На правах рукописи

the

Коломейцев Андрей

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

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

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:	Баранов Павел Федорович, кандидат технических наук
Официальные оппоненты:	Паулиш Андрей Георгиевич доктор технических наук, доцент, Новоси- бирский филиал ФГБУН Института физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический инсти- тут прикладной микроэлектроники», ученый секретарь
	Мамаев Анатолий Иванович доктор химических наук, профессор, феде- ральное государственное автономное обра- зовательное учреждение высшего образова-

ния «Национальный исследовательский Томский государственный университет», директор научно-инновационного образовательного центра «Микроплазменные технологии».

Защита диссертации состоится 15.11.2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного Совета ДС.ТПУ.31 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук



П.Ф. Баранов

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### 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 RTDферрозонда 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.
- 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 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.

Результаты работы также используются: в ООО «Лорге Медикал» (г. Томск) при реализации проекта по созданию медицинских систем для биомагнитных исследований; в учебном процессе в отделении 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 146 наименований и приложений. Работа содержит 195 страниц основного текста, включая 132 рисунка и 37 таблиц.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** «Высокочувствительные датчики сверхслабых магнитных полей» 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 азотнозамещенной вакансии в алмазе и спин-волнового интерферометра. Особое внимание уделено перспективным решениям в феррозондовых датчиках.

Проведенный обзор датчиков для измерения сверхслабых магнитных полей показал, что для систем магнитного вакуума работоспособностью и приемлемой чувствительностью обладают датчики трех типов: феррозондовые, магниторезистивные и СКВИДы, для измерения биомагнитных полей наибольшей чувствительностью обладают СКВИДы, магнитометры с оптической накачкой, магнитометры на основе азотно-замещенной вакансии в алмазе и феррозонды.

За исключением феррозондов, все перечисленные выше классы средств измерений характеризуются технической сложностью и высокой стоимостью. Причиной этого является технология изготовления датчиков, сложность схем возбуждения и обработки сигналов и повышенные требования к условиям эксплуатации.

Феррозонд является технологически простым и недорогим датчиком, имеющим потенциал совершенствования с точки зрения повышения чувствительности, миниатюризации и разрешающей способности для измерения магнитных полей в трехмерном пространстве.

Традиционный способ обработки выходного сигнала феррозонда заключается в выделении второй гармоники, по амплитуде которой судят о значении измеряемой магнитной индукции. Современный этап развития феррозондовых преобразователей характеризуется исследованиями, направленными на поиск новых способов обработки выходного сигнала с целью минимизации их габаритов, уменьшения амплитуды тока возбуждения и, соответственно, тепловыделения и т.д.

Феррозондовый датчик, в котором измеряется не амплитуда второй гармоники, а разность временных интервалов между максимальным и минимальным значениями амплитуды ЭДС в выходном сигнале, называется *RTD-феррозонд*.

RTD-феррозонд представляет собой одиночный сердечник с высоким коэффициентом магнитной проницаемости, который охвачен как измерительной обмоткой, так и обмоткой возбуждения, см. рисунок 1а. В обмотку возбуждения подается сигнал, амплитуда которого достаточна для того, чтобы ввести сердечник в область насыщения. Зависимость намагниченности сердечника от времени имеет форму, похожую на меандр. Так как ЭДС, индуцируемая в измерительной обмотке, пропорциональна производной магнитного потока через сердечник, график зависимости выходного сигнала от времени представляет собой чередующиеся разнополярные импульсы с выраженными пиками (рисунок 1б). При отсутствии внешнего магнитного поля, промежутки времени от отрицательного пика до положительного  $T^+$  и от положительного до отрицательного  $T^-$  равны между собой. При наличии внешнего магнитного поля, напряженность магнитного поля внутри сердечника смещается в положительном или отрицательном направлении относительно нуля на величину внешнего поля. Тогда, при том же токе возбуждения, напряженность поля в сердечнике будет являться суммой напряженностей внешнего и индуцированного полей. Вследствие этого, сердечник сохраняет намагниченность одного из знаков дольше, чем противоположного знака за один период сигнала возбуждения. При этом разность между  $T^+$  и  $T^-$  пропорциональна величине внешнего (измеряемого) магнитного поля.



