

Расширение диапазона воспроизведения магнитной индукции постоянного поля Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011

В. Я. Шифрин, Д. И. Беляков, А. Е. Шилов, Д. Д. Косенков

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: shifrin@vniim.ru, d.i.belyakov@vniim.ru, aeshilov48@gmail.com, wdenkosw@gmail.com

Изложены результаты работ, направленных на повышение уровня единства измерений магнитной индукции постоянного поля – базовой величины в области магнитных измерений. Создан и описан комплекс аппаратуры для воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазоне 1–25 мТл. Включение данного 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. Для передачи единицы магнитной индукции в область средних полей создан квантовый цезиевый магнитометр на разрешённой структуре атомов цезия. Описана процедура расчёта коэффициентов преобразования частоты в магнитную индукцию созданного квантового цезиевого магнитометра. Оценён бюджет неопределённости воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля с помощью созданного комплекса.

Ключевые слова: магнитная индукция, эталон, мера, магнитометр, атомный магнитный резонанс.

Введение. Метрологическое обеспечение измерений магнитных величин, в том числе базовой величины – магнитной индукции постоянного поля, в Российской Федерации регулируется государственной поверочной схемой согласно ГОСТ 8.030-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции». В соответствии с государственной поверочной схемой воспроизведение единицы с помощью ГЭТ 12-2011 осуществляется в диапазоне слабых полей (10^{-3} –1 мТл) [1]. Государственная поверочная схема предусматривает передачу единицы средствами измерений с помощью вторичных и рабочих эталонов в существующем диапазоне, а также его расширение до 2,5 Тл. При этом в диапазоне средних (1–25 мТл) и сильных полей (до 2,5 Тл) прослеживаемость единицы магнитной индукции к ГЭТ 12-2011 реализуется лишь на уровне рабочих эталонов второго разряда.

Комплекс аппаратуры для воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля. Создание комплекса аппаратуры для воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля повысит уровень прослеживаемости применяемых в стране средств измерений к ГЭТ 12-2011 во всём диапазоне, предусмотренном государственной поверочной схемой.

Воспроизведение единицы магнитной индукции в ГЭТ 12-2011 происходит с помощью входящего в его состав

эталонного гелий-цезиевого магнитометра (ЭГМ). Принцип действия ЭГМ основан на квантовом преобразовании магнитной индукции в частоту переменного электрического напряжения с использованием физических принципов двойного радиооптического магнитного резонанса, оптической ориентации атомных моментов цезия-133 (^{133}Cs), спиновой поляризации и магнитного резонанса атомов гелия-4 в метастабильном состоянии. ЭГМ имеет неопределённость типа А на уровне лучших традиционных квантовых цезиевых магнитометров (КЦМ), неопределённость типа В составляет на два порядка меньше.

В настоящее время диапазон воспроизведения магнитной индукции в ГЭТ 12-2011 ограничен значением 1 мТл. Данный предел связан с ограничением диапазона действующей системы генерации магнитной индукции эталона. Предварительные исследования показали, что существует возможность расширения диапазона генерации до 25 мТл и более, однако возможности ЭГМ ограничены 2 мТл.

Дальнейшее расширение диапазона воспроизведения единицы магнитной индукции в ГЭТ 12-2011 возможно при включении в его состав специально разработанного и изготовленного КЦМ – магнитометра типа M_z (КЦММЗ) [2], основанного на методе двойного радиооптического атомного магнитного резонанса (АМР) и работающего на разрешённой структуре атомов цезия в диапазоне 1–25 мТл.

Основным отличием КЦММЗ от традиционных КЦМ геомагнитного диапазона 20–100 мкТл является его назначение

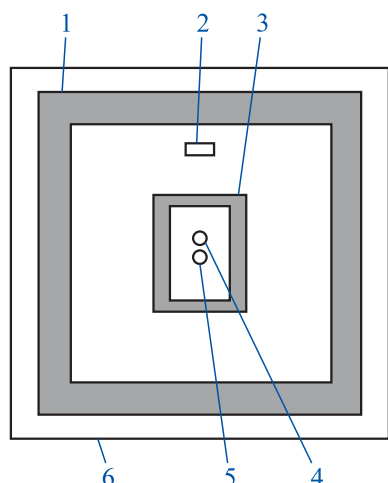


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса для сличений квантового цезиевого магнитометра типа M_z и эталонного гелий-цезиевого магнитометра в диапазоне 0,8–2,0 мТл:

1 – эталонная трёхкомпонентная мера-компаратор магнитной индукции с системой генерации токов компенсации магнитного поля Земли; 2 – система компенсации магнитных помех промышленной частоты; 3 – эталонные кварцевые соленоиды С4-2 и ЭСТВ; 4 – ЭГМ; 5 – КЦММЗ; 6 – двухобъёмный АМР-компенсатор вариаций магнитного поля Земли

Fig. 1. Block diagram of the measuring complex for comparisons of QCMMZ and RHM in the range of 0,8–2,0 mT:

1 – reference three-component magnetic induction comparator with a system for generating currents to compensate for the Earth's magnetic field; 2 – industrial frequency magnetic interference compensation system; 3 – reference quartz solenoids C4-2 and ESTV; 4 – the reference helium-cesium magnetometer; 5 – quantum cesium magnetometer based on the resolved structure of cesium atoms; 6 – compensator for variations in the Earth's magnetic field

для измерений в 10–250 раз больших величин магнитной индукции (1–25 мТл) при существенно большей абсолютной неоднородности магнитной индукции. Последнее является определяющим фактором, требующим минимизации размеров камеры поглощения магнитометра. Кроме того, следует отметить разные формы и амплитуды магниторезонансной линии при работе в слабых и сильных магнитных полях. Если в полях геомагнитного диапазона используется единая (неразделённая на компоненты) структура сигнала, то в диапазоне сильных и средних полей рабочей будет одна из семи разделённых в более сильном поле АМР-линий с существенно меньшей интенсивностью.

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

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

$$\left. \begin{aligned} f_{(-4, -3)} &= K_1 B + K_2^- B^2 + K_3^- B^3 + K_4^- B^4 + K_5^- B^5 + \dots; \\ f_{(4, 3)} &= K_1 B - K_2^+ B^2 + K_3^+ B^3 - K_4^+ B^4 + K_5^+ B^5 + \dots, \end{aligned} \right\} (1)$$

где $f_{(-4, -3)}$, $f_{(4, 3)}$ – частоты АМР, соответствующие направлению магнитной индукции, совпадающему с направлением света оптической накачки атомов цезия и противоположному направлению света оптической накачки атомов цезия; K_i – коэффициенты преобразования магнитной индукции в частоту магнитного резонанса; B – измеряемая магнитная индукция.

Для снижения неопределённости результат измерений КЦММЗ определяется как полусумма частот, полученных при двух противоположных направлениях магнитного поля меры при неизменном значении модуля магнитной индукции:

$$f = (f_{(4, 3)} + f_{(-4, -3)})/2 = K_1^{av} B + \Delta K_2 B^2 + K_3^{av} B^3 + \Delta K_4 B^4 + K_5^{av} B^5 + \dots, (2)$$

$$K_1^{av} = (K_1^- + K_1^+)/2; \Delta K_2 = (K_2^- - K_2^+)/2;$$

$$K_3^{av} = (K_3^- + K_3^+)/2; \Delta K_4 = (K_4^- - K_4^+)/2;$$

$$K_5^{av} = (K_5^- + K_5^+)/2.$$

Так как значения остаточных коэффициентов чётных порядков в выражении (2) существенно меньше (компенсированы) по сравнению с исходными выражениями (1), то, соответственно, уменьшается влияние степени неточности их определения на интегральный коэффициент преобразования частоты АМР в магнитную индукцию.

Для воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции представим (2) в реверсной форме:

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

где f – измеренная частота АМР; a_i – коэффициенты преобразования частоты магнитного резонанса в магнитную индукцию.

В процессе исследований для КЦММЗ были определены оптимальная интенсивность света оптической накачки атомов и температура в объёме чувствительного элемента, обеспечивающие максимальную стабильность частоты АМР. При этом установлено, что для обеспечения нестability частоты АМР на уровне менее 10^{-7} необходимо обеспечить стабилизацию интенсивности света накачки и температуры камеры поглощения на уровне менее 0,1 % (по фототоку и сопротивлению термистора соответственно).

По экспериментальной оценке случайная составляющая погрешности частоты АМР, генерируемой КЦММЗ, не превышает 10^{-7} во всём диапазоне 3,5–90 МГц.

