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

- AF

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 $1\cdot10^{-6}$ до $1\cdot10^{-8}$ Тл и верхнего предела от $1\cdot10^{-3}$ до $2,5\cdot10^{-2}$ 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 (1·10⁻⁸ – 1·10⁻⁶ 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 (1·10⁻³ – 2,5·10⁻² 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 РТВ (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 (1·10⁻⁸ – 1·10⁻⁶ 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 программное 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 ·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 эталона В область «гипогеомагнитного» диапазона. первичного 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 1·10⁻⁸ до 1·10⁻⁶ Тл» - СК 03-2205-МК-10-Т и «Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне от 1 до 25мТл» - 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 1.10⁻⁸ до 1.10⁻⁶ 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 2,1·10⁻⁶.

- 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

- Разработанные 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 1.10⁻⁸ до 1.10⁻⁶ 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 неопределенностью не более 2,1·10⁻⁶;

- 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 1.10⁻³ до 25.10⁻³ 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 объем 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 ядерно-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 ДЕТУ 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 (CMI), 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 аппаратурная 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 1·10⁻⁸ -1·10⁻⁶ 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 1·10⁻⁸ - 1·10⁻⁶ 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 ЭТМК.

3. Фиксация и поддержание программным путём тока компенсации I_{ZO} осуществляется посредством мультиметра Agilent 3458A через измерение электрического напряжения, создаваемого током I_{ZO} 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:

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

6. Для непосредственного выполнения калибровочных работ устанавливается рабочее положение направления тока в обмотке $K_{Z_{2}}$ соответствующее полной компенсации МПЗ при токе I_{ZO} и вводятся в действие программные приращения МИ в пределах ± 1000 нТл посредством воспроизведения заданных опорных фазового контроллера частот 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:

 $B_{cur} = B_{realMPZ} - B_{measMPZ} + B_{shortVar} + B_{longVar} + B_{fcomp} - B_{compVar}$ (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.

Параметр X _i	Тип оце нки	Стандартная неопределенность, нТл	Распред. вероятн ости	Коэфф. чувстви- тельности	Вклад, нТл
ЭГМ	Α	0,003	Норм.	$\sqrt{2}$	0,004
	В	0,03	Равном.	$\sqrt{2}$	0,04
Неоднородность МИ в ЭТМК(Ø 10 см)	В	0,03	Равном.	1	0,03
Нестабильность	А	0,05	Норм.	1	0,05
вариаций и статизм)	В	0,1	Равном.	1	0,1
Нестабильность В _Z (нестабильность тока)	A	0,015	Норм.	1	0,015
C	уммар	ная неопределенност	ь, нТл		0,13

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

Суммарная стандартная и расширенная неопределённость при доверительной вероятности Р=0,95 (К=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 1.10⁻³ до 2,5.10⁻² 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 AMP 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 AMP сигнала.

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

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

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

 $f_{(4,3)} - \kappa_1 \cdot b_{11} - \kappa_2 \cdot b_{11} - \kappa_3 \cdot b_{14} \cdot b_{15} - k_{15}$ 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 неопределенности измерений цезиевого магнитометра КЦМ результат измерений определяется как полусумма частот, полученных при двух противоположных направлениях магнитного поля меры при неизменном значении модуля МИ:

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

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

По экспериментальной оценке случайная составляющая погрешности частоты AMP, генерируемой цезиевым магнитометром КЦМ, не превышает 1·10⁻⁷ 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 ЯМРтесламетром 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 мерекомпараторе 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 1·10⁻⁶. 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 ЯМРтесламетром, 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).