Рисунок 1 – Структурная схема RTD-феррозонда и основные временные диаграммы

Поскольку RTD-феррозонды являются относительно новым типом датчиков, в отечественных и зарубежных публикациях отсутствуют аналитические модели, описывающие их работу с учетом параметров тока возбуждения и формы кривой намагничивания ферромагнитного сердечника.

Во второй главе «Аналитическое описание RTD-феррозондовых преобразователей» 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.

Для создания математической модели RTD-феррозонда необходимо аналитически описать кривую намагниченности материала ферромагнитного сердечника. Для этого, предложено использовать функцию корневой сигмоиды. Преимуществом использования функции корневой сигмоиды 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.

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

$$H(t) = H_{\rm m} \sin\left(2\pi f \cdot t\right),\tag{1}$$

где f – частота сигнала возбуждения, Гц;  $H_{\rm m}$  – амплитуда сигнала возбуждения, А/м, то магнитная индукция в сердечнике изменяется по закону:

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

где *P*<sub>1</sub> – параметр, определяющий индукцию насыщения материала ферромагнитного сердечника; *P*<sub>2</sub> – параметр, определяющий наклон кривой намагниченности ферромагнитного сердечника.

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

$$\mathcal{E}(t) = -w_2 \cdot S \cdot dB(t) / dt, \qquad (3)$$

где  $w_2$  – число витков в измерительной обмотке; S – площадь поперечного сечения сердечника, мм<sup>2</sup>.

Подставив формулу (2) в выражение (3) и совершив необходимые преобразования, получаем выражение, определяющее значение ЭДС в измерительной обмотке:

$$\varepsilon(t) = -w_2 \cdot S \cdot 2\pi f \cdot H_m \cdot P_1 \cos(2\pi f \cdot t) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_2 + (H_{\text{const}} + H_m \sin(2\pi f \cdot t))^2}} - \frac{(H_{\text{const}} + H_m \sin(2\pi f \cdot t))^2}{(P_2 + (H_{\text{const}} + H_m \sin(2\pi f \cdot t))^2)^{\frac{3}{2}}}\right) \cdot (4)$$

На рисунке 2 представлены сфазированные временные диаграммы магнитной индукции в сердечнике и наводимой ЭДС в измерительной обмотке RTDферрозондового преобразователя, рассчитанные по формулам (2) и (4) соответственно.



Рисунок 2 – Сфазированные диаграммы магнитной индукции в сердечнике и индуцируемой ЭДС

Пики ЭДС можно рассматривать как точки экстремумов. Это означает, что производная ЭДС по времени в этих точках должна равняться нулю. Продифференцируем функцию (4) ЭДС в измерительной обмотке по времени:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{8\sqrt{2}w_2 \cdot S(\pi f)^2 \cdot H_m \cdot P_1 \cdot P_2}{\left(2P_2 + 2H_{const}^2 - H_m^2 \cos(4\pi f \cdot t) + 4H_{const} \cdot H_m \sin(2\pi f \cdot t)\right)^{\frac{5}{2}}} \cdot \left(5H_{const} \cdot H_m + 2P_2 \sin(2\pi f \cdot t) + 2H_{const}^2 \sin(2\pi f \cdot t) + 2H_m^2 \sin(2\pi f \cdot t) + H_m^2 \sin(6\pi f \cdot t) + H_{const} \cdot H_m \cos(4\pi f \cdot t)\right).$$
(5)

Корни уравнения (5) определяют моменты времени, в которые производная от ЭДС равняется нулю. При отсутствии внешнего (измеряемого) магнитного поля эти корни совпадут с моментами перехода через ноль сигнала возбуждения. При наличии измеряемого поля корни и моменты перехода через ноль не совпадают друг с другом.

