

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 ГЭТ 12-2011 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

(электрические и магнитные величины)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
В.Я. Шифрин

Санкт-Петербург

2020

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Обзор современного состояния области измерений магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока	12
1.1 Востребованность измерений магнитной индукции, магнитного потока и магнитных параметров материалов.....	12
1.2 Состояние метрологического обеспечения области измерений магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока	13
1.3 Парк рабочих средств измерений магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока.....	14
1.4 Методы и средства измерений магнитной индукции для геомагнитного и «гипогеомагнитного» диапазонов	15
1.5 Средства измерений магнитной индукции для области «средних» и «сильных» магнитных полей	19
1.6 Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011	21
1.7 Состояние метрологического обеспечения измерений магнитной индукции постоянного поля в области «средних», «сильных» и «гипогеомагнитных» полей.....	25
1.8 Обзор зарубежных эталонов для области измерений магнитной индукции постоянного поля	30
1.9 Состояние метрологического обеспечения измерений магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах.....	39
1.10 Актуальные задачи развития метрологического обеспечения магнитных измерений.....	41
Выводы к главе 1	42

Глава 2. Разработка эталонного подкомплекса для расширения диапазона измерений при передаче единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля в область «гипогеомагнитных» полей.....	44
2.1 Состав и структура подкомплекса.....	44
2.2 Методика передачи единицы магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне.....	47
2.3 Программное обеспечение для передачи единицы магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне.	49
2.4 Исследования неопределенности измерений при передаче единицы магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне	51
Выводы к главе 2.....	54
Глава 3. Разработка эталонного подкомплекса для расширения диапазона передачи единицы магнитной индукции в область «средних» постоянных полей.....	55
3.1 Квантовый магнитометр на разрешенной структуре атомов цезия.....	55
3.2 Состав и структура комплекса для передачи единицы магнитной индукции Тл в область «средних» полей	59
3.3 Экспериментальные исследования по определению коэффициентов преобразования экспериментального образца эталонного цезиевого магнитометра КЦМ.....	62
3.4 Исследование неопределённости измерений при передаче единицы магнитной индукции в область «средних» постоянных полей	68
Выводы к главе 3.....	77
Глава 4. Разработка эталонного подкомплекса для расширения функций первичного эталона при передаче единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов	78
4.1 Состав и структура подкомплекса.....	78
4.2 Программное обеспечение комплекса	84

4.2.1 Программа измерений констант преобразования мер магнитной индукции, мер взаимной индуктивности и измерительных катушек.....	85
4.2.2 Программа оценочного определения параметров петли гистерезиса образца.....	87
4.2.3 Основная программа определения максимальной и остаточной индукции исследуемых образцов магнитомягких материалов	88
4.2.4 Программа определения коэрцитивной силы на образцах тороидальной и прямолинейной формы	90
4.2.5 Программа определения параметров основной кривой намагничивания исследуемых образцов магнитомягких материалов	93
4.3 Исследование неопределенности измерений подкомплекса при передаче единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов	95
4.3.1 Исследование USB-флюксметра	95
4.3.2 Исследование неопределенности определения констант мер взаимной индуктивности	98
4.3.3 Исследование неопределенности измерений максимальной и остаточной индукции	99
4.3.4 Исследование неопределенности определения коэрцитивной силы ...	103
4.3.5 Исследование неопределенности определения максимальной магнитной проницаемости.....	105
Выводы к главе 4	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
Список использованных источников.....	111
Приложение А. Акты внедрения.....	115
Приложение Б. Патент на изобретение.....	119
Приложение В. Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в «гипогеомагнитном» диапазоне.....	120

Приложение Г. Методика калибровки квантового магнитометров в диапазоне 1-25 мТл.....	128
Приложение Д. Сертификат соответствия «Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ12-2011.....	139

Введение

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 отрасли и научных исследований в части метрологического обеспечения измерений магнитной индукции (МИ) постоянного поля приводит к необходимости расширения диапазона воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции от Государственного первичного эталона 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).

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 (от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ 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 воспроизведения 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 программное обеспечение 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 не превышает 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 единицы 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 и результаты, выносимые на защиту:

- Разработанный состав и структура измерительного комплекса для передачи единицы Тл в «гипогеомагнитный» диапазон постоянного поля, 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» постоянных 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 передачу единицы магнитного потока в область измерений магнитных параметров магнитомягких материалов.

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:

- Международная научно-практическая конференция «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений», г.Санкт-Петербург, 2017.

- 15-я Международная школа-конференция «Magnetic resonance and its applications – Spinus 2018», г.Санкт-Петербург, 2018.

- V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, г.Москва, 2019.

- Международная научно-техническая конференция «Метрология — 2019», г.Минск, 2019.

- 16-я Международная школа-конференция «Magnetic resonance and its applications – Spinus 2019», г. Санкт-Петербург, 2019.

- 2-я научно-техническая конференция “Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии», г. Москва, 2019.

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

Глава 1. Обзор современного состояния области измерений магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока

1.1 Востребованность измерений магнитной индукции, магнитного потока и магнитных параметров материалов

Измерение физических величин, характеризующих магнитное поле естественных и технических объектов, имеет применение во многих важных для человеческой деятельности областях.

К таким областям относятся:

- фундаментальная наука, например, при поиске постоянного электрического дипольного момента нейтрона и др.;
- планетарная геофизика, для изучения физической природы земного магнетизма, предсказание землетрясений;
- аэрномия, для изучения солнечно-земных связей, их влияния распространение радиоволн;
- изучение магнитных полей в ближнем и дальнем космосе;
- археология и палеонтология;
- разведочная геофизика при поиске полезных ископаемых и оценке сырьевых ресурсов;
- поиск скрытых технических объектов с целью трассирования трубопроводов и объектов военной техники, в охранных целях и т.д.;
- перспективные вооружения, военная и специальная техника;
- решение проблем бесконтактного определения качества и технических параметров изделий промышленности;
- оптимизации процессов генерации и распределение электроэнергии;
- решения проблем электромагнитной совместимости;
- осуществление морской и аэрокосмической навигации;
- решение экологических вопросов, связанных с влиянием на человека магнитных полей энергоемких технических объектов и полей «гипогеомагнитного» диапазона;

- исследование магнитных полей человека и воздействия на него магнитных полей в целях медицинской диагностики.

1.2 Состояние метрологического обеспечения области измерений магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока

Метрологическое обеспечение магнитных измерений в РФ опирается на разработанные во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011 [1], а также на ГОСТ 8.030-2013 - Государственные поверочные схемы для средств измерений этих величин [2].

Дополняют измерительные возможности ГЭТ12-2011 два государственных эталона ВНИИФТРИ: в диапазоне измерений магнитной индукции сильных постоянных магнитных полей от 1 до 10 Тл Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции ГЭТ 82-85 [3] и в области измерений параметров переменного магнитного поля ГПЭ единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот от 0,01 до 30 мГц – ГЭТ 44–2010 [4]. В области измерений параметров магнитных материалов в 2017 г. утверждён и действует Государственный первичный эталон ГЭТ 198-2017 – единицы мощности магнитных потерь, разработанный УНИИМ [5].

В области измерений магнитной индукции (МИ) постоянного поля Государственный первичный эталон ГЭТ 12-2011 обеспечивает воспроизведение и передачу единицы МИ в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Тл с суммарной стандартной относительной неопределённостью $3 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-7}$, соответственно.

1.3 Парк рабочих средств измерений магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока

В стране серийно выпущены, импортированы из-за рубежа и применяются более 100 тысяч средств измерений параметров магнитного поля и магнитных материалов. Более 100 типов используемых приборов зарегистрировано в Государственном реестре средств измерений.

К ним относятся магнитометры, тесламетры, веберметры, измерители магнитной индукции (МИ) и напряженности магнитного поля, меры магнитных величин, приборы для измерений магнитного потока (МП), параметров магнитных материалов и многие другие средства измерений магнитных величин.

Информация о серийно выпускаемых средствах измерений магнитных величин, наиболее распространенных в практике магнитных измерений, приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные типы применяемых на территории РФ средств измерений магнитных величин

№	РСИ, ОСИ	Типы	Диапазоны	Неопределенности, %
1	Магнитометры квантовые геомагнитного диапазона	Минимаг-М, ММПГ-1, ПКМ-1М, MagniProX4, ММРОС-1, ММРОС-2, ЛОМ-2, Cs-2, Cs-3, G859, ММП203М, ММПГ, Мини-маг и др.	20-100 мкТл	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$
2	Тесламетры ядерного магнитного резонанса	Ш1-1, Ш1-9, РТ2025, Сибирь-1	0,02 - 2 Тл	$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$
3	Феррозондовые магнитометры	НВ0599, НВ0204, МГРФ,	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-4}$ Тл	1 – 0,05
4	Магнитометры на эффекте Холла	ТПУ, ТПУ-2В, GM-2, МТМ-02, НВ1200, НВ0305,	$1 \cdot 10^{-4} - 2$ Тл	5 – 0,1
5	Магнитометры на анизотропных магниторезистивных датчиках	МТМ-01, ИПМИ, Техно-маг,	$1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$ Тл	10 – 0,5

Продолжение таблицы 1.1

6	Веберметры, меры магнитного потока	БИМП, МК-7Э, ТПУ-2В, В2, ЕФ 14, ЕФ5, Ф190, Ф191, Ф192, М1119, Р5009, У5056	1мкВб-1Вб 100мкГн- 10мГн	0,1-5% 0,1-1
7	Измерители параметров магнитных материалов в статике	МК-3Э, ММКС-15Э/1...	Нс 1-300А/м μ 0,001- 10мГн/м	2 5
8	Измерители параметров магнитных материалов в динамике	МК-4Э, УИ5099, EVA-6, РС SST 005, УМ-ИМПИ, В-Н анализатор MS-03, MPG 100 D, MPG 200 D, С 510, УКМП 0,05-100, ММКС-05 ...	0,0001-0,01Тл 0,01-1,2Тл 1,2-2Тл Удельные потери	5 3 1,5 2,5
9	Магнитометры дифференциальные, микротесламетры-градиентометры	МФ-24ФМ, МФ-24ФМ АКАSCAN, МФ-34ФМ АКАSCAN	±2000мкТл на базе 20мм	5
10	Коэрцитиметры	КСП-01, К-61, КИФМ-1Х, КМ-445, КОЕРЗИМАТ 1.097 НсJ, КАСКАД-01, КИПФ-1, КИМ-2...	200-6000А/м	5
11	Ферритометры	МФ-51НЦ АКАSCAN, МФ-510 АКАSCAN, МК-1.2Ф, МФ-510 ...	0,5-20%	5
12	Измерители магнитной восприимчивости и проницаемости	ИМВ, ZHstruments SM-30, SatisGeo KM-7, ZHstruments SM-150, ПИМВ, КТ-10	$10^{-8} - 2 \cdot 10^{-2}$	5
13	Меры магнитной индукции	МО76, М103, М113, М303, У738, У739, У4356, ЭМ4-2...	0-30000А/м	0,3-3
14	Меры градиента магнитной индукции	М101, М301	1-200кА/м ²	3

1.4 Методы и средства измерений магнитной индукции для геомагнитного и «гипогеомагнитного» диапазонов

На рисунке 1.1 представлены магнитометры применяемые для измерений постоянной магнитной индукции в «гипогеомагнитном» и геомагнитном диапазонах.

Приборы индукционного типа основаны на измерении переменной Э.д.с., индуцируемой в катушке при изменении сцепляющегося с ней магнитного потока. Такие приборы применяются для измерений магнитной индукции и напряженности постоянных и переменных магнитных полей. В постоянных полях потокосцепление с катушкой изменяется под влиянием вращения её в исследуемом поле, в переменном поле - катушка неподвижна, и Э.д.с. в ней индуцируется в следствии изменения самого магнитного потока.

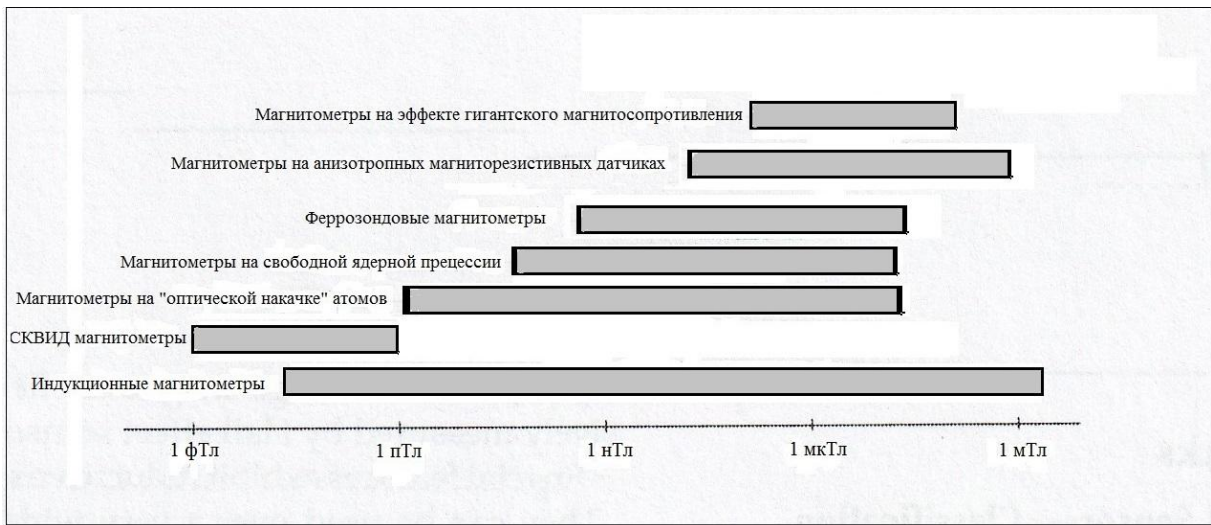


Рисунок 1.1 – Основные типы магнитометров работающих в «гипогеомагнитном» и геомагнитном диапазонах

Принцип действия индукционного магнитометра определяется законом Фарадея:

$$\varepsilon = -n \times S \times \frac{dB}{dt} = -n \times S \times \mu_0 \times \frac{dH}{dt},$$

где n – количество витков катушки; S – площадь поперечного сечения катушки; B – индукция магнитного поля; H – напряженность магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная.

Датчики, основанные на эффекте измерения сопротивления тонких пленок под действием внешнего магнитного поля [6], используются в магнитометрии сравнительно недавно. Тем не менее, парк приборов основанных на

анизотропных магниторезистивных сенсорах расширяется с каждым днем. Это связано со сравнительной дешевизной подобных датчиков и удобством их применения.

Основная проблема при использовании отдельно тонких магниторезистивных пленок в магнитометрии заключается в том, что зависимость отношения изменения сопротивления пленки к её начальному сопротивлению не является линейной функцией от внешнего магнитного поля. Для того, чтобы получить линейную зависимость датчика от поля, необходимо совместить линейный диапазон магниторезистивной пленки с необходимым диапазоном измерения. Эта проблема решается путем добавления в систему регулирующих слоев из магнитомягких материалов. Путем вариации комбинации слоев и материалов можно достигать улучшения метрологических свойств датчика.

Датчики магнитной индукции на основе гигантского магнитосопротивления [7] стали серийно производиться сравнительно недавно и поэтому еще не нашли широкого применения в магнитометрической сфере Российской Федерации. Однако, учитывая, что датчики данного типа, сохраняя все преимущества классических магниторезистивных датчиков, значительно выигрывают у них по своим характеристикам, логично предположить, что в будущем датчики на основе гигантского магнитосопротивления будут широко использоваться в гражданской и военной отраслях РФ.

Феррозондовые приборы являются наиболее распространённой разновидностью индукционных методов измерений магнитной индукции, в которых индуктированная в измерительных обмотках э.д.с. связывается с магнитными характеристиками сердечника из магнитомягкого материала [8]. Сердечник намагничивается одновременно измеряемым постоянным и переменным полями, создаваемыми обмоткой.

Известно, что при одновременном действии на материал постоянного и переменного магнитных полей, его магнитное состояние изменяется по несим-

метричной магнитной петле. В переменной составляющей магнитной индукции появляются четные гармонические составляющие, отсутствующие при намагничивании материала только переменным полем. Ввиду того, что в области сравнительно слабых магнитных полей постоянное поле пропорционально амплитуде второй гармоники индуктированной э.д.с., то по величине этой второй гармоники можно определять величину измеряемой магнитной индукции.

Широкое распространение получили прецизионные квантовые приборы, основанные на свободной ядерной прецессии [9]. В качестве рабочего вещества, чаще всего, применяется образец с дистиллированной водой, помещённый в индукционную катушку.

Суть метода заключается в измерении частоты сигнала переменного напряжения от прецессии ядер поляризованного рабочего вещества датчика, возникающего в индукционной катушке окружающей образец, вследствие магнитного резонанса, под действием слабого постоянного измеряемого поля. Предварительная поляризация рабочего вещества осуществляется его кратковременным облучением сильным, ортогонально ориентированным, постоянным магнитным полем, или совместно с усиливающим резонансный эффект, электромагнитным переменным полем радиочастотного диапазона (эффект Оверхаузера). Магнитный резонанс возникает вследствие избирательного поглощения рабочим веществом электромагнитных волн определенной длины и обусловлен взаимодействием с магнитным полем микрочастиц рабочего вещества.

Измеренная магнитная индукция B_u вычисляется через частоту магнитного резонанса f и гиромагнитное отношение ядер γ по формуле:

$$B_u = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\gamma}.$$

Для образца в виде дистиллированной воды, коэффициент преобразования магнитной индукции в частоту γ'_p – гиромагнитное отношение протона в

молекулах воды, является фундаментальной физической константой [28], равной $\gamma'_p = 2,675153171(33) \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}$.

В задачах геологоразведки и в специальной тематике всё шире используются приборы, основанные на оптической накачке атомов – атомном магнитном резонансе (АМР). Как следует из названия метода, в приборах данного типа магнитные моменты атомов ориентируются с использованием оптических методов [10].

Как правило, ориентация магнитных моментов производится путем облучения светом определенной длины волны для газообразных рабочих веществ в виде атомов гелия, цезия, калия или рубидия.

1.5 Средства измерений магнитной индукции для области «средних» и «сильных» магнитных полей

Несмотря на массовость применения на практике измерений параметров постоянных, переменных и импульсных полей, в области «средних» и «сильных» полей фактически в используемых приборах применяется всего 3 измерительных принципа.

Широкое применение в сфере измерений магнитной индукции средних и сильных полей нашли магнитометры, основанные на эффекте Холла [11], который является одной из разновидностей гальваномагнитных явлений.

Гальваномагнитными явлениями называют ряд вторичных эффектов, возникающих при помещении проводника или полупроводника с током в магнитное поле. К таким явлениям относятся: возникновение разности потенциалов между гранями пластинки в направлении, перпендикулярном направлению тока (эффект Холла), изменение электрического сопротивления проводника или полупроводника в магнитном поле, появлении поперечной или продольной разности температур.

Еще один способ измерения постоянных полей в рассматриваемом диапазоне заключается в использовании индукционных измерительных катушек и веберметров.

Суть метода заключается в измерении приращения магнитного потока с помощью веберметра или баллистического гальванометра при повороте измерительной катушки, первоначально установленной соосно с направлением измеряемого магнитного поля, на углы 90° и 180° . Конфигурируя размер катушки, количество её витков, форму и материал сердечника, можно добиться оптимальной точности измерений в требуемом диапазоне магнитной индукции. При применении прецизионного веберметра этот метод позволяет снизить неопределенность измерений до уровня 0,1-0,5%, что превосходит возможности датчиков Холла.

Около 95% магнитных измерений в диапазонах «средних» и «сильных» полей производятся с помощью магнитометров Холла и измерительных катушек. Однако, данные методы не позволяют снизить погрешность менее десятых долей процента. Вместе с тем, в некоторых применениях необходимо более высокая точность. В этих областях используются магнитометры (тесламетры), основанные на принципе ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) [12].

Приборы данного типа во многом схожи с магнитометрами на свободной ядерной прецессии. Величина индукции измеряемого магнитного поля также вычисляется через частоту прецессии ядер и гиромагнитное отношение рабочего вещества. Отличие заключается в том, что поляризация частиц достигается измеряемым постоянным полем и прецессия происходит после наложения переменного магнитного поля резонансной частоты ориентируемого ортогонально измеряемому магнитному полю.

ЯМР-тесламетры, как правило, позволяют измерять магнитную индукцию в диапазоне $2 \cdot 10^{-2} - 10$ Тл с относительной неопределенностью от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-6}$.

1.6 Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011

Структура Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции и схема его взаимосвязи с эталонами других областей измерений, а также вторичными и рабочими эталонами единиц магнитных величин представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Структура государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ12-2011

Подкомплекс эталона, воспроизводящий единицу магнитной индукции постоянного поля, состоит из следующих основных частей:

- эталонных гелий-цезиевых магнитометров ЭГМ-1 и ЭГМ-2 [13];
- эталонных кварцевых соленоидов магнитной индукции постоянного поля С4-2 и ЭСТВ;

- эталонной квантовой меры силы постоянного электрического тока КМТ;
- эталонной трёхкомпонентной меры-компаратора средств измерений магнитной индукции постоянного поля (ЭТМК);
- эталонного квантового транспортируемого компаратора магнитной индукции постоянного поля [14].

Функционирование эталонных измерительных комплексов осуществляется на основе разработанных пяти специальных компьютерных программ автоматического управления процессами измерений.

Общий вид эталонного комплекса воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля представлен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Фотография основных частей эталонного измерительного комплекса для воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля

Измерительная система комплекса основана на применении двух гелий-цезиевых магнитометров ЭГМ-1 и ЭГМ-2, эталонных кварцевых соленоидов С4-2 и ЭСТВ, питаемых квантовой мерой тока КМТ, трёхкомпонентной меры-компаратора ЭТМК, автоматической системы компенсации вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) в виде одно объёмного однокомпонентного, и трёх компонентного двух-объёмного атомно-резонансного контроллеров МП. Эталонные кварцевые соленоиды С4-2 и ЭСТВ предназначены для передачи размеров единиц Тл и Тл/А в составе ЭТМК в верхней части диапазона измерений – от 0,1 мТл до 1 мТл.

Эталонные магнитометры ЭГМ основаны на квантовом преобразовании магнитной индукции в частоту переменного напряжения с использованием физических принципов оптической накачки атомов вспомогательного вещества - ^{133}Cs , спиновой обменной поляризации и магнитного резонанса атомов основного вещества - ^4He .

Передача размера Тл в данной, наиболее востребованной и требующей наибольшей точности области магнитных измерений, сопряжена с большими научно-техническими трудностями. Это связано с тем, что воспроизводимая величина МИ, в нижней части диапазона измерений, в пятьдесят раз ниже уровня помех в виде изменяющегося магнитного поля Земли и техногенных источников магнитного поля, а в верхней части - больше этого уровня только в 20 раз. Это определяет сложность состава эталонных средств измерений, учитывая высокую степень точности наиболее прецизионных квантовых магнитометров, которые на практике требуют снижения неопределённости калибровки и поверки до уровня $1 \cdot 10^{-6}$.

Предусмотрено функционирование эталонной меры-компаратора в двух режимах, в зависимости от требуемого параметра воспроизводимой МИ и типа калибруемого средства измерения.

Для воспроизведения с наивысшей точностью модуля МИ и калибровки скалярных квантовых магнитометров в диапазоне от 1 мкТл до 110 мкТл применяется измерительная система с однообъёмным стабилизатором МИ. При этом датчики эталонного или калибруемого магнитометров одновременно помещаются в рабочее пространство основной 3-х компонентной меры (КМИ) вместе с датчиком контроллера МИ.

Для калибровки мер МИ и компонентных магнитометров в диапазоне от 1 мкТл до $1 \cdot 10^{-3}$ Тл применяется двухобъёмный АМР-компенсатор вариаций МПЗ. При таком способе воспроизведения МИ, датчики АМР-компенсаторов вариаций компонент МПЗ размещаются во вспомогательных 2-компонентных системах катушек МИ, удалённых от основного рабочего пространства на 30 м, а датчики эталонного или калибруемого магнитометров попеременно помещаются в рабочее пространство основной 3-компонентной катушки МИ.

Основной 3-компонентный источник МП меры МИ содержит три КМИ с совмещёнными центрами, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны, причём одна из них ориентирована по местной вертикали, а две других горизонтально – по магнитному меридиану и перпендикулярно ему.

Однообъёмный стабилизатор магнитной индукции в комплекте с эталонным гелий-цезиевым магнитометром ЭГМ применяется для поверки и калибровки скалярных квантовых магнитометров в диапазоне от 1 мкТл до 110 мкТл.

Метод передачи размера Тл основан на одновременном сличении эталонного и калибруемого магнитометров в стабилизированном магнитном поле. Передача размера Тл/А осуществляется при условии прецизионной компенсации внешнего магнитного поля путём прямых измерений эталонным магнитометром МИ, воспроизводимой мерой при токе в её обмотке, генерируемом КМТ, либо сличением констант калибруемой и эталонной мер МИ посредством магнитометра ЭГМ при идентичном токе в их обмотках.

Методики выполнения измерений и средства измерений, применяемые при передаче размера единицы в данной области измерений, установлены «Правилами хранения и применения» данного эталона, Методикой ВНИИМ СК 03-2205-МК-01-Т и общегосударственными методическими указаниями МИ 166-78 и РД 50-487-84.

1.7 Состояние метрологического обеспечения измерений магнитной индукции постоянного поля в области «средних», «сильных» и «гипогеоманитных» полей

До недавнего времени, согласно [15] метрологическое обеспечение области сильных магнитных полей было возложено на ДЕТУ 08-01-96 (фактически ГСЭ 144-75, хранимый на Украине в г. Харьков).