11



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

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	Тип А	Нормальное	0,3
МКМИ	Тип В	Равномерное	0,2
Суммарная стандартная	Тип В	Нормальное	0,3
неопределённость	Тип А	Нормальное	0,3

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

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 а ₁ и а ₃	Тип В	Равномерное	0,5
Неоднородность МИ в МКМИ(в диаметре 10мм)	Тип В	Равномерное	2
Hootofuu uootu MIA	Тип А	Нормальное	0,3
пестабильность ми	Тип В	Равномерное	0,2
Суммарная стандартная	Тип А	Нормальное	0,3
неопределенность	Тип В	Равномерное	2,1

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

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

Система может быть решена с помощью метода Крамера. Пусть:

$$\Delta = \sum x_i^2 \cdot \sum x_i^6 - (\sum x_i^4)^2$$

$$\Delta_1 = \sum (y_i \cdot x_i) \cdot \sum x_i^6 - \sum (y_i \cdot x_i^3) \cdot \sum x_i^4$$

$$\Delta_3 = \sum (y_i \cdot x_i^3) \cdot \sum x_i^2 - \sum (y_i \cdot x_i) \cdot \sum x_i^4$$

В таком случае, используя метод Крамера, можно найти коэффициенты *a*₁ и *a*₃:

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

Аналогичным образом, коэффициенты *a*² и *a*⁴ вычисляются из данных сличений ЭГМ и ЯМР-магнитометра в диапазоне средних полей как:

$$a_{2} = \frac{\Delta_{2}}{\Delta_{24}}; a_{4} = \frac{\Delta_{4}}{\Delta_{24}}, \text{ где:}$$

$$\Delta_{24} = \sum x_{i}^{4} \cdot \sum x_{i}^{8} - (\sum x_{i}^{6})^{2}$$

$$\Delta_{2} = \sum y_{i} \cdot x_{i}^{2} \cdot \sum x_{i}^{8} - \sum y_{i} \cdot x_{i}^{4} \cdot \sum x_{i}^{6}$$

$$\Delta_{4} = \sum y_{i} \cdot x_{i}^{4} \cdot \sum x_{i}^{4} - \sum y_{i} \cdot x_{i}^{2} \cdot \sum x_{i}^{6}$$

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

					Стандартная,		
	Tur		Коэфф	ициенты	неопределенность,		
Параметр		Распределение			M	Гл	
	оценки		Значени	е f _{изм} , кГц	Значение	МИ, мТл	
			3,5	90000	1	25	
Коэфф.	Тип А	Равном.	$3,5.10^{3}$	9,0·10 ⁴	2,9.10-7	7,5·10 ⁻⁶	
a_1	Тип В	Нормал.	$3,5.10^{3}$	9,0·10 ⁴	2,9.10-7	7,6.10-6	
Коэфф.	Тип А	Равном.	$1,2.10^{7}$	8,1·10 ⁹	7,6.10-8	5,0·10 ⁻⁵	
a_2	Тип В	Нормал.	$1,2.10^{7}$	8,1·10 ⁹	$3,2 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$	
Коэфф.	Тип А	Равном.	$4,3.10^{10}$	7,3·10 ¹⁴	$2,2 \cdot 10^{-10}$	3,8·10 ⁻⁶	
a ₃	Тип В	Нормал.	$4,3.10^{10}$	7,3·10 ¹⁴	$2,1 \cdot 10^{-10}$	3,6·10 ⁻⁶	
Коэфф.	Тип А	Равном.	1,5.1014	6,6·10 ¹⁹	3,0.10-11	1,3·10 ⁻⁵	
a_4	Тип В	Нормал.	1,5.1014	6,6·10 ¹⁹	$1,1.10^{-13}$	4,6.10-8	
Относительная стандартная неопределенность 4,2.10-7 2,1.10-							

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-флюксметром и различными намагничивающими и приемными устройствами. ИТН является биполярным. Диапазоны устанавливаемых величин источника тока: ± (0.1мA-15A). Диапазоны устанавливаемых напряжений: ± (0-60) В. 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).