Определим корни уравнения (5). После ряда упрощающих преобразований получаем выражение:

$$-2H_{m}^{2}(\sin(2\pi f \cdot t))^{3} - H_{const} \cdot H_{m}(\sin(2\pi f \cdot t))^{2} + (H_{const}^{2} + 3H_{m}^{2} + P_{2})\sin(2\pi f \cdot t) + 3H_{const} \cdot H_{m} = 0.$$
(6)

Уравнение (6) является полиномом третьей степени, т.е. имеет три корня. Поиск корней таких полиномов сводится к применению формулы Кардано. После ряда преобразований получаем следующие корни:

$$t_{1} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin\left[\frac{1}{6H_{m}}\left(2\sqrt{7H_{const}^{2} + 18H_{m}^{2} + 6P_{2}}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) - H_{const}\right)\right];$$

$$t_{2} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin\left[-\frac{1}{6H_{m}}\cdot\left(H_{const} + 2\sqrt{7H_{const}^{2} + 18H_{m}^{2} + 6P_{2}}\sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6}\right)\right)\right];$$

$$t_{3} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin\left[-\frac{1}{6H_{m}}\cdot\left(H_{const} + 2\sqrt{7H_{const}^{2} + 18H_{m}^{2} + 6P_{2}}\sin\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{\pi}{6}\right)\right)\right].$$
(7)

Для получения вещественного результата, аргумент арксинуса должен находиться в диапазоне [-1, 1].

При измерении слабых и сверхслабых магнитных полей с помощью феррозонда должны выполняться следующие условия:

$$H_{const} < H_m; H_{const} < P_2, \tag{8}$$

откуда следует, что t<sub>1</sub> и t<sub>2</sub> будут принадлежать множеству комплексных чисел.

Третий корень уравнения можно записать в упрощенном виде, как

$$t_3 = 1/2\pi f \cdot \arcsin\left(-H_{const}/6H_m\right) \tag{9}$$

Таким образом, выражение (9) описывает временную координату пика ЭДС, полученного в результате воздействия на датчик внешнего магнитного поля.

Получим значение разности временных интервалов, дополним формулу (9):

$$RTD = k \cdot T / 2 + (-1)^{k} \cdot 1 / 2\pi f \cdot \arcsin\left(-H_{const} / 6H_{m}\right)$$
(10)

Или в полном виде:

$$RTD = k \cdot T / 2 + (-1)^{k} \cdot 1 / 2\pi f \cdot$$
  
 
$$\cdot \arcsin\left[-1/6H_{m} \cdot \left(H_{const} + 2\sqrt{7H_{const}^{2} + 18H_{m}^{2} + 6P_{2}}\sin(\varphi/3 + 5\pi/6)\right)\right]$$
(11)

Выражение (11) показывает, что при измерении слабых и сверхслабых магнитных полей, если поле возбуждения значительно превышает измеряемое поле, то значение RTD линейно зависит от измеряемой магнитной индукции, так как значение арксинуса малого аргумента стремится к значению аргумента.

Если катушка, возбуждающая магнитное поле в датчике, имеет цилиндрическую форму, то формула, связывающая ток возбуждения и напряженность возбуждающего магнитного поля, имеет вид:

$$H_m(t) = I(t) \cdot n / l, \qquad (12)$$

где I(t) – сила тока в обмотке возбуждения, А; n – количество витков в обмотке возбуждения; l – длина обмотки возбуждения, м.

Подставив выражение (12) в (10), получаем формулу для RTD с учетом параметров цилиндрической катушки возбуждения:

$$RTD = k \cdot T / 2 + (-1)^{k} \cdot 1 / 2\pi f \cdot \arcsin\left(-H_{const} \cdot l / 6 \cdot I \cdot n\right).$$
<sup>(13)</sup>

На рисунке 3 приведены графики ЭДС, наводимой в измерительной обмотке RTD-феррозонда, при различных значениях измеряемого постоянного магнитного поля, полученные в результате расчетов по формуле (13).



