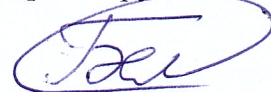


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА»

На правах рукописи



Беляков Денис Игоревич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА И ФУНКЦИЙ ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ГЭТ12-2011 ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЕДИНИЦ
МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ И МАГНИТНОГО
ПОТОКА ВТОРИЧНЫМ И РАБОЧИМ ЭТАЛОНАМ

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений
(измерения электрических и магнитных величин)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2020

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Шифрин Владлен Яковлевич

Официальные оппоненты:

Вершовский Антон Константинович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Атомной Радиоспектроскопии Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, Физико-Технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург).

Куприянов Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры ядерно-физических методов исследования, Санкт-Петербургский Государственный Университет (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Защита диссертации состоится «22» декабря 2020 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 308.004.01 при ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по адресу: 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19, ученому секретарю диссертационного совета Чекирде Константину Владимировичу.

Ученый секретарь диссертационного совета.
кандидат технических наук



К.В.Чекирда

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Метрологическое обеспечение магнитных измерений в РФ опирается на разработанный во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011. Дополняют измерительные возможности ГЭТ12-2011 два государственных эталона ВНИИФТРИ - Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции ГЭТ 82-85 и ГПЭ единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот от 0,01 до 30 мГц – ГЭТ 44 – 2010 и Государственный первичный эталон единицы мощности магнитных потерь ГЭТ 198-2017, созданный в УНИИМ.

Анализ современных потребностей промышленности, оборонной области и научных исследований показывает, что одной из актуальных задач дальнейшего развития метрологического обеспечения измерений магнитной индукции (МИ) постоянного поля являются расширение нижнего предела диапазона воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля ГЭТ12-2011 от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Тл и верхнего предела от $1 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тл.

В области эталонных средств измерений магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах наиболее актуальной является задача разработки методов и средств измерений по передаче единицы магнитного потока, воспроизводимой Государственным первичным эталоном ГЭТ12-2011, средствам измерений параметров магнитных материалов.

Решение этой задачи включает в себя выполнение исследований методических погрешности измерений, связанных с процессами возникновения намагниченности в нелинейно-гистерезисных средах и с созданием соответствующего комплекса средств измерений.

Цель работы

Целями данной работы являются:

- разработка методики, средств измерений и программного обеспечения для расширения диапазона Государственного первичного эталона ГЭТ 12-2011 в части воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля в область «гипогеомагнитных» полей ($1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ Тл);
- разработка методики, проведение экспериментальных исследований и разработка программного обеспечения для расширения диапазона ГЭТ 12-2011 в части воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля в область «средних» полей ($1 \cdot 10^{-3}$ – $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тл);
- разработка структуры экспериментального образца индукционного компаратора, а также методики и программного обеспечения для расширения

функций ГЭТ12-2011 в область измерений магнитных параметров магнитомягких материалов.

Задачи исследования

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ способов и методов воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля, применяемых во ВНИИМ и в зарубежных ведущих мировых метрологических институтах, таких как PTB (Германия), NPL(Англия), KRISS (Ю.Корея), NIM (Китай) и др.;

- разработать методику и программное обеспечение для передачи размера единицы магнитной индукции постоянного поля от ГЭТ12-2011 в «гипогеомагнитный» диапазон ($1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ Тл) и провести исследование неопределенности измерений при передаче единицы;

- разработать процедуру и провести экспериментальные и теоретические исследования для передачи единицы магнитной индукции постоянного поля от ГЭТ12-2011 в область «средних» полей (1 – 25 мТл);

- разработать комплекс средств измерений и программного обеспечения для передачи размера единицы магнитного потока в область измерений магнитных параметров материалов, в том числе проведение исследование составляющих неопределенности измерений при передаче единицы.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- предложены, обоснованы и реализованы состав и структура нового дополняющего ГЭТ12-2011 подкомплекса, обеспечивающего передачу единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля Тл в область «гипогеомагнитного» диапазона с суммарной стандартной неопределённостью 0,13 нТл. По итогам этой части работы получен патент «Способ воспроизведения магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне», Патент на изобретение № 2650769 от 26 июня 2018 г;

- предложена процедура передачи единицы индукции постоянного магнитного поля Тл от ГЭТ12-2011 в область «средних» полей (1 – 25 мТл). Исследованы составляющие неопределенности измерений при передаче единицы. Предложена методика передачи единицы Тл в область «средних» полей, позволяющая осуществить передачу размера единицы с относительной стандартной неопределенностью $2,1 \cdot 10^{-6}$.

- предложены, обоснованы и реализованы состав и структура измерительного комплекса, обеспечивающего передачу единицы магнитного потока Вб от ГЭТ12-2011 в область измерений магнитных параметров магнитомягких материалов. Выполнена оценка неопределенности измерений при передаче размера Вб в область магнитных параметров магнитомягких материалов - магнитной индукции насыщения, остаточной индукции, коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости материала.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- Впервые создан опытный образец эталонного подкомплекса предназначенного для передачи единицы постоянной магнитной индукции от первичного эталона в область «гипогеомагнитного» диапазона. По результатам исследований подкомплекса суммарная стандартная неопределённость составила 0,13 нТл.

- В соответствии со стандартом Системы менеджмента качества ВНИИМ СК 02-31-09 разработаны: «Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ Тл» - СК 03-2205-МК-10-Т и «Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне от 1 до 25 мТл» - СК 03-2205-МК-11-С,

- Разработано программное обеспечение «Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ12-2011», предназначенное для диапазона от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ Тл.

- Впервые создан измерительный комплекс, предназначенный для передачи единицы постоянной магнитной индукции от первичного эталона в область «средних» полей (1 – 25 мТл). По результатам теоретических и экспериментальных исследований комплекса определено, что суммарная стандартная неопределённость передачи единицы не превышает $2,1 \cdot 10^{-6}$.

- Разработано программное обеспечение «Magnetic Material Calculation Software (MMCS)», предназначенное для автоматической обработки результатов измерений параметров магнитных материалов с использованием созданного комплекса.

- Разработан и внедрен индукционный компаратор магнитного потока для передачи единицы Вб в область измерений параметров магнитомягких материалов, что позволит существенно расширить измерительные возможности ВНИИМ с последующей актуализацией пяти строк СМС.

Результаты работы внедрены во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», АО «НИИ СТТ», ООО «ГеоДевайс». Акты о внедрении приведены в приложении А.