		and the second sec								
		(4)	California - 1	These Concerns		. free fr	CONTRACTOR -			
the archeoropecture of	New Second Street, all	House at any	desperant stars do	Dars/lost raniferance-yes		inen eur	und een a			
www.irian								4.1		101
				Server survey as			www.weeksare.re			202
		1		LADIOR ADDRESS TO				1		
				1000000000000000		· farmer		÷		
		1		Survey offerent on				4		
				GLAST		· · ·	A MITCH AND	Overofinati & Tyrand		
Carbon Co.		1		Personal Sectors				2		
				5.2 - 2 - 46						
			New York	THE IS INC.						
15.50		Knippinunski njestopero	9999111	and the second second	C100					
1550					Lauran unessin	Beingman utres	Course Course	00.5	00	
		000.75	0.1		8792.5	517	A		Marganette	× .
5 1			N N	Manager and America 1996						
02 Поли	IN INTE	OW cpcm-era %	N	Diseason di surge, sella						
man Inuquu	ючить		1	The second secon						
20		11 anna								
Начать И	змерения	bavw.		12	п	адальс-ните				
15000	and a house of the									
- 2000				15	Hette	ль излере	H20H			
,	шигь					CIC OFNILLATE.				
						хівершите				
				1		74				
	21					(C)				
						n				
рограмма нак оронил коар роко сосрекной	стивной скизы в Настройон п	плитке или стержне -	- C X	tautra was were able	Provinsional antiseptional of Provinsional of deepse	0)	off all the fill some last	000		
раграмма нак оронип керр роко оканкнаї ют вебежара	цитивной склы в Настройон Настройон р	плитка или стержене – рограны ыйлок, а	- C X Market	1000-0110 (MILLION OF DESIGNATION OF DESIGNATIONO OF D	Material and an and a second sec	0)	ant all the second s	205		
раграмма нак ерения керр роко оканнака ют вебежера	итноной сканы о Настройон Настройон Каксаналы	плитке или стержене – риграны ойток, 4 А 1		taantens seeta aarooaataa - 19 Taantens seeta aarooaataa	Dorychiadd y Diampioned of Principles all diampion diampion	0)	effekti kölkesisko	806		
рограмма Изморої Ил Корр Роко окрывні Готвебеметра	чтивной склы в Настройон максемлы	плитерили сторжно - рограны айток, а 4.1	D D	- 10 - 10 - 20	NYTHIAI (Nervice) A Printing alderes ag	0)	effekti költerisiki	Los		
раграмма нак.ерения керр робо оканный от већежера от већежера от истаника така	нтногой силы о Нестробого максемалын	плитеа или сторие ю — — — — — — — — — — — — — — — — — —	C C	taastee ship umusatka 19 10. 10. 20 20 20	Hormitali character a Hormital al dente dante	0)	intalis systematics	8049		
аагралина Иамаран Ип коор койо секринаний от есбезиетра от истаники таки	стивной сильно Настройов и Максемальн Зоеня интен	плитка иля стораена – рограны ойток, а 4.1 окровния, с	C C	tautore sourcestation 19 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Provincial American S Provincial dense a		alfaði tið hendan	8045		
распралина изм. орон ил. коор ново: оходиноний от вебезнетря от истоники така	чтно юй скиш о Настробот Настробот Каксичальн Каксичальн Каксичальн Каксичальн	плитер илля сторано — рогранны зайток, а 4.1 Окообника, с 1	- 3 Bitter Carter Angene Carter Angene See B	tastration wave	Intrinsia at several art of Historic dense 4	0)	eff alls followeights	8045		
реграмма накорон на корр нако андинаний от евескиера ат истаника така ат кольциера	чиссеналын зсеня интер	плитка или стариена – рограны ий ток, 4 4.1 окровния, с 1	E 2 3	tanteris future servenation 19 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Difficult character of a Protocole dense a 22	0)	1990 <u>805 - 1</u> 940	805		
аспратина изикерон ил кеор ново окаринной от вобелиетря от источния таки от яльнаятря	стур истивной скилы В Настускати максильн страните спраните сраните	плитка или стариена – рогрании ийток, и 4.1 скровники, с 1 скровники, с	-) State Stat	tastere ones arrestator 19 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Difficult American S Provide al dense dense 3	0)	19100 NJ	000		
раграмиа на ерої на керр рако акцинанії алі наманалі алі наманалі алі пальнита рабанала	стурный скилы В Нестройон и жаксивальн с бранитера	плитка или старжена - радания айтак, а 4.1 спровения, с 1 плите вналина паса исприятия с 35	C C	Instanting solution sources and Instanting solution solution of the Instanting solution solution of the Instanting solution (solution of the Instanting solution (solution of the Instanting solution of the Instanting solution (solution of the Instanting solution of the Instanting solution (solution of the Instanting solution (so	DOTIVITAL Character of Principles of the Princip	0)	17.00 Apr	0010		
