006.91

Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции и магнитного потока

Д. И. БЕЛЯКОВ, В. Н. ХОРЕВ, А. Е. ШИЛОВ, В. Я. ШИФРИН

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

Исследованы функциональные возможности Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12–2011 с целью расширения диапазонов измерений при передаче единицы магнитной индукции в область измерений сильных и слабых магнитных полей, а также при передаче единицы магнитного потока средствам измерений параметров магнитомягких материалов.

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

The functional possibilities of the State primary measurement standard of the magnetic flux density, magnetic flux, magnetic moment and gradient of magnetic flux density units GET 12–2011 were investigated for purposes of transfer of the magnetic flux density unit in the ranges of low and high magnetic fields, and transfer of a magnetic flux unit to measuring instruments soft magnetic materials parameters.

Key words: *magnetic flux density, measurement standard, measure, magnetometer, comparator, measurement controller, atomic magnetic resonance.*

Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12–2011 обеспечивает воспроизведение и прямую передачу единицы магнитной индукции (МИ) постоянного поля в наиболее востребованном диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$–$1 \cdot 10^{-3}$ Тл с суммарной стандартной неопределённостью $3 \cdot 10^{-5}$–$2 \cdot 10^{-7}$ [1].

До недавнего времени существовали принципиальные ограничения при передаче единицы МИ (тесла) в диапазонах $1 \cdot 10^{-8}$–$1 \cdot 10^{-6}$ и $1 \cdot 10^{-3}$–$2 \cdot 10^{-2}$ Тл. Эти ограничения были связаны с диапазонами измерений МИ с помощью существующих квантовых методов измерений, что не позволяло непосредственно применять данные методы для передачи единицы тесла от ГЭТ 12–2011 средствам измерений МИ постоянного поля в диапазоне $1 \cdot 10^{-8}$– 1 Тл.

В [2] приведены результаты недавно выполненных исследований, позволивших решить актуальную задачу разработки метода и средств измерений (СИ) для расширения диапазона передачи единицы МИ от ГЭТ 12–2011 на два порядка в область слабых полей ($1 \cdot 10^{-6}$–$1 \cdot 10^{-8}$ Тл).

В настоящей статье представлены результаты исследований, направленных на разработку методов и создание СИ для прямой передачи единицы МИ от ГЭТ 12–2011 в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$–1 Тл. Внедрение результатов этих исследований позволит впервые реализовать единую систему метрологического обеспечения измерений МИ в диапазоне слабых, средних и сильных полей ($1 \cdot 10^{-8}$–1 Тл) на базе ГЭТ 12–2011, что соответствует современным потребностям промышленности, оборонных отраслей и научных исследований.

Для реализации поставленной задачи были разработаны методика и аппаратура для передачи единицы МИ рабочим тесламетрам в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$–1 Тл. В частности, для передачи единицы МИ в диапазоне 1–25 мТл разработан, изготовлен и исследован квантовый цезиевый атомно-резонансный магнитометр (КЦМ), работающий на разрешённой структуре атомов цезия. КЦМ создан как базовый элемент компаратора, работа которого основана на методе двойного радиооптического атомного магнитного резонанса (АМР) (АМР-магнитометр типа M_z [3]).

Метод АМР успешно реализован в ГЭТ 12–2011 в области слабых магнитных полей в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$–$1 \cdot 10^{-3}$ Тл на базе эталонного гелий-цезиевого магнитометра (ЭГМ) [1, 4], однако в рассматриваемой области более сильных магнитных полей 1–25 мТл реализуется впервые.

Преимуществом разработанного АМР-магнитометра типа M_z в данном применении перед традиционными ядерно-резонансными и АМР-магнитометрами является возможность использования чувствительного элемента датчика уменьшенного объёма (сфера диаметром 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 с помощью КЦМ не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ в диапазоне 1–25 мТл.