Для расчёта коэффициентов полинома a_1, a_2, a_3, a_4 из (3) были проведены две серии сличений магнитометра КЦММЗ: первая – с ЭГМ из состава ГЭТ 12-2011 с расширенным диапазоном 0,8–2 мТл, вторая – с разработанным ЯМР-тесламетром в диапазоне 8–25 мТл.

На рис. 1 представлена структурная схема измерительного комплекса для сличений КЦММЗ с ЭГМ в смежном для обоих магнитометров диапазоне магнитной индукции 0,8–2 мТл.

Комплекс включает в себя следующие основные компоненты из состава ГЭТ12-2011: эталонную трёхкомпонентную

меру-компаратор магнитной индукции (ЭТМК) с системой генерации токов компенсации магнитного поля Земли; систему компенсации магнитных помех промышленной частоты; два эталонных кварцевых соленоида С4-2 и ЭСТВ, питаемых квантовой мерой тока; ЭГМ; КЦММЗ; двухобъёмный АМР-компенсатор вариаций магнитного поля Земли.

В рабочем пространстве ЭТМК осуществляется полная автоматическая компенсация внешнего магнитного поля, включая магнитные помехи переменного магнитного поля промышленной частоты 50 Гц.

В центр ЭТМК устанавливают два эталонных кварцевых соленоида С4-2 и ЭСТВ, их магнитные оси ориентированы вертикально и центры рабочих пространств совмещены. Как показали исследования, однородность магнитной индукции, создаваемой комплексом мер магнитной индукции, достаточна для обеспечения требуемой точности сличений двух магнитометров (КЦММЗ и ЭГМ) с существенно разными размерами чувствительных элементов – цилиндрической формы диаметром и длиной 40 мм (He^4) и сферы диаметром 10 мм (Cs^{133}).

Квантовая мера тока генерирует постоянный ток в последовательно и согласно соединённые обмотки эталонных кварцевых мер при значениях номинальных токов 0,56 и 1,4 А, в рабочем пространстве системы мер магнитной индукции воспроизводится высокостабильное однородное магнитное поле с номиналами 0,8 и 2 мТл. При этом магнитная индукция номиналом 2 мТл является верхним пределом диапазона измерений ЭГМ.

Структурная схема комплекса, используемого для сличений КЦММЗ и ЯМР-тесламетра в диапазоне 8–25 мТл представлена на рис. 2.

Сличения магнитометров проводятся в мере-компараторе магнитной индукции (МКМИ), представляющей собой четырёхсекционный соленоид с устройствами коррекции неоднородности магнитной индукции и компенсации магнитных помех промышленной частоты, а также генерации и стабилизации постоянного тока в обмотке соленоида. Такое устройство обеспечивает наиболее высокую однородность магнитного поля в рабочей области системы при условии точного выполнения расчётных геометрических параметров обмотки соленоида.

Предварительно была скорректирована неоднородность магнитной индукции в рабочей области МКМИ до уровня $2 \cdot 10^{-6}$. МКМИ в течение 24 ч перед измерением в каждой точке рабочей области прогревалась под действием рабочего тока для исключения сложно определяемых температурных поправок обмотки.

Используемый для сличений ЯМР-тесламетр разработан на основе ЯМР-спектрометра с импульсным селективным возбуждением и регистрацией частоты магнитного резонанса [3].

Расчёт коэффициентов преобразования частоты в магнитную индукцию квантового магнитометра на разрешённой структуре атомов цезия. Для определения коэффициентов полиномиальной регрессии разработана специальная расчётная программа. Проверено несколько вариантов (моделей) вычисления коэффициентов преобразования частоты АМР в магнитную индукцию (см. (3)). Несколько коэффициентов вычислялись на основе измерений слабых полей (0,8–2 мТл), остальные в средних полях (10–25 мТл). Качество модели при этом определяли по минимальной погрешности