рагралина нак ерон ил кеор робно секринана пот вобезиетра от илтонека таки алт альнанетра посбезистра	стури прій скилы ві Настурба и максивальн с боеня нитен с Срамитарая	плитко илл сторжено – рограни илтон, к илтон, к 4.1 сиробния, с 1 повол вонично таки класнатия С.35	- 3 Bitter Bitter Contractions Contracti	taskine ones arrowating 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Contract and Contract of Second Secon	0)	-ff x23 5g5cab			
раграмма изл.ерої ил кезр ноко сединанії от еебежера ат истичних така ат истичних така ат истичних така ат истичних	стуритинен той скилы ен Настройка и нассиклын с боеня интен Сримитирая Пактя типо Дажа типо	плитае иля сторие ю	2 3	Basistina Antii kuttivaatii basistina Antii kuttivaatii basistina Antii kuttivaatii basistina Antii kuttivaatii basisti kuttiv	Minimum and American Amer American American Am American American A	0)	eff and Age (same gain	00%		
рагралина нак.ерон ни коор робо окалиний от вебежера от источних тока от источних тока от источних тока от вобежетра побежетра и 2 антят	стидной скины р нестробого нестробого нестробого соны р соны нитен соны нитен соны нитен дингезон го	плитко илл сторжно – рипрани, илтон, к 4.1 саробния, с 1 повол режиние така кладития С.35 нога кордитиеной заки, %	- 3 Transition of the second	taskinte kons autrovation 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Herrican Annual Secondaria (Herrican Annual An	0)	-11 x33 525	uosu		
раграмма изл.ерої ил кезр ноло сединный от ебежеря ат истички таки ат яльниктря посбанстра и 2 алтабарит (ре		плитер иля сторие ю -	D D	Tapatente Junite conferencemente 10 autores antes conferencemente 10 aut	entrinant exercise a reserver a dense a dense dense a dense a de	0)	19 - 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19	2012		
рагралица чак. ерон на коор роко оканчки от вебежера от источних тока от источних тока от источних тока от источних тока от источних тока от источника от вебежетра и 2 аколектра и 2 аколектра и 2 аколектра и 2 аколектра	чтивной склы в Нестуона и массельн связ илтен Срансцоя на днагодон п с	плитер илл сторжено – рограни илтов, к 4.1 соотвенная так истрантия С.35 иста кордитивной зави, % 10	- 3 TryPecial datase, A Promotion datase, A Prom	taskinte kristi samanastini 19 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	enverteen al denne al denne de	0)		000		
рапралика чак орог ил коэр ново сединский от еебехнетра от егосинера от илтическа таки ит кличанетра и бабристра и 2 авалеберистра 2016	итивной сили в Нестройки и насекольн чассекльн с Сринстрои Дингазон п Калинсство	плитер иля сторие ю -		transferred white wertweeter	eerynaad Generalae y Penatie al denu danu danu danu danu danu danu danu da	0)				
раграмма как ерої на керр ноко ехерникиї от вебежера от источний така от источний така от источний така от источний така от вебежетра и 2 волавбанетра 2286	trinsipii Caritu B Herryschar Herryschar Seria unter Seria unter Crunningna Derracion Honivectors	плитась илл с ториж ю рогрании айтик, к 4.1 ликования, с 1 0:000 внание так ктра итик 0:35 иста корти-генева пликае иста корти-генева пликае	A	tanante do non autoroadana berrar do non berrar do n	Hermite States of A	0)		804		
рапралина изикарон ил кеор ноло ехеринан от еебехнетра от источних таки от источних таки от источних таки от источних таки от источних таки и 2 ампебериетра 2465	UTHEDIDĂ CAMU B Hecrychia n Hecrychia n Hecrychia n Hecrychia n Hecrychia n Hecrychia n T Cyunetspon Jueroson n Henricetos	плитер иля сторие ю -		Tablititi difficienti difficienti 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Hindu is a diama Anno Anno Anno Anno Anno Anno Anno Ann	0)		804		