В процессе проведённых работ исследованы следующие физические параметры, влияющие на неопределённость измерений частоты АМР с применением КЦМ:

интенсивность света оптической накачки атомов, которую контролировали по силе тока фотодетектора. Установлено оптимальное значение силы тока 50 мкА, поддерживаемого с нестабильностью менее ±0,01 мкА. Определена степень влияния интенсивности света оптической накачки атомов на показания прибора, составляющая менее $1 \cdot 10^{-7}$ при вариациях силы тока ±2,5 мкА;

оптимальная (по интенсивности сигнала АМР) температура в объёме чувствительного элемента, установленная на уровне 61 °С. Температура автоматически поддерживается с погрешностью менее 0,05 °С;

вариации амплитуды переменной МИ резонансной частоты радиополя и его модуляции практически не влияют на нестабильность частоты АМР (на уровне $1 \cdot 10^{-7}$) при изменении амплитуд радиополя и его модуляции в пределах ±50 % оптимальных величин, при том, что имеющаяся система генерации радиополя обеспечивает его стабильность в пределах ±0,3 %.

По результатам исследований вклад составляющих неопределённости в общий бюджет неопределённостей от указанных параметров формирования сигнала АМР с помощью КЦМ не превышает $2 \cdot 10^{-7}$.

На первом этапе процедуры передачи единицы МИ определяли константы преобразования КЦМ путём его сличения с ГЭТ 12–2011 в диапазоне 0,8–1,5 мТл [3].

Измерительный комплекс для передачи единицы МИ от ГЭТ 12–2011 к КЦМ в режиме воспроизведения МИ в диапазоне 0,8–1,5 мТл состоит из следующих шести подкомплексов из состава ГЭТ 12–2011: ЭГМ; двух эталонных кварцевых соленоидов, питаемых квантовой мерой силы постоянного тока; эталонной трёхкомпонентной меры МИ (ЭТМК) с системой генерации токов компенсации магнитного поля Земли; двухобъёмного АМР-компенсатора вариаций поля Земли; компенсатора промышленных помех $B_\sim$ [1].

В рабочем пространстве ЭТМК осуществляется полная автоматическая компенсация внешнего магнитного поля, включая магнитные помехи переменного магнитного поля промышленной частоты 50 Гц. В центр ЭТМК устанавливаются два эталонных кварцевых соленоида из состава ГЭТ 12–2011, их магнитные оси ориентируются вертикально, центры рабочих пространств совмещаются, и модули векторов МИ складываются. Однородность МИ, создаваемая с помощью комплекса мер МИ, достаточна для обеспечения требуемой точности сличений двух магнитометров с разными размерами чувствительных элементов: цилиндрической формы диаметром и длиной 40 мм (ЭГМ) и сферы диаметром 10 мм (КЦМ).

ЭТМК с системой генерации токов обеспечивает компенсацию магнитного поля Земли, квантовая мера силы тока генерирует постоянный ток в последовательно соединённые обмотки эталонных кварцевых мер. При значении номинальных токов 0,6 и 1 А в обмотках эталонных кварцевых мер в рабочем пространстве системы мер МИ воспроизводится высокостабильное и однородное магнитное поле 0,91 и 1,5 мТл.