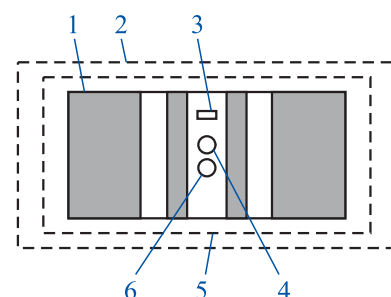


Рис. 2. Структурная схема измерительного комплекса для сличений магнитометра типа M_z и ЯМР-тесламетра в диапазоне 8–25 мТл: 1 – мера-компаратор магнитной индукции; 2 – блок коррекции однородности магнитной индукции; 3 – система компенсации промышленных магнитных помех; 4 – ЯМР-тесламетр; 5 – система генерации и стабилизации тока; 6 – КЦММЗ

Fig. 2. Block diagram of the measuring complex for comparisons of the QCMMZ magnetometer and the NMR teslameter in the range of 8–25 mT: 1 – magnetic induction comparator; 2 – the block of correction of the homogeneity of the magnetic induction; 3 – industrial frequency magnetic interference compensation system; 4 – NMR teslameter; 5 – current generation and stabilization system; 6 – QCMMZ

аппроксимации и скорректированному коэффициенту детерминации [4].

Оценку значимости коэффициентов регрессии проводили стандартным образом с помощью теста Стьюдента при выдвижении гипотезы о статистически незначимом отличии значения коэффициента регрессии от нуля. Результаты вычислений коэффициентов, их t -статистик и скорректированного коэффициента детерминации k_d для каждой модели приведены в табл. 1.

При вычислении в слабых полях коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 и t -статистики коэффициент a_2 меньше критического значения ($t_{кр} = 2,23$). Следовательно, коэффициент a_2 во 2-й модели оказывается статистически не значимым. Кроме того, скорректированный коэффициент детерминации k_d 2-й модели (0,90) оказался выше первой (0,89).

При определении в средних полях в 3-й модели статистически значимыми оказываются все коэффициенты a_2 , a_4 , a_5 . Однако 4-я модель, использующая в качестве объясняющих переменных только второй и четвертый порядок, продемонстрировала больший скорректированный коэффициент детерминации (0,90).

На основании данных заключений принято решение определять коэффициенты a_1 , a_2 в слабых полях, а коэффициенты a_2 , a_4 в средних полях.

В результате расчёт в программе производится в два этапа. На первом этапе с помощью метода наименьших квадратов обрабатываются данные сличения КЦММЗ с ЭГМ и оцениваются коэффициенты a_1 , a_3 . Коэффициенты фиксируются в памяти и позднее используются на втором этапе расчёта как заданные.

Логика второго этапа программы отличается от логики первого этапа. В отличие от сличений КЦММЗ с ЭГМ, где единица магнитной индукции постоянного поля фактически передаётся от ГЭТ 12-2011, при сличении КЦММЗ с ЯМР-тесламетром в средних полях, следует учитывать, что ЯМР-тесламетр не является носителем единицы магнитной индукции, а просто

Таблица 1

Коэффициенты регрессии при разном порядке вычисления

Коэффициент	Значение, мкТл/Гц	<i>t</i> -статистика	<i>k</i> _д
Вычисление коэффициентов <i>a</i> ₁ , <i>a</i> ₂ , <i>a</i> ₃ в слабых полях (1-я модель)			
<i>a</i> ₁	0,000285829	233191,2	0,89
<i>a</i> ₂	-2,3·10 ⁻¹³	-0,5	
<i>a</i> ₃	-1,4·10 ⁻¹⁶	-3,6	
Вычисление коэффициентов <i>a</i> ₁ , <i>a</i> ₃ в слабых полях (2-я модель)			
<i>a</i> ₁	0,000285828	2882696,7	0,90
<i>a</i> ₃	-1,6·10 ⁻¹⁶	-58,1	
Вычисление коэффициентов <i>a</i> ₂ , <i>a</i> ₄ , <i>a</i> ₅ в средних полях (3-я модель)			
<i>a</i> ₂	4,6·10 ⁻¹³	10,2	0,89
<i>a</i> ₄	3,0·10 ⁻²²	11,4	
<i>a</i> ₅	-1,2·10 ⁻²⁷	-5,0	
Вычисление коэффициентов <i>a</i> ₂ , <i>a</i> ₄ в средних полях (4-я модель)			
<i>a</i> ₂	6,8·10 ⁻¹³	25,2	0,90
<i>a</i> ₄	1,7·10 ⁻²²	39,0	

Таблица 2

Бюджет неопределённости измерений магнитной индукции в диапазонах 0,8–2 мТл и 10–25 мТл