Основные положения выносимые на защиту

- Разработанный состав и структура измерительного комплекса для передачи единицы Тл в «гипогеомагнитный» диапазон, в сочетании с комплексом технических и методических решений по автоматизации процесса измерения, позволяют воспроизводить магнитную индукцию в диапазоне от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ Тл с суммарной стандартной неопределённостью не превышающей 0,13 нТл;

- Разработанные процедура и методика передачи единицы Тл от Государственного первичного эталона в область «средних» полей, которые позволяют передать единицу магнитной индукции с относительной неопределённостью не более $2,1 \cdot 10^{-6}$;

- Комплекс технических и методических решений созданного индукционного компаратора магнитного потока позволяет реализовать прямую передачу единицы магнитного потока от ГЭТ 12 в область измерений магнитных параметров магнитомягких материалов (для тороидальных образцов остаточная и максимальная индукция с неопределенностью не более 0,53%, коэрцитивная сила с неопределенностью не более 0,6%, максимальная проницаемость с неопределенностью не более 0,72%).

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Автором разработаны методика, программное обеспечение и структура средств измерений для воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля в «гипогеомагнитном» диапазоне; разработаны комплекс средств измерений, методика и программное обеспечение, предназначенные для передачи единиц магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $25 \cdot 10^{-3}$ Тл и магнитного потока от ГЭТ12-2011 в область измерений магнитных параметров магнитомягких материалов.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на:

- Международной научно-практической конференции «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений», г. Санкт-Петербург, 2017.

- 15-й Международной школа-конференции «Magnetic resonance and its applications – Spinus 2018», г. Санкт-Петербург, 2018.

- V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, г. Москва, 2019.

- Международной научно-технической конференция «Метрология — 2019», г. Минск, 2019.

- 16-й Международной школа-конференции «Magnetic resonance and its applications – Spinus 2019», г. Санкт-Петербург, 2019.

- 2-й научно-технической конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии», г. Москва, 2019.

- Семинарах лаборатории госэталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Публикации

Основные положения диссертационной работы представлены в 12 печатных работах, 4 статьи опубликованы в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, списка источников и приложения. Общий объём работы составляет 140 страниц машинописного текста, включая 35 рисунков, 42 таблицы и списка источников из 36 наименований.

В диссертационной работе изложены и обобщены результаты работы, выполненной в период с 2014 по 2020 гг.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении приводится обоснование актуальности тематики диссертационного исследования, формулируются цели и задачи, научная и практическая значимость работы.

В Первой главе рассмотрен вопрос востребованности измерений магнитной индукции, магнитного потока и магнитных параметров материалов. Перечислены области деятельности, где применяются измерения магнитных величин.

Приведено описание текущего состояния метрологического обеспечения области магнитных измерений и обзор характеристик основных средств измерения магнитной индукции и магнитного потока используемых в РФ.

Описаны основные методы и средства измерений магнитной индукции геомагнитного и «гипогеомагнитного» диапазонов (индукционные магнитометры, магниторезистивные магнитометры различных типов, феррозондовые и квантовые магнитометры).

Рассмотрены типы и принципы работы средств измерений магнитной индукции «средних» и «сильных» полей (магнитометры на эффекте Холла, измерительные катушки и ядро-магниторезонансные магнитометры).

Подробно описаны состав, структура и принципы действия Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011.

Рассмотрены эталоны, реализующие метрологическое обеспечения области измерений магнитной индукции постоянного поля в странах СНГ: харьковский эталон ДЕУ 08-01-96 и хранимый во ФГУП «ВНИИФТРИ» Государственный первичный специальный эталон единиц магнитной индукции в диапазоне 1-10Тл ГЭТ 82-85.

Исследованы характеристики и принципы действия эталонов магнитной индукции зарубежных метрологических институтов: Англии (NPL), Германии (PTB), Чехии (СМІ), Ю. Кореи (KRISS), Китая (NIM).

Рассмотрены тенденции развития метрологического обеспечения измерений магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах.

В конце главы сформулированы актуальные задачи развития области метрологического обеспечения магнитных измерений.

Во **Второй** главе описываются проведенные работы по разработке эталонного подкомплекса для расширения диапазона измерений при передаче единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля в область гипогеомагнитных полей. Структурная схема подкомплекса приведена на рисунке 1.

Методика и аппаратная реализация задачи воспроизведения и передачи единицы МИ в гипогеомагнитный диапазон осуществляются на базе расширения функциональных возможностей эталонной трехкомпонентной меры-компаратора (ЭТМК) и эталонного гелий-цезиевого магнитометра величин ГЭТ 12-2011.

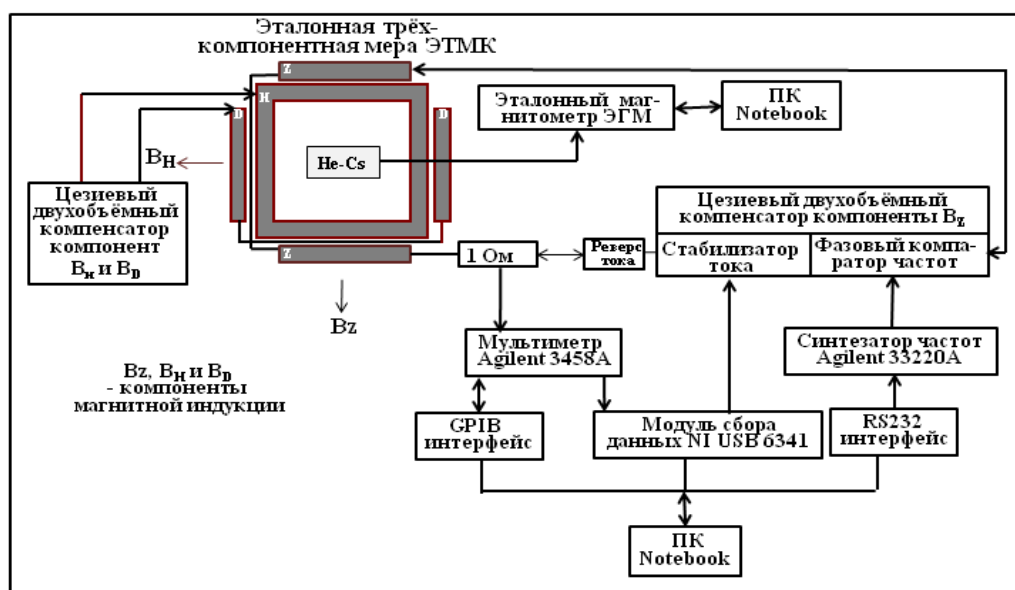


Рисунок 1 – Структурная схема подкомплекса для воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$ Тл

В подкомплексе в новой функции применяется широкополосный фазовый компаратор частот атомного магнитного резонанса. В связи с возросшими требованиями к стабильности генерируемого в основную обмотку ЭТМК постоянного тока, вводится дополнительная система стабилизации тока, основанная на прецизионном вольтметре Agilent 3458A и автономном блоке сбора данных LCard 34-4. Управление комплексом производится специально разработанным программным обеспечением (имеющим сертификат соответствия программного обеспечения № ПО ИМ - 01-2019).

