовый преобразователь позволяет измерять переменный сигнал магнитной индукции сложной формы. На полученной магнитокардиограмме можно четко выделить R-зубец, P-, Q-, S- и T-зубцы видны менее четко.

4.6 Выводы к главе 4

1. Проведены экспериментальные исследования изготовленных 7 образцов RTD-феррозондовых датчиков. Анализ экспериментальных данных показал, что образцы 5, 6 и 7 имеют малый коэффициент преобразования, менее 10 нс/мкТл, вследствие чего при использовании для обработки выходной информации модуля NI PXI-5122 с частотой дискретизации 100 МГц принципиально невозможно оценить метрологические характеристики данных образцов в области слабых полей. Низкий коэффициент преобразования обусловлен малым количеством витков в измерительных катушках феррозондов, увеличить коэффициент преобразования возможно за счет снижения частоты возбуждения, однако это потребует увеличения амплитуды тока возбуждения и повышения требований к объему памяти при накоплении данных при сохранении частоты дискретизации. Образцы 1-4 пригодны для оценки метрологических характеристик

2. Из результатов определения метрологических характеристик образцов 1-4 следует, что коэффициент преобразования уменьшается с ростом частоты, это подтверждает теоретические выкладки, полученные в главе 2 и результаты конечно-элементного моделирования, представленные в главе 3. Относительная погрешность измерений практически на всем диапазоне не превышает 1-3 %, а максимальные значения погрешности 7-13 % получены для одного, двух результатов измерений на нижней границе диапазона измерений, данную погрешность возможно снизить увеличив частоту дискретизации сигнала с измерительной катушки феррозонда.

3. С увеличением частоты возбуждения феррозонда требуется меньшая амплитуда тока возбуждения для получения приемлемых результатов измерений, таким образом повышение частоты возбуждения позволяет уменьшить тепловыделение феррозонда.

4. Образцы 1 и 3 (конструкции с разомкнутым сердечником) обладают большим линейным диапазоном измерений, чем образцы 2 и 4 (конструкции с замкнутым сердечником), однако образцы 2 и 4 позволяют измерять более слабые магнитные поля при значительно меньшей амплитуде тока возбуждения.

5. Для всех четырех образцов характерно, что увеличение числа витков в образце позволяет увеличить коэффициент преобразования и уменьшить амплитуду тока возбуждения

6. Показана принципиальная возможность измерения разработанными RTD-феррозондовыми датчиками биосигналов на примере магнитокардиограммы.

7. Дальнейшее повышение метрологических характеристик, разработанных конструкций RTD-феррозондовых датчиков возможно за счет предварительного усиления и фильтрации от высокочастотного шума сигнала с измерительной обмотки, а также повышения точности и технологичности изготовления образцов за счет автоматизации процесса изготовления, использования технологии микромеханических датчиков для изготовления всего датчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана аналитическая модель RTD-феррозонда, связывающая параметры тока возбуждения с ЭДС наводимой в измерительной обмотке и учитывающей аналитическое описание кривой намагничивания ферромагнитного сердечника для расчета временных интервалов прямо пропорциональных измеряемой магнитной индукции.

2. Разработана методика конечно-элементного анализа RTD-феррозондов в зависимости от геометрии датчика, амплитуды и частоты тока возбуждения и учитывающая форму петли гистерезиса ферромагнитного сердечника.

3. На основе предложенных решений, спроектированы, промоделированы и экспериментально исследованы варианты конструкций планарных RTD-феррозондов, которые позволяют измерять индукцию постоянного магнитного поля с коэффициентом преобразования до 0,464 мкс/мкТ в диапазоне от 100 нТл до 15 мкТл и относительной погрешностью не более 3,2 %.

4. Экспериментально показана принципиальная возможность измерения разработанным RTD-феррозондовым датчиком биосигналов на примере магнитокардиограммы.

5. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР: Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-873.2020.8 «Высококочувствительные средства сравнения для передачи единиц физических величин», 2020-2021 гг.; Грант РФФИ № 19-37-90061 «Планарный феррозондовый преобразователь для магнитокардиографии», 2019-2021 гг.; Грант РНФ № 17-79-10083 «Планарный феррозондовый преобразователь для системы магнитного вакуума квантового компьютера», 2017-2019 гг.; Грант ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», № 14.578.21.0232 «Интеллектуальный инерциальный модуль на основе

микроэлектромеханических датчиков с функциями гироскопа, акселерометра и магнитометра для систем ориентации, и навигации транспортных средств с автоматизированным управлением», 2017-2020 гг.