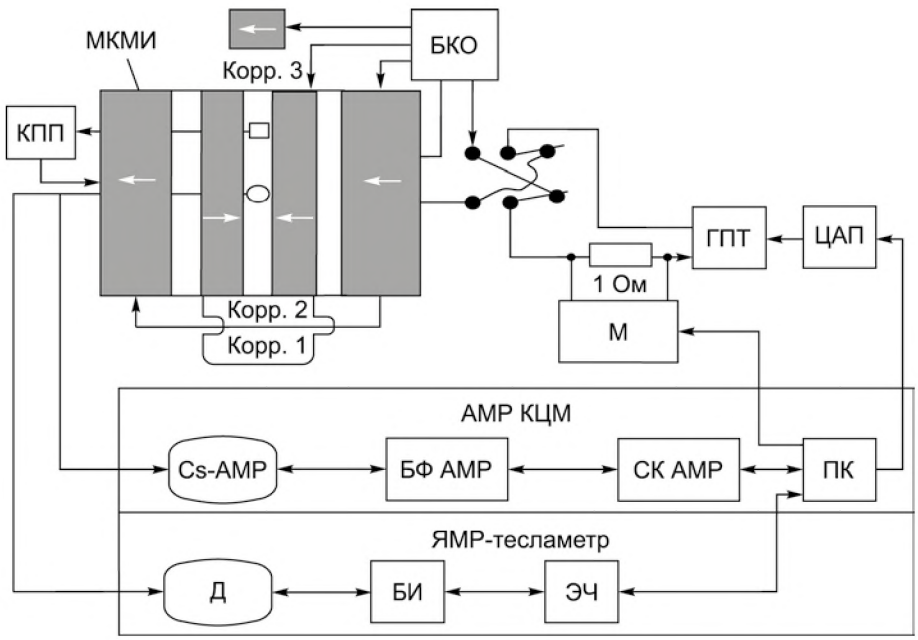

Рис. 1. Структурная схема квантового компаратора единицы магнитной индукции постоянного поля 1–25 мТл:
АМР КЦМ – атомный магнитный резонансный квантовый цезиевый магнитометр; *Cs-АМР* – датчик; *БФ АМР* – блок формирования сигнала *АМР*; *СК АМР* – синтезатор-контроллер частот АМР; *ПК* – управляющий компьютер; *МКМИ* – четырёхсекционная мера-компаратор магнитной индукции; *БКО* – блок коррекции однородности магнитной индукции; *КПП* – компенсатор промышленных помех; *ГПТ* – генератор стабильного постоянного тока; *ЦАП* – цифроаналоговый преобразователь; *М* – программируемый мультиметр; *Д* – датчик ЯМР; *БИ* – блок измерительный ЯМР; *ЭЧ* – электронный частотомер

При этом номинальное значение МИ 1,5 мТл является верхним пределом диапазона измерений ЭГМ.

На втором этапе передачи единицы МИ в диапазоне измерений 8–25 мТл производится калибровка ядерного магнитного резонансного (ЯМР) тесламетра, разработанного для этих экспериментов, путём его сличения с КЦМ посредством квантового компаратора МИ. ЯМР-тесламетр предназначен для измерений модуля МИ постоянного поля с возбуждением сигнала ЯМР и его регистрацией в импульсном режиме. Возникающий после приложенного импульса сигнал свободной прецессии ЯМР регистрируется специализированным синтезатором частот.

На рис. 1 представлена структурная схема квантового компаратора МИ для измерений в диапазоне 8–25 мТл. Основными элементами созданного компаратора являются: атомный магнитный резонансный квантовый цезиевый магнитометр *АМР КЦМ*, состоящий из датчика *Cs*-АМР, блока формирования сигнала АМР *БФ АМР*, синтезатора-контроллера частот АМР *СК АМР* и управляющего компьютера *ПК*; четырёхсекционная мера-компаратор магнитной индукции (МКМИ) [5], в комплекте с блоком коррекции однородности МИ *БКО* и компенсатором промышленных помех *КПП*, генератором стабильного постоянного тока *ГПТ* со следящей управляющей системой, состоящей из цифроаналогового преобразователя *ЦАП*, образцового резистора, программируемого мультиметра *М* и компьютера; ЯМР-тесламетра, состоящего из датчика ЯМР *Д*, блока измерительного ЯМР *БИ*, электронного частотомера *ЭЧ* и управляющего компьютера *ПК*.

Для компенсации неоднородности МИ в конструкции МКМИ заложены дополнительные обмотки: одна (*Корр. 3*) – для коррекции компонента неоднородности поперёк оси меры (диполь) и две обмотки, соосные оси, – для коррекции осевых компонентов неоднородности первого (*Корр. 1*) и второго порядков (*Корр. 2*). Корректирующие однородность поля дополнительные обмотки меры подключены через блок коррекции к цепи питания меры от стабилизатора тока. Зависимость показаний магнитометра от изменения положения центра чувствительного элемента цезиевого датчика относительно центра меры не превышает $2 \cdot 10^{-7}$ при смещении на 2 мм.

Для воспроизведения МИ в диапазоне 1–25 мТл по обмотке меры МКМИ пропускается ток силой 0,064–1,6 А.

При сличениях частоты АМР ЦМК с частотой ЯМР-тесламетра выполняются разновременные измерения частоты каждым из приборов с попеременной установкой их датчиков в центр рабочего объёма МКМИ. При этом обеспечивается идентичность силы тока, пропускаемого по обмотке меры во время снятия показаний сличаемых приборов.