Воспроизведение и передача единицы магнитной индукции в область величин в 50 – 5000 раз ниже естественного фона магнитного поля Земли (МПЗ) оказалась возможной благодаря разработке методики точной компенсации локального магнитного поля, контроля созданного «нуля» поля и автоматического воспроизведения заданных величин МИ в диапазоне ± 1000 нТл.

На разработанную методику был получен патент на изобретение («Способ воспроизведения магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне» Шифрин В.Я, Калабин В.Н., Беляков Д.И., патент №2650769).

Процедура калибровки подкомплекса в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл предусматривает выполнение следующих измерительных процедур:

1. Измерение эталонным магнитометром ЭГМ начального стабилизированного уровня МИ, соответствующего среднему значению стабилизированной вертикальной компоненты B_{Z0} МИ локального поля Земли при полной компенсации двух ортогональных горизонтальных компонент.

2. Воспроизведение по показаниям ЭГМ удвоенной величины МИ - $2B_{Z0}$ путем подбора соответствующего тока I_{Z0} , пропускаемого по обмотке K_Z вертикальной компоненты меры ЭГМК.

3. Фиксация и поддержание программным путём тока компенсации I_{Z0} осуществляется посредством мультиметра Agilent 3458A через измерение электрического напряжения, создаваемого током I_{Z0} на мере сопротивления 1 Ом.

При этом, программируемый интерфейс управляющей программы, разработанный на языке LabView считывает показание вольтметра, соответствующее силе тока для воспроизведения «0 поля», усредняет полученные величины за нормированный период времени и, посредством цифро-аналогово преобразователя (ЦАП), подает пропорциональное управляющее напряжение на стабилизатор тока. Таким образом, во время калибровки магнитометров, поддерживается неизменной величина тока в цепи компенсации вертикальной компоненты МИ локального поля Земли.

4. Одновременно с вольтметром Agilent 3458A, компьютерная программа управляет синтезатором опорных частот фазового компаратора частот двух-объемного компенсатора вариаций вертикальной компоненты B_Z , что позволяет генерировать заданные приращения и воспроизведение МИ B_{Zi} в пределах ± 1000 нТл.

5. Воспроизводимые под управлением компьютерной программы величины B_{Z0} и B_{Zi} калибруются на фоне удвоенной величины МИ $2B_{Z0}$ посредством измерений эталонным магнитометром ЭГМ. Заданные действительные величины МИ рассчитываются как разность:

$$B_{ZiД} = (2 \cdot B_{Z0} + B_{Zi}) - 2 \cdot B_{Z0}$$

6. Для непосредственного выполнения калибровочных работ устанавливается рабочее положение направления тока в обмотке K_Z , соответствующее полной компенсации МПЗ при токе I_{Z0} и вводятся в действие программные приращения МИ в пределах ± 1000 нТл посредством воспроизведения заданных опорных частот фазового контроллера компоненты B_Z .

Контроль величины воспроизводимой МИ дополнительно осуществляется эталонным магнитометром ЭГМ при калибровке системы на верхнем пределе диапазона ± 1000 нТл относительно скомпенсированного «0 поля».

Воспроизводимая в ЭТМК величина «гипогеомагнитного» поля равняется сумме постоянной составляющей МПЗ, вариаций МПЗ, генерируемой в ЭТМК индукции численно равной индукции МПЗ (измерено ЭГМ) и направленной противоположно и индукцией генерируемой дополнительными обмотками через фазовый компаратор:

$$B_{cur} = B_{realMPZ} - B_{measMPZ} + B_{shortVar} + B_{longVar} + B_{fcomp} - B_{compVar} \quad (1)$$

где B_{cur} – воспроизводимая в ЭТМК индукция постоянного магнитного поля;

$B_{realMPZ}$ – индукция постоянной составляющей магнитного поля Земли;

$B_{measMPZ}$ – измеренная ЭГМ МПЗ, воспроизводимая в вертикальной обмотки ЭТМК индукция;

$B_{shortVar}$ – коротковолновые вариации МПЗ;

$B_{longVar}$ – длинноволновые вариации МПЗ;

B_{fcomp} – индукция генерируемая через дополнительные обмотки фазовым компаратором;

$B_{compVar}$ – индукция генерируемая в ЭТМК системой компенсации вариаций.

Неопределенность измерений ЭГМ также напрямую зависит от однородности соленоида в котором генерируется магнитное поле, что в итоге учитывается в бюджете неопределенности.

Бюджет неопределённости передачи размера единицы Тл в диапазоне ± 1000 нТл, представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Бюджет неопределённостей передачи размера единицы Тл для диапазона МИ ± 1000 нТл

Параметр X_i	Тип оценки	Стандартная неопределенность, нТл	Распред. вероятности	Кoeff. чувствительности	Вклад, нТл
ЭГМ	A	0,003	Норм.	$\sqrt{2}$	0,004
	B	0,03	Равном.	$\sqrt{2}$	0,04
Неоднородность МИ в ЭТМК(\emptyset 10 см)	B	0,03	Равном.	1	0,03
Нестабильность B_{z0} (градиент вариаций и статизм)	A	0,05	Норм.	1	0,05
	B	0,1	Равном.	1	0,1
Нестабильность B_z (нестабильность тока)	A	0,015	Норм.	1	0,015
Суммарная неопределенность, нТл					0,13

Суммарная стандартная и расширенная неопределённость при доверительной вероятности $P=0,95$ ($K=2$) оцениваются величинами 0,13 нТл и 0,26 нТл.

В **Третьей главе** описываются работы по разработке эталонного подкомплекса для расширения диапазона воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции в область «средних» постоянных полей (от $1 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тл).

Существуют ограничения, связанные с несогласованностью границ диапазонов измерений на основе существующих квантовых методов измерений в пределах $1 \cdot 10^{-3}$ – $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Это не давало возможность непосредственной передачи размера единицы от ГЭТ12-2011 ко всем областям измерений в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6}$ до 1 Тл.