6. Разработанные аналитические выражения и методика конечно-элементного анализа конструкций RTD-феррозондов используются в ООО «Лорге Медикал» при реализации проекта по созданию медицинских систем для биомагнитных исследований и в учебном процессе в отделе Электронной инженерии Томского политехнического университета, что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы.

Список используемой литературы

- 1 Авербух В. М. Шестой технологический уклад и перспективы России (краткий обзор) // Наука. Инновации. Технологии. – 2010. – №. 71.
- 2 Aswathy S., Shamsudheen S., Faizal A. Review of recent trends in bio medical instrumentation. Scholars' Press, 2020. – 196 с.
- 3 Timmis A. et al. European Society of Cardiology: cardiovascular disease statistics 2019 // European heart journal. – 2020. – Т. 41. – №. 1. – С. 12-85.
- 4 Сердечно-сосудистые заболевания [Электронный ресурс] // Всемирная организация здравоохранения. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (дата обращения: 08.11.2021).
- 5 Зудбинов Ю. И. Азбука ЭКГ // Ростов-на-Дону: Феникс. – 2003.
- 6 Фролов С. В. и др. Методы и приборы функциональной диагностики // Тамбов: Издательство ТГТУ. – 2008.
- 7 Macfarlane P. W. et al. (ed.). Comprehensive electrocardiology. Springer Science & Business Media, 2010.
- 8 Koch H. Recent advances in magnetocardiography // Journal of electrocardiology. – 2004. – Т. 37. – С. 117-122.
- 9 Andrä W., Nowak H. (ed.). Magnetism in medicine: a handbook. – John Wiley & Sons, 2007.
- 10 Mapps D. J. Remote magnetic sensing of people // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – Т. 106. – №. 1-3. – С. 321-325.
- 11 Zhang Y. et al. Recording fetal and adult magnetocardiograms using high-temperature Superconducting quantum interference device gradiometers // IEEE transactions on applied superconductivity. – 2003. – Т. 13. – №. 4. – С. 3862-3866.
- 12 Clarke J., Braginski A. I. The SQUID handbook: Applications of SQUIDs and SQUID systems, Volume II. – 2006.
- 13 Reermann J., Elzenheimer E., Schmidt G. Real-Time Biomagnetic Signal Processing for Uncooled Magnetometers in Cardiology // IEEE Sensors Journal. – 2019. – Т. 19. – №. 11. – С. 4237-4249.

- 14 Singh, Sanjay P. Magnetoencephalography: Basic principles. *Annals of Indian Academy of Neurology* vol. 17, Suppl 1 (2014): S107-12. DOI: 10.4103/0972-2327.128676.
- 15 Mackert B. M. Magnetoneurography: theory and application to peripheral nerve disorders. *Clin Neurophysiol.* 2004 Dec;115(12):2667-76. DOI: 10.1016/j.clinph.2004.07.028. PMID: 15546775.
- 16 Lau S., Petković B., Haueisen J. Optimal magnetic sensor vests for cardiac source imaging // *Sensors*. – 2016. – Т. 16. – №. 6. – С. 754.
- 17 Афанасьев, Ю.В. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия. Ленингр. Отделение, 1979. – 320 с.
- 18 Бараночников, М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – Т. 1, – 544 с.
- 19 Ripka, P. *Magnetic Sensors and Magnetometers* / P. Ripka. – Boston: Artech house, 2000. – 494 p.
- 20 Lenz, J.E. A Review of Magnetic Sensors // *Proceeding of the IEEE*. – 1990. – Vol.78, № 6. – P. 973-989.
- 21 Баранова, В. Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.11.01.
- 22 Lanting T. et al. Entanglement in a quantum annealing processor // *Physical Review X*. – 2014. – Т. 4. – №. 2. – С. 021041.
- 23 Murzin D. et al. Ultrasensitive magnetic field sensors for biomedical applications // *Sensors*. – 2020. – Т. 20. – №. 6. – С. 1569.
- 24 Jaklevic R. C. et al. Quantum interference effects in Josephson tunneling // *Physical Review Letters*. – 1964. – Т. 12. – №. 7. – С. 159.
- 25 Sochnikov I., Davino D., Kalisky B. dc SQUID Design with FemtoTesla Sensitivity for Quantum-Ready Readouts // *Physical Review Applied*. – 2020. – Т. 14. – №. 1. – С. 014020.