Источник	Тип оценки	Распределение	Стандартная неопределённость, $\mu \cdot 10^6$, отн. ед.
0,8–2 мТл			
ЭГМ	B	Равномерное	0,05
Неоднородность магнитной индукции в МКМИ	B	Равномерное	0,2
Нестабильность магнитной индукции МКМИ	A	Нормальное	0,3
	B	Равномерное	0,2
u_c	B	Нормальное	0,3
	A	Нормальное	0,3
10–25 мТл			
Определение a_1, a_3	B	Равномерное	0,5
Неоднородность магнитной индукции в МКМИ	B	Равномерное	2
Нестабильность магнитной индукции	A	Нормальное	0,3
	B	Равномерное	0,2
u_c	A	Нормальное	0,3
	B	Равномерное	2,1

Таблица 3

Бюджет неопределённости воспроизведения единицы магнитной индукции в области 1–25 мТл

Коэффициент	Тип оценки	Распределение	Значение коэффициентов при различных $f_{изм}$, кГц		u_c , мТл, при различной магнитной индукции, мТл	
			3,5	90000	1	25
a_1	A	Равномерное	$3,5 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
	B	Нормальное	$3,5 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
a_2	A	Равномерное	$1,2 \cdot 10^7$	$8,1 \cdot 10^9$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
	B	Нормальное	$1,2 \cdot 10^7$	$8,1 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$
a_3	A	Равномерное	$4,3 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$
	B	Нормальное	$4,3 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$
a_4	A	Равномерное	$1,5 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{19}$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
	B	Нормальное	$1,5 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$
Относительная неопределённость					$4,2 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$

обладает достаточной для выполняемого эксперимента линейностью преобразования индукции в частоту АМР в рассматриваемом диапазоне.

Оценка коэффициентов высших порядков была построена следующим образом. Значение магнитной индукции, измеренной ЯМР-тесламетром, учитывается с некоторым множителем, в остальном оценка коэффициентов производится аналогично первому этапу программы.

В интерфейсе программы существует возможность задавать интервал значений множителя и шаг итерации поиска. Программа в автоматическом режиме вычисляет коэффициенты и среднее квадратическое отклонение (СКО) ряда для всех коэффициентов из указанного интервала и находит значения, соответствующие минимальному СКО. Коэффициенты регрессии, соответствующие минимальному СКО, признаются реальными коэффициентами регрессии.

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

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

Оценка неопределённости воспроизведения магнитной индукции постоянного поля. Бюджет неопределённости измерений магнитной индукции в диапазонах 0,8–2 мТл и 10–25 мТл представлены в табл. 2. В диапазоне 0,8–2 мТл суммарная стандартная неопределённость u_c зависит от неопределённости ЭГМ, неоднородности магнитной индукции в МКМИ (это вносит дополнительную погрешность ЭГМ), нестабильности магнитной индукции МКМИ (связанной с нестабильностью стабилизатора тока и коротковолновых вариаций градиента МПЗ). В диапазоне 10–25 мТл суммарная стандартная неопределённость u_c зависит от погрешности определения коэффициентов a_1, a_3 , нестабильности и неоднородности магнитной индукции в МКМИ.

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

Коэффициенты регрессии оцениваются методом наименьших квадратов и находятся в результате решения системы

$$\left. \begin{aligned} a_1 \sum f_i^2 + a_3 \sum f_i^4 &= \sum B_i f_i; \\ a_1 \sum f_i^4 + a_3 \sum f_i^6 &= \sum B_i f_i^3; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где B_i – i -е измерение индукции ЭГМ в диапазоне 0,8–2 мТл и ЯМР-тесламетром в диапазоне 10–25 мТл; f_i – измерение частоты КЦММЗ.