Для воспроизведения и хранения единицы магнитной индукции с помощью специального эталона использована связь между значением магнитной индукции постоянного магнитного поля и частотой прецессии протонов в воде или ядер дейтерия в тяжелой воде в измеряемом магнитном поле. Наблюдение прецессии производится путем использования явления ядерного магнитного резонансного поглощения.

Фотография подкомплекса эталона приведена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Фотография подкомплекса межгосударственного специального эталона магнитной индукции в диапазоне 0.005Тл - 2Тл

Государственный специальный эталон состоит из комплекса следующих средств измерений и устройств:

- эталонный измеритель магнитной индукции, использующий явление ядерного магнитного резонанса;
- электромагнит со сложной системой рабочих воздушных зазоров, в которых создаются однородные магнитные поля;
- стабилизированный источник питания электромагнита;
- устройство для стабилизации магнитного поля в рабочих зазорах электромагнита.

Эталонный измеритель магнитной индукции служит для определения значений магнитной индукции в рабочих объемах источника магнитного поля. С целью обеспечения необходимой точности измерений эталонный измеритель имеет ряд отличий от промышленных измерителей и измерителей специального изготовления, использующих эффект ЯМР.

При измерении магнитной индукции с помощью эталонного измерителя в диапазоне индукции от 0,05 до 1,2 Тл используется резонанс протонов в воде, при котором сигнал ЯМР значительно больше сигналов, получаемых при резонансе ядер других веществ. При измерениях значений магнитной индукции больших 1,2 Тл, используется резонанс ядер дейтерия в тяжелой воде. Весь диапазон индукции перекрывается тремя сменными датчиками.

Для получения однородного стабильного магнитного поля в диапазоне от 0,05 до 2 Тл используется электромагнит, имеющий пять полюсных систем с длинами рабочих воздушных зазоров 11 мм. Четыре полюсные системы, кроме центральной, расположены в полях рассеяния электромагнита и обеспечивают относительные изменения поля в рабочих объемах, не превышающие изменения поля в центральной полюсной системе, которые составляют в относительном выражении $1 \cdot 10^{-6}$ от установленного значения на 1 см.

Стабильность значений магнитной индукции в рабочих зазорах во времени обеспечивается за счет применения двух систем стабилизации: системы

стабилизации напряжения питания намагничивающих катушек электромагнита и системы стабилизации магнитной индукции.

Ядерный стабилизатор магнитного поля представляет собой двойную систему стабилизации и состоит из двух стабилизаторов. Датчик первого стабилизатора может быть размещен в центральной полюсной системе или в одной из трех боковых полюсных систем. Датчик второго стабилизатора размещен постоянно в нижней полюсной системе, на полюсах которой имеются регулирующие катушки.

При измерениях магнитной индукции в рабочих объемах полюсных систем первый стабилизатор вырабатывает регулирующий сигнал, который подводится к катушкам нижней полюсной системы так, чтобы изменение магнитной индукции в ней еще больше увеличивалось. Это позволяет на выходе стабилизатора получить увеличенный регулирующий сигнал, который воздействует на основную регулируемую систему.

Такая система позволяет обеспечить стабильность магнитной индукции в рабочих объемах электромагнита во времени с отклонениями не превышающими $1 \cdot 10^{-6}$ от установленного значения. При этом частота генератора стабилизатора 1 синхронизируется источником опорного частоты, обеспечивающем работу систем стабилизации поля при любом значении индукции в диапазоне 0,05 – 2 Тл. Однако при больших токах в намагничивающих обмотках электромагнита, приводящих к его нагреву, происходит некоторое заметное перераспределение полей с полюсных систем. С целью исключения этих изменений применена специальная компенсирующая система, интенсивность работы которой зависит от температуры намагничивающих катушек.

Передача размера единицы образцовым тесламетрам осуществляется методом непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного измерителя магнитной индукции в рабочем зазоре электромагнита.

Эталон воспроизводит единицу магнитной индукции в диапазоне 0,05-2 Тл с расширенной неопределенностью на уровне $4 \cdot 10^{-6}$.

Кроме ГЭТ 12-2011 в Российской Федерации действуют первичный эталон магнитных величин, хранимый во ФГУП «ВНИИФТРИ». Фотография эталона приведена на рисунке 1.5.

В основу работы эталона положен метод точного измерения магнитной индукции, основанный на явлении ядерного магнитного резонанса протонов в дистиллированной воде. Измеряемая магнитная индукция создается в сверхпроводящем соленоиде однородного и стабильного магнитного поля.

В состав эталонного комплекса входят следующие средства измерений: пульт управления магнитным полем, криогенный пульт со сверхпроводящим соленоидом СС-10 и такой же пульт со сверхпроводящим соленоидом СС-5; эталонный тесламетр; пульт управления; вспомогательное оборудование.



Рисунок 1.5 – Фотография государственного первичного специального эталона единицы магнитной индукции в диапазоне 1-10Тл – ГЭТ 82-85

Основным узлом эталона служит эталонный тесламетр, в котором реализован нутационный метод ЯМР в проточной воде. Эталонный тесламетр укомплектован двумя зондами. Конструкция зонда для измерений при комнат-

ной температуре позволяет проводить измерения не только в сверхпроводящих соленоидах описываемого эталона, но и в электромагнитных. Зонд для измерений при криогенных температурах представляет собой модификацию обычного нутационного зонда с поляризацией воды измеряемым магнитным полем, отличающуюся наличием теплоизолирующей вакуумной полости с радиационным экраном.

Эталон включает два сверхпроводящих соленоида, намотанных проводами на основе сплава НТ-50. Соленоид СС-10 с внутренним расположением корректирующих обмоток создает магнитную индукцию 9 Тл при 4,2 К и 9,9 Тл при 2,5 К (с откачкой паров жидкого гелия). Неоднородность поля при различных режимах работы соленоида не превышает $1 \cdot 10^{-4}$ в цилиндрическом объеме диаметром 10 и высотой 10 мм. Постоянная соленоида равна 0,0939 Тл/А. Соленоид СС-5 с наружным расположением корректирующих обмоток воспроизводит магнитную индукцию до 5,5 Тл при 4,2 К. Неоднородность магнитного поля в таком же цилиндрическом объеме не превышает $5 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне 1-5,5 Тл. Постоянная соленоида составляет 0,0443 Тл/А.

Соленоиды СС-10 и СС-5 смонтированы в криостатах ГК-200, которые помещаются в криогенные пульта. Для обеспечения в измерительных объемах соленоидов температур 293 и 77 К они укомплектованы обратными криостатами в виде стеклянных сосудов Дьюара с внутренними диаметрами соответственно 17 и 28 мм.

Передача размера единицы образцовым тесламетрам 1-го разряда осуществляется методом непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного тесламетра при измерениях магнитной индукции в сверхпроводящих соленоидах эталона. Погрешность при передаче в СС-5 составляет 0,001% и 0,003% в соленоиде СС-10.

Передача размера единицы образцовым мерам магнитной индукции 1-го разряда осуществляется методом прямых измерений эталонным тесламетром

магнитной индукции, воспроизведенной в поверяемой мере. Суммарная погрешность составляет при этом 0,01-0,03%.

Эталон воспроизводит единицу магнитной индукции в диапазоне 2-10 Тл при температуре 4,2; 77; 293 К и в диапазоне 1-2 Тл при температурах 4,2 и 77 К с неисключенной систематической погрешностью, не превышающей $7 \cdot 10^{-6}$, и средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $1 \cdot 10^{-6}$ при десяти независимых наблюдениях.

В области «гипогеомагнитных» полей, несмотря на актуальность для фундаментальной науки, космической отрасли, навигации и разработчиков магнитноэкранирующих систем, метрологическое обеспечение практически не осуществляется [16].

Следует отметить, что «гипогеомагнитный» диапазон является проблемным для всей мировой магнитной метрологии. По этой причине, в последнее время в РТВ активизировались работы воспроизведения индукции в гипогеомагнитном диапазоне. С этой целью, в последние несколько лет был построен отдельный комплекс содержащий три немагнитные комнаты, отличающиеся объемами и разными коэффициентами экранирования [17].

1.8 Обзор зарубежных эталонов для области измерений магнитной индукции постоянного поля

В 2013 – 2014 гг., впервые были проведены международные сличения государственных эталонов единицы магнитной индукции постоянного поля геомагнитного диапазона, зарегистрированные в базе данных МБМВ под индексом АРМР.ЕМ S14 [18]. Пилотной лабораторией в этих сличениях выступала магнитная лаборатория ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

В сличениях участвовали государственные метрологические институты России (ВНИИМ), Англии (NPL), Германии (РТВ), Чехии (СМІ), Ю. Кореи (KRISS), Китая (NIM) и 4-е геомагнитные обсерватории глобальной сети (Бельгия, Чехия, Австралия и Австрия), определяющие на практике высшую

точность воспроизведения единицы МИ этих стран в геомагнитном диапазоне и во всей области измерений этой базовой единицы в области магнитных измерений.

На первом этапе сличений, пилотная лаборатория подготовила транспортируемый квантовый эталон в виде протонного Оверхаузеровского магнитометра ММПГ-01, прошедшего пятилетние метрологические исследования временной стабильности во ВНИИМ.

Эталон единицы магнитной индукции постоянного поля NPL (Англия) [19] представляет собой комплекс из ЯМР магнитометра и 3-х компонентной системы воспроизведения МИ. Калибруемый магнитометр помещается в центр 3-х компонентных колец Гельмгольца, в которых воспроизводится МИ в диапазоне 20 -100 мкТл. Передача размера единицы Тл производилась путем одновременного сличения калибруемого и эталонного магнитометра. Внешний вид системы колец представлен на рис.1.6.



Рисунок 1.6 – Система 3-х компонентных колец Гельмгольца из состава эталона единицы МИ NPL

Эталон Бельгийского Королевского Метеорологического института и геомагнитная обсерватория на его базе воспроизводили магнитное поле в диапазоне 20-78 мкТл с относительной неопределенностью на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-5}$. Внешний вид комплекса представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Система воспроизведения МИ Бельгийского Королевского Метеорологического института

Комплекс представляет собой компаратор на основе АМР магнитометра на K^{39} и системы генерации и стабилизации магнитного поля.

Эталон индукции постоянного магнитного поля РТВ (Германия) опирается на разработанный и изготовленный в РТВ ЯМР-магнитометр - NMR-FP РТВ [20]. Магнитное поле генерируется в системе колец Браунбека. Вариации магнитного поля Земли регистрируются с помощью 3-х компонентного феррозондового датчика, расположенного на расстоянии 50 метров от колец Браунбека. Внешний вид комплекса представлен на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Внешний вид эталонной системы для воспроизведения и передачи размера единицы индукции постоянного магнитного поля РТВ

Эталон позволяет воспроизводить магнитную индукцию постоянного поля в диапазоне 10-150 мкТл. По итогам пилотируемых ВНИИМом международных сличений 2013-2014 эталон РТВ подтвердил относительную неопределенность на уровне 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-5}$.

Со времени прошедшего после международных сличений 2014-ого года РТВ не остановил свое развитие в метрологическом обеспечении измерений магнитной индукции. В результате, 1 мая 2017-го года РТВ на базе площадки в Берлине открыл лабораторию «Метрологии Сверхслабых магнитных полей», которая была создана в основном для биомедицинских и фундаментальных исследований. Фотография подкомплекса приведена на рис.1.9.

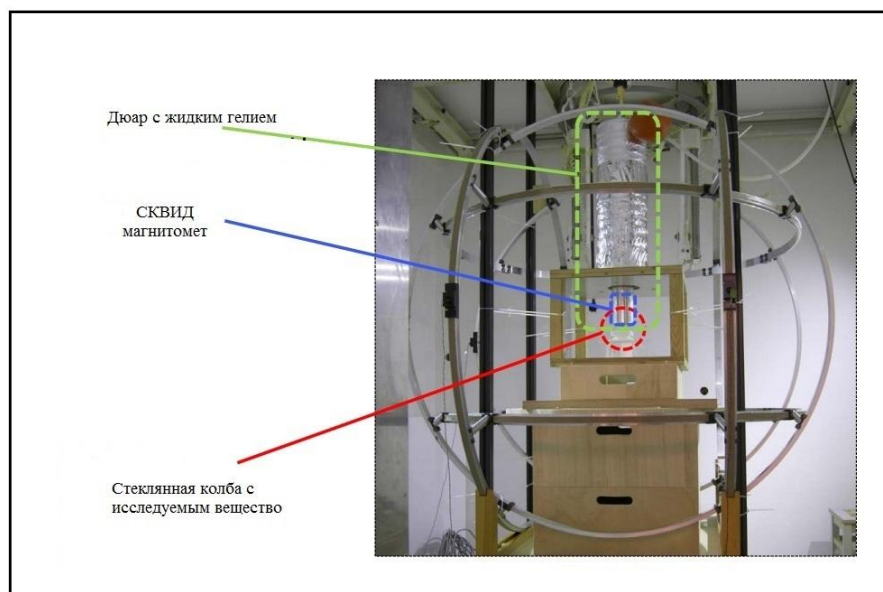


Рисунок 1.9 – Трехкомпонентные кольца Гельмгольца внутри BMSR-2

Комплекс базируется в специально построенном здании, где размещены еще несколько магнитоэкранируемых комнат. Основной является сконструированная из семи магнитных экранов BMSR-2 (Berlin Magnetic Shielding Room). Габариты комнаты - куб с ребром 3 метра. Коэффициент экранирования составляет 10^7 , что на данный момент является мировым рекордом при экранировании помещений таких размеров. Остаточное магнитное поле внутри BMSR-2 составляет менее 500 пТл, градиент индукции в рабочем пространстве комнаты составляет 1,2 пТл/мм.

При изготовлении здание и комнаты были использованы тщательно подобранные немагнитные материалы. В качестве датчиков используются разработанные в РТВ СКВИД-магнитометры с чувствительностью в несколько фТл.

В РТВ эта измерительная техника используется для проведения работ, связанным с детектированием и обработкой биосигналов, ядерной спиновой прецессии поляризованных инертных газов, исследованиями магнитных наночастиц и ядерно-магнитного резонанса в сверхслабых полях.

Несмотря на масштабность работ, проведенных в РТВ в сфере развития метрологического обеспечения магнитных измерений слабых полей, возникают ряд вопросов к определению метрологических характеристик установки.

Не удалось найти публикации, описывающие способ измерения и оценивания погрешности воспроизведения магнитной индукции в рабочем объеме. Кроме того, описанная установка - система с рабочим объёмом в условиях сверхпроводимости - не пригодна для калибровки в нормальных условиях.

Вопрос воспроизведения постоянной магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне является актуальным в мировой метрологии.

Эталон Корейского Метрологического Института (KRISS) [21] разрабатывался в тесном сотрудничестве со специалистами из ВНИИМ и поэтому имеет похожую структуру и концепцию. Структурная схема эталона представлена на рисунке 1.10.

Непосредственным носителем единицы Тл является АМР He-Cs магнитометр, разработанный и изготовленный во ВНИИМ. Магнитное поле генерируется и стабилизируется в трехкомпонентной системе колец. Для стабилизации поля используется фазовый компаратор и дополнительные обмотки. Для компенсации вариаций магнитного поля Земли используется вспомогательная система колец и Cs-магнитометр, расположенные в помещении на расстоянии 50 метров от основной системы.

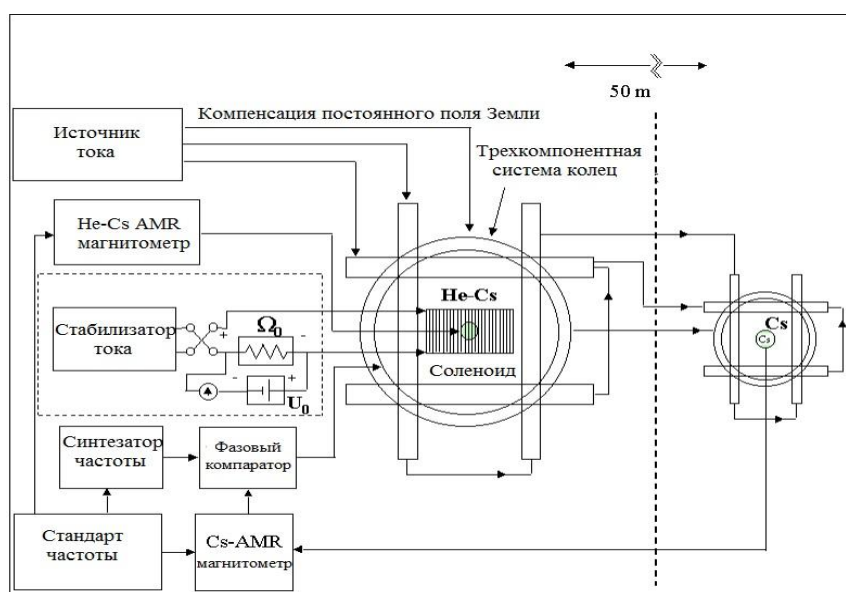


Рисунок 1.10 – Структурная схема эталона индукции постоянного магнитного поля геомагнитного диапазона KRISS

Эталонная система Китайского Метрологического Института (NIM) также разрабатывалась в тесном сотрудничестве со специалистами магнитной лаборатории ВНИИМ. Непосредственным носителем единицы является ЯМР-магнитометр серийного производства.

Эталон состоит из ЯМР-магнитометра, основной 3-х компонентной системы колец Гельмгольца, системы внешней компенсации вариаций магнитного поля Земли, системы генерации и контроля токов питания обмоток меры.

Датчик эталонного ЯМР – магнитометра представляет собой цилиндр диаметром 70мм и длиной 140мм. Диапазон измерений магнитометра 20мкТл-100мкТл.

Чешский Метрологический Институт, Институт Геофизики Чешской Академии Наук, Национальный Измерительный Институт Геофизики Австралии и Австрийский Метеорологический Институт, участвовавшие в сличениях, не имеют системы генерации, стабилизации и компенсации полей постоянной магнитной индукции геомагнитного диапазона. Поэтому на международных сличениях ими были представлены различные модификации магнитометра на эффекте Оверхаузера производства фирмы GEM Systems. Передача единицы внутри страны производится ими путем одновременных сличений калибруемого и эталонного магнитометра в одной точке (в локальном магнитном поле Земли). Фотография магнитометра приведена на рис.1.11.



Рисунок 1.11 – Магнитометр GSM-19, используемый в качестве эталонного в ряде стран

Американский метрологический институт NIST не принимал участия в международных сличениях. Это связано с тем, что после завершения работ по определению гиромангнитного отношения протона, данная тематика была фактически закрыта. Тем не менее, изготовленное оборудование для воспроизведения, стабилизации и компенсации индукции постоянного магнитного поля геомагнитного диапазона используется для сличений используемых в США квантовых магнитометров. Внешний вид системы представлен на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Система воспроизведения и стабилизации магнитной индукции постоянного поля NIST

Результаты международных сличений APMR.EM S14 приведены в таблице 1.2. Эталон единицы магнитной индукции ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» подтвердил свои лидирующие позиции, получив при обработке данных наибольший весовой коэффициент.

Таблица 1.2 – Результаты международных сличений АРМР.ЕМ S14 государственных эталонов постоянной магнитной индукции геомагнитного диапазона

Институт	Измеряемые значения индукции μT	$U_i^*(k=2)$, nT **	Difference***: TS – NS, **, nT	Весовой коэффициент, **
VNIM	20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100	0,15	0,12	0,69;0,69;0,66; 0,45;0,62;0,68 0,70;0,84;0,77
NPL	20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100	4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20	-1,5;- 1,9;- 2,5; -3,0;- 3,3;- 3,8; -4,6;- 5,5;- 6,7	< 0,01
GO, Belgium	20; 30; 40; 50, 60;70; 78	0,26	0,47;0,05;0,04; 0,09;0,07;0,16; 0,22	0,23;0,23;0,22; 0,15;0,21;0,23; 0,23
PTB	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	1,6; 1,3;1,4; 1,3; 1,4; 1,3; 1,3; 1,1; 0,7	-0,39;-0,56; -0,60;-0,38; -0,45;-0,12 -0,04;-0,03; -0,16	0,01;0,10;0,05 0,02;0,02;0,02 0; 0; 0,04
CMI	48,6	0,36	0,17	0,08
GO, Czech	48,6	0,36	0,47	0,08
KRISS	20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100	1,0	-0,8; -0,8;-0,8; -0,7; -0,7; -0,6; -0,5; -0,4; -0,5	0,02;0,02;0,01; 0,01;0,01;0,02; 0,02;0,02;0,02
NIM	20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 99	0,52;0,46; 0,37;0,35; 0,44;0,53; 0,62;0,72; 0,77	0,11; 0,75; 0,64;0,79;0,78; 0,91;0,87;0,88; 0,84	0,06;0,07;0,10; 0,11;0,07;0,06; 0,04;0,03;0,03
GO, Austral.	58	0,44	0,42	0,07
GO, Austria,	48,4	0,9	-0,13	0,11

1.9 Состояние метрологического обеспечения измерений магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах

В результате сложившейся практики, измерительные установки, применяемые в качестве исходных по точности для определения магнитных параметров материалов, принято характеризовать только инструментальными погрешностями измерений магнитного потока и напряженности намагничивающего поля в образце.

Подобная практика привела к ситуации, когда результаты измеренных в различных условиях параметры некоторых материалов, при повторных измерениях, могут превышать нормированную погрешность установки на порядок, в том числе в статическом режиме измерений, который является самым точным.

Объясняется такая ситуация тем, что погрешность результата измерений параметров магнитных материалов определяется не столько инструментальной погрешностью, сколько методической. Последняя обусловлена особенностями возникновения намагниченности в нелинейно-гистерезисной среде. Методическая погрешность может быть снижена только путем оптимизации методики проведения измерений.

В настоящее время суммарная инструментальная погрешность в случае прецизионных измерений снижена до величин порядка 0,1 %, тогда как методическая погрешность (при соблюдении принятых методик измерения в статике) реально составляет 0,5-7 %.

В научной литературе имеются указания на недостаточность учета только инструментальных погрешностей [22] и многочисленные упоминания о факторах, влияющих на выбор методики измерений, таких как: качество магнитной подготовки, качество размагничивания, дрейф интегратора, продолжи-

тельность интегрирования, дополнительная выдержка в отдельных критических точках измерения, эффект последствия, пульсации намагничивающего поля, его неоднородность и пр.

Тем не менее, сведений об анализе методических погрешностей определения магнитных параметров материала в статике, например, магнитной проницаемости или коэрцитивной силы, в литературе не обнаружено. Это делает невозможным построение оптимальной методики проведения измерений, так как отсутствуют четкие критерии приведения материала в стационарное или нейтральное магнитное состояние и т.д. Критерий окончания интегрирования предложен в [23], однако единственная попытка его реализации на практике [22, 24] заметным успехом не увенчалась.

В нормативной литературе также не обнаружено анализа методических погрешностей, несмотря на то, что с целью их минимизации начиная с 1987г. регламентирована обязательная поверка магнитоизмерительных установок по стандартным образцам [2, 25].

Например, основополагающий стандарт [26], регламентирующий методику измерений в статике, просто декларирует, что погрешность измерения не должна превышать 2-3 %. Практикой это подтверждается далеко не всегда, особенно в точках начальной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы. Это естественно, так как приведенные цифры были основаны на учете только инструментальной погрешности, которая на стадии разработки данного ГО-СТа составляла 1-2 %.

В нормативном документе [27] суммарная погрешность определения параметров материала в статике впервые регламентирована, но - только как разность между полученными характеристиками измеряемого образца и заранее известными характеристиками эталонного образца, происхождение которых не обсуждается.

1.10 Актуальные задачи развития метрологического обеспечения магнитных измерений

Как было отмечено выше, в наиболее востребованной области магнитных измерений - МИ постоянного поля - Государственный первичный эталон ГЭТ12-2011 непосредственно воспроизводит диапазон ограниченный тремя порядками величин от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Тл, включая геомагнитную область измерений магнитного поля Земли от $2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ Тл

Анализ современных потребностей промышленности, оборонной области и научных исследований показывает, что одной из актуальных задач дальнейшего развития метрологического обеспечения измерений МИ постоянного поля в настоящее время являются расширение на два порядка (от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Тл) нижнего предела диапазона воспроизведения и на три порядка (от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 Тл) его верхнего предела.

Необходимость расширения нижнего предела диапазона воспроизведения и передачи размера единицы от 1000 нТл до 10 нТл связано с запросами научных и производственных организаций на метрологическое обеспечение измерений в космическом пространстве, в электромагнитных экранирующих системах и области контроля правил и норм СанПин надзора.

Реализация задачи передачи размера единицы МИ в область величин на много порядков ниже естественного фона магнитного поля Земли (МПЗ) оказалась возможной благодаря разработке методики точной компенсации и контроля «нуля» поля, обеспечения на его базе генерирования нормированных величин МИ в пределах ± 1000 нТл и разработке соответствующего программного обеспечения процесса измерений.

На основании анализа состояния метрологического обеспечения в области эталонных средств измерений магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах можно сделать следующие выводы. Задача эталонного сопровож-

дения данной области измерений не решена. Для ее решения следует предпринять изучение условий, определяющих методические погрешности измерений, обусловленные процессами возникновения намагниченности в нелинейно-гистерезисных средах. Исследование следует начинать с режима статического намагничивания в замкнутой магнитной цепи, который наименее отягощен погрешностями измерений методического характера. Такое исследование позволит выработать критерии оптимизации методики проведения измерений и снизить методическую погрешность эталонных измерений параметров магнитных материалов до уровня инструментальной погрешности измерений.

Для проведения исследований по выбранному направлению требуется создать опытный образец нового подкомплекса действующего эталона ГЭТ12-2011, позволяющего расширить диапазон и функции эталона при передаче единицы магнитного потока. Данный комплекс должен быть снабжен максимально гибким программным обеспечением, предусматривающим визуализацию измеряемых и влияющих величин и позволяющим оператору вмешиваться в процесс измерения на любой стадии его проведения.