- 26 Xie Y. et al. A hybrid magnetometer towards femtotesla sensitivity under ambient conditions // *Science Bulletin*. – 2020.
- 27 Storm J. H. et al. An ultra-sensitive and wideband magnetometer based on a superconducting quantum interference device // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Т. 110. – №. 7. – С. 072603.
- 28 Clarke J., Hatridge M., Mößle M. SQUID-detected magnetic resonance imaging in microtesla fields // *Annu. Rev. Biomed. Eng.* – 2007. – Т. 9. – С. 389-413.
- 29 Inaba T. et al. Routine clinical heart examinations using SQUID magnetocardiography at University of Tsukuba Hospital // *Superconductor Science and Technology*. – 2017. – Т. 30. – №. 11. – С. 114003.
- 30 Clarke J., Lee Y. H., Schneiderman J. Focus on SQUIDs in biomagnetism // *Supercond. Sci. Technol.* – 2018. – Т. 31. – С. 080201.
- 31 Koch H. SQUID magnetocardiography: Status and perspectives // *IEEE transactions on applied superconductivity*. – 2001. – Т. 11. – №. 1. – С. 49-59.
- 32 Shanehsazzadeh F., Fardmanesh M. Low noise active shield for SQUID-based magnetocardiography systems // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2017. – Т. 28. – №. 4. – С. 1-5.
- 33 Faley M. I. et al. High-*t_c* SQUID biomagnetometers // *Superconductor science and technology*. – 2017. – Т. 30. – №. 8. – С. 083001.
- 34 Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // *Успехи физических наук*. – 2009. – Т. 179. – №. 6. – С. 605-637.
- 35 Borna A. et al. Magnetic source imaging using a pulsed optically pumped magnetometer array // *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. – 2018. – Т. 68. – №. 2. – С. 493-501.
- 36 Kim Y. J., Savukov I. Ultra-sensitive magnetic microscopy with an optically pumped magnetometer // *Scientific reports*. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-7.

37 Osborne J. et al. Fully integrated standalone zero field optically pumped magnetometer for biomagnetism // Steep Dispersion Engineering and Opto-Atomic Precision Metrology XI. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – T. 10548. – C. 105481G.

38 Robin K. Harris, Edwin D. Becker, Sonia M. Cabral De Menezes, Robin Goodfellow, Pierre Granger: NMR Nomenclature. Nuclear Spin Properties and Conventions for Chemical Shifts. Pure Appl. Chem. 2001 (73), 1795—1818.

39 Allred J. C. et al. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation // Physical review letters. – 2002. – T. 89. – №. 13. – C. 130801.

40 Li J. et al. SERF atomic magnetometer—recent advances and applications: A review // IEEE Sensors Journal. – 2018. – T. 18. – №. 20. – C. 8198-8207.

41 Jensen K. et al. Magnetocardiography on an isolated animal heart with a room-temperature optically pumped magnetometer // Scientific reports. – 2018. – T. 8. – №. 1. – C. 1-9.

42 Boto E. et al. A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers // NeuroImage. – 2017. – T. 149. – C. 404-414.

43 Boto E., Meyer S., Shah V., Alem O., Knappe S., Kruger P., Fromhold T., Lim M., Glover PM., Morris P., Bowtell R., Barnes G., Brookes M. A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers // Neuroimage. 2017 Apr 1;149:404-414. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.034. Epub 2017.

44 Amir Borna, Tony R Carter, Josh D Goldberg, Anthony P Colombo, Yuan-Yu Jau, Christopher Berry, Jim McKay, Julia Stephen, Michael Weisend, Peter D Schwindt A 20-channel magnetoencephalography system based on optically pumped magnetometers // Physics in Medicine & Biology, Volume 62, Number 23 2017 DOI: 10.1088/1361-6560/aa93d1.

