

УДК: 006.91; 537.612

СОСТОЯНИЕ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ ВНИИМ В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Д.И. Беляков, В.Я. Шифрин, Е.П. Кривцов, А.Е. Шилов

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева,
Санкт-Петербург,
d.i.belyakov@vniim.ru*

Статья посвящена текущему состоянию эталонной базы ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в области метрологического обеспечения измерений магнитной индукции. Описываются действующие характеристики ГЭТ12-2011, разработки по его усовершенствованию и сравнение с эталонами зарубежных метрологических институтов.

Ключевые слова: эталонная база ВНИИМ, магнитная индукция, измерения, эталон.

STATE OF VNIIM REFERENCE BASE IN THE FIELD OF METROLOGICAL SUPPORT OF MAGNETIC INDUCTION MEASUREMENTS

D.I. Belyakov, V.Ia. Shifrin, E.P. Krivtsov, A.E. Shilov

*The D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM)
d.i.belyakov@vniim.ru*

The article is devoted to the current state of the reference base of the Federal state unitary enterprise "D.I. Mendeleev Institute for Metrology" in the field of metrological support of magnetic induction measurements. The current characteristics of the primary standard, developments for its improvement and comparison with the standards of foreign metrological institutes are described.

Key words: VNIIM reference base, magnetic induction, measurements, primary standard.

Метрологическое обеспечение магнитных измерений в РФ опирается на разработанные во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Государственный первичный эталон единиц магнитных величин ГЭТ12-2011, а также на ГОСТ 8.030-2013, в области измерений магнитной индукции (МИ) постоянного поля,

ГЭТ12-2011 обеспечивает воспроизведение и прямую передачу единицы Тл в диапазоне «слабых» полей от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Тл с суммарной стандартной неопределённостью $3 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-7}$ [1].

Работа по созданию единого государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции была выполнена во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в период с 2007 по 2011 гг. и продолжена с 2012 по 2019 гг.

За это время проведены экспериментальные и теоретические исследова-

ния в рамках международного сотрудничества по уточнению фундаментальных физических констант с участием ВНИИМ, которые дали основание Комитету CODATA рекомендовать более точное значение гиромангнитного отношения протона γ'_p [2].

На этой основе в рамках экспериментальных исследований была повышена в три раза точность экспериментального определения гиромангнитного отношения атомов гелия-4 (γ_{He4}) [3].

Принцип действия двух эталонных квантовых гелий-цезиевых магнитометров ЭГМ, имеющих различие по конструктивным параметрам и элементной базе первичного преобразователя, основан на квантовом преобразовании модуля магнитной индукции (МИ) в частоту с использованием физических принципов двойного радио-оптического магнитного резонанса, оптической ориентации атомных моментов цезия-133 (^{133}Cs), спиновой поляризации и магнитного резонанса атомов гелия-4 в метастабильном состоянии.

Для исключения влияния на выходную частоту квантового преобразователя физических параметров, формирующих сигнал атомного магнитного резонанса (АМР), магнитный момент оптически поляризованных атомов ^{133}Cs передается путем спинового взаимодействия атомам 4He .

Магнитометры включают в себя первичные преобразователи с газообразными магниточувствительными элементами со смесью паров атомов Cs и He, устройства формирования сигналов АМР, синтезатор-контроллер частоты АМР, управляемый специальной компьютерной программой. Процессор синтезатора-контроллера преобразует частоту АМР в единицы МИ. Принцип действия и устройство магнитометров изложены в техническом описании эталона.

Измеряемая магнитная индукция B регистрируется в цифровой и графической форме в соответствии с формулой:

$$B = f_{He4} / K_\gamma,$$

где f_{He4} – частота магнитного резонанса атомов гелия-4;

$K_\gamma = \left(\frac{\gamma_{He4}}{2\pi} \right) = 28,023803$ Гц/нТл - коэффициент преобразования датчиков эталонных магнитометров ЭГМ;

$\gamma_{He4} = \gamma'_p \cdot P_{\gamma_{He4}} = 1760,78743(5) \cdot 10^8 c^{-1} \cdot Tл^{-1}$ - гиромангнитное отношение атомов гелия-4;

$\gamma'_p = 2,67515336(73) \cdot 10^8 c^{-1} Tл^{-1}$ – гиромангнитное отношение экранированного протона в молекуле воды, рекомендованное CODATA 2014 [2];

$P_{\gamma_{He4}} = \frac{\gamma_{He4}}{\gamma_{He4}} = 658,200556(20)$ - относительная константа, определённая разработчиками эталона ГЭТ12-2011 [3].