Выводы к главе 1

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

Описаны основные методы и средства измерений магнитной индукции «гипогеомагнитного», геомагнитного, «среднего» и «сильного» полей.

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

Исследованы характеристики и принципы действия эталонов магнитной индукции отечественных и зарубежных метрологических институтов: ФГУП «ВНИИФТРИ», Англии (NPL), Германии (PTB), Чехии (CMI), Ю. Кореи (KRISS), Китая (NIM), Украины (НИЦ «Институт метрологии»).

На основе анализа состояния метрологического обеспечения области магнитных измерений сделано заключение о том, что наиболее актуальными задачами 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.

Глава 2. Разработка эталонного подкомплекса для расширения диапазона измерений при передаче единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля в область «гипогеомагнитных» полей

2.1 Состав и структура подкомплекса

Методика и аппаратная реализация задачи воспроизведения и передачи единицы МИ в «гипогеомагнитном» диапазоне осуществляются на базе расширения функциональных возможностей эталонного подкомплекса ЭТМК и эталонного гелий-цезиевого магнитометра ЭГМ из состава Государственного первичного эталона единиц магнитных величин ГЭТ12-2011.

Структурная схема обсуждаемой части эталонного измерительного подкомплекса представлена на рисунке 2.1.

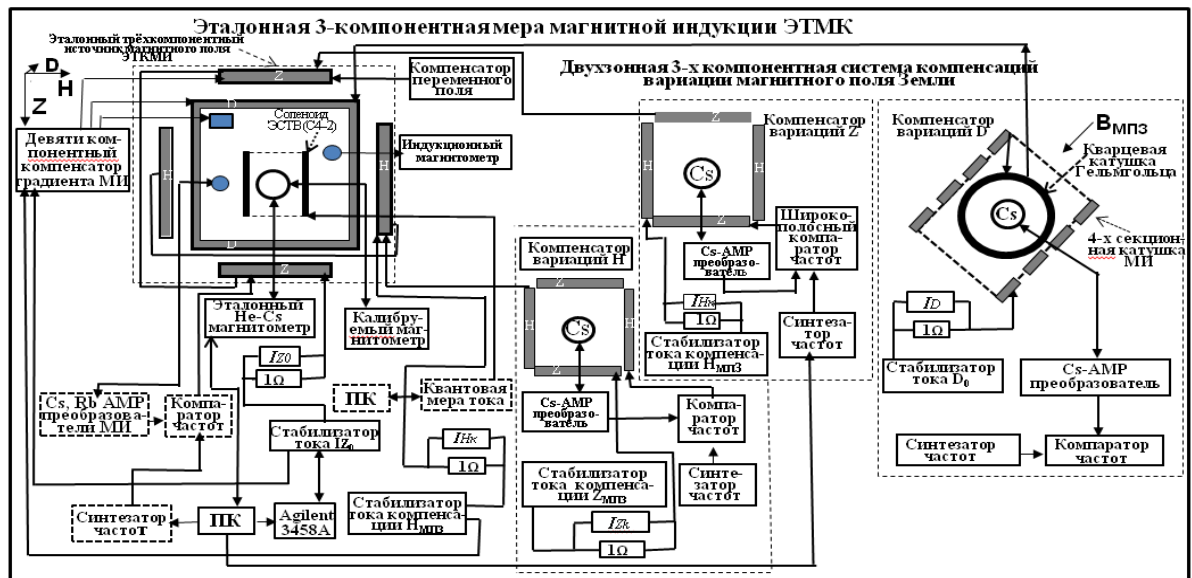


Рисунок 2.1 – Структурная схема эталонной трехкомпонентной меры - компаратора средств измерений магнитной индукции постоянного поля ЭТМК из состава ГЭТ 12-2011 для воспроизведения и передачи размера Тл и Тл/А в область «гипогеомагнитного» диапазона

Измерительная система основана на применении следующих эталонных подкомплексов: эталонного гелий-цезиевого магнитометра ЭГМ, эталонного трёхкомпонентного источника МИ - меры ЭТМК, эталонного кварцевого соленоида ЭСТВ, системы автоматической компенсации вариаций МПЗ в виде однообъёмного однокомпонентного, и двухобъёмного трёхкомпонентного атомных магнито-резонансных (АМР) контроллеров магнитной индукции.

Эталонный кварцевый соленоид предназначен для передачи размера Тл в верхней части диапазона измерений – от 0,1 мТл до 1 мТл и размера Тл/А в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-2}$.

Эталон ГЭТ12-2011 воспроизводит единицу магнитной индукции $B_{\text{Тл}}$ Тесла посредством эталонного гелий-цезиевого магнитометра ЭГМ, опираясь на гиромагнитное отношение протона - γ'_P [28], гиромагнитное отношение атомов гелия-4 - γ_{He4} [29.] и метод двойного радио-оптического магнитного резонанса атомов (АМР) гелия-4 [10]. Диапазон измерений ЭГМ составляет $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ Тл при суммарной стандартной неопределённости $3 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-7}$, соответственно.

Следует отметить, что однообъёмная и двухобъёмная системы работают по одинаковому принципу. Отличие заключается в том, что при одно объёмной компенсации, АМР контроллер располагается внутри рабочего объёма меры ЭТМК, а в двух объёмной системе три АМР контроллера размещены в центрах соответствующих двухкомпонентных мер МИ компенсирующих поперечные составляющие локального поля компонент – вертикальной - B_Z и двух горизонтальных - B_H и B_D .

Применяемое в новой функции – вновь созданное устройство - широкополосный фазовый компаратор частот АМР, а также другие, разработанные ранее элементы подкомплекса ЭТМК из состава ГЭТ12-2011, включаемые в систему воспроизведения МИ в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл, обозначены сплошными прямоугольными контурами.

Реализации такого способа воспроизведения МИ, на два порядка меньшей величины по сравнению с нижним пределом, нормированном в Паспорте на ГЭТ12-2011, и в $5 \cdot 10^4$ раз меньшей МИ поля Земли (МПЗ), потребовала разработки специализированного программного обеспечения, аппаратные элементы которого поясняются рисунком 2.2.

Поскольку воспроизводимые значения МИ зависят от величины тока питания меры МИ при компенсации МПЗ (I_{zo}), то требования к его стабильности повышаются многократно.

Для автоматического поддержания предварительно определённой величины тока компенсации I_{zo} , введена дополнительная обратная связь управления источником тока.

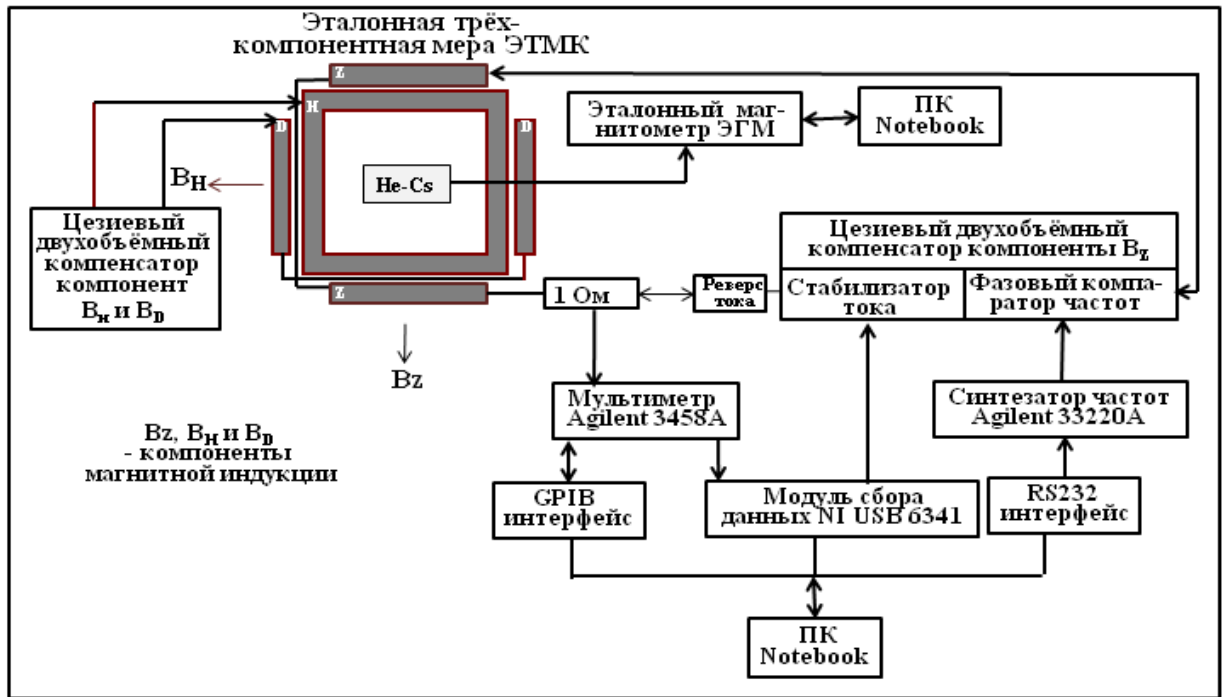


Рисунок 2.2 – Структурная схема эталонной измерительной системы с дополнением функциональными элементами программного обеспечения для диапазона $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$ Тл

2.2 Методика передачи единицы магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне

Воспроизведение и передача единицы МИ 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 [30].

Для автоматизации процесса воспроизведения МИ был разработан усовершенствованный фазовый компаратор частот (ФКЧ) атомного магнитного резонанса (АМР) двух-объёмной системы компенсации вариаций МПЗ. Расширение его диапазона регулирования - до 3500 Гц (1000 нТл) позволило обеспечить нормированные для этого диапазона метрологические характеристики системы, упростить методику и программу измерений.

Процедура калибровки измерительной системы в диапазоне от 10нТл до ± 1000 нТл предусматривает автоматическую компенсацию магнитного поля Земли в рабочей области меры-компаратора ЭТМК трёхкомпонентным двух-объёмным атомно-резонансным контроллером МИ - ТДК. ТДК включает в себя три двух-объёмные системы компенсации вариаций МИ поля Земли - B_z , B_H , B_D .

Дополнительно предусматривается введение в действие устройство контроля «0 поля» и воспроизведения заданного набора уровней вертикальной компоненты - B_{zi} в центре рабочего объёма меры-компаратора ЭТМК.

При этом выполняются следующие измерительные процедуры.

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_{z0} осуществляется посредством мультиметра Agilent 3458A через измерение электрического напряжения, создаваемого током I_{z0} на мере сопротивления 1Ω .

При этом, программируемый интерфейс управляющей программы, разработанный на языке LabView, считывает показание мультиметра, соответствующее силе тока для воспроизведения «0 поля», усредняет полученные величины за нормированный период времени и, посредством цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), подает пропорциональное управляющее напряжение на «стабилизатор тока B_z » (рисунок 2.2). Таким образом, во время калибровки магнитометров, поддерживается неизменной величина тока в цепи компенсации вертикальной компоненты МИ локального поля Земли.

4. Одновременно с мультиметром 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

$$B_{zид} = (2B_{z0} + B_{zi}) - 2B_{z0}.$$

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».

2.3 Программное обеспечение для передачи единицы магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне

Разработанное программное обеспечение в данном подкомплексе имеет два назначения: стабилизация тока, подаваемого на обмотку вертикальной компоненты меры ЭТМК из состава ГЭТ 12-2011, и управление фазовым компаратором частот с целью генерации магнитной индукции постоянного поля в диапазоне ± 1000 нТл с шагом дискретизации 100 нТл.

Внешний вид интерфейса, разработанного ПО приведен на рисунке 2.3.

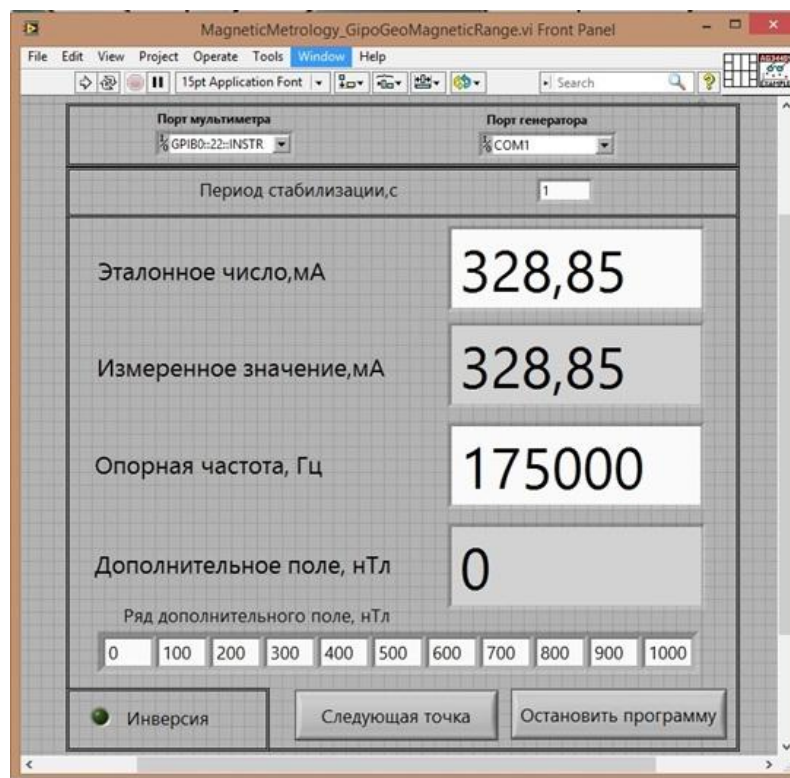


Рисунок 2.3 – Внешний вид интерфейса программы воспроизведения магнитной индукции постоянного поля в «гипогеомагнитном» диапазоне

Первоначально оператор назначает порты соединения программируемых в под комплексе приборов (Мультиметр Agilent 3458A и генератор Agilent 33220A) и устанавливает значения тока, которое необходимо поддерживать. Порт используемого в под комплексе внешнего ЦАПа (LCard34-4) определяется автоматически.

После запуска программы, подкомплекс начинает стабилизировать ток в обмотке вертикальной компоненты меры ЭТМК. При этом, установленный интерфейсом постоянный ток полностью компенсирует локальное поле Земли и поддерживает в рабочей области ЭТМК «нулевое поле». После нажатия на клавишу «Следующая точка», программа устанавливает очередную величину частоты синтезатора опорных частот фазового компаратора частот.

Текущее значение поля индицируется в графе «Дополнительное поле, нТл». При нажатии клавиши «Инверсия» генерируется ток противоположной полярности. Программы разработана на языке LabView. Блок-схема программы воспроизведения МИ в «гипогеомагнитном» диапазоне разработанная на языке LabView представлена на рисунке 2.4.

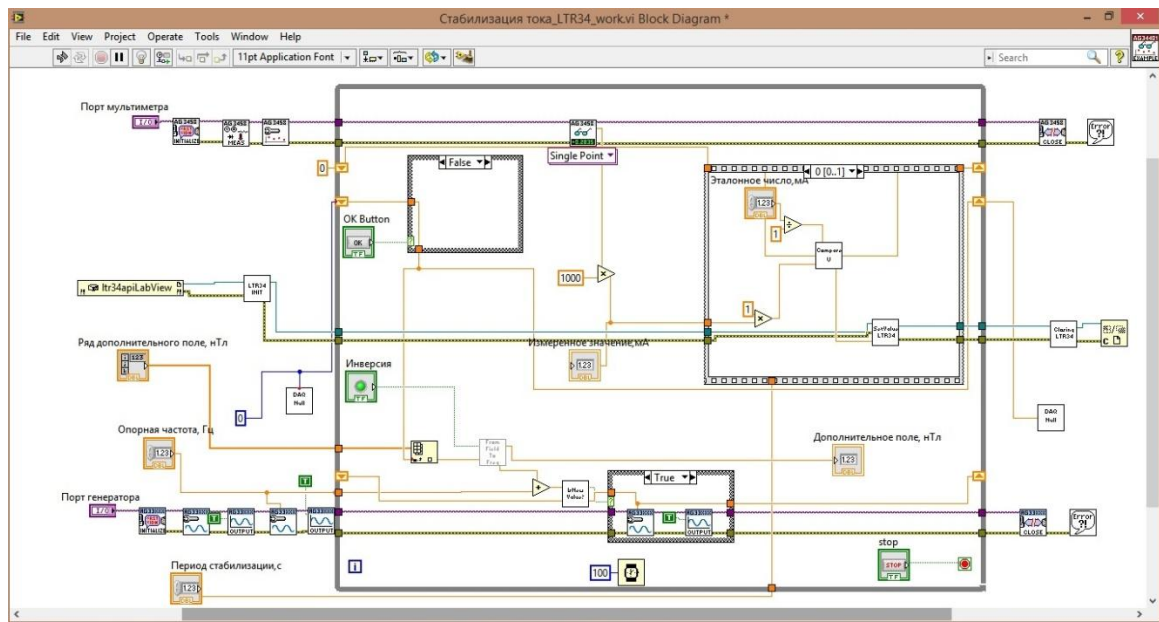


Рисунок 2.4 – Блок-схема программы воспроизведение магнитной индукции постоянного поля в гипогеомагнитном диапазоне (среда разработки LabView)

В графе «Период стабилизации, сек.» можно задать время отклика обратной связи подкомплекса.

Принцип действия следующий: циклически через заданное время вольтметр снимает показания с образцового резистора, по которому протекает ток I_{ZO} , подаваемый на вертикальную обмотку меры ЭТМК. После этого, находящийся под управлением программы внешний ЦАП LCard LTR34-4, подает напряжение на дополнительный вход внешнего аналогового управления стабилизатора тока СТ-1 из состава ГЭТ12-2011. Стабилизатор СТ-1 имеет два входа внешнего управления: основной, напрямую подаваемый на сумматор напряжений, и дополнительный вход. Напряжение с дополнительного входа подается на сумматор через делитель напряжения с коэффициентом деления 1000, что позволяет варьировать выходной ток стабилизатора с достаточно высоким разрешением. Коэффициент преобразования напряжения, подаваемого на дополнительный вход в ток, выдаваемый стабилизатором, определяется предварительно.

Как было отмечено выше, одновременно с мультиметром 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 $\pm (10 - 1000)$ нТл.

2.4 Исследования неопределенности измерений при передаче единицы магнитной индукции в «гипогеомагнитном» диапазоне

Воспроизводимая в ЭТМК величина магнитной индукции 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:

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

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.

Разность индукции ($B_{realMPZ} - B_{measMPZ}$) может быть оценена как суммарная неопределенность измерений ЭГМ. Поскольку согласно методике калибровке индукция в ЭТМК измеряется дважды, погрешности ЭГМ в бюджете неопределенности учитываются с коэффициентом чувствительности $\sqrt{2}$.

Воспроизводимая в ЭТМК величина $B_{measMPZ}$ фактически равняется произведению константы вертикальной обмотки и тока подаваемого на эту обмотку. Константа вертикальной обмотки ЭТМК, в силу механических особенностей системы, не является постоянной во времени величиной. Однако, в ходе процедуры измерений её можно считать постоянной. Для оценки коэффициента влияния стабильности тока можно учесть, что генерация поля на уровне 50 мкТл требует поддерживать ток приблизительно на уровне 0,327А. Таким образом, при составлении бюджета неопределенности коэффициент чувствительности тока можно принять равным 152,9мкТл/А.

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

В ГЭТ12-2011 предусмотрено два типа компенсаций вариаций МПЗ: внешняя и внутренняя компенсация. При внутренней компенсации в рабочей области ЭТМК находится цезиевый (или рубидиевый) магнитометр в автоматическом режиме компенсирующий вариации МПЗ. Однако для сличений ЭГМ и КЦМ внутренняя компенсация не подходит. Установленные в рабочей

области кварцевые соленоиды рассеивают магнитное поле, что делают применение в рассеиваемой области внутренней компенсации бессмысленной. Таким образом, остается внешняя компенсация, представляющая из себя магнитометры, находящиеся в другом помещении на расстоянии 20 метров от ЭТМК. Сигнал с магнитометров подается на обмотку трехкомпонентной меры-компаратора компенсируя вариации МПЗ. Таким образом, удастся компенсировать длинноволновые вариации, но не удастся компенсировать незначительные коротковолновые вариации.

Бюджет неопределённости передачи размера единицы Тл в диапазоне ± 1000 нТл, представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Бюджет неопределённостей передачи размера единицы Тл для диапазона МИ ± 1000 нТл

Параметр X_i	Тип оценки	Стандартная неопределённость, нТл	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности	Вклад, нТл
ЭГМ	A	0,003	Нормальное	$\sqrt{2}$	0,004
	B	0,03	Равномерное	$\sqrt{2}$	0,04
Неоднородность МИ в ЭТМК ($\varnothing 10$ см)	B	0,03	Равномерное	1	0,03
Нестабильность B_{z0} (градиент вариаций и статизм)	A	0,05	Нормальное	1	0,05
	B	0,1	Равномерное	1	0,1
Нестабильность B_z (нестабильность тока)	A	0,015	Нормальное	1	0,015
Суммарная неопределённость, 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.

Выводы к главе 2

В главе описаны работы по созданию и исследованию комплекса разработанного с целью снижения нижнего предела диапазона воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля ГЭТ 12-2011 от 1000 нТл до 10нТл, что является в настоящее время актуальной задачей.

Предложенная в главе методика и аппаратная реализация данной задачи осуществляются на базе расширения функциональных возможностей эталонной трехкомпонентной меры - компаратора средств измерений магнитной индукции постоянного поля и эталонного гелий-цезиевого магнитометра из состава Государственного первичного эталона единиц магнитных величин ГЭТ 12-2011.

В результате исследования неопределенности воспроизведения разработанным комплексом единицы магнитной индукции «гипогеомагнитного» диапазона было получено, что суммарная стандартная и расширенная неопределённость при доверительной вероятности $P=0,95$ ($K=2$) оцениваются значениями 0,13 нТл и 0,26 нТл.

Глава 3. Разработка эталонного подкомплекса для расширения диапазона передачи единицы магнитной индукции в область «средних» постоянных полей

В области измерений базовой единицы магнитных измерений – магнитной индукции, Государственный первичный эталон ГЭТ12-2011 обеспечивает воспроизведение и прямую передачу размера Тл постоянного поля в наиболее востребованном диапазоне «слабых» полей от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Тл с суммарной стандартной неопределённостью $3 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-7}$. Воспроизведение и передача размера Тл осуществляется эталонным комплексом ГЭТ12-2011 с опорой на эталонные гелий-цезиевые АМР магнитометры.

Государственная поверочная схема ГОСТ 8.030-2013 предусматривает передачу размера Тл постоянного поля в диапазоне от 1 мТл до 2,5 Тл посредством вторичных и рабочих эталонов 1 разряда, однако взаимосвязь первичного эталона с областью измерений «сильных» полей до сих пор не была реализована. На восполнение этого пробела и были направлены проведенные работы.

В данной главе представлены результаты исследований, направленных на решение задачи по созданию средств измерений для расширения прямой передачи размера Тл от ГЭТ12-2011 в область «средних» магнитных полей ($1 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тл) [31].

3.1 Квантовый магнитометр на разрешенной структуре атомов цезия

В таблице 3.1 приведены диапазоны применяемых на практике квантовых методов измерений МИ по диапазонам измерений, на которые должна опираться передача Тл от ГЭТ 12-2011 в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6}$ до 2 Тл.

Таблица 3.1 – Методы магнитометрии, используемые в области «средних» полей

Метод	ЯМР (СП)	АМР (He-Cs)	АМР (Cs)	ЯМР (ВП)	Пробел
B, Тл	$2 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2} - 1$	$1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$

Обозначения в Таблице 3.1 следующие: ЯМР (СП) – метод свободной прецессии протонов геомагнитного диапазона, в т. ч. на эффекте Оверхаузера, ЯМР (ВП) – метод ядерной прецессии «сильного» поля, АМР (He-Cs) – гелий-цезиевый атомный магнитный резонанс, АМР (Cs) – метод магнитного резонанса на неразрешённой структуре атомов цезия при измерениях в геомагнитном диапазоне МИ.

Как следует из таблицы, существуют принципиальные 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 [32]).

Этот метод успешно реализован в Государственном первичном эталоне ГЭТ12-2011 - в области «слабых» магнитных полей в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$ Тл на базе ЭГМ, однако в рассматриваемой области более сильных магнитных полей диапазона 1 до 25 мТл, в практике магнитных измерений был реализован впервые.

Преимуществом разработанного цезиевого магнитометра в новой области применения перед традиционными ЯМР и АМР магнитометрами на основе протонов, атомов газообразного гелия и других рабочих веществ, является возможность применения существенно уменьшенного объёма чувствительного

элемента датчика (сфера \varnothing 10 мм) при сохранении достаточно высокого отношения сигнал-шум в оптимальном для построения электронной части аппаратуры диапазоне частот АМР (3,5 – 90 МГц).

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

Для измерений 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 $F=4$, обеспечивающие максимальную в серии резонансов амплитуду АМР сигнала.