45 S Morales, M C Corsi, W Fourcalt, F Bertrand, G Cauffet, C Gobbo, F Alcouffe, F Lenouvel, M Le Prado, F Berger. Magnetocardiography measurements

with ^4He vector optically pumped magnetometers at room temperature // *Physics in Medicine & Biology*, Volume 62, Number 18 2017
DOI: 10.1088/1361-6560/aa6459

46 Lembke, G., Erné, S. N., Nowak, H., Menhorn, B., Pasquarelli, A. Optical multichannel room temperature magnetic field imaging system for clinical application // *Biomedical Optics Express*, 5(3), 876–881. 2014
DOI:10.1364/BOE.5.000876.

47 Li W. et al. Unshielded scalar magnetometer based on nonlinear magneto-optical rotation with amplitude modulated light // 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). – IEEE, 2016. – C. 1-4.

48 Zhang R. et al. Recording brain activities in unshielded Earth's field with optically pumped atomic magnetometers // *Science Advances*. – 2020. – T. 6. – №. 24. – C. 87-92.

49 Le Contel O. et al. The search-coil magnetometer for MMS // *Space Science Reviews*. – 2016. – T. 199. – №. 1-4. – C. 257-282

50 Ripka P., Janosek M. Advances in magnetic field sensors // *IEEE Sensors journal*. – 2010. – T. 10. – №. 6. – C. 1108-1116.

51 Coillot C. et al. Improvements on the design of search coil magnetometer for space experiments // *sensor letters*. – 2007. – T. 5. – №. 1. – C. 167-170.

52 Séran H. C., Fergeau P. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research // *Review of scientific instruments*. – 2005. – T. 76. – №. 4. – C. 044502.

53 Coillot C. et al. Principle and performance of a dual-band search coil magnetometer: A new instrument to investigate fluctuating magnetic fields in space // *IEEE Sensors Journal*. – 2009. – T. 10. – №. 2. – C. 255-260.

54 Pellicer-Guridi R. et al. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity // *Scientific reports*. – 2017. – T. 7. – №. 1. – C. 1-12.

55 Tashiro K. *Induction Coil Magnetometers* // *High sensitivity magnetometers*. – Springer, Cham, 2017. – C. 1-39.

- 56 Brown P. et al. Magnetoresistive magnetometer for space science applications // *Measurement Science and Technology*. – 2012. – Т. 23. – №. 2. – С. 025902.
- 57 Ripka P. et al. AMR magnetometer // *Journal of Magnetism and Magnetic materials*. – 2003. – Т. 254. – С. 639-641.
- 58 Platif A. et al. Precise AMR magnetometer for compass // *SENSORS, 2003 IEEE*. – IEEE, 2003. – Т. 1. – С. 472-476.
- 59 He D. F., Tachiki M., Itozaki H. Highly sensitive anisotropic magnetoresistance magnetometer for Eddy-current nondestructive evaluation // *Review of Scientific Instruments*. – 2009. – Т. 80. – №. 3. – С. 036102.
- 60 Brown P. et al. Space magnetometer based on an anisotropic magnetoresistive hybrid sensor // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – Т. 85. – №. 12. – С. 125117.
- 61 Лачинов А. Н., Воробьева Н. В., Лачинов А. А. Особенности гигантского магнитосопротивления в системе ферромагнетик–полимер // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2006. – Т. 84. – №. 11. – С. 720-722.
- 62 Устинов В. В. и др. Зависимость магнитосопротивления сверхрешеток Fe/Cr от ориентации внешнего магнитного поля // *Физика металлов и металловедение*. – 1995. – Т. 80. – №. 2. – С. 71-80.
- 63 Baibich M. N. et al. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices // *Physical review letters*. – 1988. – Т. 61. – №. 21. – С. 2472.
- 64 Pannetier-Lecoeur M. et al. Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Т. 98. – №. 15. – С. 153705.
- 65 Pannetier-Lecoeur M. et al. Magnetocardiography with GMR-based sensors // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2011. – Т. 303. – №. 1. – С. 012054.
- 66 Guedes A. et al. Hybrid GMR sensor detecting 950 pT/sqrt (Hz) at 1 Hz and room temperature // *Sensors*. – 2018. – Т. 18. – №. 3. – С. 790.