Для реализации поставленной задачи во ВНИИМ ранее были выполнены разработка и изготовление квантового цезиевого магнитометра (КЦМ), работающего на разрешённой структуре атомов цезия в диапазоне 1 – 25 мТл и основанного на методе двойного радиооптического атомного магнитного резонанса (АМР магнитометра M_Z типа).

Для измерений модуля МИ на основе АМР в Cs^{133} предусматривается применение квантовых переходов между магнитными подуровнями $m_{F=4} \rightarrow m_{F=3}$ и $m_{F=3} \rightarrow m_{F=4}$, при полном моменте количества движения $F=4$, обеспечивающих максимальную в серии резонансов амплитуду АМР сигнала.

Частоты зеemanовских переходов между смежными магнитными подуровнями $f_{m, m-1}$ принято определять разложением функции в ряд Тейлора в соответствии с выражениями:

$$f_{(-4,-3)} = K_1 \cdot B [1 + K_2^- \cdot B + K_3^- \cdot B^2 + K_4^- \cdot B^3 + K_5^- \cdot B^4 + \dots]$$

$$f_{(4,3)} = K_1 \cdot B [1 - K_2^+ \cdot B + K_3^+ \cdot B^2 - K_4^+ \cdot B^3 + K_5^+ \cdot B^4 + \dots]$$

где $f_{(-4,-3)}$ и $f_{(4,3)}$ – частоты АМР, соответствующие направлению МИ, совпадающему с направлением света оптической накачки атомов цезия, и, соответственно, противоположного ему; K_i – коэффициенты преобразования МИ в частоту магнитного резонанса.

Для снижения неопределённости измерений цезиевого магнитометра КЦМ результат измерений определяется как полусумма частот, полученных при двух противоположных направлениях магнитного поля меры при неизменном значении модуля МИ:

$$f = \frac{f_{(4,3)} + f_{(-4,-3)}}{2} = K_1 \cdot B [1 + \Delta K_2 \cdot B + K_3^{av} \cdot B^2 + \Delta K_4 \cdot B^3 + K_5^{av} \cdot B^4 + \dots] \quad (2)$$

При этом, в связи с существенно сниженными (компенсированными) величинами остаточных коэффициентов четных порядков в выражении (2), по сравнению с исходными, влияние степени неточности их определения на интегральный коэффициент преобразования частоты АМР в МИ, соответственно, снижается.

Для целей воспроизведения и передачи единицы МИ удобнее представлять (2) в реверсной форме:

$$B = a_1 \cdot f + a_2 \cdot f^2 + a_3 \cdot f^3 + a_4 \cdot f^4 + \dots \quad (3)$$

По экспериментальной оценке случайная составляющая погрешности частоты АМР, генерируемой цезиевым магнитометром КЦМ, не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ во всём диапазоне от 3,5 – 90 МГц.

Для расчета коэффициентов полинома (a_1, a_2, a_3, a_4) в выражении (3) были проведены две серии сличений магнитометра КЦМ: первая - с эталонным щелочно-гелиевым магнитометром (ЭГМ) состава ГЭТ 12-2011 с расширенным диапазоном 0,8-2 мТл, вторая - с разработанным ЯМР-тесламетром в диапазоне 8-25 мТл.

Измерительный комплекс в режиме воспроизведения МИ в диапазоне 0,8 мТл – 2 мТл включает в себя следующие основные компоненты из состава ГЭТ12-2011: два эталонных кварцевых соленоида, питаемых квантовой мерой тока КМТ, эталонную трёхкомпонентную меру МИ ЭТМК с системой генерации токов компенсации МПЗ, двухобъёмный АМР компенсатор вариаций МПЗ, ЭГМ.

Сличения магнитометров в диапазоне 8-25 мТл проводятся в мерекмпараторе МКМИ, представляющей собой четырёхсекционный соленоид с устройствами коррекции однородности МИ и стабилизации и измерения силы постоянного тока в его обмотке.

Подобная система теоретически обеспечивает наиболее высокую однородность магнитного поля в её рабочем пространстве при условии точного выполнения расчётных геометрических параметров обмотки.

Предварительно были проведены работы по коррекции однородности МИ в рабочей области МКМИ до уровня $1 \cdot 10^{-6}$. Перед измерением каждой очередной величины МИ, воспроизводимой мерой МКМИ, в течение 24 часов мера прогревалась и стабилизировалась под действием рабочего тока.

Используемый для сличений ядерно-резонансный тесламетр разработан на основе ЯМР-спектрометра с импульсным селективным методом возбуждения и регистрации частоты магнитного резонанса.

Для определения коэффициентов полиномиальной регрессии была разработана специальная расчетная программа.

Было проверено несколько вариантов вычисления коэффициентов преобразования частоты АМР в магнитную индукцию из формулы (3). Несколько коэффициентов (в том числе при первом порядке) вычислялись на основе измерений «слабых» полей (0,8-2 мТл), остальные в «средних» полях (10-25 мТл). Качество модели при этом определялось по минимальной ошибке аппроксимации и скорректированному коэффициенту детерминации.

Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась стандартным образом при помощи теста Стьюдента при выдвижении гипотезы о статистически незначимом отличии значения коэффициента регрессии от нуля.

На основании данных выполненных ранее вычислений определялись коэффициенты при первом и третьем порядке в «слабых» полях, и коэффициенты при втором и четвертом порядке, в «средних» полях.

В результате расчет по программе проводится в два этапа.

На первом этапе, обрабатывая данные сличения с ЭГМ, программа с помощью метода наименьших квадратов оценивала коэффициенты a_1 и a_3 . Коэффициенты фиксируются в памяти программы и позднее используются на втором этапе расчета как заданные.

Логика программы второго этапа отличается от логики первой программы. В отличие от метода сличений с ЭГМ, когда единица магнитной индукции постоянного поля фактически передается от ГЭТ12-2011, при сличении в «средних» полях магнитометр КЦМ сличается с ЯМР-тесламетром, имеющим подтвержденную на практике и достаточную для применения в выполняемом эксперименте линейность преобразования модуля индукции в частоту АМР в рассматриваемом диапазоне.

Оценка коэффициентов высших порядков была построена следующим образом. Значение МИ, измеренной ЯМР-тесламетром, учитывается с некоторым множителем, в остальном оценка коэффициентов производится аналогично первой программе.

В интерфейсе программы существует возможность задавать интервал значений множителя и шаг итерации поиска. Программа в автоматическом режиме вычисляет коэффициенты и СКО ряда для всех коэффициентов из указанного интервала и находит значения, соответствующие минимальному СКО. Коэффициенты регрессии, соответствующие минимальному СКО, признаются реальными коэффициентами регрессии. Интерфейс программы представлен на рисунке 2.