Разность частот смежных подуровней m , $m-1$ по степеням измеряемой магнитной индукции B можно вычислить при помощи формулы Брейта-Раби при $J = 1/2$ (внутреннее квантовое число) [33]:

$$W(F, m_F) = -\frac{\Delta W}{2(2I+1)} - g_I \cdot \mu_k \cdot m_F \cdot H_0 \pm \frac{\Delta W}{2} \sqrt{1 + \frac{4m_F}{2I+1} x + x^2},$$

(знак «+» берется для $F = I + 1/2$, «-» берется для $F = I - 1/2$)

где $W(F, m_F)$ – энергия подуровня с данными F и m_F ;

μ_k – ядерный магнетон; $= 5,050\,783\,43(43) \cdot 10^{-27}$ Дж·Тл⁻¹;

I – ядерное спиновое число (для Cs_{133} $I = 7/2$);

g_I – фактор ядра (для Cs_{133} $g_I = 2,5771 \pm 0,0009$);

$\Delta W = 2\pi h \Delta\nu$ – энергия сверхтонкого расщепления (для Cs_{133} $\Delta\nu = 9192,76 \pm 0,1$ МГц);

F – полное квантовое число атома (для нашего случая $F=4$);

m_F – квантовое число (для нашего случая $m_F=4$);

$$x = \frac{g_S \mu_B + g_I \mu_k}{\Delta W} \cdot H_0 = b \cdot H_0;$$

g_S – фактор электрона $-2,00231930436153(53)$

μ_B – магнетон Бора $= 927,400968(20) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл

Нетрудно показать, что при рассмотрении переходов $m_F=4 \rightarrow m_F=3$ и $m_F=3 \rightarrow m_F=2$ при $F=4$ зависимость средней частоты (по обоим поляриностям) от индукции выражается как обычный полином:

$$f^{\pm} = \frac{f(4,3) + f(-4,-3)}{2} = K_1 \cdot B(1 + \Delta K_2 \cdot B + K'_3 \cdot B^2 + \Delta K_4 \cdot B^3 + K'_5 \cdot B^4 + \dots)$$

где $K_n = \frac{K_n}{K_1}$;

K'_j – линейный член коэффициента преобразования частоты АМР в магнитную индукцию;

K_n – составляющие коэффициента преобразования порядка n , B – модуль измеряемой магнитной индукции.

Следует отметить, что согласно вычислениям, коэффициенты при четных порядках равны нулю. Это сильно облегчило бы вычисление коэффициентов, однако воспользоваться этим упрощением в данном случае нельзя. Дело в том, что вывод о том, что четные коэффициенты равны нулю был сделан на основе разложения функции в ряд Тейлора в окрестности точки ноль. Как было обнаружено в предварительных экспериментах коэффициенты при четных порядках не обнуляются. Следовательно, в регрессии должны учитываться все коэффициенты полинома.

Уравнение измерений в реверсной форме, преобразованное в зависимость измеряемой МИ от частоты АМР, представляется в виде:

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{K_1} \cdot f + \frac{\Delta K_2}{K_1^2} \cdot f^2 + \frac{\Delta(2 \cdot (K_2 \cdot K_1) - K'_3)}{K_1^2} \cdot f^3 + \Delta K_4 \cdot f^4 + \dots = \\ &= a_1 \cdot f + a_2 \cdot f^2 + a_3 \cdot f^3 + a_4 \cdot f^4 + a_5 \cdot f^5 + \dots \quad (3.1) \end{aligned}$$

Для оценки коэффициентов квантового цезиевого магнитометра проводится экспериментальное определение констант преобразования разрабатываемого экспериментального образца магнитометра КЦМ путём его сличений с государственным первичным эталоном ГЭТ12-2011 в диапазоне от 0,8 до 1,5 мТл и ЯМР магнитометром в области средних полей. Вычисления проводятся специально разработанной компьютерной программой.

3.2 Состав и структура комплекса для передачи единицы магнитной индукции Тл в область «средних» полей

Основными элементами комплекса являются: ЭТМК и ЭГМ из состава ГЭТ12-2011, КЦМ, мера-компаратор МКМИ с генератором – стабилизатором постоянного тока, устройствами контроля тока, коррекции однородности МИ и компенсации магнитных помех.

Экспериментальное исследование по сличению магнитометров КЦМ и ЭГМ в диапазоне 1-2 мТл проводятся в ЭТМК.

Экспериментальное исследование по сличению магнитометров КЦМ и ЯМР в диапазоне 10-25 мТл проводятся в мере-компараторе МКМИ, представляющего собой четырёхсекционный соленоид с устройствами коррекции однородности МИ и стабилизации и измерений силы постоянного тока в его обмотке.



Рисунок 3.1 – Фотография четырёхсекционной меры-компаратора МКМИ

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

Для передачи размера единицы Тл от ГЭТ 12-2011 в область «средних» полей используется КЦМ. Основным отличием этого магнитометра от традиционных квантовых цезиевых магнитометров геомагнитного диапазона (20 – 100) мкТл, является его назначение для измерений в 10 – 250 раз больших величин МИ (1 – 20 мТл) при существенно большей абсолютной неоднородности МИ. Последнее является определяющим фактором, требующим минимизации размеров магниточувствительного преобразователя – камеры поглощения (МЧП) магнитометра.

Особенностью изменения условий и параметров сигнала АМР, по сравнению с традиционными аналогами в сравниваемых областях и диапазонах измерений, являются различия формы и амплитуды магниторезонансной линии при работе в «слабых» и в «средних» магнитных полях.

Если в «слабых» полях геомагнитного диапазона (20 – 100 мкТл) используется единая, неразделённая на 7 компонент, структура сигнала, то в обсуждаемом диапазоне «средних» полей, рабочей является одна из 7-ми разделённых в более сильном поле АМР линий с существенно меньшей по сравнению с условиями «слабых» полей интенсивностью.

Изменение формы и амплитуды резонансной линии, а также сужение рабочего пространства с однородным магнитным полем, потребовали для сохранения оптимальной ширины линии магнитного резонанса, применения в 20-30 раз меньшего объёма цезиевого магниточувствительного преобразователя (МЧП). Для КЦМ изготовлен МЧП в виде сферы диаметром 12 мм, в то время как в традиционных магнитометрах применяются образцы цилиндрической формы размером 30 – 40 мм, работающие в однородном поле Земли.

При проведении работ по сличению КЦМ и ЯМР магнитометра, большее значение имеет нестабильность магнитного поля в МКМИ. Нестабильность поля напрямую связана с нестабильностью подаваемого на обмотки соленоида тока. Для дополнительной коррекции тока была разработана система стабили-

зации с обратной связью. Подаваемый со стабилизатора ток измеряется на образцовом резисторе с помощью высокоточного вольтметра Agilent 3458A. Специально разработанная программа в автоматическом режиме считывает показания с вольтметра и через ЦАП LCard 34-4 подает стабилизирующее напряжение на вход стабилизатора тока. Чтобы избежать требования по стабильности подаваемого ЦАП напряжения, выдаваемый стабилизатором ток через сумматор складывается из генерируемого напряжения стабилизатора и дисконтируемого в 1000 раз напряжения ЦАПа. Интерфейс управляющей программы представлен на рисунке 3.2.

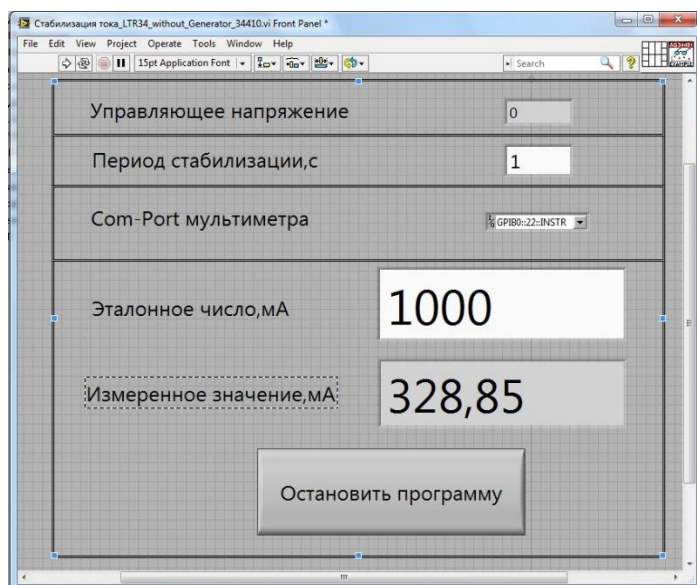


Рисунок 3.2 – Интерфейс программы стабилизации тока

Оператор программы выставляет в окне программы значение тока, которое нужно поддерживать. После запуска программа в автоматическом режиме стабилизирует подаваемый на обмотку МКМИ ток. Диапазон регулирования тока составляет приблизительно $\pm 100\text{мкА}$.

3.3 Экспериментальные исследования по определению коэффициентов преобразования экспериментального образца эталонного цезиевого магнитометра

На первом этапе передачи единицы в область «средних» полей, в ЭТМК при включенной компенсации МПЗ и стабилизированном на уровне 10^{-6} токе генерации МИ производится сличение КЦМ и ЭГМ. Исследование выполняется в магнитных полях эталонных кварцевых мер МИ из состава ГЭТ12-2011 в смежном для обоих магнитометров ЭГМ и КЦМ диапазоне МИ от 1 до 2 мТл. Для воспроизведения МИ в рассматриваемом диапазоне используются два последовательно включённых эталонных соленоидов С4-2 и ЭСТВ совместно с питающей их обмотки квантовой мерой тока КМТ.

В центр меры ЭТМК устанавливаются два эталонных кварцевых соленоида С4-2 и ЭСТВ, их магнитные оси ориентируются вертикально и центры рабочих пространств совмещаются. Двухзонная система автоматической компенсации вариаций локального магнитного поля обеспечивает высокую стабильность измеряемой МИ, создаваемой эталонными соленоидами.

Как показали выполненные ранее исследования, однородность МИ воспроизводимой комплексом мер МИ, достаточна для обеспечения требуемой точности сличений двух магнитометров с существенно разными размерами чувствительных элементов – цилиндрической формы диаметром и длиной 40 мм (He^4) и сферы диаметром 10 мм (Cs^{133}).

Квантовая мера КМТ генерирует постоянный ток в последовательно соединённые обмотки эталонных кварцевых мер и, при величине номиналов тока 0,7 и 1,4 А в их обмотках, в рабочем пространстве системы мер МИ воспроизводится высокостабильное и однородное суммарное магнитное поле с номиналами от 1 до 2 мТл.

При сличении обоими приборами попеременно измеряется индукция в соленоиде при двух противоположных направлениях поля, что позволяет в результате получить средние значения свободные от постоянных магнитных помех.

Как было показано выше, зависимость измеряемой индукции от частоты представляет собой полиномиальную функцию. Согласно [34], коэффициенты полинома могут быть оценены с помощью стандартных инструментов регрессионного анализа.

Для расчета коэффициентов преобразования частоты в индукцию ЦМК была разработана специальная программа. Интерфейс программы представлен на рисунке 3.3.

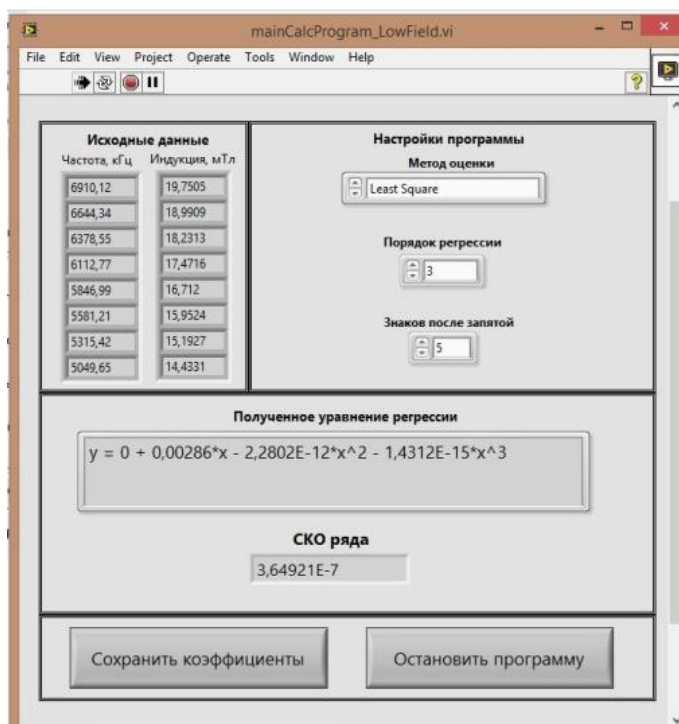


Рисунок 3.3 – Интерфейс программы расчета коэффициентов преобразования КЦМ в «слабых» полях

Программа в автоматическом режиме загружает из заранее указанного файла массив объясняющего и объясняемого параметров и производит оценку коэффициентов регрессии. В зависимости от выбора оператора оценка может

быть произведена методом наименьших квадратов (МНК) или методом наименьшего модуля. Как показала практика, наиболее точный комплексный результат получается при использовании МНК. Кроме того, пользователь выбирает количество знаков после запятой в коэффициентах итогового уравнения. При оценке априорно установлено, что свободный коэффициент регрессии равен нулю.

В результате работы программа выводит полученное уравнение регрессии, СКО ряда оценочных значений индукции от прямых измерений ЭГМ. Если пользователя устраивает результат оценки регрессии, то он имеет возможность сохранить полученных коэффициенты для использования их при оценке коэффициентов более высоких порядков в области «средних» полей.

На втором этапе, были проведены сличения КЦМ и ЯМР магнитометра в рабочей области меры МКМИ. Предварительно, были проведены работы по коррекции однородности МИ в рабочей области МКМИ до уровня $1 \cdot 10^{-6}$. С целью избежать сложно определяемых температурных поправок обмотки, перед измерением в каждой точке МКМИ в течении 24 часов прогревалась под действием рабочего тока.

При обработке результатов второго этап, используя полученные ранее коэффициенты первых порядков регрессии, производится оценка коэффициентов оставшихся значимых порядков.

Логика программы второго этапа отличается от логики первой программы. Дело в том, что в отличие от сличений в диапазоне 1-2 мТл, где единица магнитной индукции постоянного поля фактически передается от ГЭТ12-2011, при сличении в «средних» полях КЦМ сличается с метрологически не подтвержденным прибором. ЯМР-магнитометр, как и ЭГМ И КЦМ, является прецизионным, высокоточным магнитометром с большой разрешающей способностью. Однако, поскольку в РФ в настоящее время не существует эталонного оборудования способного на должном уровне произвести калибровку используемого ЯМР-магнитометра, то говорить о метрологически обоснованной

неопределенности его измерений невозможно. При этом, можно говорить о линейности показаний ЯМР-магнитометра.

Кроме того, в силу слабого влияния коэффициента третьего порядка в области «слабых» полей, было принято решение использовать его на втором этапе как интервал, а не как точечное значение.

Учитывая выше сказанное, логика программы оценки коэффициентов высших порядков была построена следующим образом.

Значение измеренной ЯМР-магнитометром индукции учитывается с некоторым множителем, в остальном оценка коэффициентов производится аналогично первой программе. Пользователь имеет возможность задать 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 второго этапа оценки приведен на рисунке 3.4.

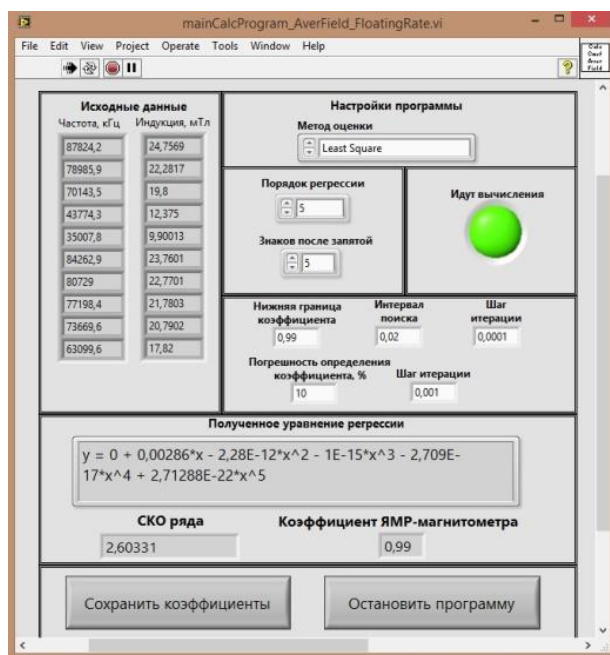


Рисунок 3.4 – Интерфейс программы расчета коэффициентов преобразования КЦМ в «средних» полях

Следует отметить, что описанная выше процедура никак «идеологически» не отличается от типичной калибровки. Поскольку, как и в калибровке, цель эксперимента найти коэффициенты преобразования минимизирующие отклонение 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.

Было проверено несколько вариантов вычисления коэффициентов. Несколько коэффициентов (в том числе при первом порядке) вычислялись на основе измерений слабых полей (1-2 мТл), остальные в средних полях (10-25 мТл).

Качество модели при этом определялось по минимальной ошибке аппроксимации и скорректированному коэффициенту детерминации (R^2).

Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась стандартным образом при помощи теста Стьюдента. Выдвигалась гипотеза о статистически незначимом отличии значения коэффициента регрессии от нуля. Статистика Стьюдента для каждого коэффициента вычислялась как:

$$t_{a_j} = \frac{a_j}{s_{a_j}},$$

где a_j – оценка коэффициента регрессии;

s_{a_j} – стандартная ошибка коэффициента регрессии a_j .

Стандартная ошибка a_j вычислялась как:

$$s_{a_j} = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-m-1} \cdot [(X^T \cdot X)^{-1}]_{jj},$$

где n – количество измерений;

m – количество объясняющих параметров в регрессии;

y_i – измеренные значения индукции;

\hat{y}_i – оцененные значения индукции;

$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & x_{nn} \end{pmatrix}$ – матрица коэффициентов системы уравнения нахождения коэффициентов регрессии.

Результаты вычислений приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты вычислений коэффициентов регрессии при разном порядке вычисления

	Коэффициенты	t-статистика
Вычисление коэффициентов a_1, a_2, a_3 в слабых полях		
Коэффициент a_1	0,000285829	233191,2
Коэффициент a_2	$-2,3 \cdot 10^{-13}$	-0,5
Коэффициент a_3	$-1,4 \cdot 10^{-16}$	-3,6
Скорректированный R^2	0,89	
Вычисление коэффициентов a_1, a_3 в слабых полях		
Коэффициент a_1	0,000285828	2882696,7
Коэффициент a_3	$-1,6 \cdot 10^{-16}$	-58,1
Скорректированный R^2	0,90	
Вычисление коэффициентов a_2, a_4, a_5 в средних полях		
Коэффициент a_2	$4,6 \cdot 10^{-13}$	10,2
Коэффициент a_4	$3,0 \cdot 10^{-22}$	11,4
Коэффициент a_5	$-1,2 \cdot 10^{-27}$	-5,0
Скорректированный R^2	0,89	
Вычисление коэффициентов a_2, a_4 в средних полях		
Коэффициент a_2	$6,8 \cdot 10^{-13}$	25,2
Коэффициент a_4	$1,7 \cdot 10^{-22}$	39,0
Скорректированный R^2	0,90	

При проведении теста Стьюдента на значимость коэффициентов полиномиальной регрессии третьего порядка коэффициент a_2 оказался статистически не значимым.

При обнулении в полиномиальной регрессии второго порядка, оба коэффициента оказались статистически значимыми, кроме того скорректированный коэффициент детерминации оказался выше чем в первом случае.

На основании этого было принято решение оценивать в слабых полях коэффициенты при первом и третьем порядке регрессии.

При оценивании в средних полях полиномиальной регрессии вида $y = a_2 \cdot f^2 + a_4 \cdot f^4 + a_5 \cdot f^5$ все три коэффициента оказались статистически значимыми. Однако при оценивании полинома вида $y = a_2 \cdot f^2 + a_4 \cdot f^4$ был получен более высокий скорректированный коэффициент детерминации. На основании этого было принято решение оценивать в средних полях коэффициенты a_2 и a_4 .

В результате в ходе эксперимента появляется возможность определить коэффициенты преобразования квантового цезиевого магнитометра. Это позволяет однозначно пересчитывать частоту на выходе КЦМ в измеряемую МИ.

3.4 Исследование неопределённости измерений при передаче единицы магнитной индукции в область «средних» постоянных полей

Как было описано выше передача единицы от ГЭТ12-2011 квантовому цезиевому магнитометру производится в два этапа: через сличения с эталонным гелий-цезиевым магнитометром в ЭТМК и с ЯМР магнитометром в соленоиде МКМИ. Следовательно, при оценке бюджета неопределенности необходимо учитывать обе процедуры.

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

При сличении КЦМ с ЭГМ в бюджете неопределенности необходимо учитывать погрешности ЭГМ, нестабильность и недокомпенсацию магнитной индукции в ЭГМК, нестабильность подаваемого на кварцевые соленоиды тока и погрешность определение коэффициентов преобразования КЦМ в диапазоне 1-2 мТл.

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 1-2 мТл представлен в таблице 3.4. Суммарная неопределенность зависит от неопределенности эталонного магнитометра ЭГМ, неоднородности МИ в МКМИ (это вносит дополнительную ошибку в работу ЭГМ), нестабильности МИ МКМИ (связанные с нестабильностью стабилизатора тока и коротковолновых вариаций магнитного поля Земли).

Таблица 3.3 – Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 1-2 мТл

Компоненты неопределённости	Тип оценки	Распределение	СКО, 10^{-6}
Эталонный магнитометр, ЭГМ	Тип В	Равномерное	0,05
Определение констант	Тип В	Равномерное	0,3
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 неопределённость	Тип В	Нормальное	0,4
	Тип А	Нормальное	0,3

Суммарная относительная неопределенность измерений МИ в диапазоне 1-2 мТл составляет $0,5 \cdot 10^{-6}$.

Неопределенность типа А измерений КЦМ согласно экспериментальной оценка составляет $1 \cdot 10^{-7}$.

При сличении ЭГМ и КЦМ в диапазоне 1-2 мТл, зависимость индукции от средней частоты определяется как полином третьего порядка. Коэффици-

енты регрессии оцениваются с помощью метода наименьших квадратов. Путем несложных вычислений можно получить, что для нахождения коэффициентов в общем виде нужно решить систему:

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

Система может быть решена с помощью метода Крамера. Пусть:

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

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

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

Для построения бюджета неопределенности необходимо найти коэффициенты чувствительности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial x_i} &= 2x_i \cdot \sum x_i^6 + 6x_i^5 \cdot \sum x_i^2 - 8x_i^3 \cdot \sum x_i^4 \\ \frac{\partial \Delta}{\partial y_i} &= 0 \\ \frac{\partial \Delta_1}{\partial x_i} &= y_i \cdot \sum x_i^6 + 6x_i^5 \cdot \sum y_i \cdot x_i - 4x_i^3 \cdot \sum (y_i \cdot x_i^3) - 3y_i \cdot x_i^2 \cdot \sum x_i^4 \\ \frac{\partial \Delta_1}{\partial y_i} &= x_i \cdot \sum x_i^6 - x_i^3 \cdot \sum x_i^4 \\ \frac{\partial \Delta_3}{\partial x_i} &= 2x_i \cdot \sum (y_i \cdot x_i^3) + 3y_i \cdot x_i^2 \cdot \sum x_i^2 - y_i \cdot \sum x_i^4 - 4x_i^3 \cdot \sum (y_i \cdot x_i) \\ \frac{\partial \Delta_3}{\partial y_i} &= x_i^3 \cdot \sum x_i^2 - x_i \cdot \sum x_i^4 \\ \frac{\partial a_1}{\partial x_i} &= \frac{(\Delta_1)'_x \cdot \Delta - (\Delta)'_x \cdot \Delta_1}{\Delta^2} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial a_3}{\partial x_i} = \frac{(\Delta_3)'_x \cdot \Delta - (\Delta)'_x \cdot \Delta_3}{\Delta^2}$$

$$\frac{\partial a_1}{\partial y_i} = \frac{(\Delta_1)'_x}{\Delta}$$

$$\frac{\partial a_3}{\partial y_i} = \frac{(\Delta_3)'_x}{\Delta}$$

Бюджет неопределенности определения коэффициентов a_1 и a_3 представлен в таблицах 3.4 и 3.5 ($u_{0A}(x)$, $u_{0A}(y)$, $u_{0B}(y)$ – относительные стандартные неопределенности).