- 67 Julliere M. Tunneling between ferromagnetic films //Physics letters A. – 1975. – T. 54. – №. 3. – C. 225-226.
- 68 Peng S. Z. et al. Magnetic tunnel junctions for spintronics: principles and applications // Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. – 1999. – C. 1-16.
- 69 Wang M. et al. Measurement of triaxial magnetocardiography using high sensitivity tunnel magnetoresistance sensor // IEEE Sensors Journal. – 2019. – T. 19. – №. 21. – C. 9610-9615.
- 70 Fujiwara K. et al. Magnetocardiography and magnetoencephalography measurements at room temperature using tunnel magneto-resistance sensors // Applied Physics Express. – 2018. – T. 11. – №. 2. – C. 023001.
- 71 Harrison E. P., Rowe H. An impedance magnetometer //Proceedings of the Physical Society (1926-1948). – 1938. – T. 50. – №. 2. – C. 176.
- 72 Panina L. V. et al. Giant magneto-impedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys // Journal of Applied Physics. – 1994. – T. 76. – №. 10. – C. 6198-6203.
- 73 G.V. Kurlyandskaya, D. de Cos, S.O. Volchkov, S.O. Magnetosensitive Transducers for Nondestructive Testing Operating on the Basis of the Giant Magnetoimpedance Effect. A Review // Russian Journal of Non-destructive testing.-2009.- V. 45.- 377.
- 74 Gudoshnikov S. et al. Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire // Physica status solidi. – 2014. – T. 211. – №. 5. – C. 980-985.
- 75 Dufay B. et al. Characterization of an optimized off-diagonal GMI-based magnetometer // IEEE Sensors Journal. – 2012. – T. 13. – №. 1. – C. 379-388.
- 76 An J. et al. A study on human magnetocardiogram using giant magnetoimpedance sensor // Proceedings of the 2012 International Conference on Electronics, Communications and Control. – IEEE Computer Society, 2012. – C. 1931-1934.

- 77 Uchiyama T., Takiya T. Development of precise off-diagonal magnetoimpedance gradiometer for magnetocardiography // *AIP Advances*. – 2017. – T. 7. – №. 5. – C. 056644.
- 78 Ma J., Uchiyama T. Development of peak-to-peak voltage detector-type MI gradiometer for magnetocardiography // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2018. – T. 54. – №. 11. – C. 1-5.
- 79 Wang Y. et al. An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor // *Advanced materials*. – 2011. – T. 23. – №. 35. – C. 4111-4114.
- 80 Wang Y. J. et al. A review on equivalent magnetic noise of magnetoelectric laminate sensors // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2014. – T. 372. – №. 2009. – C. 20120455.
- 81 Ren L., Yu K., Tan Y. Applications and advances of magnetoelastic sensors in biomedical engineering: A review // *Materials*. – 2019. – T. 12. – №. 7. – C. 1135.
- 82 Reermann J. et al. Evaluation of magnetoelectric sensor systems for cardiological applications // *Measurement*. – 2018. – T. 116. – C. 230-238.
- 83 Röbbisch V. et al. Pushing the detection limit of thin film magnetoelectric heterostructures // *Journal of Materials Research*. – 2017. – T. 32. – №. 6. – C. 1009.
- 84 Yu Y. et al. Modelling of cavity optomechanical magnetometers // *Sensors*. – 2018. – T. 18. – №. 5. – C. 1558.
- 85 Li B. B. et al. Invited article: scalable high-sensitivity optomechanical magnetometers on a chip // *Apl Photonics*. – 2018. – T. 3. – №. 12. – C. 120806.
- 86 Li B. B. et al. Ultrabroadband and sensitive cavity optomechanical magnetometry // *Photonics Research*. – 2020. – T. 8. – №. 7. – C. 1064-1071.
- 87 Balynsky M. et al. A magnetometer based on a spin wave interferometer // *Scientific Reports*. – 2017. – T. 7. – №. 1. – C. 1-11.
- 88 Balinskiy M. et al. A spin-wave magnetometer with a positive feedback // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – T. 514. – C. 167046.