Следует отметить, что описанная выше процедура в совокупности с рассчитанным бюджетом неопределенности никак принципиально не отличается от типичной калибровки, поскольку, как и в калибровке, цель эксперимента - найти коэффициенты преобразования, минимизирующие отклонение результатов измерений калибруемого прибора от эталонного.

Оценка коэффициента калибровки ЯМР-магнитометра проходила в интервале $[0,999; 1,001]$ при шаге итерации 10^{-8} . При уменьшении шага до 10^{-9} улучшений оценки выявлено не было.

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 0,8-2 мТл представлен в таблице 2. Суммарная неопределенность зависит от неопределенности эталонного магнитометра ЭГМ, неоднородности МИ в мере МКМИ (это вносит дополнительную неопределенность измерений ЭГМ), нестабильности МИ МКМИ (связанной с нестабильностью стабилизатора тока и низкочастотных вариаций градиента МПЗ).

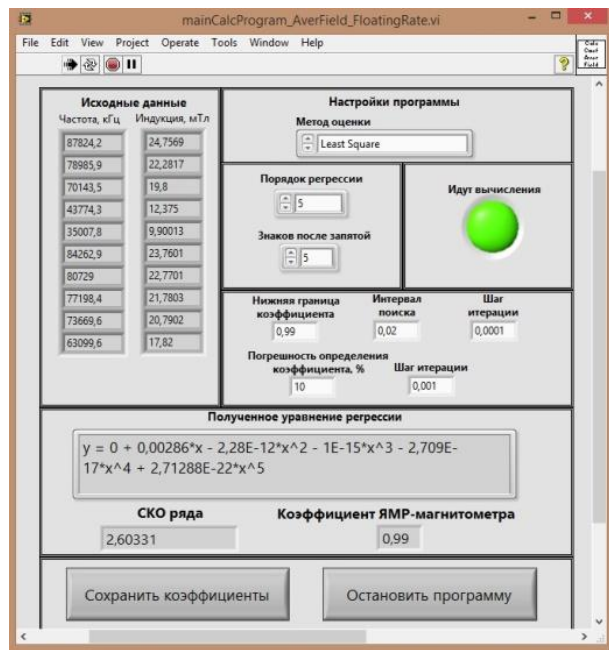


Рисунок 2 – Интерфейс программы расчета коэффициентов преобразования КЦМ в «средних» полях

Таблица 2 - Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 0,8-2 мТл

Источник Неопределенности	Тип оценки	Распределение	Стандартная неопределенность, 10^{-6}
Эталонный магнитометр, ЭГМ-1	Тип В	Равномерное	0,05
Неоднородность МИ в МКМИ (Ø 10 мм)	Тип В	Равномерное	0,2
Нестабильность МИ МКМИ	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	0,2
Суммарная стандартная неопределённость	Тип В	Нормальное	0,3
	Тип А	Нормальное	0,3

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 10-25 мТл представлен в таблице 3. Суммарная неопределенность зависит от погрешности определения коэффициентов a_1 и a_3 , нестабильности и неоднородности МИ в МКМИ.

При сличении ЭГМ и КЦМ в диапазоне 0,8-2 мТл зависимость магнитной индукции от средней частоты определяется как полином третьего порядка.

Таблица 3 -Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 10-25мТл

Источник Неопределенности	Тип оценки	Распределение	Стандартная неопределенность, 10^{-6}
Определение констант a_1 и a_3	Тип В	Равномерное	0,5
Неоднородность МИ в МКМИ(в диаметре 10мм)	Тип В	Равномерное	2
Нестабильность МИ	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	0,2
Суммарная стандартная неопределенность	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	2,1

Коэффициенты регрессии оцениваются с помощью метода наименьших квадратов и находятся в результате решения системы:

$$\begin{cases} a_1 \cdot \sum x_i^2 + a_3 \cdot \sum x_i^4 = \sum y_i \cdot x_i \\ a_1 \cdot \sum x_i^4 + a_3 \cdot \sum x_i^6 = \sum y_i \cdot x_i^3 \end{cases}$$

Система может быть решена с помощью метода Крамера. Пусть:

$$\begin{aligned} \Delta &= \sum x_i^2 \cdot \sum x_i^6 - (\sum x_i^4)^2 \\ \Delta_1 &= \sum (y_i \cdot x_i) \cdot \sum x_i^6 - \sum (y_i \cdot x_i^3) \cdot \sum x_i^4 \\ \Delta_3 &= \sum (y_i \cdot x_i^3) \cdot \sum x_i^2 - \sum (y_i \cdot x_i) \cdot \sum x_i^4 \end{aligned}$$

В таком случае, используя метод Крамера, можно найти коэффициенты a_1 и a_3 :

$$a_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad a_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta};$$

Аналогичным образом, коэффициенты a_2 и a_4 вычисляются из данных сличений ЭГМ и ЯМР-магнитометра в диапазоне средних полей как:

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{\Delta_2}{\Delta_{24}}; a_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta_{24}}, \text{ где:} \\ \Delta_{24} &= \sum x_i^4 \cdot \sum x_i^8 - (\sum x_i^6)^2 \\ \Delta_2 &= \sum y_i \cdot x_i^2 \cdot \sum x_i^8 - \sum y_i \cdot x_i^4 \cdot \sum x_i^6 \\ \Delta_4 &= \sum y_i \cdot x_i^4 \cdot \sum x_i^4 - \sum y_i \cdot x_i^2 \cdot \sum x_i^6 \end{aligned}$$

Для построения бюджета неопределенности производится вычисление коэффициентов чувствительности. Для данных вычислений была разработана специальная компьютерная программа.