Диапазон измерений магнитометров ЭГМ от 500 нТл до 1 мТл, СКО (тип А) – 0,002 нТл при постоянной времени тракта регистрации 2 с.

Гиромангнитное отношение атомов гелия-4 является квантовым коэффициентом преобразования эталонного атомно-резонансного гелий-цезиевого магнитометра, что позволило, соответственно, снизить неопределённость воспроизведения базовой единицы магнитных измерений – Тесла.

Научно-техническая реализация воспроизведения и передачи размера Тл постоянного поля осуществляется с применением эталонной трёхкомпонентной меры-компаратора средств измерений магнитной индукции (МИ) постоянного поля при полной автоматической компенсации магнитного поля Земли (МПЗ). Для расширения нижнего предела диапазона воспроизведения и передачи единицы от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Тл был применён способ, изложенный в патенте на изобретение [4].

Эта же измерительная система осуществляет передачу размера Тл/А на постоянном токе, т.е. определение констант преобразования (постоянных) КВ мер МИ, применяемых как на постоянном, так и переменном токе при частотах от 1 Гц до 400 кГц.

Обобщённая 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.

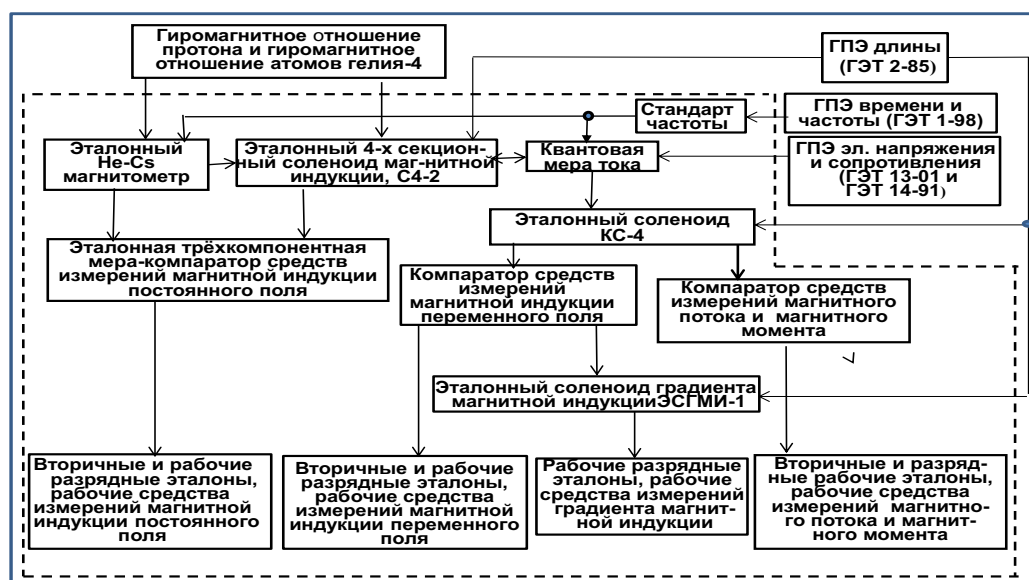


Рис. 1. Структура Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции и схема его взаимосвязи с эталонами других областей измерений

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

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение и передачу единиц в диапазонах величин и с погрешностями, которые представлены в таблице 1, где приняты обозначения: НСП – граница неисключённой систематической погрешности воспроизведения и передачи размера единицы при доверительной вероятности $P=0,9$; СКО – среднеквадратическое отклонение воспроизведения и передачи размера единицы при $n=10$ независимых измерениях.

Для воспроизведения и передачи единицы МИ в области постоянных магнитных полей, в том числе в наиболее востребованных «геомагнитном» (20 - 100 мкТл) и «гипогеомагнитном» ($1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ Тл) диапазонах, применяется эталонный комплекс, фотографии основных элементов которого представлены на рис. 2.

Таблица 1

Метрологические характеристики первичного эталона

Физическая величина	Диапазон	Частота, Гц	Погрешности воспроизведения и передачи единицы	
			СКО ($n=10$)	НСП ($P=0,99$)
Магнитная индукция (МИ)	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$ Тл	0	$2 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-7}$
	$1 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-4}$ Тл	1-20 000	$3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-2} - 9 \cdot 10^{-4}$
Магнитный поток (МП)	$5 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-2}$ Вб	0	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3} - 4,3 \cdot 10^{-5}$
Магнитный момент (ММ)	$3 \cdot 10^{-4} - 20$ А·м ²	0	$5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3} - 1,8 \cdot 10^{-4}$
Градиент МИ (ГМИ)	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-1}$ Тл/м	0	$1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Угол между магнитными сями мер МИ	$90 \pm 0,1$ угл.град.	0	2 угл. сек.	5 угл. сек.
Отношение МИ к силе тока	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$ Тл/А	0 1-20000,	$2 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-8}$ $1 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-6} - 1,8 \cdot 10^{-6}$ $1 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-4}$
Отношение МП к силе тока	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$ Вб/А	0	$3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3} - 4,3 \cdot 10^{-5}$