Рисунок 3 – Сравнение ЭДС в измерительной обмотке при различных значениях измеряемого магнитного поля

Из рисунка 3 видно, что 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. При наличии измеряемого магнитного поля происходит смещение пиков ЭДС, появляется ненулевое значение при измерении времени между пиками ЭДС:

$$dT_1 - dT_2 \neq 0. \tag{14}$$

Видно, что знак разности временных интервалов показывает направление внешнего магнитного поля.

На основе разработанной аналитической модели в среде графического программирования LabVIEW была разработана компьютерная программа экспресскалькулятора для оценки характеристик RTD-феррозонда при различных наборах входных параметров.

Экспресс-калькулятор представляет из себя набор команд для обработки и вывода данных, полученных в результате математического моделирования RTDферрозонда. Помимо решения уравнений, описанных выше, данная программа предоставляет возможность графического отображения расчетных параметров чувствительности и диапазона линейности RTD-феррозонда. Реализована функция линейной аппроксимации решения уравнения (11) для заданного диапазона измеряемого внешнего магнитного поля. На рисунке 4 представлен пользовательский интерфейс программы.



Рисунок 4 – Интерфейс разработанного экспресс-калькулятора

Разработанный экспресс-калькулятор позволяет при проектировании RTDферрозонда провести предварительный качественный анализ его метрологических характеристик в зависимости от параметров кривой намагничивания сердечника и параметров тока возбуждения.

При проектировании феррозондов необходимо учитывать электромагнитные, электростатические, тепловые свойства используемых материалов и их взаимодействие в зависимости от геометрии конструкции датчика. Аналитически решить эти задачи не представляется возможным. Успешная разработка RTDферрозонда требует проведения физического и имитационного моделирования для более точного прогнозирования режимов функционирования датчика и достижимости метрологических характеристик. Одним из способов решения данной задачи является конечно-элементный анализ, который позволяет проанализировать объект, сокращая долю экспериментальных исследований, прогнозировать свойства феррозонда при изменении исходных параметров, значительно сокращая общее время, стоимость проектирования и прототипирования. Предложена методика конечно-элементного анализа конструкций RTDферрозондов в зависимости от амплитуды и частоты тока возбуждения, учитывающая форму петли гистерезиса ферромагнитного сердечника, в виде последовательности шагов моделирования в Comsol Multiphysics. Методика включает следующие этапы: задание геометрических параметров датчика; задание гистерезисной модели намагничивания сердечника на основе математической модели Джилса-Атертона, позволяющей описать материал сердечника с учетом нелинейности и анизотропии; настройка физического описания модели; формирование конечно-элементной сетки с учетом геометрии датчика; настройка решателя для анализа стационарных и зависимых от времени процессов и представление результатов моделирования.

В третьей главе «Разработка и изготовление RTD-феррозондовых датчиков» приведено описание шести разработанных конструкций RTDферрозондовых 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.

Конструктивное исполнение феррозонда влияет как на его метрологические характеристики, так и на выбор амплитуды и частоты тока возбуждения. В связи с этим в диссертационной работе предложены шесть конструкций образцов RTD-феррозондов. Был проведен сравнительный анализ конструкций с целью оценки их достоинств и недостатков, отработки технологии изготовления и анализа практической применимости для измерения сверхслабых магнитных полей.

Образец 1 выполнен на основе двух симметричных стержневых сердечников. Габаритные размеры сердечников 12,5×2,5×0,2 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.

Образец 2 выполнен на основе плоского броневого сердечника. Габаритные размеры сердечника 15×35×0,2 мм. Каждую стойку сердечника охватывает 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.

Образцы 3 и 4 являются удлиненными копиями образцов 1 и 2 соответственно с утроенным количеством витков в каждом.

Образец 5 выполнен на основе одностержневого сердечника. Габаритные размеры сердечника 18×7,5×0,2 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.