Таблица 3.4 – Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_1

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial x_1}$	$1,9 \cdot 10^{-23}$
...
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial x_n}$	$1,9 \cdot 10^{-24}$
y_1	$u_{0A}(x) \cdot y_1$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial y_1}$	$1,9 \cdot 10^{-21}$
y_1	$u_{0B}(x) \cdot y_1$	B	$\frac{\partial a_1}{\partial y_1}$	$3,4 \cdot 10^{-21}$
...
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial y_n}$	$7,4 \cdot 10^{-22}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	B	$\frac{\partial a_1}{\partial y_n}$	$1,3 \cdot 10^{-21}$
Суммарная стандартная неопределенность типа А				$8,4 \cdot 10^{-11}$
Суммарная стандартная неопределенность типа В				$1,1 \cdot 10^{-10}$

Таблица 3.5 - Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_3

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial x_1}$	$1,4 \cdot 10^{-42}$
...
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial x_n}$	$9,4 \cdot 10^{-47}$
y_1	$u_{0A}(x) \cdot y_1$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial y_1}$	$6,7 \cdot 10^{-42}$
y_1	$u_{0B}(x) \cdot y_1$	B	$\frac{\partial a_3}{\partial y_1}$	$1,2 \cdot 10^{-41}$
...
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial y_n}$	$1,1 \cdot 10^{-43}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	B	$\frac{\partial a_3}{\partial y_n}$	$2,0 \cdot 10^{-43}$
Суммарная стандартная неопределенность типа А				$5,2 \cdot 10^{-21}$
Суммарная стандартная неопределенность типа В				$6,5 \cdot 10^{-21}$

Для нахождения оставшихся статистически значимых коэффициентов в области «средних» полей необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} a_2 \cdot \sum x_i^4 + a_4 \cdot \sum x_i^6 = \sum y_i \cdot x_i^2 \\ a_2 \cdot \sum x_i^6 + a_4 \cdot \sum x_i^8 = \sum y_i \cdot x_i^4 \end{cases}$$

Система может быть решена с помощью метода Крамера. Пусть:

$$\begin{aligned} \Delta_{24} &= \sum x_i^4 \cdot \sum x_i^8 - (\sum x_i^6)^2 \\ \Delta_2 &= \sum y_i \cdot x_i^2 \cdot \sum x_i^8 - \sum y_i \cdot x_i^4 \cdot \sum x_i^6 \\ \Delta_4 &= \sum y_i \cdot x_i^4 \cdot \sum x_i^4 - \sum y_i \cdot x_i^2 \cdot \sum x_i^6 \end{aligned}$$

В таком случае, используя метод Крамера, можно найти коэффициенты a_2 и a_4 :

$$a_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_{24}}; \quad a_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta_{24}};$$

Для построения бюджета неопределенности необходимо найти коэффициенты чувствительности:

$$\frac{\partial \Delta_{24}}{\partial x_i} = 4x_i^3 \cdot \sum x_i^8 + 8x_i^7 \cdot \sum x_i^4 - 12x_i^5 \cdot \sum x_i^6$$

$$\frac{\partial \Delta_{24}}{\partial y_i} = 0$$

$$\frac{\partial \Delta_2}{\partial x_i} = 2x_i \cdot y_i \cdot \sum x_i^8 + 8x_i^7 \cdot \sum y_i \cdot x_i^2 - 6x_i^5 \cdot \sum (y_i \cdot x_i^4) - 4y_i \cdot x_i^3 \cdot \sum x_i^6$$

$$\frac{\partial \Delta_2}{\partial y_i} = x_i^2 \cdot \sum x_i^8 - x_i^4 \cdot \sum x_i^6$$

$$\frac{\partial \Delta_4}{\partial x_i} = 4x_i^3 \cdot \sum (y_i \cdot x_i^4) + 4y_i \cdot x_i^3 \cdot \sum x_i^4 - 2y_i \cdot x_i \cdot \sum x_i^6 - 6x_i^5 \cdot \sum (y_i \cdot x_i^2)$$

$$\frac{\partial \Delta_4}{\partial y_i} = x_i^4 \cdot \sum x_i^4 - x_i^2 \cdot \sum x_i^6$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial x_i} = \frac{(\Delta_2)'_x \cdot \Delta_{24} - (\Delta_{24})'_x \cdot \Delta_2}{\Delta_{24}^2}$$

$$\frac{\partial a_4}{\partial x_i} = \frac{(\Delta_4)'_x \cdot \Delta_{24} - (\Delta_{24})'_x \cdot \Delta_4}{\Delta_{24}^2}$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial y_i} = \frac{(\Delta_2)'_y}{\Delta_{24}}$$

$$\frac{\partial a_4}{\partial y_i} = \frac{(\Delta_4)'_y}{\Delta_{24}}$$

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 10-25 мТл представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 10-25 мТл

	Тип оценки	Распределение	Стандартная неопределённость, 10^{-6}
Определение констант	Тип В	Равномерное	0,3
Неоднородность МИ в ЭМК (Ø 10 мм)	Тип В	Равномерное	0,2
Нестабильность МИ	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	0,2
Неопределенность определения a_1	Тип В	Нормальное	0,5
	Тип А	Нормальное	0,4
Суммарная неопределённость	Тип В	Нормальное	0,4
	Тип А	Нормальное	0,3

Суммарная относительная неопределенности измерений МИ в диапазоне 10-25 мТл составляет $0,4 \cdot 10^{-6}$.

Бюджет неопределенности определения коэффициентов представлен в таблицах 3.7 и 3.8 ($u_{0A}(x)$, $u_{0A}(y)$, $u_{0B}(y)$ – относительные стандартные неопределенности).

Таблица 3.7 – Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_2

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial x_1}$	$1,2 \cdot 10^{-29}$
...
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial x_n}$	$2,1 \cdot 10^{-32}$

Продолжение таблицы 3.7

y_l	$u_{0A}(x) \cdot y_l$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial y_1}$	$7,8 \cdot 10^{-42}$
y_l	$u_{0B}(x) \cdot y_l$	В	$\frac{\partial a_2}{\partial y_1}$	$1,2 \cdot 10^{-41}$
...
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial y_n}$	$4,5 \cdot 10^{-44}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	В	$\frac{\partial a_2}{\partial y_n}$	$7,1 \cdot 10^{-44}$
Суммарная стандартная неопределенность типа А				$6,2 \cdot 10^{-15}$
Суммарная стандартная неопределенность типа В				$6,1 \cdot 10^{-21}$

Таблица 3.8 - Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_4

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопределенность
x_l	$1,2 \cdot 10^{-29}$	А	$\frac{\partial a_4}{\partial x_1}$	$3,0 \cdot 10^{-50}$
...
x_n	$2,1 \cdot 10^{-32}$	А	$\frac{\partial a_4}{\partial x_n}$	$2,5 \cdot 10^{-53}$
y_l	$7,8 \cdot 10^{-42}$	А	$\frac{\partial a_4}{\partial y_1}$	$5,6 \cdot 10^{-57}$
y_l	$1,2 \cdot 10^{-41}$	В	$\frac{\partial a_4}{\partial y_1}$	$1,3 \cdot 10^{-56}$
...
...
y_n	$4,5 \cdot 10^{-44}$	А	$\frac{\partial a_4}{\partial y_n}$	$3,4 \cdot 10^{-59}$

Продолжение таблицы 3.8

y_n	$7,1 \cdot 10^{-44}$	В	$\frac{\partial a_4}{\partial y_n}$	$7,6 \cdot 10^{-59}$
Суммарная стандартная неопределенность типа А				$2,0 \cdot 10^{-25}$
Суммарная стандартная неопределенность типа Б				$2,0 \cdot 10^{-28}$

Поскольку вкладом погрешности измерения частоты в неопределенность передачи 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 размера единицы МИ постоянного поля в область «средних» полей представлен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Бюджет неопределённостей передачи единицы МИ в область «средних» полей

Параметр	Тип оценки	Распределение	Коэффициенты		Стандарт. 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.	$1,5 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$
Абсолютная неопределенность, мТл					$4,2 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$
Относительная неопределенность					$4,2 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$

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

Выводы к главе 3

В главе изложены результаты работ направленных на расширение диапазона воспроизведения магнитной индукции постоянного поля Государственным первичным эталоном единиц магнитных величин ГЭТ 12-2011 в область «средних» полей (1–25 мТл). Включение описанного в главе комплекса в состав Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011 обеспечит воспроизведение и непосредственную передачу единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазонах не только слабых (10^{-3} –1 мТл), но средних (1–25 мТл) и сильных (0,025–1 Тл) магнитных полей. Описана процедура расчёта коэффициентов преобразования частоты в магнитную индукцию созданного ранее и используемого для перехода в средние поля квантового цезиевого магнитометра на разрешённой структуре атомов цезия. Оценён бюджет неопределённости воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля с помощью созданного комплекса.

В результате было получено, что суммарная относительная стандартная неопределённость воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля созданным комплексом в верхней точке диапазона средних постоянных магнитных полей составляет $2,1 \cdot 10^{-6}$.

Глава 4. Разработка эталонного подкомплекса для расширения функций первичного эталона при передаче единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов

4.1 Состав и структура подкомплекса

В основу аппаратного решения по составу подкомплекса положены следующие позиции.

Магнитный поток в образце материала наиболее точно измеряется в статическом режиме намагничивания. В связи с этим, подкомплекс должен включать в себя двухканальный веберметр, позволяющий обеспечить одновременное компарирование по магнитному потоку в двух сечениях исследуемого стандартного образца магнитного материала.

Параметры магнитных материалов наиболее достоверно определяются на образцах тороидальной формы. Поэтому в первую очередь должны быть отработаны методики определения параметров материалов на тороидальных образцах.

На практике применяются также образцы другой формы - стержни, цилиндры, полосы. Подкомплекс содержит комплект устройств намагничивания образцов этих конфигураций, а также комплект приемных устройств для обработки индуцируемого в образцах сигнала.

Кроме того, в составе предусмотрено применение следующего основного ряда стандартных приборов: управляемого двухполярного источника питания постоянного тока, мер электрического сопротивления, вольтметров с программным обеспечением, персонального компьютера.

Структурная схема подкомплекса приведена на рисунке 4.1.

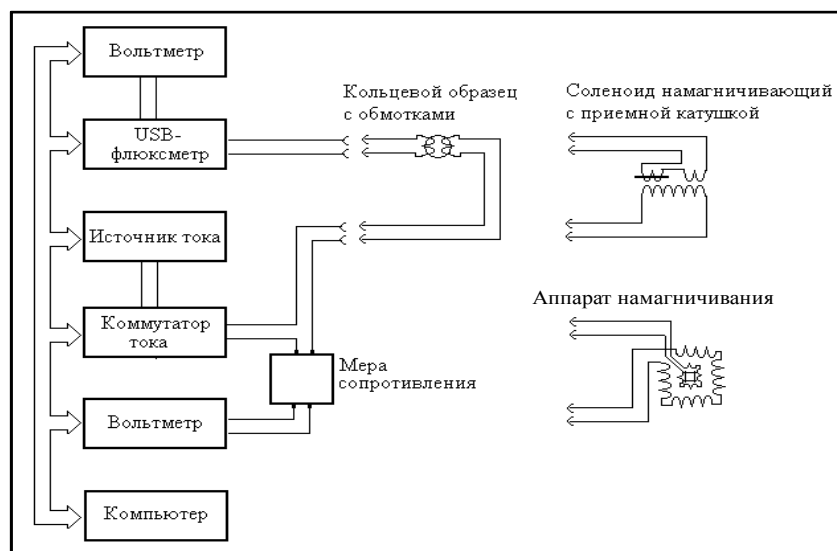


Рисунок 4.1 – Структурная схема подкомплекса

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

USB-флюксметр предназначен для работы в комплексе с источником тока и различными намагничивающими и приемными устройствами. Он был изготовлен по ТЗ ВНИИМ в НИИСТТ, г. Смоленск. Прибор управляется от компьютера и предназначен для работы в комплексе со специализированным источником намагничивающего тока и различными намагничивающими и приемными устройствами.

В отличие от веберметров традиционного типа, USB-флюксметр включает в себя кроме двух каналов измерения магнитного потока, также два канала измерения электрического напряжения, используемые для измерения силы намагничивающих токов при помощи мер сопротивления. Кроме того, в комплект входит вольт-секундный калибратор магнитного потока, предназначенный для самокалибровки USB-флюксметра и для калибровки (поверки) сторонних веберметров.

Исследования показали, что при диапазоне измерений магнитного потока обоих каналов USB-флюксметра, составляющем от 1 мкВб до 500 мВб,

ожидаемая погрешность измерений находится в пределах от 2 % до 0,2 %. Дрейф показаний при замкнутом входе с вероятностью 90% не превосходит 100 нВб/с.

Фотография USB-флюксметра представлена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Фотография USB-флюксметра

Для реализации поставленных общих требований к индукционному компаратору и USB-флюксметру, специфические требования разработаны также для специализированного источника тока намагничивания (ИНТ). Он управляется от компьютера и предназначен для работы в комплексе с USB-флюксметром и различными намагничивающими и приемными устройствами.



Рисунок 4.3 – Фотография специализированного источника тока ИНТ

Фотография специализированного источника тока ИНТ приведена на рисунке 4.3.

Специализированный источник тока ИТН является биполярным. Диапазоны устанавливаемых величин источника тока: $\pm (0.1\text{мА}-15\text{А})$. Диапазоны устанавливаемых напряжений: $\pm (0-60)\text{ В}$. Дискретность установки значения тока внутри каждого поддиапазона не более 0,05 %.

Источник тока ИНТ обеспечивает возможность программного управления прибором через USB или LAN интерфейс.

Изготовлены три типа намагничивающих устройств, которые позволяют определять магнитные параметры образцов различной формы - колец, цилиндров и полос.

Два комплекта изготовленных макетов приемных индукционных измерительных преобразователей (катушек) предназначены для измерений параметров образцов в виде стержней длиной до 100 мм и стандартных плиток размером 58x35x8 мм. Обе приемные катушки – дифференциальные, то есть состоят из двух одинаковых частей, размещаемых в двух зонах соленоида намагничивающего и включаемых встречно по отношению к полю соленоида. Благодаря такому включению сигнал в приемной катушке не зависит от напряженности поля, создаваемого соленоидом.

Первое из трёх входящих в состав подкомплекса разработанных и изготовленных макетов устройств намагничивания - МАГНА-1, представляет собой скомпенсированный по однородности создаваемого поля многослойный соленоид, предназначенный для намагничивания габаритных образцов (до 300 мм длиной и до 30 мм в поперечнике).

Устройство МАГНА-1 имеет две зоны однородного магнитного поля, расположенные на расстоянии около 200 мм. Благодаря этому обеспечена возможность измерения коэрцитивной силы в условиях компенсации магнитного потока поля соленоида в приемном устройстве.

Необходимый профиль распределения МИ на оси соленоида достигается благодаря двум дополнительным секциям обмотки на концах соленоида. Соленоид намотан двумя проводами одновременно и имеет две идентичные

обмотки, что облегчает согласование с различными источниками тока благодаря возможности параллельного и последовательного включения обмоток при работе.

Исследование намагничивающего устройства МАГНА-1 при помощи средств измерений из состава первичного эталона ГЭТ 12-2011 показало, что его коэффициент преобразования (постоянная) для каждой из двух обмоток, составляет 3,84 мТл/А. Распределение МИ на оси соленоида является однородным на длине 250 мм с погрешностью не более $\pm 0,3\%$, что отвечает поставленной задаче.

Фотография устройства МАГНА-1 приведена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Фотография намагничивающего устройства МАГНА-1

Второе намагничивающее устройство - МАГНА-2, предназначено для намагничивания стержневых образцов длиной до 120 мм при измерениях магнитной проницаемости слабоферромагнитного материала. Конструкция устройства аналогична устройству МАГНА-1.

Исследование намагничивающего устройства МАГНА-2 показало, что постоянная каждой из двух обмоток соленоида составляет 5,22 мТл/А.

Фотография намагничивающего устройства МАГНА-2 приведена на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Фотография намагничивающего устройства МАГНА-2

Третье намагничивающее устройство - МАГНА-3, представляет собой аппарат намагничивания Эпштейна для замкнутого набора полосовых образцов. Устройство разработано для измерения параметров магнитных параметров в образцов полосовой формы.

Фотография намагничивающего устройства МАГНА-3 приведена на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Фотография намагничивающего устройства МАГНА-3

Кроме того, было также разработано два макета приемных устройства для образцов различной формы.

Для стержней длиной до 100 мм изготовленный макет представляет собой дифференциальный индукционный измерительный преобразователь, состоящий из двух одинаковых цилиндрических измерительных катушек, соединенных последовательно и встречно по отношению к внешнему магнитному полю. Измерительные катушки разнесены в пространстве и помещаются в зоны однородного поля намагничивающего устройства МАГНА-1, при этом одна из измерительных катушек охватывает испытуемый образец.

В результате исследований приемного устройства для стержней был сбалансирован с погрешностью $\pm 0,1\%$ и определена константа каждой измерительной катушки, равная $0,1322 \pm 0,0001 \text{ м}^2$ и измеренная с погрешностью не более $0,2\%$.

Второе приемное устройство для образцов в виде плиток размером $58 \times 35 \times 8$ мм построено аналогично устройству для стержней, но измерительные катушки имеют прямоугольную форму, соответствующую сечению испытуемого образца, помещаемого внутрь одной из них.

В результате исследований макет приемного устройства для плиток был сбалансирован с погрешностью $\pm 0,2\%$ и определена константа каждой прямоугольной измерительной катушки, равная $0,1033 \pm 0,003 \text{ м}^2$ и измеренная с погрешностью не более $0,3\%$.

4.2 Программное обеспечение комплекса

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.

4.2.1 Программа измерений констант преобразования мер магнитной индукции, мер взаимной индуктивности и измерительных катушек

Программы выполнения процесса измерений трёх констант имеют аналогичную логику, т.к. сводятся к определению коэффициента взаимной индуктивности. Отличие заключается в том, что при работе с мерой взаимной индуктивности непосредственно определяется коэффициент преобразования самой меры, а при работе с мерами магнитной индукции и измерительными катушками определяются коэффициенты взаимной индуктивности исследуемой меры и исследуемой измерительной катушки.

В исследовании используется следующее оборудование: управляемый специализированный источник тока, USB-флюксметр, образцовая мера сопротивления, вольтметр с функцией дистанционного управления и исследуемый стандартный образец. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.7.

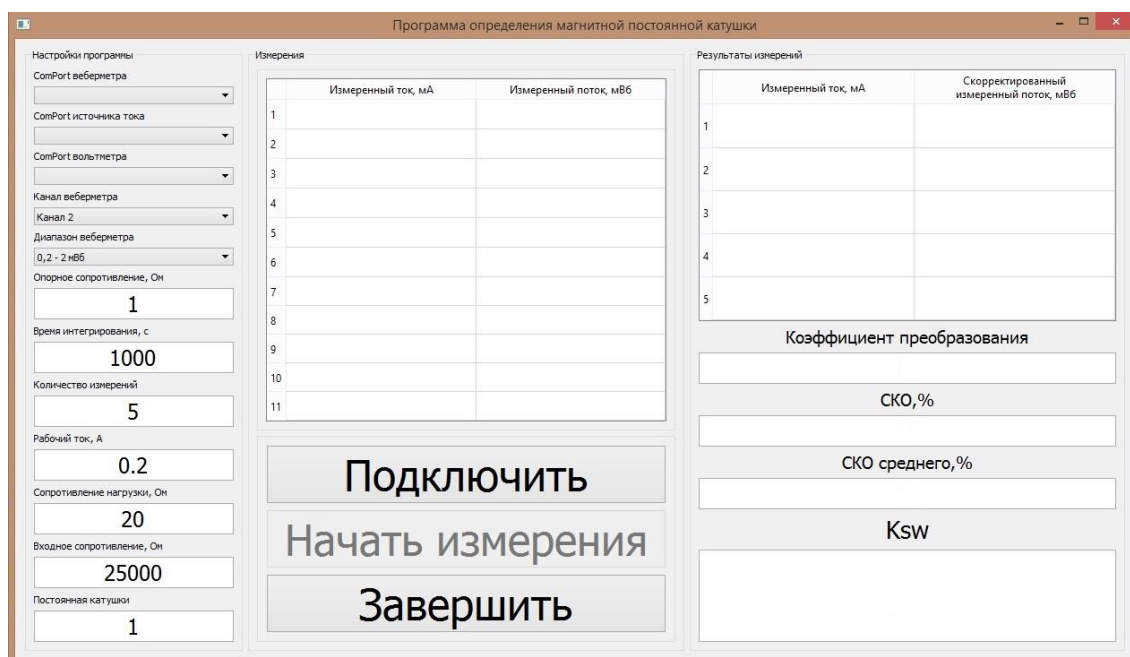


Рисунок 4.7 – Интерфейс программы определения постоянной измерительной катушки

Логика программы следующая. Измерения потока выполняются при неизменном по модулю, но изменяющемся в каждой точке по полярности значении тока.

На каждом следующем этапе измерений производится корректировка дрейфа веберметра. Используя стандартное для данных измерений предположение о линейности дрейфа на небольшом временном интервале, из первоначальной таблицы некорректированных исходных данных генерируется таблица скорректированных значений магнитного потока. Скорректированное значение потока в этом случае равно:

$$\Phi_{ci} = \Phi_i - \frac{\Phi_{i+1} + \Phi_{i-1}}{2},$$

где Φ_{ci} – скорректированное по дрейфу значение потока;

Φ_i - нескорректированное по дрейфу значение потока;

$i = 1; 3; 5; \dots$

Таким образом, если размерность таблицы сырых данных равна N (всегда нечетная), то размерность таблицы скорректированных данных равна $(N/2 - 1)$.

По каждой паре ток-поток из таблицы скорректированных значений вычисляется коэффициент взаимной индуктивности $K_{вз}$:

$$K_{вз} = \left(1 + \frac{R_{нагр}}{R_{вх}}\right) \cdot \frac{\Phi_i}{I_i},$$

где $R_{нагр}$ - сопротивление нагрузки;

$R_{вх}$ – входное сопротивление используемого канала веберметра;

Φ_i – значение с индексом i из таблицы скорректированных потоков;

I_i - значение с индексом i из таблицы скорректированных токов.

Проведя вычисления коэффициента взаимной индуктивности по каждой паре ток-поток, получается массив коэффициентов взаимной индуктивности. Из этого массива, вычисляется среднее значение, СКО ряда и СКО среднего.

Учитывая, что коэффициент взаимной индуктивности пары мера магнитной индукции и измерительная катушка равняется произведению коэффициентов меры и катушки, зная константу одного элемента, всегда можно определить коэффициент второго.

4.2.2 Программа оценочного определения параметров петли гистерезиса образца

Программа оценочного определения параметров петли гистерезиса была разработана для предварительного исследования поступающих на измерение стандартных образцов (СО).

Основная причина применения оценочного определения параметров СО заключается в необходимости получения такой априорной информации, как ориентировочные размеры максимального тока намагничивания, ток коэрцитивной силы и т.д. Зная эту информацию, исследователь может, увеличивая набор предварительных данных о СО, повысить достоверность результатов измерений его параметров посредством основной программы измерений.

Программа «Оценочного определения параметров петли гистерезиса» может быть использована не только для оценочных исследований, но и для более точных работ. С помощью данной программы, увеличив количество исследуемых на петле точек и/или число повторений в точке, оператор имеет возможность увеличить достоверность измерений. Однако, при этом будет затрачено значительно больше времени, чем при использовании специализированной программы.

При работе с программой оператор должен настроить последовательные порты, параметры используемого флюксметра и основные настройки программы (максимальный ток намагничивания, время интегрирования, количество исследуемых точек на петле гистерезиса, количество повторений в точке и количество зачетных измерений в точке). Интерфейс программ представлен на рисунке 4.8.

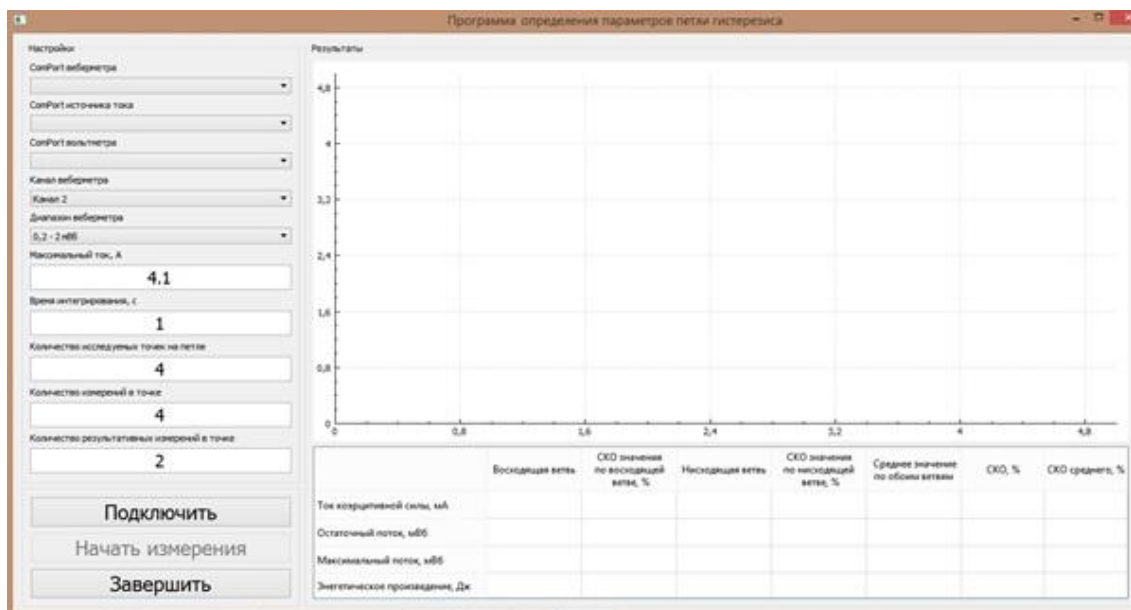


Рисунок 4.8 – Интерфейс программы определения параметров петли гистерезиса

Цель программы построить график функции петли гистерезиса. Для того чтобы иметь возможность корректировать дрейф флюксметра, программа после измерения в каждой точке возвращается в исходную точку.

Для нижней ветви петли гистерезиса исходной точкой является минимальный ток ($-I_{\max}$), в верхней ветви петли гистерезиса исходной точкой является максимальный ток (I_{\max}).

Максимальная и остаточная индукция определяется как половина размаха ординаты графика и ордината графика при нулевой абсциссе, соответственно. Значение тока коэрцитивной силы определяется через координаты соседних точек с противоположным по знаку значением ординаты.

4.2.3 Основная программа определения максимальной и остаточной индукции исследуемых образцов магнитомягких материалов

Задачи определения максимальной и остаточной индукции в образце являются взаимосвязанными задачами, так как для определения остаточной индукции требуется знать величину максимальной индукции. По этой причине,

было принято решение объединить задачи нахождения остаточной и максимальной индукции образца в одной программе.

Интерфейс программы представлен на рисунке 4.9.