Отношение МП к МИ [отношение ММ к силе тока, $(A \cdot m^2)/A$]	$1 \cdot 10^{-2} - 20$ Вб/Тл	020-20000	$1 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-4}$
Отношение ГМИ к силе тока	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-1}$ Тл·м-1·А-1	0	$5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$



Рис. 2. Фото основных узлов эталонного комплекса для воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-3}$ Тл

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

Передача размера Тл в данной, требующей наибольшей точности, области магнитных измерений, сопряжена с большими научно-техническими трудностями. Это связано с тем, что воспроизводимая МИ в нижней части диапазона измерений в пять тысяч раз ниже уровня магнитных помех в виде

изменяющегося магнитного поля Земли и техногенных источников магнитных помех, а в верхней части - больше этого уровня только в 20 раз. Это определяет сложность и состав эталонных средств измерений, т.к., например, наиболее прецизионные квантовые магнитометры должны быть откалиброваны с неопределённостью не более $1 \cdot 10^{-6}$.

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 одно-объёмным стабилизатором МИ. При этом датчики эталонного или калибруемого магнитометров одновременно помещаются в рабочее пространство основной трёхкомпонентной 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 двух-объёмный атомнорезонансный (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 катушки МИ с совмещёнными центрами, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны, причём одна из них ориентирована по местной вертикали, а две другие горизонтально – по магнитному меридиану и перпендикулярно ему.

Однообъёмный стабилизатор магнитной индукции в комплекте с эталонными гелий-цезиевыми магнитометрами 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.

На прошедших впервые после подписания в 1999 г. «Международной договорённости о взаимном признании эталонов и сертификатов о калибровке и измерениях, выдаваемых национальными метрологическими институтами» (CIPM MRA), международных сличений квантовых эталонов

единицы магнитной индукции постоянного поля в геомагнитном диапазоне, ГЭТ 12-2011 и подтвердил свои лидирующие позиции. Сличения были инициированы Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева в рамках региональной метрологической организации «Азиатско-Тихоокеанская метрологическая программа» (Asia-Pacific Metrology Program - APMP). Пилотной лабораторией в этих сличениях являлся ВНИИМ, который разработал программу и порядок сличений, согласованные с 9-ю участниками. Сличения зарегистрированы под индексом P1-APMP.EM-S14 в базе данных по ключевым сличениям, поддерживаемой Международным Бюро мер и весов (МБМВ).

В проекте участвовали метрологические институты шести стран – ВНИИМ (Россия), NPL (Англия), PTB (Германия), KRISS (Ю.Корея), NIM (Китай), СМІ (Чехия) и геомагнитные обсерватории трёх стран, представляющих Королевский метеорологический институт Бельгии, Национальный институт физики Земли (Австралия) и Центральный институт метеорологии и геодинамики (Австрия).

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) представляет собой комплекс из ЯМР магнитометра и трёхкомпонентной системы воспроизведения МИ. Калибруемый магнитометр помещается в центр трёхкомпонентных колец Гельмгольца, в которых воспроизводится МИ в диапазоне 20 -100 мкТл. Передача размера единицы Тл производилась путем одновременного сличения калибруемого и эталонного магнитометра.

Эталон Бельгийского Королевского метеорологического института и Геомагнитная обсерватория на его базе воспроизводили магнитное поле в диапазоне 20-78 мкТл с относительной неопределенностью на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-5}$.

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

Эталон индукции постоянного магнитного поля PTB (Германия) опирается на разработанный и изготовленный в PTB ЯМР-магнитометр - NMR-FP PTB. Магнитное поле генерируется в системе колец Браунбека. Вариации магнитного поля Земли регистрируются с помощью трёхкомпонентного феррозондового датчика, расположенного на расстоянии 50 м от колец Браунбека.

Эталон позволяет воспроизводить магнитную индукцию постоянного поля в диапазоне 10-150 мкТл. По итогам пилотируемых ВНИИМ международных сличений 2013-2014 гг. эталон PTB подтвердил относительную

неопределенность на уровне 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-5}$.

Эталон Корейского метрологического института (KRISS) разрабатывался в тесном сотрудничестве со специалистами из ВНИИМ и поэтому имеет похожую структуру и концепцию.