Образец 6 выполнен на основе плоского броневого сердечника. Габаритные размеры сердечника 12,5×20×0,2 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.

Конструкции всех образцов показаны на рисунке 5.



Рисунок 5 – Шесть конструкций образцов RTD-феррозонда, где – синие обмотки возбуждения, красные измерительные обмотки, зеленые сердечники, розовые переходные отверстия

Для всех конструкций RTD-феррозондов по предложенной методике проведен конечно-элементный анализ в среде Comsol Multiphysics. В результате получены зависимости изменения временных интервалов в выходной ЭДС от тока возбуждения и величины магнитной индукции измеряемого внешнего поля, а также зависимости амплитуды ЭДС в измерительной обмотке от амплитуды тока возбуждения, что позволило выбрать параметры схемы возбуждения и обработки сигналов для данных датчиков.

На рисунке 6 представлена часть результатов конечно-элементного анализа образца 4.



График распределения магнитной индукции в сердечнике через 1/2 периода при токе возбуждения 50 мА



Зависимости RTD-смещения для диапазона значений от 10 нТл до 1 мкТл.



ЭДС в измерительной катушке при токе возбуждения 50 мА при различных значениях внешнего поля (желтый – 0 мкТл, розовый – 20 мкТл, голубой – 40 мкТл, красный – 60 мкТл, зеленый – 80 мкТл, синий – 100 мкТл)



Зависимости RTD-смещения для диапазона значений от 1 мкТл до 100 мкТл.



Все спроектированные образцы были изготовлены по технологии печатных плат. Для каждого образца изготавливали печатные платы с полуобмотками возбуждения и измерительными полуобмотками. 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 полуобмоткой возбуждения, после чего через переходные отверстия полуобмотки возбуждения верхней платы соединяли с полуобмотками возбуждения нижней платы, все переходные отверстия пропаивались, аналогично соединялась измерительные полуобмотки. На рисунке 7 показан изготовленный образец 4 RTD-феррозонда.



Рисунок 7 – Изготовленный образец 4 RTD-феррозонда

В четвертой главе «Экспериментальные исследования RTDферрозондовых датчиков» приведено описание установки для создания измеряемого магнитного поля, схемы возбуждения RTD-феррозондовых датчиков, схемы и программное обеспечение для обработки выходных сигналов RTDферрозондов. 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.

Для проверки возможности измерения магнитного поля разработанными образцами датчиков, была применена восьмикатушечная система для создания однородного магнитного поля (рисунок 8-а), которая находится внутри магнитного экрана ММР-50 (рисунок 8-б). Внутрь системы, соосно восьмикатушечной системе и магнитному экрану, помещался датчик магнитометра Mag-01H для измерения заданной магнитной индукции (рисунок 8-в) и исследуемый образец RTD-феррозонда. Общий вид установки в сборе представлен на рисунке 8-г.



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

Для задания однородного магнитного поля, система катушек была подключена к лабораторному линейному источнику питания Matrix MPS-3005L-3. Регулировка магнитной индукции в центре системы катушек осуществлялась путем изменения выходного тока источника питания.

Исследуемые образцы RTD-феррозондов возбуждали синусоидальным сигналом от генератора АКИП-3407/1А через усилитель мощности на основе микросхемы EL2099. Для измерения временных интервалов (RTD-смещения) в выходном сигнале RTD-феррозондов, был использован 14-битный осциллограф/дигитайзер с частотой дискретизации 100 МГц NI PXI-5122 платформы PXI-1042Q. Оцифрованные значения ЭДС с выхода RTD-феррозонда обрабатывались математически с помощью специально разработанного программного обеспечения в среде программирования LabVIEW. Были реализованы две независимых программы: первая программа реализует непосредственно управление модулем NI PXI-5122, оцифровку ЭДС, вывод и сохраннее значений 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.