Решим систему (4) с помощью метода Крамера. Примем

$$\Delta = \sum f_i^2 \sum f_i^6 - (\sum f_i^4)^2;$$

$$\Delta_1 = \sum (B_i f_i) \sum f_i^6 - \sum (B_i f_i^3) \sum f_i^4;$$

$$\Delta_3 = \sum (B_i f_i^3) \sum f_i^2 - \sum (B_i f_i) \sum f_i^4.$$

Используем метод Крамера и найдём коэффициенты a_1, a_3 :

$$a_1 = \Delta_1 / \Delta; \quad a_3 = \Delta_3 / \Delta.$$

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

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

где

$$\Delta_{24} = \sum f_i^4 \sum f_i^8 - \left(\sum f_i^6 \right)^2;$$

$$\Delta_2 = \sum (B_i f_i^2) \sum f_i^8 - \sum B_i f_i^4 \sum f_i^6;$$

$$\Delta_4 = \sum (B_i f_i^4) \sum f_i^4 - \sum (B_i f_i^2) \sum f_i^6.$$

Для построения бюджета неопределённости вычислим коэффициенты чувствительности. Для данных вычислений используем разработанную компьютерную программу.

Поскольку вкладом погрешности измерения частоты в неопределённость передачи единицы можно пренебречь, то суммарную стандартную неопределённость определим как

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

Бюджет неопределённости воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля в области средних полей представлен в табл. 3.

Суммарная относительная стандартная неопределённость воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного поля в верхней точке диапазона средних постоянных магнитных полей составляет $2,1 \cdot 10^{-6}$.

Реализация и утверждение нового измерительного комплекса позволит обеспечить воспроизведение и непосредственную передачу единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазонах слабых (10^{-3} –1 мТл) и средних (1–25 мТл) полей, а

также повысить уровень прослеживаемости к первичному эталону в диапазоне сильных полей с индукцией до 2,5 Тл.

Список литературы

1. Шифрин В. Я., Хорев В. Н., Калабин В. Н., Воронов С. Л., Шилов А. Е. Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 3–7.
2. Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 6. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200906f.0605.
3. Неронов Ю. И., Серегин А. Н. Разработка ЯМР-спектрометра для прецизионного определения отношения частот резонанса ядер // Измерительная техника. 2010. № 8. С. 65–70.
4. Курешева С. В., Нерадовская Ю. В., Беляков Д. И., Галиуллина Л. М., Кабачек А. В. ЭКОНОМЕТРИКА: Учебник. Сер. 61. Бакалавр и магистр. Академический курс (1-е изд.). М.: Издательство «Юрайт», 2017.

References

1. Shifrin V. Y., Khorev V. N., Kalabin V. N., Voronov S. L., Shilov A. E., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 10, pp. 739–744. DOI: 10.1007/s11018-012-0031-y
2. Aleksandrov E. B., Vershovskii A. K., *Physics-Uspekhi*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 573–601. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200906f.0605
3. Neronov Y. I., Seregin A. N., *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53, no. 8, pp. 926–935. DOI: 10.1007/s11018-010-9600-0
4. Kurysheva S. V., Neradovskaya Yu. V., Belyakov D. I., Galiullina L. M., Kabachek A. V., *EKONOMETRIKA, Ucheb-nik. Ser. 61. Bakalavr i magistr. Akademicheskii kurs (1-e izd.)*, Moscow, Yurait Publ., 2017 (in Russian).

Дата поступления: 28.01.2020.

Дата принятия: 25.02.2020.

Research on expanding the range of reproduction of magnetic flux density of the DC field of the state primary standard GET12-2011

Vladlen Ya. Shifrin, Denis I. Belyakov, Alexander E. Shilov, Denis D. Kosenkov

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: shifrin@vniim.ru, d.i.belyakov@vniim.ru, aeshilov48@gmail.com, wdenkosw@gmail.com

The results of works aimed at increasing the level of uniformity of measurements of the magnetic induction of a constant field – the basic value in the field of magnetic measurements. A set of equipment for reproducing a unit of magnetic induction of a constant field in the range of 1–25 mT was created and described. The inclusion of this complex in the State primary standard of units of magnetic induction, magnetic flux, magnetic moment and magnetic induction gradient GET 12-2011 will ensure the reproduction and direct transmission of the unit of permanent magnetic induction in the ranges of not only weak (10^{-3} –1 mT), but medium (1–25 mT) and strong (0.025–1 T) magnetic fields. A quantum cesium magnetometer based on the resolved structure of cesium atoms was created to transmit the unit of magnetic induction to the region of medium fields. The procedure for calculating the frequency conversion coefficients to magnetic induction of the created quantum cesium magnetometer is described. The uncertainty budget for reproducing a unit of magnetic induction of a constant field using the created complex is estimated.

Key words: magnetic flux density, measuring standard, magnetometer, atomic magnetic resonance.