Поскольку вкладом погрешности измерения частоты в неопределенность при передаче единицы можно пренебречь, суммарная стандартная неопределенность определяется как:

$$u_c = \sqrt{(f \cdot u^2(a_1))^2 + (f^2 \cdot u^2(a_2))^2 + (f^3 \cdot u^2(a_3))^2 + (f^4 \cdot u^2(a_4))^2}$$

Бюджет неопределенности передачи единицы МИ постоянного поля в область «средних» полей представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Бюджет неопределённостей передачи единицы МИ в диапазоне 1-25 мТл

Параметр	Тип оценки	Распределение	Коэффициенты		Стандартная, неопределенность, мТл	
			Значение $f_{\text{изм}}$, кГц		Значение МИ, мТл	
			3,5	90000	1	25
Коэфф. a_1	Тип А	Равном.	$3,5 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
	Тип В	Нормал.	$3,5 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Коэфф. a_2	Тип А	Равном.	$1,2 \cdot 10^7$	$8,1 \cdot 10^9$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
	Тип В	Нормал.	$1,2 \cdot 10^7$	$8,1 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$
Коэфф. a_3	Тип А	Равном.	$4,3 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$
	Тип В	Нормал.	$4,3 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$
Коэфф. a_4	Тип А	Равном.	$1,5 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{19}$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
	Тип В	Нормал.	$1,5 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$
Относительная стандартная неопределенность					$4,2 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$

Суммарная неопределённость передачи размера единицы Тл в диапазоне 1 – 25 мТл составляет от $4,2 \cdot 10^{-7}$ до $2,1 \cdot 10^{-6}$.

В **Четвертой главе** описываются работы по разработке эталонного подкомплекса для расширения функций первичного эталона при передаче единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов.

Структурная схема подкомплекса приведена на рисунке 3.

Основным элементом подкомплекса, определяющим его метрологические и функциональные характеристики, является специализированный веберметр - двухканальный USB-флюксметр.

Исследования показали, что ожидаемая погрешность измерений магнитного потока каждым из каналов USB-флюксметра находится в пределах от 2 % до 0,2 %, в диапазоне измерений магнитного потока от 1 мкВб до 500 мВб. Дрейф показаний при замкнутом входе с вероятностью 90% не превосходит 100 нВб/с.

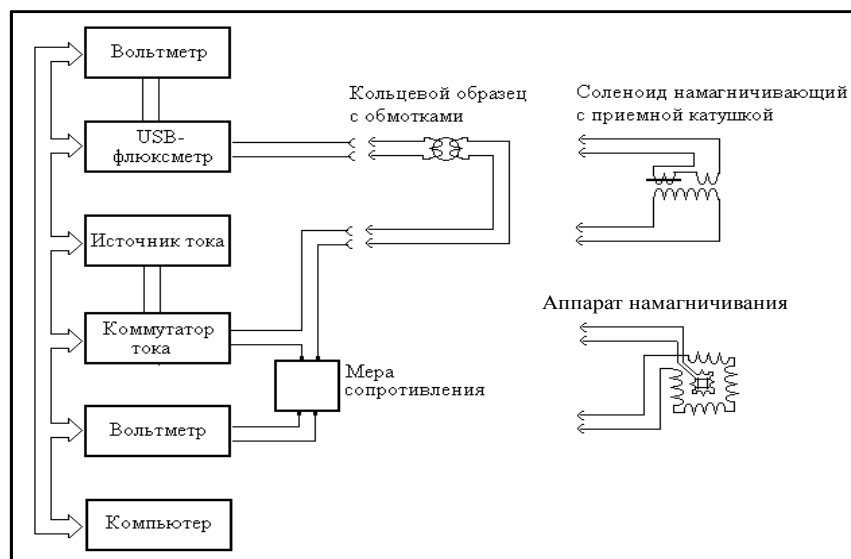


Рисунок 3 – Структурная схема эталонного подкомплекса для передачи единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов

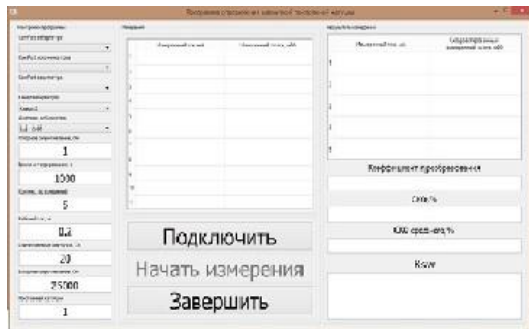
Специфические требования разработаны также для специализированного источника тока намагничивания (ИТН). Он управляется от компьютера и предназначен для работы в комплексе с USB-флюксометром и различными намагничивающими и приемными устройствами. ИТН является биполярным. Диапазоны устанавливаемых величин источника тока: $\pm (0,1\text{mA}-15\text{A})$. Диапазоны устанавливаемых напряжений: $\pm (0-60)\text{V}$. Дискретность установки значения тока внутри каждого поддиапазона не более 0,05 %.

Изготовлены три типа намагничивающих устройств и два комплекта макетов приемных индукционных измерительных преобразователей.

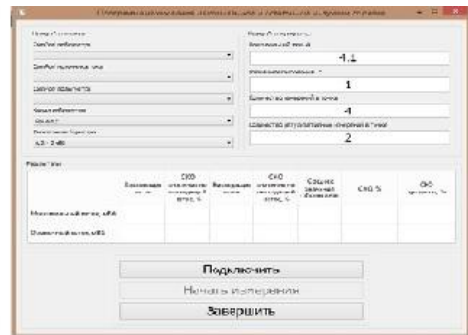
Программный блок подкомплекса состоит из набора программ, разработанных для передачи размера единицы магнитного потока Вб от ГЭТ 12-2011 магнитным материалам и мерам магнитной индукции, который включает в себя программу измерений констант преобразования мер магнитной индукции, мер взаимной индуктивности и измерительных катушек, программу оценочного определения параметров петли гистерезиса, программы определения максимальной и остаточной индукции, коэрцитивной силы и максимальной проницаемости образцов (интерфейсы программы представлены на рисунке 4).

Кроме того, в главе описываются исследования неопределенности измерений подкомплекса при передаче единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов.

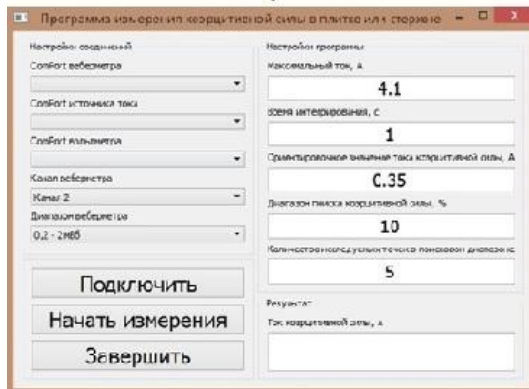
Исследования неопределенности измерений максимальной и остаточной индукции были проведены на тороидальном образце №2 из состава набора государственных стандартных образцов МС-5. Всего было сделано 10 измерений при максимальном токе намагничивания 2,1А (согласно документации к МС-5). Был составлен бюджет неопределенности измерений (таблица 5).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – интерфейсы программ эталонного подкомплекса магнитного потока: а) программа определения констант мер; б) максимальной и остаточной индукции образца; в) коэрцитивной силы образца; г) максимальной магнитной проницаемости образца