рагралила нак.ерон нл кеор новы сединаний от асточнаки таки от источнаки таки от источнаки таки от источнаки таки от источнаки таки посбалиства Под килючинть	trinsition Control by theorytolian viscourses	плитаа илл сторие ю рогрании айток, к 4.1 Скозония, с 1 Скозония, с 35 мота поскланати скозония 10 мота поскланати 5		Basicity and the second	An Anna Anna Anna Anna Anna Anna Anna A	0)		804		
рапролика чак орог ил коор ново сединский от вебежетра от вебежетра от истическа таки от кользинтра повберистра и 2 актовберистра 2.2465 ПОДКЛЮЧИТЬ	UTHEDIDIÖÄ OVINU DI Hecrycolar n Hecrycolar o V Ocera same Ocera same Ocera same Ocera same Ocera son Nonecerso Nonecerso Proportion	плитер иля сторие о ратраны интор, 4 4,1 перевния, с 1 почает внанные таки ктери ития С.35 вска кордитерей оны, 5 10 Б		Transfer to show we want to be a single state of the show we want to be a sing	Hindu is a second of a second	0)		804		
раграмись чак.ерог ил кеор робы соединский от вебежнера от истическа така от истическа така от истическа така от истическа така от истическа така от истическа от истическа о	Upring in Grand Lange Annual Annua Annual Annual Annu	плитаа илл сторие ю вопрании ай ток, к 4.1 Серевния, с 1 понол внижние так кладити С.355 иста нордина 10 нолосоруживата кака подати 5	Constrained and a second a	bipatrite and the wave wave bipatrite and the wave wave bipatrite and the wave wave and bipatrite and the wave wave wave and bipatrite and the wave and the wave and bipatrite and the wave and the wave and the wave and bipatrite and the wave and the wav	Herein Hereinen der Freiherten der Freiherten Hereinen Here Hereinen Hereinen He Hereinen Hereinen H Hereinen Hereinen H	0)				
реграмма как ерения корр нако окадински от ележнера от источники така от источники така от источники така и 2 аконестра Подключить Начать измерени	Cymeratiol Cyfland D Hecrysolian r Hecrysolian r Hecrysolian r Hecrysolian r Councilland Councilland Councilland Hecrysolian r Councilland Hecrysolian r Councilland Hecrysolian r Councilland Hecrysolian r Hecrysolian r	плитер илл сториено	Constanting of the second	transfer to show we want to show the sh	Handrich al denne Alexen Alexe	0)		2002 21		
раграмиа чак ерог ил кеор рабо седински от есбежера от истичека така от и	UTHEDIDIÖÄCHTULE Haceyoolaa e Haceyoolaa e Haceyoolaa e Haceyoolaa e Gounetuppa Guunetuppa Gu	плитаа иля сторие ю вирования айток, к 4.1 Окровника, с 1 покол внаника така кладития С.355 исса кординаной заки, % 10 иссла усликита конса планазака 5 исса кординаной заки, %	D D	Testanti uniti uni	And Annual A Annual Annual Annua	0)		10011 10011		
рабранна как орон ил коор робо окранна К Бот вебежера Бот истички така Бот истички така Бот истички така Бот истички така Бот истички така из 2 Подключить Начать измерени Заверонить	Cyserson Convector	плитар илл сториено	S	the sector of th	Handrick al drama Alaren Baren	0)	14	1004 1004	Ever tour	
рапролика чак орог ил коор трабо секринан Fort вобожера Fort истическа така Fort исти	Cymeratiai Gwruu B Hecrysolai r Hecrysolai r Scena untei Cymeragon Cymeragon Diaroson r Horenograe Romograe Preywrae R	плитаа илл сторие ю вопраны, « 4.1 20006ния, с 1 полот выяние тыск кладития С.35 исса кордитияной экей, % 10 полосучениятсяса пленовое 5 некой алеж, к	A	Testarts are una series and a s		0)		1004 1	Ener teer	
раграмись чак. ерог ил коор робы охадинский от себезингра от интическа така от интическа така от интическа така от интическа така от интическа от интическа и 2 акторити и 2 Подключить Начать измерени Завершить	Cyperiodia Control Bill Control	плитась иля с сторие ю рогрании айток, к 4.1 совремния, с 1 почаль выската стористика с.35 виска корсиляется с ланиство 10 ногоступниката с стористика 5 накод сток, к	S	the second process of the second proces of t		0)	14	1004 1		
рапролика чак орог ил коор пробе секринация For teofoxиmpo For teofoxиmpo For teofoxиmpo For teofoximpo For te	Cymeratiol Certur B Hecrysolian r Hecrysolian r Scena Mittel Cymeratynn Cymeratynn Ganeratynn Romecerso Pesymerat Tox raspunt	плитар иля сторие ю рограны, айток, к 4,1 сиробника, с 1 покол венание так истористия С.35 истористиристористири постористористири 5 некото доти, к		Testanti and second an	Hanning Control of Con	0)		10040 10040		