- 89 Taylor J. M. et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution // *Nature Physics*. – 2008. – Т. 4. – №. 10. – С. 810-816.
- 90 Grinolds M. S. et al. Nanoscale magnetic imaging of a single electron spin under ambient conditions // *Nature Physics*. – 2013. – Т. 9. – №. 4. – С. 215-219.
- 91 Maurer P. C. et al. Far-field optical imaging and manipulation of individual spins with nanoscale resolution // *Nature Physics*. – 2010. – Т. 6. – №. 11. – С. 912-918.
- 92 Dutt M. V. G. et al. Quantum register based on individual electronic and nuclear spin qubits in diamond // *Science*. – 2007. – Т. 316. – №. 5829. – С. 1312-1316.
- 93 Вершовский А. К., Дмитриев А. К. Микроразмерный квантовый трехкомпонентный магнитометр на основе азотно-вакансионных центров окраски в кристалле алмаза // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41. – №. 8.
- 94 Fuchs P., Challier M., Neu E. Optimized single-crystal diamond scanning probes for high sensitivity magnetometry // *New Journal of Physics*. – 2018. – Т. 20. – №. 12. – С. 125001.
- 95 Webb J. L. et al. Optimization of a Diamond Nitrogen Vacancy Centre Magnetometer for Sensing of Biological Signals // *Frontiers in Physics*. – 2020. – Т. 8. – С. 430.
- 96 Binh N. H. et al. Simple planar Hall effect based sensors for low-magnetic field detection // *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. – 2019. – Т. 10. – №. 2. – С. 025002.
- 97 Nhalil H. et al. Planar Hall effect magnetometer with 5 pT resolution // *IEEE Sensors Letters*. – 2019. – Т. 3. – №. 12. – С. 1-4.
- 98 Izci D. et al. The construction of a Graphene Hall effect magnetometer // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – Т. 18. – №. 23. – С. 9534-9541.
- 99 Henriksen A. D., Rizzi G., Hansen M. F. Planar Hall effect bridge sensors with NiFe/Cu/IrMn stack optimized for self-field magnetic bead detection // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Т. 119. – №. 9. – С. 093910.

100 Ren L., Yu K., Tan Y. Wireless and Passive Magnetoelastic-Based Sensor for Force Monitoring of Artificial Bone. *IEEE Sens. J.* 2019, 19, 2096–2104.

101 Ren L., Yu K., Tan Y. Monitoring and assessing the degradation rate of magnesium-based artificial bone in vitro using a wireless magnetoelastic sensor. *Sensors* 2018, 18, 3066.

102 Ripka P. Magnetic sensors and magnetometers // *Measurement Science and Technology*. – 2002. – Т. 13. – №. 4. – С. 645-645.

103 Baranova V. E. et al. Fluxgate magnetometer for measuring ultra-low magnetic induction // *Measurement in Research and Industry: Proceedings of XXI IMEKO World Congress*. – 2015. – С. 1-4.

104 Janosek M. et al. 1 pT-noise fluxgate magnetometer design and its performance in geomagnetic measurements // *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. – IEEE, 2019. – С. 1-5.

105 Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы //Л.: Энергоатомиздат. – 1986. – Т. 188.

106 Karo H., Sasada I. Magnetocardiogram measured by fundamental mode orthogonal fluxgate array // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – Т. 117. – №. 17. – С. 17B322.

107 Janosek M. et al. 1-pT noise fluxgate magnetometer for geomagnetic measurements and unshielded magnetocardiography // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2019. – Т. 69. – №. 5. – С. 2552-2560.

108 Nguyen A. T. et al. Heart-Rate Monitoring Device based on Fluxgate Sensors // *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. – IEEE, 2019. – С. 437-440.

109 ООО "НПО ЭНТ", Отделение средств магнитометрии. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.nvlaboratory.spb.ru>: (дата обращения: 08.11.2017).

110 Applied Physics Systems: [сайт]. URL: <http://www.appliedphysics.com> (дата обращения: 08.11.2017).

111 Bartington Instruments: [сайт]. URL: <http://www.bartington.com/> (дата обращения: 08.11.2017).

112 Laboratory for electromagnetic innovation: [сайт]. URL: <http://www.lemisensors.com> (дата обращения: 08.11.2017).

113 Magson GmbH: [сайт]. URL: <http://www.magson.de> (дата обращения: 08.11.2017).

114 Vallon GmbH: [сайт]. URL: <http://www.vallon.de> (дата обращения: 08.11.2017).

115 Díaz-Michelena M. et al. Small fluxgate magnetometers: Development and future trends in Spain // *Sensors*. – 2010. – Т. 10. – №. 3. – С. 1859-1870.

116 Andò B. et al. Multilayer based technology to build RTD fluxgate magnetometer // *Sens. Transducers J.* – 2006. – Т. 65. – №. 3. – С. 509-514.