Обработка выходной ЭДС RTD-феррозондов осуществлялась следующим образом: задавалось значение магнитной индукции внутри восьмикатушечной системы с помощью источника питания Matrix MPS-3005L-3, которое контролировалось по показаниям магнитометра Mag01-H, затем питание магнитометра Mag01-Н отключалось и с генератора АКИП-3407/1А подавалось напряжение синусоидальной формы заданной частоты и амплитуды, ток в цепи возбуждения измерялся с помощью мультиметра Keysight 34410А; оцифровывали 50 периодов сигнала со скоростью 100 МВыб/с, фильтровали сигнал фильтром нижних частот с частотой среза 100 кГц, затем сигнал раскладывали на периоды и вычисляли средний сигнал за 50 периодов; по среднему сигналу определяли максимальное и минимальное значение (пики ЭДС) и их временные координаты, разница между длительностью половины периода сигнала возбуждения и временем между пиками ЭДС это удвоенное значение RTD-смещения; вычисленное значение RTD-смещения выводилось на экран и записывалось в память платформы PXI-1042Q вместе с заданными магнитной индукцией, частотой сигнала возбуждения и амплитудой сигнала возбуждения.

Для всех образцов были измерены значения RTD-смещения в диапазоне от 0,01 до 20 мкТл на частотах возбуждения 1, 2,5, 5 и 10 кГц при 5 значениях амплитуды тока возбуждения. Значения амплитуды тока возбуждения задавались на основе результатов конечно-элементного анализа для каждого образца индивидуально.

Анализ экспериментальных данных показал, что образцы 5 и 6 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 катуш-

ках 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.

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

$$RTD = aB + b, \tag{15}$$

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 (16):

$$B_{\mu_{3M}} = \left(RTD_{\mu_{3M}} - b\right) / a. \tag{16}$$

где *RTD*<sub>изм</sub> – измеренная образцами разность временных интервалов за период (*RTD*-смещение), с;

Относительную погрешность измерения магнитной индукции определяли как:

$$\gamma = \left(B_{\mu_{\rm MM}} - B\right) / B \cdot 100 \%. \tag{17}$$

Таким образом, для экспериментально исследованных 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 1.

Из результатов определения метрологических характеристик образцов следует, что коэффициент преобразования уменьшается с ростом частоты, это подтверждает теоретические выкладки и результаты конечно-элементного анализа. Относительная погрешность измерений практически на всем диапазоне не превышает 1-3 %, а отдельные 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.

102									
	O	бразец 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	0,05-8		
Максимальная, погрешность, %	9	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	1-20	0,5-20	0,5-20	2,5-15	2,5-15	2,5-15	2,5-15		
Максимальная, погрешность, %	5,1	10,5	7,73	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	0,05-8		
Максимальная, погрешность, %	3,2	11,3	10,2	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		

Таблица 1 – Результаты определения метрологических характеристик образ-

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 следует отметить факт, что увеличение числа витков в образце позволяет увеличить коэффициент преобразования и уменьшить амплитуду тока возбуждения. Этот факт согласуется с аналитическими выкладками. Следует отметить, что все исследованные образцы в экспериментах показали меньший коэффициент преобразования по сравнению с коэффициентами, полученными в ходе конечно-элементного анализа. Это обусловлено тем, что при моделировании не учитывались частотные свойства ферромагнитного сердечника, а также неточностью ручного изготовления образцов (неодинаковостью соединения обмоток, несимметричностью приклейки сердечника и т.д.).

Для определения возможности измерения индукции магнитного поля сложной формы, была собрана измерительная установка, схема которой представлена на рисунке 9-а, внешний вид установки представлен на рисунке 9-б.

Для имитации магнитных полей, создаваемых биотоками в теле человека, на калибровочную систему подавался сигнал ЭКГ от генератора функционального Диатест-4 через усилитель У7-6. Таким образом осуществлялось 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.