Таблица 5 – Бюджет неопределенности измерений индукции насыщения и остаточной индукции

Индукция насыщения				
Параметр	Тип оценки	Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствит.	Вклад
Магнитный поток Φ	B	0,1%	1	0,1%
Площадь сечения S	B	0,5%	1	0,5%
Статистика (СКО)	A	0,1%	1	0,1%
Суммарная стандартная неопределенность u_{OC}				0,52%
Остаточная индукция				
Параметр	Тип оценки	Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствит.	Вклад

Продолжение таблицы 5

Магнитный поток	В	0,1%	$\sqrt{2}$	0,14%
Площадь сечения	В	0,5%	1	0,5%
Статистика (СКО)	А	0,1%	1	0,1%
Суммарная стандартная неопределенность u_{oc}				0,53%

Исследования неопределенности определения коэрцитивной силы также проводились на образце №2 ГСО МС-5 (выборка из 7 измерений). В ходе измерений были вычислены токи коэрцитивной силы на восходящей и нисходящей ветвях петли гистерезиса по формуле:

$$I_c = I_1 - (I_2 - I_1) \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_2 - \Phi_1},$$

где $I_1 = (1 - n) \cdot I_{ca}$; $I_2 = (1 + n) \cdot I_{ca}$; $\Phi_1 = F(I_1) - F(-I_m)$, $\Phi_2 = F(I_2) - F(-I_m)$

I_{ca} – ориентировочное значение тока коэрцитивной силы;

n – настраиваемый в программе коэффициент.

Далее вычислялись среднее значение и стандартная неопределенность типа А тока коэрцитивной силы СО в абсолютной и относительной форме:

$$I_{cAv} = \frac{\sum I_{ci}}{n} \quad u_A(I_{cAv}) = \sqrt{\frac{\sum (I_{cAv} - I_{ci})^2}{n(n-1)}} \quad u_{0A}(I_{cAv}) = \frac{u_A(I_{cAv})}{I_{cAv}} \cdot 100\%$$

Учитывая, что в области измерения коэрцитивной силы коэффициент наклона $\frac{I_2 - I_1}{\Phi_2 - \Phi_1}$ является постоянной величиной, расчет коэрцитивной силы материала СО выполняется по формуле:

$$H_c = \frac{I_c \cdot w_1}{L_0} = \left(I_1 - \frac{I_2 - I_1}{\Phi_2 - \Phi_1} \cdot \Phi_1 \right) \cdot \frac{w_1}{L_0} = (I_1 - k \cdot \Phi_1) \cdot \frac{w_1}{L_0}$$

где L_0 – длина средней линии тороидального образца; w_1 – число витков намагничивающей обмотки; k – коэффициент наклона кривой вблизи тока коэрцитивной силы.

Бюджет неопределенности измерения коэрцитивной силы представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Бюджет неопределенности измерения коэрцитивной силы

Параметр	Тип оценки	Относительная стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад
Магнитный поток Φ_1	В	0,3%	$\frac{(I_1 - I_2) \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2}{(I_1 \Phi_2 - I_2 \Phi_1) \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)}$	0,1%
Магнитный поток Φ_2	В	0,3%	$\frac{(I_2 - I_1) \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2}{(I_1 \Phi_2 - I_2 \Phi_1) \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)}$	0,1%

Продолжение таблицы 6

Ток I_1	В	0,01%	$\frac{\Phi_2 \cdot I_1}{(I_1 \Phi_2 - I_2 \Phi_1)}$	0,01
Ток I_2	В	0,01%	1	0,01
Длина средней линии L_0	В	0,2%	1	0,2%
Статистика (СКО)	А	0,5%	1	0,5%
Суммарная стандартная неопределенность u_{oC}				0,6%

Исследование неопределенности определения максимальной магнитной проницаемости также проводилось на №2 ГСО МС-5 (7 измерений).

Перед каждым измерением магнитной проницаемости производится размагничивание образца в соответствии с требованиями ГОСТ 8.377-80.

При измерении магнитного потока в точках основной кривой намагничивания выбирается 10 возрастающих значений силы тока на основной кривой:

$$i_1 < i_2 < \dots < i_{10}, \text{ где } i_1 > 0,01 \cdot I_m \text{ и } i_{10} < 0,1 \cdot I_m$$

Для каждой из точек основной кривой намагничивания вычисляется магнитный поток Φ_{bsx} и отношение M_{bsx} магнитного потока к току по формулам:

$$\Phi_{bsx}(i) = \frac{F(+i) - F(-i)}{2}$$

$$M_{bsx}(i) = \frac{\Phi_{bsx}(i)}{i}$$

где $i = i_1, i_2, \dots, i_{10}$.

Описанные выше операции для каждой точки были выполнены 7 раз. Затем вычислялись средние значения и стандартная неопределенность типа А магнитного потока и отношения потока к току:

$$\Phi_{bs}(i) = \frac{\sum \Phi_{bsx}(i)}{n}$$

$$u_A(\Phi_{bs}(i)) = \sqrt{\frac{(\Phi_{bs}(i) - \Phi_{bsx}(i))^2}{n(n-1)}}$$

$$M_{bs}(i) = \frac{\sum M_{bsx}(i)}{n}$$

$$u_A(M_{bs}(i)) = \sqrt{\frac{(M_{bs}(i) - M_{bsx}(i))^2}{n(n-1)}}$$

где $i = i_1, i_2, \dots$

Относительная неопределенность типа А (в процентах) магнитного потока и отношения потока к току вычисляются для каждой точки основной кривой отдельно по формулам:

$$u_{oA}(\Phi_{bs}(i)) = \frac{u_{oA}(\Phi_{bs}(i))}{\Phi_{bs}(i)} \cdot 100\%$$

$$u_{oA}(M_{bs}(i)) = \frac{u_{oA}(M_{bs}(i))}{M_{bs}(i)} \cdot 100\%$$

где $i = i_1, i_2, \dots$

Магнитная проницаемость в i -ой точке основной кривой рассчитывается по формуле:

$$\mu(i) = \frac{M_{bs}(i) \cdot L_0 \cdot w_2}{S_0 \cdot w_1} = \frac{\sum M_{bsx}(i)}{n} \cdot \frac{L_0 \cdot w_2}{S_0 \cdot w_1} = \sum \frac{\Phi_{bsx}(i)}{i} \cdot \frac{L_0 \cdot w_2}{n \cdot S_0 \cdot w_1}$$