В процессе исследований экспериментально определён температурный коэффициент α_{tR} связи изменений константы преобразования меры МКМИ с изменениями электрического сопротивления её обмотки. Температурный коэффициент α_{tR} применялся для расчёта поправок, учитывающих изменения воспроизводимой мерой МИ при изменении температуры её обмотки в установившемся температурном режиме за интервал времени между моментами измерений частот АМР и ЯМР. Погрешность регистрации зависимости константы преобразования меры от температуры (сопротивления обмотки) не превышает $2 \cdot 10^{-7}$ при расчёте изменений МИ за интервал времени менее 10 мин.

При подготовке к сличениям КЦМ и ЯМР-тесламетра при каждом значении МИ, воспроизводимом мерой, предварительно осуществлялись длительная стабилизация температурного режима обмотки МКМИ, стабилизация и контроль упомянутых выше параметров, влияющих на неопределённость измерений. При проведении сличений частот АМР и ЯМР в диапазоне 8–25 мТл относительная стандартная неопределённость типа А составила менее $3 \cdot 10^{-7}$.

На последнем этапе передачи единицы МИ в область сильных полей производится сличение комплекта датчиков экспериментального образца ЯМР-тесламетра в электромагните-компараторе. При этом производились последовательные сличения измерительных преобразователей ЯМР-тесламетра, охватывающих ряд поддиапазонов измерений, перекрывающих диапазон 0,02–1 Тл, и калибровка рабочих ЯМР-тесламетров с разработанным экспериментальным образцом ЯМР-тесламетра.

Результаты описанных выше исследований позволяют передать единицу МИ непосредственно от ГЭТ 12–2011, функционирующего до настоящего времени в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$–$1 \cdot 10^{-3}$ Тл, СИ, работающим в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$– 1 Тл с суммарной стандартной неопределённостью в пределах $(1...2) \cdot 10^{-6}$.

Исследования по определению и уточнению компонентов коэффициента преобразования КЦМ по приведённой выше методике продолжаются.

Расширение функциональных возможностей ГЭТ 12–2011 в области передачи единицы магнитного потока СИ параметров магнитомягких материалов. Для прямой передачи единицы магнитного потока СИ, применяемым для определения свойств магнитомягких материалов, был разработан индукционный компаратор и оптимизированы методики измерений. Проведённые исследования показали, что погрешности большинства используемых в метрологической практике методик измерений параметров магнитных материалов значительно превышают инструментальные погрешности рабочих СИ.

С целью более подробного изучения методических погрешностей было выполнено экспериментальное определение коэффициентов преобразования и неопределённости результатов измерений с помощью базового элемента разработанного индукционного компаратора – двухканального флюксметра (USB-флюксметра). Разработаны компьютерные программы, позволяющие повысить точность измерений МИ насыщения, остаточной МИ, параметров петли намагничивания и коэрцитивной силы магнитомягких материалов.

Основой аппаратного решения по составу индукционного компаратора являлись следующие положения. Магнитный поток в образце материала наиболее точно измеряется в статическом режиме намагничивания. В связи с этим компаратор должен содержать двухканальный флюксметр, позволяющий обеспечить компарирование по магнитному потоку. Два канала измерения магнитного потока необходимы для повышения точности измерений параметров магнитных материалов на образцах в форме цилиндра, так как обеспечивают одновременное измерение магнитного потока в двух его сечениях. USB-флюксметр предназначен для работы в комплексе с источником тока, коммутатором направления тока и различными намагничивающими и приёмными устройствами. Кроме двух каналов измерения магнитного потока, он также включает в себя два канала измерения электрического напряжения, используемые для измерений силы намагничивающего тока с помощью стандартных мер электрического сопротивления.

USB-флюксметр, источник тока и коммутатор направления тока управляются от компьютера. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс измерений. Диапазон измерения магнитного потока составляет 0,001–500 мВб, экспериментально оцененная неопределённость измерений находится в пределах 0,2–2 %.

Структурная схема индукционного компаратора приведена на рис. 2. Индукционный компаратор состоит из управляющего компьютера *ПК*, меры сопротивления *МС*, соленоида намагничивающего, кольцевого стандартного образца, аппарата намагничивающего, программируемых USB-флюксметра *Ф* и двух вольтметров *В*, источника тока *ИТ* и коммутатора тока *КТ*.

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

разцах. В состав компаратора входит комплект стандартных образцов. На практике применяются также образцы более простой формы (стержни, цилиндры, полосы), хотя они не позволяют получить максимальную точность определения параметров материала. Компаратор содержит комплект устройств намагничивания образцов подобных конфигураций, а также комплект приёмных устройств обработки индуцируемого сигнала.