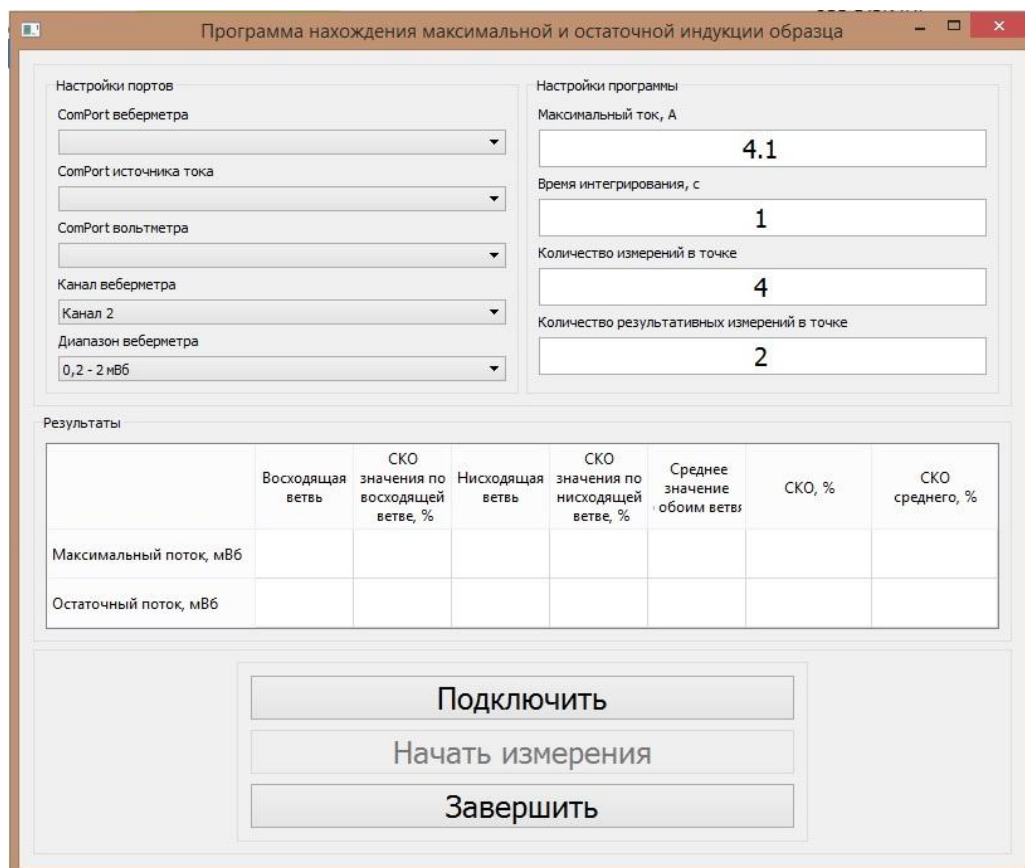


Рисунок 4.9 – Интерфейс программы определение максимальной и остаточной индукции образца

Логика программы следующая. На первом этапе производится форматирование образца, которое представляется собой несколько циклов промагничивания образца на максимальном токе с периодической сменой полярности тока.

Затем программа осуществляет основной цикл измерений, при этом крайняя точка петли гистерезиса выступает в роли опорной точки.

После каждого цикла измерения образец возвращается в опорную точку. Согласно [26], в каждой точке отсчёта, сначала проводится несколько проб-

ных, а потом несколько основных измерений. Количество пробных и основных измерений задается в интерфейсе программы. Среднее значение, СКО ряда и среднего для обеих ветвей петли гистерезиса вычисляется только по основным измерениям без учета пробных.

После проведения измерений на одной ветви петли, в качестве опорной точки принимается противоположная точка петли гистерезиса и исследование повторяется для другой ветви петли гистерезиса.

Для того, чтобы избежать проблемы корректировки дрейфа после возвращении к опорной точке, показания веберметра обнуляются.

При измерениях остаточной и максимальной индукции исследуются четыре точки: две крайние точки петли гистерезиса и две точки петли гистерезиса, которые соответствуют нулевому току на двух ветвях петли. Максимальный поток вычисляется как половина максимальной амплитуды, а остаточная, как разность максимального потока и потока, измеренного при переходе от максимального тока к нулевому.

4.2.4 Программа определения коэрцитивной силы на образцах тороидальной и прямолинейной формы

Для определения значения коэрцитивной силы образца, в программе используется методика, предложенная в ГОСТ [26]. Однако, ГОСТ применим не для всех образцов. Необходимым условием для интерпретации результатов измерений, является форма образца. Для образцов прямолинейной формы отношение длины образца к корню квадратному из площади поперечного сечения должно быть не менее 10. Это связано с тем, что у более коротких образцов увеличивается размагничивающий коэффициент, что ухудшает качество промагничивания образца. Однако, изготавливаемые и используемые в стране для калибровки портативных коэрцитиметров стандартные образцы не соответствуют этим требованиям.

По этой причине, при работе с короткими СО коэрцитивной силы, приходится проводить предварительное промагничивание СО в электромагните, а в самом комплексе измерять только коэрцитивную силу. Однако это не предусмотрено требованиями ГОСТ для соответствующих образцов.

Для измерения коэрцитивной силы, с учётом отмеченных особенностей, было разработано две программы. Пользовательский интерфейс программы определения коэрцитивной силы на стандартизированных образцах представлен на рисунке 4.10.

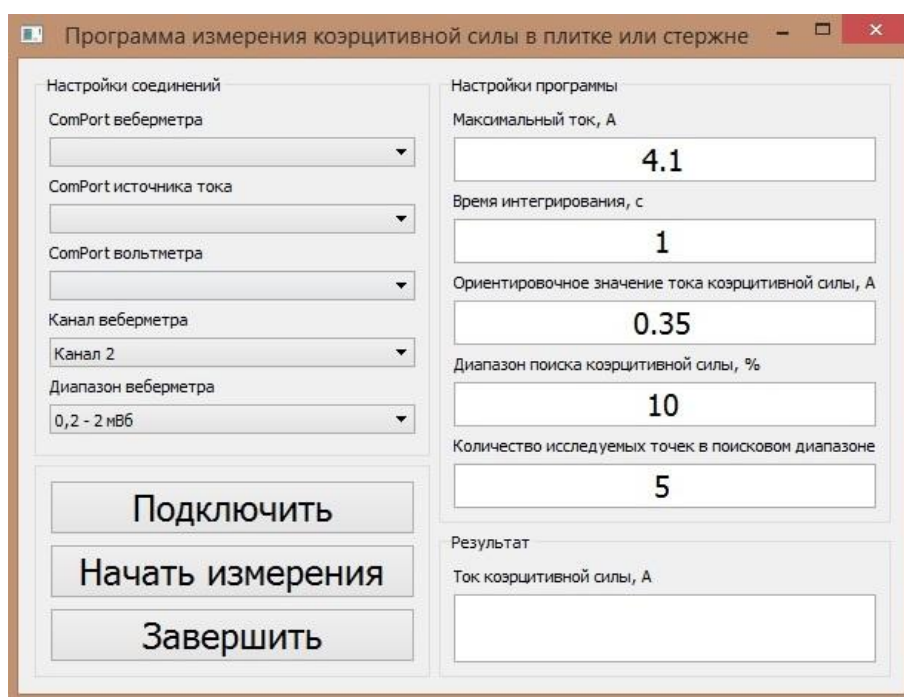


Рисунок 4.10 – Интерфейс программы определение коэрцитивной силы стандартизированного образца

В случае, если форма образца удовлетворяет требованиям ГОСТа, логика программы следующая. Образец помещается в соленоид МАГНА-1.

Первоначально на намагничивающую обмотку подается максимальный ток намагничивания (задается в настройках программы), тем самым образец заводится в предельную точку петли гистерезиса. Затем, ток снижается до нулевого уровня, меняется полярность тока и в намагничивающую обмотку образца подается ток на некоторое количество процентов меньше ожидаемого

(ожидаемый ток коэрцитивной силы и интервал поиска задается в программе). После этого подается ток на заданную величину больше ожидаемого тока коэрцитивной силы. Таким образом, исследователь получает две соседние точки, в которых магнитная индукция образца имеет разную полярности.

Ток коэрцитивной силы образца определяется по координатам точек (I_1 , Φ_1) и (I_2 , Φ_2) в соответствии с выражением:

$$I_{cf} = I_1 - \Phi_1 \cdot \frac{(I_2 - I_1)}{(\Phi_2 - \Phi_1)}$$

Измерения проводятся для двух полярностей магнитного поля, несколько раз. На основании полученных данных, определяется среднее значение тока коэрцитивной силы и неопределенность типа А.

Для образцов, не удовлетворяющих требованиям ГОСТ, была разработана альтернативная программа. Интерфейс представлен на рисунке 4.11.

Как было описано выше, при работе с такими образцами возникают проблемы с промагничиванием образца, которые решаются следующим образом. Образец предварительно помещается в электромагнит в который подается поле с индукцией до 0,5Тл.

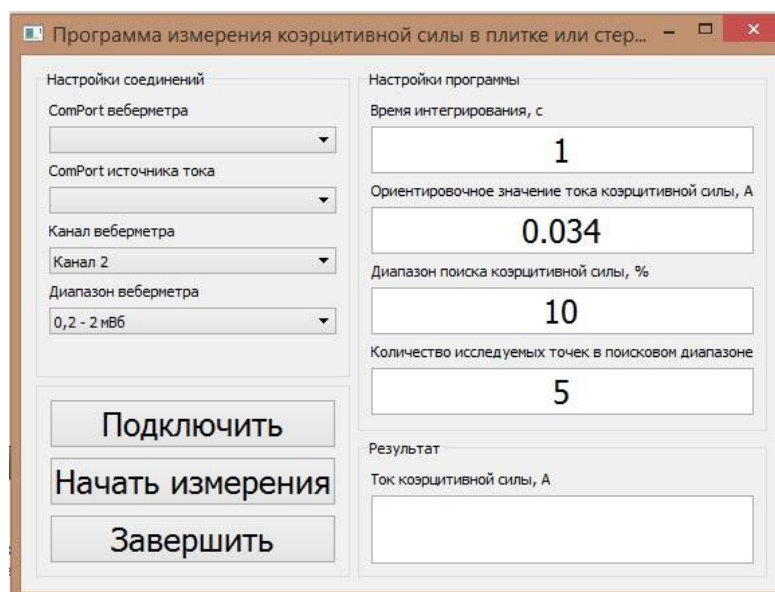


Рисунок 4.11 – Интерфейс программы определение коэрцитивной силы стандартизированного образца

После этого образец помещается в соленоид МАГНА-1, в который подается уменьшающей индукцию в образце ток. Значение подаваемого тока предварительно задаются в настройках программы. Затем ток увеличивается с заданными в программе итерациями при одновременном автоматическом снятии измеряемых значений с флюксметра. Когда в результате измерений появляются две соседние точки с противоположной индукцией ток коэрцитивной силы вычисляется по описанной выше процедуре.

4.2.5 Программа определения параметров основной кривой намагничивания исследуемых образцов магнитомягких материалов

В разработанной программе оператору предоставляется возможность определить максимальную магнитную проницаемость образца.

Согласно действующему ГОСТ [26], кольцевые образцы перед исследованием должны быть размагничены, а образцы прямолинейной формы предварительного размагничивания не требуют.

Образцы размагничиваются посредством наложения убывающего по амплитуде переменного поля. Максимальная амплитуда размагничивающего поля должна превышать коэрцитивную силу материала образца не менее чем в 50 раз для прецизионных магнитомягких сплавов и не менее чем в 10 раз для остальных видов СО. Минимальная амплитуда составляет 0,1А/м для прецизионных магнитомягких материалов и не более 0,005 значения коэрцитивной силы для других. ИНТ имеет штатную функцию размагничивания образцов.

Исследования проводятся, начиная от точки, соответствующей минимальному значению тока, к точке с максимальным значением тока.

Как и в случае определения параметров петли гистерезиса, в каждой точке проводятся несколько пробных и несколько зачетных измерений. Их количество настраивается в программе, однако согласно действующему ГОСТу, количество пробных измерений должно быть не менее 10, а зачетных не менее 3.

В каждой точке измеряется амплитуда изменения магнитного потока при переключении полярности тока.

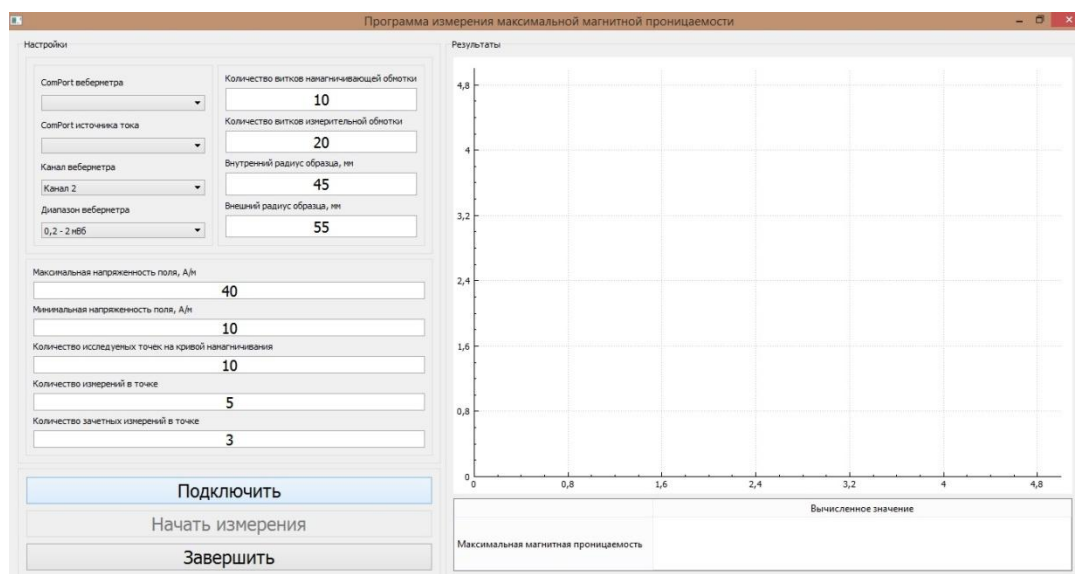


Рисунок 4.12 – Интерфейс программы определения максимальной магнитной проницаемости

Для нахождения максимальной проницаемости была разработана специальная программы. Исследуются несколько точек (не менее десяти) в диапазоне напряженности намагничивающего поля от половины до двух значений коэрцитивной силы. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.12.

Для нахождения значения начальной магнитной проницаемости определяют ординату пересечения с осью ординат построенного графика линеаризованной зависимости проницаемости от напряженности поля. Для линеаризации зависимости используется стандартный для регрессионного анализа метод наименьших квадратов. Наклон графика регрессии (начальная магнитная проницаемость) μ_0 при этом равняется [35]:

$$\mu_0 = \frac{\sum B_i \cdot H_i - \sum B_i \cdot \sum H_i}{\sum H_i^2 - (\sum H_i)^2},$$

где (В,Н) – полученные в результате исследования координаты точек.

Для нахождения значения максимальной магнитной проницаемости строится график зависимости индукции от напряженности поля и определяется максимальное отношение индукции к напряженности в диапазоне.

4.3 Исследование неопределенности измерений подкомплекса при передаче единицы магнитного потока в область измерений параметров магнитных материалов

4.3.1 Исследование USB-флюксметра

Для экспериментального определения коэффициентов калибровки USB-флюксметра в различных диапазонах была разработана специальная вычислительно-измерительная процедура.



Рисунок 4.13 – Фотография измерительного комплекса для определения калибровочных коэффициентов USB-флюксметра

Для процедуры измерений используется следующий измерительный комплекс:

- Исследуемый двухканальный USB-флюксметр;
- Делитель магнитного потока ДМП-01 из состава ГЭТ 12-2011;
- Специализированный источник тока для USB-флюксметра;
- Программируемый вольтметр Agilent 34401A\$
- Эталонный резистор P321 номиналом 0,1 Ом;

- Ноутбук с установленным специально разработанным для данной задачи ПО;

Фотография измерительного комплекса представлена на рисунке 4.13.

Для калибровки используется метод одновременного сравнения измеренного флюксметром магнитного потока с потоком, вычисленным как произведение тока подаваемого на первичную обмотку делителя магнитного потока ДМП-01 из состава ГЭТ12-2011 на коэффициент взаимной индуктивности ДМП-01 на текущей декаде.

Для минимизации неопределенности измерений, связанной с временным дрейфом операционного усилителя и неравномерностью временных интервалов между измерениями, была разработана специальная измерительная программа и измерения выполнялись в автоматическом режиме. Пользовательский интерфейс программы представлен на рисунке 4.14.

Влияние дрейфа показаний флюксметра было минимизировано методически при помощи возврата к реперным точкам.

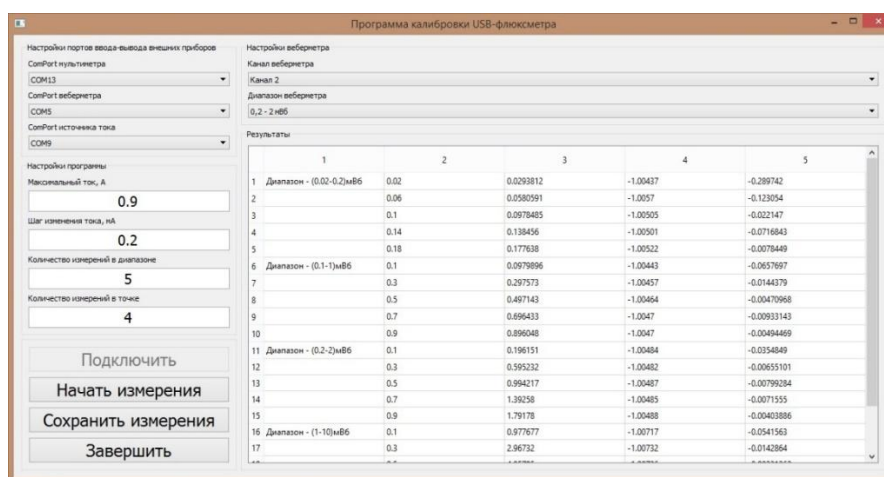


Рисунок 4.14 – Пользовательский интерфейс программы калибровки USB-флюксметра

Калибровочный коэффициент флюксметра определяется K_{cal} как:

$$K_{cal} = \frac{U \cdot K_{пр}}{R_{оп} \cdot \Phi_{изм} \cdot \left(1 + \frac{R_x}{R_{wb}}\right)}$$

где U – падение напряжения на опорном сопротивлении;

$\Phi_{\text{изм}}$ – измеренный USB-флюксометром поток;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования используемой декады ДМП-01;

R_x – сопротивление нагрузки;

R_{wb} – сопротивление входного канала веберметра;

$R_{\text{оп}}$ – опорное сопротивление.

Измерения проводились в диапазонах 0,2; 1; 2; и 10 мВб на втором входном канале флюксометра. Входное сопротивление второго канала флюксометра 10,402 кОм, сопротивление нагрузки 38 Ом, опорное сопротивление 0,1 Ом. Предварительно была проведена калибровка ДМП-01 от первичного эталона ГЭТ12-2011 и вычислены коэффициенты преобразования на рабочих диапазонах (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Коэффициенты преобразования ДМП-01

Предел, мГн	Коэффициент преобразования	Неопределенность, не более
1	0,99958	0,03%
2	1,99877	0,03%
10	9,99429	0,03%

По результатам исследования, в соответствии с [36], был составлен бюджет неопределенности измерений, представленный в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Бюджет неопределённости измерений

Параметр	Тип оценки	Распределение	Относительная стандартная неопределенность	Коэффиц. влияния	Вклад
Опорное сопротивление $R_{\text{оп}}$	В	Равномер.	0,01%	1	0,01%
$K_{\text{пр}}$ ДМП-01	В	Равномер.	0,02%	1	0,02%
Напряжение U	В	Равномер.	0,01%	1	0,01%
Сопротивление R_x	В	Равномер.	0,10%	0,003	0,00%
Сопротивление R_{wb}	В	Равномер.	0,10%	0,99	0,10%
Статистика (СКО)	А	Нормальное	0,10%	1	0,10%
Суммарная относительная неопределенность u_{oc}					0,14%

В результате исследований установлено, что суммарная стандартная неопределенность измерений магнитного потока в диапазоне 30-10000 мкВб составляет 0,25-0,024%. Расширенная неопределенность составляет 0,5 - 0,048 % (при доверительной вероятности $P=0,95$ и коэффициенте охвата 2).

4.3.2 Исследование неопределенности определения констант мер взаимной индуктивности

Как было описано выше, константа меры взаимной индуктивности $K_{вз}$ определяется как:

$$K_{вз} = \left(1 + \frac{R_x}{R_{wb}}\right) \cdot \frac{\Phi \cdot R_{оп}}{U},$$

где R_x - сопротивление нагрузки;

R_{wb} – входное сопротивление используемого канала флюксметра;

$R_{оп}$ – опорное сопротивление;

Φ – измеренный поток;

U – падение напряжения на опорном сопротивлении.

Как и в предыдущем случае, суммарную неопределенность удобнее выражать в относительной форме. Бюджет неопределенности измерения констант меры взаимной индуктивности представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Бюджет неопределённости измерения коэффициента меры взаимной индуктивности

Параметр	Тип оценки	Относительная стандартная неопределенн.	Коэффициент чувствит.	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%
Поправка R_x	В	0,10%	0,004	0,00%
Поправка R_{wb}	В	0,10%	1	0,10%
Статистика (СКО)	А	0,10%	1	0,10%
Суммарная относительная неопределенность $u_{оС}$				0,17%

4.3.3 Исследование неопределенности измерений максимальной и остаточной индукции

Исследования неопределенности измерений максимальной и остаточной индукции проводились на тороидальном образце №2 из состава набора государственных стандартных образцов МС-5. Всего было сделано 10 измерений при максимальном токе намагничивания 2,1 А (согласно документации к МС-5). Результаты измерений приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты измерений остаточного и максимального потока в образце МС-5-2

№	Ф _{max}			Ф _r		
	Восходящая петля, Вб	Нисходящая петля, Вб	Среднее, Вб	Восходящая петля, Вб	Нисходящая петля, Вб	Среднее, Вб
1	0,62342	0,62337	0,623396	0,590818	0,590741	0,59078
2	0,623382	0,623371	0,623377	0,590777	0,590801	0,590789
3	0,623347	0,623355	0,623351	0,590795	0,590752	0,590773
4	0,623314	0,62337	0,623336	0,590712	0,590704	0,590708
5	0,623362	0,623368	0,623365	0,590806	0,590696	0,590801
6	0,623458	0,62347	0,623464	0,590576	0,590551	0,590564
7	0,623406	0,623407	0,623406	0,590585	0,59061	0,590597
8	0,623354	0,623382	0,623368	0,590517	0,590589	0,590553
9	0,623413	0,623363	0,623388	0,590624	0,590584	0,590604
10	0,623338	0,623329	0,623333	0,590657	0,590563	0,590625
Среднее	0,6233794	0,6233785	0,623378	0,5906867	0,5906591	0,590679
СКО	0,007%	0,006%	0,006%	0,019%	0,015%	0,017%
СКО среднего	0,002%	0,002%	0,002%	0,006%	0,005%	0,005%

При измерении магнитного потока насыщения образца первоначально измеряется значение (показания) F магнитного потока USB-флюксметра при переходе от тока I = -I_m к I = +I_m. Магнитный поток насыщения при этом вычисляется по формуле:

$$\Phi_{mx} = \frac{F(-I_m, I_m)}{2}$$

Описанная выше операция повторяется n раз (n ≥ 4), после чего вычисляются среднее значение и стандартную неопределенность типа A магнитного

потока насыщения в абсолютной форме, используя формулы (суммирование по $k=1, \dots, n$):

$$\Phi_m = \frac{\sum \Phi_{mx_i}}{n}$$
$$u_A(\Phi_m) = \sqrt{\frac{\sum (\Phi_m - \Phi_{mx_i})^2}{n(n-1)}}$$

Здесь и далее согласно ГОСТ 8.377-80 в целях снижения неопределенности допускается частичное суммирование с опусканием нескольких первых m слагаемых (сумма по $k = m+1, \dots, n$, где $m < n$), так как неоднократное реверсирование тока в некоторых случаях способствует стабилизации магнитного состояния магнитного материала.