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 – І	Бюджет	неопределенности	измерений	индукции	насыщения	И
остаточной ин	дукции					

Индукция насыщения						
Параметр	Тип оценки	Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствит.	Вклад		
Магнитный поток Ф	В	0,1%	1	0,1%		
Площадь сечения S	В	0,5%	1	0,5%		
Статистика (СКО)	А	0,1%	1	0,1%		
Суммарная стандартная неопределенность <i>и</i> _{оС}						
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 <i>и</i> _{оС}					

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:

$$I_{c} = I_{1} - (I_{2} - I_{1}) \cdot \frac{\Phi_{1}}{\Phi_{2} - \Phi_{1}},$$

$$I_{2} = (1 + n) \cdot I_{22}; \quad \Phi = F(I_{2}) - F(-I_{2}), \quad \Phi = F(I_{2})$$

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.

Параметр	Тип оценки	Относительная стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад
Магнитный поток Ф ₁	В	0,3%	$\frac{(l_1 - l_2) \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2}{(l_1 \Phi_2 - l_2 \Phi_1) \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)}$	0,1%
Магнитный поток Ф 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%

Таблица 6 – Бюджет неопределенности измерения коэрцитивной силы

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 <i>и</i> _{оС}					

Исследование неопределенности определения максимальной магнитной проницаемости также проводились 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:

 $i_1 < i_2 < \ldots < i_{10}$, где $i_1 > 0,01 \cdot I_m$ 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:

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

где $i = i_1, i_2, ..., i_{10}$.

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 $i = i_1, i_2, ...$

Относительная неопределенность типа A (в процентах) магнитного потока и отношения потока к току вычисляют 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 $i = i_1, i_2, ...$

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 $i = i_1, i_2, ...$

Максимальная магнитная проницаемость определяется как:

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

Бюджет неопределенности измерения максимальной проницаемости образца представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Бюджет неопределенности измерения максимальной проницаемости

Параметр	Тип оценк и	Стандартная неопределен- ность	Коэффицие нт влияния	Вклад			
Магнитный поток Ф	В	0,10%	1	0,10%			
Опорное сопротивление Коп	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)	Α	0,10%	1	0,10%			
Суммарная стандартная неопределенность и _{оС}							

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 $1\cdot10^{-6}$ до $1\cdot10^{-8}$ Тл и в 25 раз вверх - от $1\cdot10^{-3}$ до $25\cdot10^{-3}$ 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 4,2·10⁻⁷ до 2,1·10⁻⁶. 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. C. 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 ¹³³Cs with resolved structure in magnetic fields higher than 0.8 mT», Magnetic resonance and its applications. Spinus - 2019. Proceedings», Saint «Petersburg State University, Department of Nuclear Physics Research Methods. 2019. ISSN 2542-2049 c. 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.