В качестве пилотного исследования на разработанном компараторе в целях оптимизации методики определения параметров магнитных материалов был выполнен сравнительный анализ эффективности применения двух известных методов измерений: равноотстоящих магнитных потоков и равноотстоящих намагничивающих токов. Эти исследования были направлены, прежде всего, на снижение затрат времени при измерениях. Такой фактор прямо влияет на неопределённость, обусловленную временной нестабильностью СИ. Например, определение значений пяти основных параметров, таких как магнитная индукция насыщения, остаточная индукция, коэрцитивная сила, максимальная и начальная магнитные проницаемости материала, может занимать до нескольких часов в автоматическом режиме измерений.

Исследования проведены на изготовленном кольцевом стандартном образце электротехнической стали. Для обеспечения автоматизации измерений по действующей программе кривая намагниченности образца была предварительно измерена традиционным способом. По полученной кривой намагниченности были вычислены неравномерно расставленные задаваемые токи.

Установлено, что метод равноотстоящих потоков позволяет сократить продолжительность сеанса измерений при определении максимальной магнитной проницаемости в случае, если число точек наблюдения составляет 8–12. В случае меньшего числа точек наблюдения данный метод не работает, а в случае большего – выравнивается по эффективности с более простым методом равноотстоящих токов. При определении остальных параметров материала этот метод пока не показал заметных преимуществ по сравнению с принятым способом.

Заключение. Метод двойного радиооптического АМР с оптической накачкой атомов цезия выбран как основа квантового компаратора для передачи единицы МИ в область измерений средних и сильных постоянных магнитных полей в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$–1 Тл. Обоснован выбор методов и СИ для компаратора магнитных параметров магнитомягких материалов. Предложен и теоретически разработан метод, позволяющий повысить точность измерений магнитной проницаемости вещества на цилиндрических образцах. Расчётная точность измерения предложенным методом в 2–3 раза выше, чем традиционным методом. Новый метод измерений расширит функциональные возможности ГЭТ 12–2011 в область первичного воспроизведения единиц магнитных параметров материалов.

Определены и обоснованы состав и основные элементы кантового и индукционного компараторов магнитной

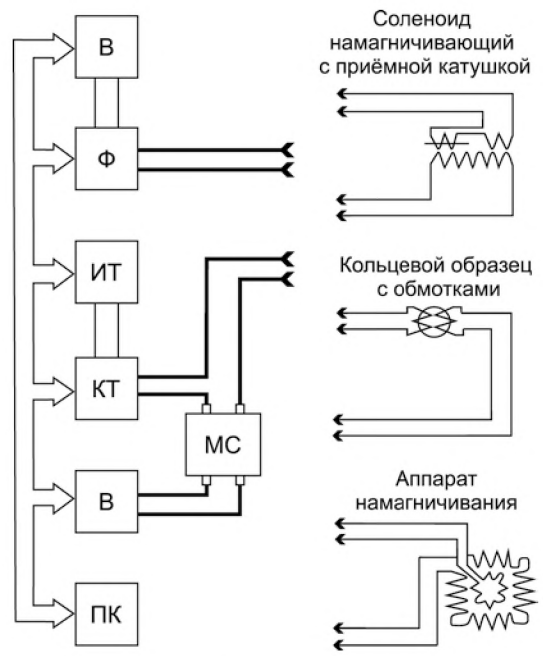

Рис. 2. Структурная схема индукционного компаратора: *ПК* – управляющий компьютер; *МС* – мера сопротивления; *Ф* – программируемый USB-флюксметр; *В* – вольтметры; *ИТ*, *КТ* – источник и коммутатор тока, соответственно

индукции, магнитного потока и методы передачи базовых единиц этих величин от ГЭТ12–2011 вторичным и рабочим эталонам в соответствии с государственной поверочной схемой [5].

Литература

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. **Шифрин В. Я., Калабин В. Н., Беляков Д. И.** Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции постоянного поля геомагнитного и гопогеомагнитного диапазонов // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 46–48.

3. **Померанцев Н. М., Рыжков В. М., Скроцкий Г. В.** Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972.

4. **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. 1997. No. 46(2).

5. **ГОСТ 8.030–2013.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции.

Дата принятия: 03.10.2017.