Относительная неопределенность типа А (в процентах) вычисляется по формуле:

$$u_{0A}(\Phi_m) = \frac{u_A(\Phi_m)}{\Phi_m} \cdot 100\%$$

Расчет магнитной индукции насыщения материала выполняется по формуле:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{w_2 \cdot S_0}$$

Стандартную неопределенность индукции насыщения образца типа А определяется как:

$$u_{0A}(B_m) = u_{0A}(\Phi_m)$$

Суммарная стандартная неопределенность (типа С) вычисляется по формуле:

$$u_{0C}(B_m) = \sqrt{u_{0A}^2(B_m) + u_{0B}^2(B_m)}$$

Бюджет неопределенности измерений индукции насыщения образца представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Бюджет неопределенности измерений индукции насыщения (на примере ГСО МС-5 комплект №7 образец №2)

Параметр	Тип оценки	Относительная стандартная неопределенность	Коэффициент чувствит.	Вклад
Магнитный поток Φ	В	0,1%	1	0,1%
Площадь сечения S	В	0,5%	1	0,5%
Статистика (СКО)	А	0,1%	1	0,1%
Суммарная относительная неопределенность u_{0C}				0,52%

Расширенная неопределенность измерения магнитной индукции образца с коэффициентом охвата 2 (при доверительной вероятности $P=0,95$) вычисляется по формуле:

$$u_{0,95}(B_m) = 2u_{0C}(B_m)$$

При измерении остаточного магнитного потока первоначально считываются три показания F магнитного потока при трех токах $I = -I_m$, $I = +I_m$ и $I=0$ подряд. Остаточный магнитный поток вычисляется по формуле:

$$\Phi_{rx} = F(0) - \frac{F(-I_m, I_m)}{2}$$

Операции предыдущего пункта выполняются n раз ($n \geq 4$), после чего вычисляется среднее значение и стандартную неопределенность типа А остаточного магнитного потока в абсолютной форме, используя формулы (сумма по $k=1, \dots, n$):

$$\Phi_r = \frac{\sum \Phi_{rx_i}}{n}$$

$$u_A(\Phi_r) = \sqrt{\frac{\sum (\Phi_r - \Phi_{rx_i})^2}{n(n-1)}}$$

Стандартная относительная неопределенность типа А вычисляется по формуле:

$$u_{0A}(\Phi_r) = \frac{u_A(\Phi_r)}{\Phi_r} \cdot 100\%$$

Расчет остаточной магнитной индукции выполняется по формуле:

$$B_r = \frac{\Phi_r}{w_2 \cdot S_0}$$

Стандартная неопределенность типа А измерения остаточной индукции образца определяется как:

$$u_{0A}(B_r) = u_{0A}(\Phi_r)$$

Суммарная стандартная неопределенность (типа С) вычисляется по формуле:

$$u_{0C}(B_r) = \sqrt{u_{0A}^2(B_r) + u_{0B}^2(B_r)}$$

Бюджет неопределенности измерений остаточной индукции образца представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Бюджет неопределенности измерений остаточной индукции (на примере ГСО МС-5 комплект №7 образец №2)

Параметр	Тип оценки	Относительная стандартная неопределенность	Коэффициент чувствит.	Вклад
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 относительная неопределенность u_{0C}				0,53%

Расширенная неопределенность измерения остаточной индукции образца при доверительной вероятности 0,95 вычисляется по формуле:

$$u_{0,95}(B_r) = 2u_{0C}(B_r)$$

4.3.4 Исследование неопределенности определения коэрцитивной силы

Сила тока в точке нулевого магнитного потока СО (далее - ток коэрцитивной силы СО) измеряется, когда известно ее приближенное значение I_{ca} (с ошибкой не более 10%), например, из результатов предыдущей калибровки. Для этого при 6 токах

$$\{-I_m; 0,9I_{ca}; 1,1I_{ca}; I_m; 0,9I_{ca}; -1,1I_{ca}\}$$

считывается серия из 6 показаний магнитного потока F подряд и вычисляется:

- ток коэрцитивной силы СО на восходящей ветви петли гистерезиса по формуле:

$$I_{cxUP} = I_1 - (I_2 - I_1) \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_2 - \Phi_1}$$

где $I_1 = 0,9I_{ca}$, $I_2 = 1,1I_{ca}$, $\Phi_1 = F(I_1) - F(-I_m)$, $\Phi_2 = F(I_2) - F(-I_m)$

- ток коэрцитивной силы СО на нисходящей ветви петли гистерезиса по формуле:

$$I_{cxDW} = I_1 - (I_2 - I_1) \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_2 - \Phi_1}$$

где $I_1 = -0,9I_{ca}$, $I_2 = -1,1I_{ca}$, $\Phi_1 = F(I_m) - F(I_1)$, $\Phi_2 = F(I_m) - F(I_2)$

Описанные выше операции выполняются n раз ($n \geq 4$).

Затем вычисляется среднее значение и стандартная неопределенность типа А тока коэрцитивной силы СО в абсолютной форме для восходящей и нисходящей ветвей порознь:

$$I_{cUp} = \frac{\sum I_{cUpk}}{n} \quad u_A(I_{cUp}) = \sqrt{\frac{\sum (I_{cUp} - I_{cUpk})^2}{n(n-1)}}$$

$$I_{cDn} = \frac{\sum I_{cDnk}}{n} \quad u_A(I_{cDn}) = \sqrt{\frac{\sum (I_{cDn} - I_{cDnk})^2}{n(n-1)}}$$

а также усредненное значение и стандартная неопределенность тока коэрцитивной силы в абсолютной форме по формулам:

$$I_c = \frac{I_{cUp} + I_{cDn}}{2}$$

$$u_A(I_c) = \sqrt{u_A^2(I_{cUp}) + u_A^2(I_{cDn})}$$

Стандартная неопределенность типа А тока коэрцитивной силы СО в процентах вычисляется для значений на обеих ветвях и усредненного значения по формулам:

$$u_{oA}(I_{cDn}) = \frac{u_{oA}(I_{cDn})}{I_{cDn}} \cdot 100\%$$

$$u_{oA}(I_{cUp}) = \frac{u_{oA}(I_{cUp})}{I_{cUp}} \cdot 100\%$$

$$u_{oA}(I_c) = \frac{u_{oA}(I_c)}{I_c} \cdot 100\%$$

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.

Коэффициенты чувствительности вычисляются как:

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

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

Стандартную неопределенность типа А измерений коэрцитивной силы определяется как:

$$u_{oA}(H_c) = u_{oA}(I_c)$$

Суммарная стандартная неопределенность (типа С) вычисляется по формуле:

$$u_{oC}(H_C) = \sqrt{u_{oA}^2(H_C) + u_{oB}^2(H_C)}$$

Бюджет неопределенности измерения коэрцитивной силы представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Бюджет неопределенности измерения коэрцитивной силы (на примере ГСО МС-5 комплект №7 образец №2)

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%
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	0,5%	1	0,2%
Статистика (СКО)	А	0,5%	1	0,5%
Суммарная стандартная неопределенность u_{oC}				0,8%

4.3.5 Исследование неопределенности определения максимальной магнитной проницаемости

Перед каждым измерением магнитной проницаемости СО производится размагничивание образца путем воздействия знакопеременного намагничивающего тока с амплитудой, равномерно убывающей от максимального значения до нуля. Параметры процесса размагничивания выбирают 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:

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

Затем строится ряд из групп знакопеременных пар токов:

$$[i_1; -i_1; i_2; -i_2; \dots; i_{10}; -i_{10}]$$

На предварительно размагниченном СО считываются показания F магнитного потока при токах построенного ряда подряд. 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 выполняют не менее 4-х раз, затем вычисляется среднее значение и стандартная неопределенность типа А магнитного потока и отношения потока к току в абсолютной форме для каждой i -ой точки основной кривой отдельно, используя формулы (суммирование по $k=1, \dots, n$):

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

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

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

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

где $i = i_1, i_2, \dots$

Относительная неопределенность типа А (в процентах) магнитного потока и отношения потока к току 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 $i = i_1, i_2, \dots$

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:

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

Стандартная неопределенность типа А измерения максимальной проницаемости образца определяется как:

$$u_{oA}(\mu_{max}) = u_{oA}(M_{bs}(i_{\mu_{max}}))$$

Суммарная стандартная неопределенность (типа С) вычисляется по формуле:

$$u_{oC}(\mu_{max}) = \sqrt{u_{oA}^2(\mu_{max}) + u_{oB}^2(\mu_{max})}$$

Бюджет неопределенности измерения максимальной проницаемости образца представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Бюджет неопределенности измерения максимальной проницаемости (на примере ГСО МС-5 комплект №7 образец №2)

Параметр	Тип оценки	Относительная стандартная неопределенн.	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 относительная неопределенность u_{oc}				0,72%

Выводы к главе 4

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.

Для упрощения работы оператора и минимизации методических ошибок был разработан программный блок подкомплекса, который состоит из набора программ, разработанных для передачи размера единицы магнитного потока Вб от ГЭТ 12-2011 магнитным материалам и мерам магнитной индукции. Программный подкомплекс 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.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современных потребностей промышленности, оборонной области и научных исследований показал, что актуальными задачами метрологического обеспечения магнитных измерений являются: расширение диапазона 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, а также расширение функционала ГЭТ 12-2011 в области прецизионных измерений 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 использованных источников

1. В.Я.Шифрин, В.Н. Хорев, В.Н. Калабин, С.Л. Воронов, А.Е. Шилов, «Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции», «Измерительная техника», № 7, стр. 3-7, Москва, 2012 г.
2. ГОСТ 8.030-2013 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции.
3. ГОСТ 8.188-85. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от 2 до 10 Тл при температурах от 4,2 до 300 К и в диапазоне от 0,1 до 2 Тл при температурах от 4,2 до 77 К.
4. В.И.Лукьянов, Р.Н.Перепелкина, В.А.Тищенко «Государственный первичный эталон единицы напряженности магнитного поля в диапазоне частот 0,01 — 30 МГц», «Измерительная техника», № 12, стр. 12-16, Москва, 2011 г.
5. Е.А.Волегова, М.А.Малыгин, Т.И.Маслова, А.С.Волегов, «Государственный первичный эталон единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ », «Измерительная техника», № 3, стр. 7-10, Москва, 2018 г.
6. Slawomir Tumanski «Handbook of Magnetic Measurements», Taylor & Francis Group, 2011.
7. С. Г. Гуржин, В. И. Жулев, С. В. Никитин «Датчики на основе новых магниторезистивных эффектов», «Датчики и системы», №9, 54-63, 2008.
8. Афанасьев Ю. В. «Феррозондовые приборы», Ленинград, «Энергоатомиздат», 1986, 188 с.

9. Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин, «Средства измерений параметров магнитного поля», Ленинград, «Энергия», Ленинградское отделение, 1979 г.
10. Е.Б. Александров, А.К. Вершовский, «Современные методы квантовой магнитометрии», «Успехи физических наук», т.179, №6, стр. 605 – 637, Москва, 2009 г.
11. И.Буслов, В.Бауткин, А.Драпезо, Н.Слободжанюк, А.Лукьянов, В.Ярмолочич «Магнитометры на эффекте Холла», «Современная электроника», №3, стр. 38-42, Москва, 2011 г.
12. С. Reymond «Magnetic Resonance techniques», Cern Acceleration School. – Анасарпи, CERN 98-05, p.219-231, Italy, 1998.
13. Блинов Е.В., Житников Р.А., Е.А.Ильина, В.А.Шифрин «Метрологические характеристики щелочно-гелиевых магнитометров», стр. 22-23, ВСООАМ, Ленинград. 1987.
14. 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.
15. ГОСТ 8.144-97 «Метрология. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,05 до 2 Тл».
16. В.Я. Шифрин, В.Н. Калабин, Д.И. Беляков, «Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции постоянного поля геомагнитного и гипомагнитного диапазонов», Измерительная техника, № 9, стр. 46 – 48, Москва, 2016.
17. I. Altarev, E. Babcock et al «A magnetically shielded room with ultra low residual field and gradient», Review of Scientific Instruments 85, 075106 (2014).

18. Shifrin V.Ya., Khorev V.N., Rasson J., Park P.G., «International comparisons to establish the traceability in the global network of geomagnetic observatories to SI units», Metrologia, T. 51. № 1A. С. 01015, 2014.
19. Hall, M J, Harmon, S A C, Turner, S, «Magnetic environment and magnetic field standards at NPL for the calibration of low noise management magnetometers and gradiometers for cleanliness studies», ESA Workshop on Aerospace EMC, 21-23 May 2012, Venice, Italy.
20. H.Harcken, R.Ketzler et al, «The natural line width of low field nuclear magnetic resonance spectra», Journal of Magnetic Resonance, Volume 206, Issue 1, September 2010, Pages 168-170.
21. Po Gyu Park, Young Gyun Kim, Wan-Seop Kim, V. Ya. Shifrin «Ac/dc magnetic flux density standard systems at KRISS», Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. CPEM 2010. – Daejeon, June 13-18, 2010. , p.312-313.
22. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерений магнитных параметров материалов. «Энергоатомиздат», Ленинград, 1986, 216 с.
23. Гордон В.И., Антонов В.Г. Оценка возможности применения метода ступенчатого намагничивания для точного измерения статических магнитных параметров материалов. «Метрология», 1982, №6, с.48-55.
24. Антонов В.Г., Гребенюк Н.В., Короленко В.И., Хорев В.Н. Эталонная измерительная установка для воспроизведения и передачи единицы магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах. «Измерительная техника», 1987, № 4, с.49-50
25. Антонов В.Г, Хорев В.Н. О новой государственной поверочной схеме для средств измерения магнитного потока. «Измерительная техника», 1987, № 3, с.46-47
26. ГОСТ 8.377-80 ГСИ. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.

27. РД 50-489-84. Методические указания. Образцовые 3-го разряда меры магнитного потока (стандартные образцы) и рабочие установки для измерений параметров магнитных и слабоферромагнитных материалов. Методы и средства поверки.
28. Peter J. Mohr, David B., Newell, Barry N. Taylor, 'CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants'2014', National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8420, USA, Dated: 25 June 2015.
29. V.Ya.Shifrin, P.G.Park, V.N.Khorev, C.H. Choi, Experimental determination of the gyromagnetic ratio of the He-4 atoms in terms of that of He-3 nuclei, IEEE Trans, Instr. Meas., 46(2), 1997.
30. Патент №2650769 от 17.04.2018 «Способ воспроизведения магнитной индукции в гипогеомагнитном диапазоне». Авторы: Шифрин Владлен Яковлевич, Калабин Владимир Николаевич, Беляков Денис Игоревич.
31. 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.
32. Н.М. Померанцев, В.М. Рыжков, Г.В. Скроцкий, «Физические основы квантовой магнитометрии», изд. Наука, стр. 1 – 448, Москва, 1972 г.
33. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. «Квантовая магнитометрия», Геофизическая аппаратура.- 1967.- Вып.33.- С.13-94.
34. Кендалл М., Стюарт А. Статистические выводы и связи. М., Наука, Физматлит, Т. 2, 1973.
35. Елисеева И.И., Курышева С.В., Нерадовская Ю.В., Беляков Д.И., Галиуллина Л.М., Кабачек А.В. «ЭКОНОМЕТРИКА», Учебник / Москва, 2017. Сер. 61 Бакалавр и магистр. Академический курс (1-е изд.).
36. Фридман А.Э. «Основы метрологии. Современный курс», 2008, СПб, НПО «Профессионал».

Приложение А. Акты внедрения

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

РОССТАНДАРТ



Федеральное государственное
унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19, Тел. (812) 251-76-01, факс (812) 713-01-14
e-mail: info@vniim.ru, <http://www.vniim.ru> ОКПО 02566450, ОГРН 1027810219007 ИНН/КПП 7809022120/783901001

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Е. Е. Кривцов
20__ г.



АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
научного сотрудника ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»
Белякова Дениса Игоревич

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Белякова Д.И., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, нашли внедрение в лаборатории государственных эталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева».

Разработанные измерительные комплексы внедрены при выполнении следующих НИОКР и в рамках постоянных метрологических работ:

1. НИР «Проведение исследований в области измерений электрических и магнитных величин по разработке квантового и индукционного компараторов единиц магнитной индукции и магнитного потока с целью улучшения метрологических характеристик государственного первичного

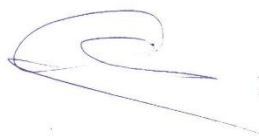
эталона единиц магнитных величин», шифр «Магнит» по Государственному контракту № 120-138 от 8.06.2015 г., в рамках ВЦП «Проведение фундаментальных исследований в области метрологии, государственных (в том числе первичных) эталонов единиц величин».

2. ОКР «Развитие единой эталонной базы в области измерений магнитных величин – магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции» (гос. контракт №120-89 от 16.06.2017), шифр «Градиент», в рамках выполнении работ по совершенствованию государственного первичного эталона ГЭТ12-2011.

3. При выполнении работ по поверке и калибровке прецизионных средств измерений магнитной индукции, в том числе, квантовых и других видов магнитометров и мер магнитной индукции.

4. При выполнении работ по разработке и исследованию методик измерений магнитного потока и параметров стандартных образцов магнитных материалов.

Руководитель лаборатории
государственных эталонов в
области магнитных измерений,
д.т.н., проф.



Шифрин В.Я.



13.08.2017

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Белякова Дениса Игоревича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы «Разработка и исследование методов и средств измерений для расширения диапазонов и функций государственного первичного эталона при передаче единиц магнитной индукции и магнитного потока вторичным и рабочим эталонам», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в ООО «ГЕОДЕВАЙС».

Полученные в рамках данной работы результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов преобразования цезиевого магнитометра позволили усовершенствовать метрологические и технические параметры серийных квантовых магнитометров ПКМ-1М и разрабатываемого ООО «ГЕОДЕВАЙС» нового поколения полевых геологоразведочных магнитометров QuantumMag.

Внедрение результатом данной диссертационной работы также рекомендовано на следующих предприятиях, эксплуатирующих и/или производящих квантовые магнитометры:

- АО «Геологоразведка»
- ООО «Морская геодезия»
- ОАО «НПП «Радар ммс»
- ОАО «МАГЭ»

Генеральный директор
ООО «ГЕОДЕВАЙС»



/ А.В. Полицина /
Тел.: (812) 748-18-82

ООО «ГЕОДЕВАЙС»
РФ, 199406, Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
УЛ. ГАВАНСКАЯ, Д.41, ПОМ.89.
ТЕЛ.: +7 812 7481882
ФАКС.: +7 812 7481882
ЭЛ. ПОЧТА: OFFICE@GEODEVICE.RU

ИНН 7801625938
КЛП 780101001
ОГРН 1147847102732
ОКАТО 40263563000
ОКПО 35471486

Р/С 40702810632230000704 В
ФИЛИАЛЕ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ»
ОАО «АЛЬФА-БАНК»
К/С 30101810600000000786
БИК: 044030786

GEODEVICE.RU



Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
современных телекоммуникационных
технологий»

Ново-Ленинградская ул., д.10
г. Смоленск, 214012
тел. (4812) 70-60-00; 27-15-08
факс.(4812) 70-60-01; 27-15-79
e-mail: office@niistt.ru
<http://www.niistt.ru>
ИНН 6730046954 КПП 672901001

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «НИИ СТТ»
Богомолов А.В.
апреля 2019г.



АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Белякова Дениса Игоревича

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационного исследования Белякова Дениса Игоревича на тему: «Разработка и исследование методик и средств измерений для расширения диапазонов и функций государственного первичного эталона при передаче единиц магнитной индукции постоянного поля и магнитного потока вторичным и рабочим эталонам», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, актуальны, представляют практический интерес и используются в АО «НИИ СТТ».

В ходе совместных работ АО «НИИ СТТ» и ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева" по договору №18-ЕП/223 от 29.08.2017 и контракту 367-ЭА/2018 от 08.10.2018 были созданы «Блок источника сигнала намагничивания повышенной точности БИСН-15/1» НЛСД.411.174.030 и «Компаратор магнитного потока КМП-09» НЛСД.411.174.031

Проведенные в рамках диссертационной работы разработки и исследования эталонного средства измерений магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах обеспечили усовершенствование технических характеристик указанных приборов. Беляковым Д.И. оптимизированы методики обработки данных при выполнении измерительных операций. Это позволило использовать БИСН-15/1 и КМП-09 в качестве элементов разрабатываемой модернизированной версии государственного первичного эталона ГЭТ12-2011.

Заместитель генерального директора
по направлению «Радиоэлектроника», к.т.н.




Пугач Е.Е.

Ведущий научный
сотрудник НИО, к.т.н.

Строев К.Н.

Приложение Б. Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2650769

**СПОСОБ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МАГНИТНОЙ
ИНДУКЦИИ В ГИПОГЕОМАГНИТНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Патентообладатель: *Российская Федерация от имени которой
выступает Федеральное агентство по техническому
регулированию и метрологии (Росстандарт) (RU)*

Авторы: *Шифрин Владлен Яковлевич (RU), Калабин Владимир
Николаевич (RU), Беляков Денис Игоревич (RU)*


Заявка № 2017122556
Приоритет изобретения 26 июня 2017 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 17 апреля 2018 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 26 июня 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



**Приложение В. Методика калибровки магнитометров постоянного
магнитного поля в «гипогеомагнитном» диапазоне**

	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	Редакция: 01
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» НИЛ-2205	МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ СК 03 – 2205 – МК - 09 - Т	Издание: 2019
		Экземпляр:

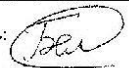


«УТВЕРЖДАЮ»
 Заместитель директора
 по научной работе


 Кривцов Е.П.
 15 января 2019 г.



**МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ
магнитометров постоянного магнитного поля
в диапазоне от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ Тл**

СК 03-2205-МК-09-Т

Разработано: Научный сотрудник НИЛ-2205 Беляков Д.И.	Согласовано: Руководитель НИЛ-2205 Шифрин В.Я.	Согласовано: Руководитель НИЛ-2022 Чуновкина А.Г.
Подпись: 	Подпись: 	Подпись: 

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 2 из 8
СК 03-2205-МК-09-Т		

Настоящая методика распространяется на процедуру калибровки магнитометров постоянной магнитной индукции (МИ) в диапазоне от $1 \cdot 10^{-8}$ Тл до $1 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Нормативные ссылки:


- ГОСТ Р 8.879-2014– Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению;
- РМГ 29-2013– Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения;
- Паспорт ГЭТ 12-2011.

1 Операции калибровки

1.1 При проведении калибровки должны выполняться операции, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Операции калибровки

Наименование операции	Номер пункта	Проведение операций при первичной калибровке	Проведение операций при периодической калибровке
Внешний осмотр	5.1	+	+
Опробование	5.2	+	+
Определение поправок и стандартной неопределённости по типу А измерений для магнитометров.	6.1.1- 6.1.5	+	+
Определение стандартной неопределённости по типу В и суммарной стандартной неопределённости измерений для магнитометров	6.1.6	+	+

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл	Редакция:
		Издание: 2019
	СК 03-2205-МК-09-Т	Стр. 3 из 8

2 Средства калибровки

2.1 При проведении калибровки магнитометров постоянного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл применяются эталонная трехкомпонентная мера - компаратор средств измерений магнитной индукции постоянного поля ЭТМК, эталонный гелий-цезиевый магнитометр ЭГМ и мультиметр Agilent 3458A из состава государственного первичного эталона ГЭТ 12-2011, а также модуль ЦАП LCard 34-4 и ноутбук со специализированным программным обеспечением (ПО) «Воспроизведение магнитной индукции «гипогеомагнитного» диапазона».

Характеристики используемых средств калибровки:

Подкомплекс воспроизведения и передачи единицы Тл магнитной индукции постоянного поля ГЭТ12-2011:

Диапазон воспроизведения и передачи, мкТл	1-1000
Относительная неопределенность типа А	$2 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-8}$
Относительная неопределенность типа В	$2,5 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-7}$
Суммарная относительная неопределенность	$3 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-7}$

Мультиметр Agilent 3458A:


Пределы измерений	100 мВ;1 В;10 В;100 В;1000 В
Суммарная неопределенность измерений	100 мВ - (0,0009% · U изм. + 0,0003% · U предел.)
	1 В - (0,0008% · U изм. + 0,00003% · U предел.)
	10 В - (0,0008% · U изм. + 0,000005% · U предел.)
	100 В - (0,001% · U изм. + 0,00003% · U предел.)
	1000 В - (0,001% · U изм. + 0,00001% · U предел.)

ЦАП LCard 34-4

Диапазон воспроизведения, В	=10
Суммарная неопределенность воспроизведения, %	1

3 Требования безопасности

3.1 К проведению калибровки допускаются лица, изучившие настоящий документ.

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл	Редакция:
		Издание: 2019
	СК 03-2205-МК-09-Т	Стр. 4 из 8

3.2 При работе должны быть соблюдены общие требования правил техники безопасности при работе с электроустановками с напряжением до 1000 В.

3.3 Лица, допущенные к работе, должны проходить проверку знаний по технике безопасности не реже 1 раза в год.

3.4 Проведение калибровки не оказывает вредных влияний на окружающую среду и является экологически безопасной процедурой.

4 Условия калибровки

4.1 При проведении калибровки должны соблюдаться нормальные условия применения, нормированные в технической документации на калибруемые средства измерений (СИ).

4.2 При отсутствии данных о нормальных условиях калибровки СИ должны соблюдаться следующие условия:

- температура, °С	20±2;
- атмосферное давление, кПа	84-106;
- относительная влажность воздуха, %	30-90;

4.3 Калибруемые и эталонные средства измерений при первичной калибровке выдерживают при условиях калибровки по п. 4.1 в течение времени, определяемого в технической документации (далее – ТД).

4.4 Калибруемые и эталонные СИ прогревают под током в течение времени, нормированного в ТД.

5 Подготовка к калибровке


5.1 Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра должно быть установлено соответствие калибруемого СИ следующим требованиям.

СИ должно быть укомплектовано в соответствии с требованиями ТД на него.

На узлах и блоках СИ должны быть указаны его наименование, тип, порядковый номер по системе предприятия-изготовителя, наименование предприятия-изготовителя или его товарный знак. Кроме того, у СИ должны быть указаны нормы на инструментальную неопределенность измерений.

Калибруемые СИ не должны иметь механических повреждений и неисправностей, влияющих на их нормальную работу.

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл	Редакция:
		Издание: 2019
	СК 03-2205-МК-09-Т	Стр. 5 из 8

К СИ, прошедшим ранее калибровку, должен быть приложен сертификат предыдущей калибровки.

5.2 Опробование

При опробовании проверяют действие доступных без вскрытия СИ органов контроля, управления, регулирования, настройки и коррекции.

6 Проведение калибровки и обработка результатов измерений.


6.1 Определение стандартной неопределённости при калибровке магнитометров.

6.1.1 Стандартную неопределённость измерений для магнитометров определяют методом одновременных сличений эталонного и калибруемого магнитометров при помощи ЭТМК из состава ГЭТ, применяемой в роли компаратора.

6.1.2 Процедура калибровки магнитометров постоянного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл, включает в себя следующие процедуры:

- подключение используемых СИ, которое производится согласно РЭ ГЭТ 12-2011;
- автоматическая компенсация двух ортогональных поперечных компонент, производимая в ЭТМК двух-объёмными компенсаторами вариаций продольной и поперечной компонент (согласно РЭ ГЭТ 12-2011);
- измерение эталонным магнитометром ЭГМ начального стабилизированного значения вертикальной компоненты B_{z0} МИ локального поля Земли при фиксированном значении опорной частоты f_0 фазового компаратора частот из состава системы стабилизации МИ ГЭТ 12-2011;
- подбор значения тока I_{z0} , пропускаемого по обмотке вертикальной компоненты меры ЭТМК, таким образом, чтобы ЭГМ показал удвоенное значение величины МИ - $2B_{z0}$;
- установка в интерфейсе ПО значения тока I_{z0} и значения воспроизводимой МИ ΔB_z (при этом автоматически изменяется опорная частота фазового детектора);
- измерение воспроизводимого значения МИ B_z эталонным магнитометром ЭГМ, воспроизводимого ГЭТ;
- вычисление значения ΔB_z по формуле:

$$\Delta B_z = B_z - 2B_{z0};$$

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 6 из 8
СК 03-2205-МК-09-Т		

- изменение полярности тока системы воспроизведения поля на противоположную, и измерение воспроизводимой МИ ΔB_z калибруемым магнитометром.