117 Lu C. C., Huang J. A 3-axis miniature magnetic sensor based on a planar fluxgate magnetometer with an orthogonal fluxguide // *Sensors*. – 2015. – Т. 15. – №. 6. – С. 14727-14744.

118 Lei J., Lei C., Zhou Y. Analysis and comparison of the performance of MEMS fluxgate sensors with permalloy magnetic cores of different structures // *Measurement*. – 2013. – Т. 46. – №. 1. – С. 710-715.

119 Lei Chong et. al. Improved Performance of Integrated Solenoid Fluxgate Sensor Chip Using a Bilayer Co-Based Ribbon Core // *IEEE Sensors Journal*. – 2015. – Vol. 15, № 9 – P. 5010–5014.

120 Shaotao Zhi et. al. Investigation of a novel MEMS orthogonal fluxgate sensor fabricated with Co-based amorphous ribbon core // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2017. – Vol. 267, № 1 – P. 121-126.

121 Yan Liu et. al. Improved performance of the micro planar double-axis fluxgate sensors with different magnetic core materials and structures // *Microsystem Technologies*. – 2016. – Vol. 22, № 9 – P. 2341–2347.

122 Wenzhe Chen et. al. MEMS Technology in the Fabrication of Fluxgate Sensor with Micro-Solenoid Cores // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 468– P. 1836-1839.

123 Jian Lei, Chong Lei, Yong Zhou Fabrication and characterization of a new MEMS fluxgate sensor with nanocrystalline magnetic core // *Measurement*. – 2012. – Vol. 45, № 3 – P. 535-540.

124 Chih-Cheng Lu A 3-Axis Miniature Magnetic Sensor Based on a Planar Fluxgate Magnetometer with an Orthogonal Fluxguide // *Sensors (Basel)*. – 2015. – Vol. 15, № 6 – P. 4507702.

125 Andò B., Baglio S., Sacco V., Adi R. Bulsara, In V. PCB fluxgate magnetometers with a residence times difference readout strategy: the effects of noise // *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. – 2008. – Vol. 57, № 1.

126 Andò B. et al. RTD fluxgate: A low-power nonlinear device to sense weak magnetic fields // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. – 2005. – T. 8. – №. 4. – C. 64-73.

127 Andò B. et al. RTD Fluxgate performance for application in magnetic label-based bioassay: preliminary results // *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. – IEEE, 2006. – C. 5060-5063.

128 Andò B. et al. A Review on RTD-Fluxgate Magnetometers: From “Single” to “Coupled Core” and Toward Novel Systems with Innovative Materials // *Sensors*. – Springer, New York, NY, 2014. – C. 283-286.

129 Andò B. et al. Experimental investigations on the spatial resolution in RTD-fluxgates // *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. – IEEE, 2009. – C. 1542-1545.

130 Trigona C. et al. RTD-fluxgate sensor for measurements of metal compounds in neurodegenerative diseases // *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. – IEEE, 2017. – C. 1-5.

131 Trigona C. et al. RTD-Fluxgate magnetometers for detecting iron accumulation in the brain // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. – 2020. – T. 23. – №. 1. – C. 7-13.

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

133 P. Petrovic, N. Mitrovic and M. Stevanovic, "A hysteresis model for magnetic materials using the Giles-Atherton model," 1999 IEEE AUTOTESTCON Proceedings (Cat. No.99CH36323), 1999, pp. 803-808, DOI: 10.1109/AUTEST.1999.800455.

134 Baranov P., Kolomeytsev A., Zatonov I. Fluxgate sensor modeling //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 516. – №. 1. – С. 012032.

135 Baranov P., Kolomeitsev A., Nesterenko T. G. Analysis of MEMS Fluxgate Design for Vibration and Impact //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2019. – Т. 970. – С. 107-114.

136 Kolomeytsev A., Baranov P., Zatonov I. The Fluxgate Magnetometer Simulation in Comsol Multiphysics //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 155. – С. 01005.

137 Kolomeitsev A. A. et al. Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology //Приборы и методы измерений. – 2021. – Т. 12. – №. 2. – С. 117-123.

138 Баранова В. Е. и др. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров //Измерительная техника. – 2015. – №. 5. – С. 52-56.