HOB



Рисунок 9 – Установка для измерения магнитного поля сложной формы

Был проведен эксперимент для оценки способности датчика измерять переменное магнитное поле сложной формы на примере биосигнала. С помощью генератора Диатест-4 задавали магнитную индукцию, пропорциональную эталонной ЭКГ с максимальной амплитудой зубцов 5,7 мкТл. Измерение проводили образцом 4 при амплитуде тока возбуждения 60 мА и частоте возбуждения 1 кГц с помощью магнитометра Mag-01H. Результаты, полученные усреднением 500 циклов измерений, представлены на рисунке 10.



Рисунок 10 – Результаты измерения переменного магнитного поля сложной формы а – магнитокардиограмма, полученная магнитометром Mag-01H; б – магнитокардиограмма, полученная образцом 4

Результаты эксперимента показали, что изготовленный RTDферрозондовый преобразователь принципиально пригоден для измерения переменного сигнала магнитной индукции сложной формы. В частности, на полученной магнитокардиограмме можно четко выделить характерный для ЭКГ R-зубец, другие признаки – P-, Q-, S- и T-зубцы – видны менее четко. **В приложениях** диссертации приведены документы, подтверждающие регистрацию результатов интеллектуальной деятельности и акты внедрения результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 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 RTDферрозондов, 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, финансируемых в рамках РНФ, ФЦП, РФФИ и Гранта Президента РФ.
- 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 отделении электронной инженерии Томского политехнического университета, что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы.

# ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, индексируемых в базах данных WoS и Scopus

- 1. **Kolomeytsev, A.** Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology / A. A. Kolomeitsev, I. A. Zatonov, M. I. Pischanskaya [et al.] // Devices and Methods of Measurements. 2021. Vol. 12. No 2. P. 117-123.
- Kolomeytsev, A. Test Signal Generator for High-Resolution Electrocardiography / P. Baranov, A. Kolomeytsev, D. Avdeeva // Studies in Systems, Decision and Control. – 2021. – Vol. 351. – P. 201-207.
- Kolomeytsev, A. Fluxgate sensor modeling / P. Baranov, A. Kolomeytsev, I. Zatonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 516, Article 012032.

- Kolomeytsev, A. Analysis of MEMS fluxgate design for vibration and impact / P. Baranov, A. Kolomeytsev, T. Nesterenko // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 970. – P. 107-114.
- Kolomeytsev, A. Drive signal waveform for a fluxgate / P. Baranov, V. Baranova, A. Kolomeytsev, I. Zatonov // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1065, Article 052020.
- Kolomeytsev, A. The Fluxgate Magnetometer Simulation in Comsol Multiphysics / A. Kolomeytsev, P. Baranov, I. Zatonov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 155, Article 01005.
- 7. Коломейцев, А.А. Анализ схем выделения дифференциального сигнала в синхронных усилителях / П. Ф. Баранов, В. Н. Бориков, А. А. Коломейцев // Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 17-22.

## Патенты

Коломейцев, А. Патент № 2686519 С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/02. Цифровой феррозондовый магнитометр: № 2018127604: заявл. 26.07.2018: опубл. 29.04.2019 / П.Ф. Баранов, И.А. Затонов, А. Коломейцев.

## Статьи в других изданиях

- Коломейцев, А. Расчет и моделирование многокатушечных систем генерации сверходнородного магнитного поля / И.А. Затонов, П.Ф. Баранов, А. Коломейцев // Наука. Технологии. инновации: Сборник научных трудов: в 9 частях, Новосибирск, 03–07 декабря 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 119-122.
- Коломейцев, А. Определение частоты возбуждения для феррозондового датчика / Д.А. Петровых, А. Коломейцев // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов. В 9-ти частях, Новосибирск, 02–06 декабря 2019 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – С. 224-227.
- 11. Коломейцев, А. Виртуальное конструкторское бюро / А. Коломейцев, В.И. Стасевский, В.А. Смолянский // Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов V Международного молодежного форума, Томск, 18–20 апреля 2017 года / Томский политехнический университет. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 138-145.