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.

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 трёхкомпонентной 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 70 мм и длиной 140 мм. Диапазон измерений магнитометра 20 – 100 мкТл.

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 магнитометров в одной точке (в локальном магнитном поле Земли).

Американский метрологический институт NIST не принимал участия в международных сличениях. Это связано с тем, что после завершения работ по определению гиромагнитного отношения протона данная тематика в институте 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.

Результаты международных сличений АРМР.ЕМ S14 приведены в таблице 2.

На основании обработки данных, полученных по результатам сличений, были определены поправки к константам преобразования квантовых эталонов стран. В результате было установлено, что наибольший вклад (60-80 %) в поправку по всем калибруемым точкам был сделан на основании измерений ГЭТ 12-2011.

Со времени, прошедшем после международных сличений 2014 г., РТВ не остановил свое развитие в метрологическом обеспечении измерений магнитной индукции. В результате 1 мая 2017 г. РТВ на базе площадки в Берлине открыл лабораторию «Метрология сверхслабых магнитных полей», которая была создана в основном для биомедицинских и фундаментальных исследований.

Таблица 2

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

Институт	Измеряемые значения индукции, мкТл	Заявленная институтом расширенная неопределенность (k=2), нТл	Разница между средневзвешенным и измеренным значением, нТл	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
РТВ	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
СМІ	48,6	0,36	0,17	0,08

Продолжение таблицы 2

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

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

В ПТБ эта измерительная техника используется для проведения работ, связанных 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, возникает ряд вопросов к определению метрологических характеристик установки. Не удалось найти публикации, описывающие способ измерения и оценивания воспроизведения поля в рабочем объеме. Кроме того, стоит отметить, что описанная установка - система с рабочим объемом в условиях сверхпроводимости и не пригодна для калибровки в нормальных условиях.

Во ВНИИМ для расширения диапазона ГЭТ 12-2011 в области постоянных магнитных полей «гипогеомагнитного» диапазона (10^{-8} - 10^{-6} Тл) был разработан дополнительный комплекс эталона, основанный на специальной методике и усовершенствованной системе генерации и стабилизации маг-

нитного поля ГЭТ 12-2011. На применяемый способ передачи единицы МИ был получен патент (патент №2650769, 2017 г. регистрации).

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

Для стабилизации тока, подаваемого на эталонную трёхкомпонентную меру - компаратор (ЭТМК), и управления опорной частотой фазового компаратора было разработано специальное программное обеспечение.

Процедура калибровки измерительной системы в диапазоне от ± 10 нТл до ± 1000 нТл предусматривает автоматическую компенсацию МПЗ в рабочей области меры-компаратора ЭТМК трёхкомпонентным двухобъемным атомно-резонансным контроллером МИ - ТДК. ТДК включает в себя три двухобъемные системы компенсации вариаций трёх компонент МИ МПЗ.

Дополнительно предусматривается введение в действие устройств автоматического контроля «0 поля» и воспроизведения заданного диапазона значений вертикальной компоненты B_z в центре рабочего объема меры-компаратора ЭТМК.

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

Бюджет неопределённости передачи размера единицы Тл в диапазоне ± 1000 нТл представлен в таблице 3.

Таблица 3

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

Параметр X_i	Тип оценки	Стандартная неопределённость, нТл	Распределение вероятности	Коэффициент влияния	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

Продолжение таблицы 3

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 стандартная неопределенность, нТл					0,12

Суммарная стандартная и расширенная неопределённости передачи единицы Тл в диапазон постоянных «гипогеомагнитных» полей при доверительной вероятности $P=0,95$ ($K=2$) оцениваются величинами 0,12 нТл и 0,24 нТл соответственно.

На 2020 г. запланированы дополнительные экспериментальные исследования для подтверждения требуемых метрологических характеристик и формальные процедуры по включению описанного выше комплекса в состав ГЭТ12-2011.

Литература

1. Шифрин В.Я., Калабин В.Н., Беляков Д.И. Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции постоянного поля геомагнитного и гипогеомагнитного диапазонов// Измерительная техника. № 9. 2016. С. 46 – 48.
2. Peter J. Mohr, David B. Newell, Barry N. Taylor. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants. 2014, 25 June, 2015.
3. Shifrin V.Ya., Park P.G., Khorev V.N., Choi C.H. 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.
4. Шифрин В.Я., Калабин В.Н., Беляков Д.И. Способ воспроизведения магнитной индукции в гипомагнитном диапазоне. Патент на изобретение № 2650769 от 26 июня 2017 г.