Процедура повторяется для всех значений магнитной индукции, подлежащих воспроизведению.

6.1.3 При каждом значении МИ проводят по 10 единичных измерений и определяется среднее арифметическое значение наблюдений (B_m) для каждого значения МИ:

$$B_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i$$

где B_i – результат единичного измерения МИ калибруемым магнитометром;

n – число измерений.

6.1.4 Экспериментальное стандартное отклонение наблюдаемых значений B_m определяется как:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (B_m - B_i)^2}$$

Стандартная неопределённость типа А среднего значения B_m , при $n-1$ степенях свободы, находится по формуле:

$$s(B_m) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (B_m - B_i)^2}$$

6.1.5 Стандартная неопределённость по типу В $u(B)$ определяется как композиция неопределённости, связанная с неопределённостями измерения и воспроизведения магнитной индукции ГЭТ 12-2011 (неопределённости измерений магнитометра ЭГМ, неоднородность МИ в ЭТМК, нестабильность B_{z0} , нестабильность B_z).

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл	Редакция:
		Издание: 2019
	СК 03-2205-МК-09-Т	Стр. 7 из 8

Бюджет неопределенности передачи размера единицы Тл:

Параметр X_i	Тип оценки	Стандартная неопределенность, нТл	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности	Вклад, нТл
ЭГМ	A	0,003	Нормальное	$\sqrt{2}$	0,004
	B	0,03	Равномерное	$\sqrt{2}$	0,04
Несоднородность МИ в ЭГМК(Ø 10 см)	B	0,03	Равномерное	1	0,03
Нестабильность B_{20} (градиент вариаций и статизм)	A	0,05	Нормальное	1	0,05
	B	0,1	Равномерное	1	0,1
Нестабильность B_z (нестабильность тока)	A	0,015	Нормальное	1	0,015
Суммарная неопределенность, нТл					0,124

6.1.6 Суммарная стандартная неопределенность результата калибровки определяется как:

$$u_c = \sqrt{s^2(B_m) + u^2(B)}$$


6.1.7. Расширенная неопределенность результата калибровки U_c при вероятности охвата 0,95 (коэффициент охвата $k=2$) вычисляется как:

$$U_c = 2u_c$$

6.1.6 Дополнительная погрешность магнитометра при изменении ориентации оси датчика от оптимального угла и изменение показаний магнитометра за нормированный интервал времени от момента включения питания определяется в соответствии с документом РД 50-487-84 «Методические указания. Средства измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля от $1 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ Тл образцовые. Методы и средства поверки».

7 Оформление результатов калибровки


7.1 При положительных результатах калибровки магнитометров на них выдают сертификат калибровки по установленной форме.

	Методика калибровки магнитометров постоянного магнитного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Тл СК 03-2205-МК-09-Т	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 8 из 8

7.2 В сертификате указывают следующие характеристики:

- условия калибровки, результаты измерений, поправка и стандартная неопределённость типа А для каждого поддиапазона измерений;
- таблица экспериментальных данных;
- расширенная неопределенность результата калибровки при вероятности охвата 0,95;

**Приложение Г. Методика калибровки квантового магнитометров
в диапазоне 1-25 мТл**

 ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» НИЛ-2205	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	Редакция: 01
	МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ СК 03 – 2205 – МК - 11 – С	Издание: 2019
		Экземпляр:

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора
по научной работе

Кривцов Е.П.


2019 г.



**МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ
квантового цезиевого магнитометра
в диапазоне от 1 до 25 мТл**

СК 03-2205-МК-11-С

Разработано: Научный сотрудник НИЛ-2205 Беляков Д.И.	Согласовано: Руководитель НИЛ-2205 Шифрин В.Я.	Согласовано: Руководитель НИЛ-2022 Чуновкина А.Г.
Подпись: 	Подпись: 	Подпись: 

	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мТл СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 2 из 8

Настоящая методика распространяется на процедуру калибровки квантового цезиевого магнитометра постоянной магнитной индукции (МИ) в диапазоне от 1 мТл до 25 мТл.

Нормативные ссылки:

- ГОСТ Р 8.879-2014– Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению;
- РМГ 29-2013– Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения;
- Паспорт ГЭТ 12-2011.

1 Операции калибровки


1.1 При проведении калибровки должны выполняться операции, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Операции калибровки

Наименование операции	Номер пункта	Проведение операций при первичной калибровке	Проведение операций при периодической калибровке
Внешний осмотр	5.1	+	+
Опробование	5.2	+	+
Определение суммарной стандартной неопределённости измерений магнитометра	6.1.6	+	+

2 Средства калибровки

2.1 При проведении калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1 - 25 мТл применяются эталонная трехкомпонентная мера - компаратор средств измерений магнитной индукции постоянного поля ЭТМК, кварцевые соленоиды С4-2 и ЭСТВ, эталонный гелий-цезиевый магнитометр ЭГМ из состава государственного первичного эталона ГЭТ 12-2011, ЯМР-магнитометра, мера-компаратор магнитной индукции МКМИ

	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мТл СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 3 из 8

и ноутбук со специализированным программным обеспечением (ПО) «Расчет коэффициентов преобразования квантового цезиевого магнитометра».

Характеристики используемых средств калибровки:

Подкомплекс воспроизведения и передачи единицы Тл магнитной индукции постоянного поля ГЭТ12-2011:

Диапазон воспроизведения и передачи, мкТл	1-1000
Относительная неопределенность типа А	$2 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-8}$
Относительная неопределенность типа В	$2,5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-7}$
Суммарная относительная неопределенность	$2,5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-7}$

ЯМР магнитометр

Диапазон измерений магнитной индукции	8,5 мТл...2,6 Тл
Поддиапазоны измерений (Тл)	0,007 - 0,028; 0,018 - 0,046; 0,044 - 0,12; 0,11 - 0,4; 0,29 - 0,78; 0,72 - 2,600.
Стандартное отклонение (СКО) единичного измерения (случайное) при времени интегрирования 1 с.	$< 5 \cdot 10^{-7}$
Нестабильность коэффициента преобразования МИ в частоту ЯМР-тесламетра (СКО) в год	$< 1 \cdot 10^{-6}$

Эталонная трехкомпонентная мера-компаратор магнитной индукции (ЭТМК)


Диапазон воспроизведения магнитной индукции:	от 1 мкТл до 2 мТл
Расчётная неоднородность магнитной индукции в рабочей области в виде сферы диаметром 10 мм *:	$< 2 \cdot 10^{-7}$
Нестабильность создаваемой мерой МИ при внешней компенсации Тип А Тип В	$3 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-7}$

Мера-компаратор магнитной индукции МКМИ

Диапазон воспроизведения магнитной индукции при токе до 1,7 А:	от 1 мТл до 25 мТл
Расчётная константа преобразования:	15,690 мТл/А
Расчётная неоднородность магнитной индукции в рабочей области в виде сферы диаметром 10 мм *:	$< 2 \cdot 10^{-6}$
Нестабильность создаваемой мерой МИ:	$< 2 \cdot 10^{-6}/30$ мин.
Температурный коэффициент константы КМИ:	$< 2 \cdot 10^{-5}$ нТл/°С
Свободный доступ к рабочему объёму по оси:	не менее Ø 100мм
Свободный доступ к рабочему объёму по радиусу (зазор):	не менее 16 мм

3 Требования безопасности

3.1 К проведению калибровки допускаются лица, изучившие настоящий документ.

	Методика калибровки квантового пезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мТл СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 4 из 8

3.2 При работе должны быть соблюдены общие требования правил техники безопасности при работе с электроустановками с напряжением до 1000 В.

3.3 Лица, допущенные к работе, должны проходить проверку знаний по технике безопасности не реже 1 раза в год.

3.4 Проведение калибровки не оказывает вредных влияний на окружающую среду и является экологически безопасной процедурой.

4 Условия калибровки

4.1 При проведении калибровки должны соблюдаться нормальные условия применения, нормированные в технической документации на калибруемые средства измерений (СИ).

4.2 При отсутствии данных о нормальных условиях калибровки СИ должны соблюдаться следующие условия:

- температура, °С	20±2;
- атмосферное давление, кПа	84-106;
- относительная влажность воздуха, %	30-90;

4.3 Калибруемые и эталонные средства измерений при первичной калибровке выдерживают при условиях калибровки по п. 4.1 в течение времени, определяемого в технической документации (далее – ТД).


4.4 Калибруемые и эталонные СИ прогревают под током в течение времени, нормированного в ТД.

5 Подготовка к калибровке

5.1 Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра должно быть установлено соответствие калибруемого СИ следующим требованиям:

- СИ должно быть укомплектовано в соответствии с требованиями ТД на него;
- На узлах и блоках СИ должны быть указаны его наименование, тип, порядковый номер по системе предприятия-изготовителя, наименование предприятия-изготовителя или его товарный знак. Кроме того, у СИ должны быть указаны нормы на инструментальную неопределённость измерений;
- Калибруемое СИ не должно иметь механических повреждений и неисправностей, влияющих на их нормальную работу;

	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мТл СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 5 из 8

– К СИ должен быть приложен сертификат предыдущей калибровки.

Подключение производится согласно РЭ квантового компаратора.

5.2 Опробование

При опробовании проверяют действие доступных без вскрытия СИ органов контроля, управления, регулирования, настройки и коррекции.


6 Проведение калибровки и обработка результатов измерений.

6.1 Определение стандартной неопределённости при калибровке магнитометров.

6.1.1 Стандартную неопределённость измерений для калибруемого магнитометра определяют методом непосредственного сличения эталонного и калибруемого магнитометров при помощи ЭТМК из состава ГЭТ, а также калибруемого и ЯМР магнитометра при помощи МКМИ, применяемых в роли компаратора.

6.1.2 Процедура калибровки магнитометров постоянного поля в диапазоне 1 - 25 мТл, включает в себя следующие процедуры:

- автоматическая компенсация вертикальной компоненты локального магнитного поля и его вариаций;
- автоматическая компенсация двух ортогональных поперечных компонент, производимая в ЭТМК двух-объёмными компенсаторами вариаций продольной и поперечной компонент (согласно РЭ ГЭТ 12-2011);
- установка в центр меры ЭТМК двух эталонных кварцевых соленоида С4-2 и ЭСТВ так, чтобы их магнитные оси были ориентированы вертикально, центры рабочих пространств совмещены и обмотки подключены последовательно;
- путем подачи на кварцевые соленоиды тока от стабилизатора тока из состава ГЭТ12-2011, поочередное воспроизведение в центре соленоидов МИ из ряда (0,8;0,9;1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0) мТл;
- поочередное измерение воспроизводимой в ЭТМК МИ эталонным гелий-цезиевым магнитометром и калибруемым квантовым цезиевым магнитометром;
- путем подачи на обмотку МКМИ тока от стабилизатора тока из состава ГЭТ12-2011, поочередное воспроизведение в центре МКМИ МИ из ряда (8;10; 12; 14; 16; 18; 19; 20; 21, 22; 23; 24; 25) мТл;
- поочередное измерение воспроизводимой в МКМИ МИ ЯМР магнитометром и калибруемым квантовым цезиевым магнитометром;

	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мТл СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 6 из 8

- внесение результатов калибровки в программу «Расчет коэффициентов преобразования квантового цезиевого магнитометра», вычисление коэффициентов преобразования квантового цезиевого магнитометра;

6.1.3 Оценка неопределенности

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 1-2 мТл представлен в таблице 2.

Таблица 2– Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 1-2 мТл

Компоненты неопределённости	Тип оценки	Распределение	СКО, 10^{-6}
Эталонный магнитометр, ЭГМ	Тип В	Равномерное	0,05
Неоднородность МИ в ЭТМК (Ø 10 мм)	Тип В	Равномерное	0,2
Нестабильность МИ ЭТМК	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	0,2
Суммарная неопределённость	Тип В	Нормальное	0,3
	Тип А	Нормальное	0,3

Зависимость индукции от средней частоты при измерении квантовым цезиевым магнитометром определяется как полином четвертого порядка:

$$V = a_1 \cdot f + a_2 \cdot f^2 + a_3 \cdot f^3 + a_4 \cdot f^4$$

Коэффициенты полинома a_1 и a_3 определяются как:

$$a_1 = \frac{\sum(B_i \cdot f_i) \cdot \sum f_i^6 - \sum(B_i \cdot f_i^3) \cdot \sum f_i^4}{\sum f_i^2 \cdot \sum f_i^6 - (\sum f_i^4)^2}$$

$$a_3 = \frac{\sum(B_i \cdot f_i^3) \cdot \sum f_i^2 - \sum(B_i \cdot f_i) \cdot \sum f_i^4}{\sum f_i^2 \cdot \sum f_i^6 - (\sum f_i^4)^2}$$

Бюджеты неопределенности определения коэффициентов a_1 и a_3 представлены в таблицах 3 и 4.


	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мГц	Редакция:
		Издание: 2019
	СК 03-2205-МК-11-С	Стр. 7 из 8

Таблица 3 - Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_1

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial x_1}$	$4,4 \cdot 10^{-12}$
...
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial x_n}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$
y_1	$u_{0A}(x) \cdot y_1$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial y_1}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$
y_1	$u_{0B}(x) \cdot y_1$	B	$\frac{\partial a_1}{\partial y_1}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$
...
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	A	$\frac{\partial a_1}{\partial y_n}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	B	$\frac{\partial a_1}{\partial y_n}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$
Суммарная стандартная неопределенность типа A				$8,4 \cdot 10^{-11}$
Суммарная стандартная неопределенность типа B				$8,3 \cdot 10^{-11}$

Таблица 4 - Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_3

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial x_1}$	$1,2 \cdot 10^{-21}$
...
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial x_n}$	$9,7 \cdot 10^{-24}$
y_1	$u_{0A}(x) \cdot y_1$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial y_1}$	$2,6 \cdot 10^{-21}$
y_1	$u_{0B}(x) \cdot y_1$	B	$\frac{\partial a_3}{\partial y_1}$	$2,6 \cdot 10^{-21}$
...
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	A	$\frac{\partial a_3}{\partial y_n}$	$3,3 \cdot 10^{-22}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	B	$\frac{\partial a_3}{\partial y_n}$	$3,3 \cdot 10^{-22}$
Суммарная стандартная неопределенность типа A				$5,2 \cdot 10^{-21}$
Суммарная стандартная неопределенность типа B				$4,9 \cdot 10^{-21}$

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 10-25 мГц представлен в таблице 5.


	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мГц	Редакция:
		Издание: 2019
	СК 03-2205-МК-11-С	Стр. 8 из 8

Таблица 5– Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 10-25 мГц

	Тип оценки	Распределение	Стандартная неопределённость, 10 ⁻⁶
Определение констант a_1 и a_3	Тип В	Равномерное	0,5
Неоднородность МИ в ЭМК (Ø 10 мм)	Тип В	Равномерное	2
Нестабильность МИ	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	0,2
	Тип А	Нормальное	0,2
Суммарная неопределённость	Тип В	Нормальное	2,1
	Тип А	Нормальное	0,3

Коэффициенты полинома a_2 и a_4 определяются как:

$$a_2 = \frac{\sum B_i \cdot f_i^2 \cdot \sum f_i^8 - \sum B_i \cdot f_i^4 \cdot \sum f_i^6}{\sum f_i^4 \cdot \sum f_i^8 - (\sum f_i^6)^2};$$

$$a_4 = \frac{\sum B_i \cdot f_i^4 \cdot \sum f_i^4 - \sum B_i \cdot f_i^2 \cdot \sum f_i^6}{\sum f_i^4 \cdot \sum f_i^8 - (\sum f_i^6)^2}$$

Бюджеты неопределённости определения a_2 и a_4 представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 - Бюджет неопределённости измерения коэффициента a_2

Величина	Стандарт. неопределённость	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial x_1}$	$3,5 \cdot 10^{-15}$
...	...	А	...	
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial x_n}$	$1,4 \cdot 10^{-16}$
y_1	$u_{0A}(x) \cdot y_1$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial y_1}$	$2,1 \cdot 10^{-21}$
y_1	$u_{0B}(x) \cdot y_1$	В	$\frac{\partial a_2}{\partial y_1}$	$1,5 \cdot 10^{-20}$
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	А	$\frac{\partial a_2}{\partial y_n}$	$1,6 \cdot 10^{-22}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	В	$\frac{\partial a_2}{\partial y_n}$	$1,1 \cdot 10^{-21}$
Суммарная стандартная неопределённость типа А				$6,2 \cdot 10^{-15}$
Суммарная стандартная неопределённость типа В				$2,6 \cdot 10^{-20}$


	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мГц	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 9 из 8
СК 03-2205-МК-11-С		


Таблица 7 - Бюджет неопределенности измерения коэффициента a_4

Величина	Стандарт. неопределенность	Тип оценки	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандарт. неопредел.
x_1	$u_{0A}(x) \cdot x_1$	A	$\frac{\partial a_4}{\partial x_1}$	$1,7 \cdot 10^{-25}$
...	...	A	...	
x_n	$u_{0A}(x) \cdot x_n$	A	$\frac{\partial a_4}{\partial x_n}$	$5,0 \cdot 10^{-27}$
y_1	$u_{0A}(x) \cdot y_1$	A	$\frac{\partial a_4}{\partial y_1}$	$5,7 \cdot 10^{-29}$
y_1	$u_{0B}(x) \cdot y_1$	B	$\frac{\partial a_4}{\partial y_1}$	$4,0 \cdot 10^{-28}$
...
y_n	$u_{0A}(x) \cdot y_n$	A	$\frac{\partial a_4}{\partial y_n}$	$8,2 \cdot 10^{-30}$
y_n	$u_{0B}(x) \cdot y_n$	B	$\frac{\partial a_4}{\partial y_n}$	$3,0 \cdot 10^{-29}$
Суммарная стандартная неопределенность типа A				$2,0 \cdot 10^{-25}$
Суммарная стандартная неопределенность типа B				$7,0 \cdot 10^{-28}$

Бюджет неопределенности передачи размера единицы МИ постоянного поля в область «средних» полей представлен в таблице 8.

Таблица 8 - Бюджет неопределенностей передачи единицы МИ в область «средних» полей

Параметр	Тип оценки	Распределение	Коэффициенты		Стандарт. неопределенность, мГц	
			Значение $f_{изм}$, кГц		Значение МИ, мГц	
			3,5	90000	1	25
Коэфф. a_1	Тип A	Равном.	3,5E+03	9,0E+04	2,9E-07	7,5E-06
	Тип B	Нормал.	3,5E+03	9,0E+04	2,9E-07	7,6E-06
Коэфф. a_2	Тип A	Равном.	1,2E+07	8,1E+09	7,6E-08	5,0E-05
	Тип B	Нормал.	1,2E+07	8,1E+09	3,2E-13	2,1E-10
Коэфф. a_3	Тип A	Равном.	4,3E+10	7,3E+14	2,2E-10	3,8E-06
	Тип B	Нормал.	4,3E+10	7,3E+14	2,1E-10	3,6E-06
Коэфф. a_4	Тип A	Равном.	1,5E+14	6,6E+19	3,0E-11	1,3E-05
	Тип B	Нормал.	1,5E+14	6,6E+19	1,1E-13	4,6E-08
Абсолютная неопределенность, мГц					4,2E-07	5,3E-05
Относительная неопределенность					4,2E-07	2,1E-06

	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мГц СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 6 из 8

- внесение результатов калибровки в программу «Расчет коэффициентов преобразования квантового цезиевого магнитометра», вычисление коэффициентов преобразования квантового цезиевого магнитометра;

6.1.3 Оценка неопределенности

Бюджет неопределенности измерений МИ в диапазоне 1-2 мГц представлен в таблице 2.

Таблица 2– Бюджет неопределённости измерений МИ в диапазоне 1-2 мГц

Компоненты неопределённости	Тип оценки	Распределение	СКО, 10^{-6}
Эталонный магнитометр, ЭГМ	Тип В	Равномерное	0,05
Неоднородность МИ в ЭТМК (Ø 10 мм)	Тип В	Равномерное	0,2
Нестабильность МИ ЭТМК	Тип А	Нормальное	0,3
	Тип В	Равномерное	0,2
Суммарная неопределённость	Тип В	Нормальное	0,3
	Тип А	Нормальное	0,3

Зависимость индукции от средней частоты при измерении квантовым цезиевым магнитометром определяется как полином четвертого порядка:


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

Коэффициенты полинома a_1 и a_3 определяются как:

$$a_1 = \frac{\sum(B_i \cdot f_i) \cdot \sum f_i^6 - \sum(B_i \cdot f_i^3) \cdot \sum f_i^4}{\sum f_i^2 \cdot \sum f_i^6 - (\sum f_i^4)^2}$$

$$a_3 = \frac{\sum(B_i \cdot f_i^3) \cdot \sum f_i^2 - \sum(B_i \cdot f_i) \cdot \sum f_i^4}{\sum f_i^2 \cdot \sum f_i^6 - (\sum f_i^4)^2}$$

Бюджеты неопределенности определения коэффициентов a_1 и a_3 представлены в таблицах 3 и 4.

	Методика калибровки квантового цезиевого магнитометра в диапазоне 1-25 мГц СК 03-2205-МК-11-С	Редакция:
		Издание: 2019
		Стр. 10 из 8

Суммарная стандартная неопределенность определяется как:

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

6.1.7. Расширенная неопределенность результата калибровки U_c при вероятности охвата 0,95 (коэффициент охвата $k=2$) вычисляется как:

$$U_c = 2u_c$$

7 Оформление результатов калибровки

7.1 По результатам калибровки магнитометра на него выдают сертификат калибровки по установленной форме.

7.2 В сертификате указывают следующие характеристики:

- условия калибровки, результаты измерений, поправка и стандартная неопределенность типа А для каждого поддиапазона измерений;
- таблица экспериментальных данных;
- расширенная неопределенность результата калибровки при доверительной вероятности 0,95 и коэффициенте охвата 2.

Приложение Д. Сертификат соответствия «Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ12-2011

00027

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
“ВНИИМ им. Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА”
190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
Факс: +7(812) 713-01-14, телефон: +7(812)251-76-01, e-mail: info@vniim.ru, http://www.vniim.ru

СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМОГО В МЕТРОЛОГИИ
Регистрационный № РОСС RU.В1541.04ИЖХ0 от 06 сентября 2016 г.



СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ по им – 01 – 2019
программного обеспечения

**Программа воспроизведения магнитной индукции
постоянного поля гипогеомагнитного диапазона
на базе ГЭТ 12-2011**

Сертификация проведена в соответствии с «Правилами функционирования Системы добровольной сертификации программного обеспечения, используемого в метрологии» и методикой системы менеджмента качества ВНИИМ им. Д.И. Менделеева СК 02-30-16 «Программное обеспечение обработки данных при измерениях. Общие положения и порядок проведения подтверждения соответствия»

Разработчик и Заказчик сертификации ПО:

НИЛ 2302 – Лаборатория госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,
190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19.

Работы по подтверждению соответствия программного обеспечения были проведены с «12» декабря 2018 г. по «28» февраля 2019 г. во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

Назначение и область применения ПО:

Программа разработана с целью воспроизведения магнитной индукции постоянного поля в диапазоне 10-1000нТл на базе подкомплекса Государственного Первичного Эталона ГЭТ 12-2011. В программном обеспечении используется два модуля, выполняемых одновременно:

1) Модуль стабилизации тока подаваемого на обмотку вертикальной компоненты меры ЭТМК из состава ГЭТ 12-2011. Модуль считывает значения текущего тока с вольтметра Agilent 3358A и в случае несовпадения считанного значения с заданным программно значением, путем подачи напряжения через ЦАП LCard34-4 на стабилизатор тока СТ-1 из состава ГЭ 12-2011 приводит действующей значение к заданному.

2) Модуль управления фазовым компаратором частот с целью генерации магнитной индукции постоянного поля в диапазоне ± 1000 нТл с шагом дискретизации 100 нТл. Модуль в зависимости от требуемой заданной программно индукции магнитного поля задает опорное напряжение на фазовом компараторе из состава ГЭТ 12-2011 через генератор Agilent 32210A из состава ГЭТ 12-2011, что через подачу разности фаз на дополнительную обмотку ЭТМК обеспечивает воспроизведения программно заданной индукции в ЭТМК.

Идентификационные данные (признаки) ПО:

Идентификационное наименование ПО:

Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ 12-2011

Номер версии (идентификационный номер) ПО: не ниже v1.5.2

Уровень защиты ПО Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ 12-2011 от непреднамеренных и преднамеренных изменений «средний» в соответствии с ГОСТ Р 8.883 – 2015.

Алгоритмы обработки данных:

Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ 12-2011 обработки данных не производит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное обеспечение **Программа воспроизведения магнитной индукции постоянного поля гипогеомагнитного диапазона на базе ГЭТ 12-2011** соответствует требованиям

ГОСТ Р 8.654 – 2015 «ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения»,

ГОСТ Р 8.883 – 2015 «ГСИ. Программное обеспечение средств измерений. Алгоритмы обработки, хранения, защиты и передачи измерительной информации. Методы испытаний»,

Руководитель органа по сертификации

Заместитель директора
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»

«28» февраля 2019



Кривцов Е.П.

М.П.