где $i = i_1, i_2, \dots$

Максимальная магнитная проницаемость определяется как:

$$\mu_{max} = \max[\mu(i)], \text{ где } i = i_1, i_2, \dots,$$

Бюджет неопределенности измерения максимальной проницаемости образца представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Бюджет неопределенности измерения максимальной проницаемости

Параметр	Тип оценки	Стандартная неопределенность	Коэффициент влияния	Вклад
Магнитный поток Φ	В	0,10%	1	0,10%
Опорное сопротивление $R_{оп}$	В	0,01%	1	0,01%
Напряжение U	В	0,01%	1	0,01%
Площадь поперечного сечения S_0	В	0,50%	1	0,50%
Длина средней линии L_0	В	0,50%	1	0,50%
Статистика (СКО)	А	0,10%	1	0,10%
Суммарная стандартная неопределенность u_{oC}				0,72%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современных потребностей промышленности, оборонной области и научных исследований показал, что актуальными задачами метрологического обеспечения магнитных измерений являются: расширение диапазона измерения и воспроизведения единицы магнитной индукции ГЭТ12-2011 на два порядка вниз от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Тл и в 25 раз вверх - от $1 \cdot 10^{-3}$ до $25 \cdot 10^{-3}$ Тл. Кроме того, актуально расширение функционала ГЭТ 12-2011 в область передачи параметров магнитных материалов.

На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Проведен анализ способов и методов решений аналогичных задач в ведущих мировых метрологических институтах (PTB, NPL, KRISS, NIM и др).

2. Разработаны структура комплекса и методика (СК 03-2205-МК-09-Т) для передачи единицы Тл в область «гипогеомагнитного» диапазона, позволяющие произвести передачу размера единицы с суммарной стандартной неопределённостью до 0,125 нТл. Определены и исследованы основные факторы, формирующие погрешность передачи единицы, Получен патент «Способ воспроизведения магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне», Патент на изобретение № 2650769 от 26 июня 2018 г.

3. Разработано программное обеспечение «Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ 12-2011» (сертификат соответствия № ПО ИМ-01-2019), предназначенная для воспроизведения полей гипогеомагнитного диапазона в эталонной трехкомпонентной мере ГЭТ 12-2011.

4. Разработана методика передачи единицы Тл в диапазон (1 – 25) мТл (СК 03-2205-МК-10-Т), позволяющая произвести передачу размера единицы с суммарной относительной неопределённостью от $4,2 \cdot 10^{-7}$ до $2,1 \cdot 10^{-6}$. Определены и исследованы основные факторы, формирующие погрешность передачи единицы.

5. Разработана программа расчета коэффициентов преобразования квантового цезиевого магнитометра, используемого для передачи единицы Тл от ГЭТ12-2011 в область «средних» полей.

6. Разработаны комплекс средств измерений и программного обеспечения для передачи размера единицы магнитного потока в область измерений магнитных параметров материалов, в том числе проведение исследование составляющих неопределенности измерений при передаче единицы

7. Результаты работы внедрены во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», АО «НИИ СТТ», ООО «Геодевайс».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шифрин В.Я., Беляков Д.И., Измерения магнитных величин. Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011, в книге "Российская Метрологическая Энциклопедия. Том 1", С.539-548, Санкт-Петербург, 2015.

2. Шифрин В.Я., Калабин В.Н., Беляков Д.И., «Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции постоянного поля геомагнитного и гипогеомагнитного диапазонов», Измерительная техника. 2016. № 9. С. 46-48., Москва, 2016.

3. Беляков Д.И., Хорев В.Н., Шилов А.Е., Шифрин В.Я. «Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции и магнитного потока», Измерительная техника, № 12, стр. 28 – 31, Москва, 2017.

4. Беляков Д.И., Хорев В.Н., Шилов А.Е., Шифрин В.Я. «Развитие эталонной базы для областей измерений магнитной индукции и магнитного потока», В книге: 175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений. Сборник аннотаций докладов. Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии и м. Д.И.Менделеева. С. 59-61, Санкт-Петербург, 2017.

5. Беляков Д.И., Калабин В.Н., Шифрин В.Я., «Эталонный квантовый транспортируемый компаратор магнитной индукции постоянного поля в диапазоне 1-100мкТл», «Измерительная техника», № 4. С. 40-43., Москва, 2018.

6. Shifrin V.Ya., Belyakov D.I., Kosenkov D.D., Shilov A.E.«Development of a standard base for the “medium” and “strong” constant fields magnetic induction measurement», «Magnetic resonance and its applications. Spinus - 2018. Abstracts book», Saint Petersburg State University, Department of Nuclear Physics Research Methods. 2018. С. 243-244.

7. Шифрин В.Я., Шилов А.Е., Беляков Д.И., Косенков Д.Д., «Применение квантового цезиевого магнитометра для передачи единицы магнитной индукции в область «средних» магнитных полей», Сборник научных трудов V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 2019, с.47-49.

8. Шифрин В.Я., Хорев В.Н., Беляков Д.И. «Разработка методики и программного обеспечения для передачи единицы Вб от ГЭТ12-2011 в область измерений параметров магнитных материалов», Естественные и технические науки. 2019. № 2 (128). с. 174-176.

9. Шифрин В.Я., Беляков Д.И., Хорев В.Н., Шилов А.Е., «Расширение диапазона и функциональных возможностей государственного первичного эталона единиц магнитных величин ГЭТ12-2011», Сборник трудов Международной научно-технической конференции “Метрология-2019», Минск, 2019, с. 239-243.

10. Shifrin V.Ya., Belyakov D.I., Kosenkov D.D., Shilov A.E., «Precise definition of γ ^{133}Cs with resolved structure in magnetic fields higher than 0.8 мТ», Magnetic resonance and its applications. Spinus - 2019. Proceedings», Saint Petersburg State University, Department of Nuclear Physics Research Methods. 2019. ISSN 2542-2049 с. 252-254.

11. Беляков Д.И., Шифрин В.Я., Кривцов Е.П., Шилов А.Е., «Метрологическое обеспечение области измерений постоянных магнитных полей геомагнитного и гипогеомагнитного диапазонов», Сборник трудов научно-технической конференции “ Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии», Москва, 2019, с. 239-243.

12. Шифрин В.Я., Беляков Д.И., Шилов А.Е., Косенков Д.Д., «Расширение диапазона воспроизведения магнитной индукции постоянного поля Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции

ГЭТ 12-2011», «Измерительная техника», № 4. С. 3-7.,
Москва, 2020.