139 Затонов И. А., Баранов П. Ф., Коломейцев А. А. Расчет и моделирование многокатушечных систем генерации сверходнородного магнитного поля // Наука. Технологии. Инновации. – 2018. – С. 119-122.

140 Киселев А. Тестирование материала ММР-50, экранирующего магнитные поля на частоте 50 Гц: [Электронный ресурс], 2018. URL: <https://ne-okip.ru/blog/chast-2-testirovanie-mmr-50/> (Дата обращения: 21.12.2021).

141 Mag-01H Single Axis: [Электронный ресурс], 2022. URL: <https://www.bartington.com/products/precision-magnetometers/mag-01h-single-axis/> (Дата обращения: 21.12.2021)

142 Baranov P. et al. Drive signal waveform for a fluxgate //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1065. – №. 5. – С. 052020.

143 Турунов Н.Г. Генератор функциональный “Диатест-4”: [Электронный ресурс], 2008. URL: <https://rudshel.ru/pdf/Diatest-4.pdf> (Дата обращения: 21.12.2021).

144 Baranov P., Avdeeva D., Kolomeytsev A. Test Signal Generator for High-Resolution Electrocardiography //Progress in Material Science and Engineering. – Springer, Cham, 2021. – С. 201-207.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2686519

ЦИФРОВОЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Авторы: *Баранов Павел Федорович (RU), Занонов Иван Андреевич (RU), Коломейцев Андрей Анатольевич (RU)*

Заявка № 2018127604

Приоритет изобретения 26 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 26 июля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения результатов диссертационной работы



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ООО «ЛОРГЕ МЕДИКАЛ»

Киселев Н.,

«___» _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук Коломейцева Андрея на тему «RTD-феррозондовый датчик для измерения сверхслабых магнитных полей»

Комиссия в составе:

Председатель:

Списивцев Сергей Анатольевич, главный инженер ООО «ЛОРГЕ МЕДИКАЛ»

Члены комиссии:

Кубарев Юрий Гаврилович, конструктор ООО «ЛОРГЕ МЕДИКАЛ»

Брюхов Евгений Владимирович, начальник производства ООО «ЛОРГЕ МЕДИКАЛ»

Климашевский Сергей Сергеевич, инженер – электроник ООО «ЛОРГЕ МЕДИКАЛ»

составила настоящей акт о том, что результаты диссертационной работы Коломейцева Андрея «RTD-феррозондовый датчик для измерения сверхслабых магнитных полей»:

- Аналитические выражения для расчета разности временных интервалов в ЭДС, наводимой в измерительной обмотке RTD-феррозонда.
- Методика конечно-элементного анализа конструкций RTD-феррозондов.
- Конструкции планарных RTD-феррозондов и технология их изготовления.

были использованы при реализации проекта по созданию медицинских систем для биомагнитных исследований.

Данный акт не является основанием для предъявления претензий, связанных с авторским правом.

Главный инженер

Списивцев С. А.

Конструктор

Кубарев Ю. Г.

Начальник производства

Брюхов Е. В.

Инженер – электроник

Климашевский С. С.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
по образовательной деятельности
ФГАОУ ВО НИ ТПУ
М.А. Соловьев

« ___ » _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук Коломейцева Андрея на тему «RTD-феррозондовый датчик для измерения сверхслабых магнитных полей»

Комиссия в составе: председателя – и.о. заведующего кафедрой – руководителя отделения Электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности, к.т.н. Тригуба М.В., к.т.н., заместителя начальника отдела организации набора ТПУ Силушкина С.В., к.т.н., директора центра практической подготовки и трудоустройства ТПУ Гребенникова В.В. составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Коломейцева Андрея «RTD-феррозондовый датчик для измерения сверхслабых магнитных полей» внедрены в учебный процесс, а именно:

- разработанные аналитическая модель и методика конечно-элементного анализа RTD-феррозондов;
- изготовленные образцы RTD-феррозондов; используются:
- при проведении лабораторных работ «Основы проектирования электронных устройств» в рамках подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»;
- при выполнении УИРС, НИРМ, ВКР студентами отделения Электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности.

и.о. зав. кафедрой - руководитель
отделения Электронной инженерии, к.т.н.

М.В. Тригуб

Заместитель начальника
отдела организации набора, к.т.н.

С.В. Силушкин

Директор центра
практической подготовки
и трудоустройства, к.т.н.

В.В. Гребенников