УДК 621.317.444; 53.089.68

В. Ф. МАТЮК, М. А. МЕЛЬГУЙ, В. Д. ПИУНОВ, А. Е. ПРЯХИН

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ

Институт прикладной физики НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 13.06.2003)

Введение. Различные источники постоянных магнитных полей в виде систем катушек с током, электромагнитов и постоянных магнитов широко используются в научных исследованиях и технике, медицине и промышленности. Для определения одного из основных параметров таких систем (магнитной индукции) используются разнообразные средства измерения. Для их градуировки и поверки необходимы соответствующие эталоны [1].

Средства измерений магнитной индукции постоянных полей различаются по принципу действия, условиям применения, методам поверки и охватывают диапазон полей от 10^{-12} до 10 Т. Для его перекрытия применяют отдельные эталоны и поверочные схемы, работающие в более узких диапазонах. Так, в СНГ этот диапазон разделен на три. Для интервала измерений от $1\cdot10^{-12}$ до $5\cdot10^{-2}$ Т существует Государственный первичный эталон и Государственная поверочная схема (ГОСТ 8.030—91), разработанные ВНИИМ им. Менделеева (г. Санкт-Петербург). В интервале от $5\cdot10^{-2}$ до 2 Т единство измерений обеспечивается с помощью Государственного специального эталона и поверочной схемы (ГОСТ 8.144—97), разработанных Национальным научным центром «Институт метрологии» (ННЦИМ, г. Харьков, Украина). В интервале 2—10 Т передача единицы магнитной индукции осуществляется от Государственного специального эталона, хранящегося во ВНИИФТРИ (г. Москва), при температурах 4,2; 77 и 293 К по поверочной схеме ГОСТ 8.188—85.

Наиболее широко используются в промышленности и медицине приборы для измерения индукции постоянных магнитных полей в диапазоне 0,05—2 Т. Это тесламетры разных типов, основанные на эффекте Холла: Ш1-8, Ф 43205, ЭМ 4305, Ф 4355, МПУ-1, ТП2-2У, МПМ-2 и др., предназначенные для измерений с погрешностью до 1%. В этом же диапазоне магнитной индукции работают приборы, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР), позволяющие производить измерения с погрешностью до 0,01%.

В Республике Беларусь до последнего времени не было образцового оборудования для поверки средств магнитных измерений. Поэтому для обеспечения единства и достоверности магнитных измерений, воспроизведения и хранения единицы магнитной индукции и дальнейшей передачи размера единицы рабочим средствам измерительной техники в Республике Беларусь Институтом прикладной физики Национальной академии наук Беларуси был разработан эталон магнитной индукции в наиболее востребованном и широко используемом диапазоне от 0,05 до 2 Т.

1. Физические основы создания эталона. Воспроизведение и передача единицы магнитной индукции с помощью созданного эталона основаны на формировании постоянного магнитного поля с высокими степенями стабильности и однородности и его измерении с использованием явления резонансного поглощения энергии высокочастотного магнитного поля (ЯМР) ядрами атомов рабочего вещества измерительного датчика. При этом регистрируется сигнал ЯМР, измеряется частота f электромагнитных колебаний, которая соответствует условиям резонанса, а магнитная индукция B вычисляется по формуле:

$$B = Cf, \tag{1}$$

где $C = 2\pi/\gamma$ — постоянная, связанная с гиромагнитным отношением γ для ядра атомов рабочего вещества. Для протона величина γ_p является фундаментальной константой: $\gamma_p = 26752{,}542(11) \cdot 10^4 \text{с}^{-1} \cdot \text{Т}^{-1}$.

Резонансная частота высокочастотного поля датчика строго пропорциональна индукции постоянного поля, что позволяет измерение магнитной индукции свести к измерению частоты электромагнитных колебаний. Поэтому, несмотря на трудности, связанные с созданием высокооднородного (погрешность не более 0,01% на 1 см) магнитного поля, необходимого для получения сигнала ЯМР, при построении эталона используется метод измерения и воспроизведения единицы магнитной индукции с помощью тесламетров на основе ЯМР через гиромагнитное отношение и частоту ядерного магнитного резонанса, которую можно измерить с высокой точностью.

В общем случае метрологический комплекс для поверки ЯМР-тесламетров постоянного магнитного поля в диапазоне средних магнитных полей (0,05—2 Т), построенный по такой схеме, должен содержать:

источник постоянного магнитного поля с высокой степенью стабильности и однородности (в рабочей области однородность не хуже 0,02% на 1 см);

стабилизированный блок питания источника магнитного поля (стабильность с погрешностью не более 0,01% за 1 мин);

устройство стабилизации магнитного поля (изменения магнитной индукции за 1 мин не должны превышать 0,002%);

измеритель магнитной индукции, использующий явление ЯМР (погрешность не более 0,005%);

частотомер (диапазон измерения от 1 до 20 МГц, погрешность не более 10^{-4}%).

2. Состав эталона.

Источник магнитного поля. Наиболее трудоемким этапом при разработке и изготовлении эталона является создание источника магнитной индукции, обеспечивающего интервал ее изменения от $5 \cdot 10^{-2}$ до 2 Т с отклонением от однородности в зоне расположения датчика не более 0,02% на 1 см. Из источников постоянного магнитного поля (постоянные магниты, электромагниты, катушки без сердечника) единственно приемлемым для создания области с однородной индукцией в вышеуказанном диапазоне является электромагнит. Его поле зависит от тока в намагничивающих катушках и допускает непрерывное регулирование. Сердечник из магнитомягкого железа позволяет получать поля, превышающие 2 Т.

Электромагнит, входящий в состав эталона (рис. 1), состоит из намагничивающих катушек *1* и *1'* и магнитопровода, который содержит ярмо *2*, сердечники *3* и *3'* и полюсные наконечники *4* и *4'*. Сердечники находятся внутри катушек и служат для формирования магнитного потока. Полюсные наконечники обеспечивают требуемое распределение магнитного потока в межполюсном зазоре *5* электромагнита, где должна быть создана область с однородной индукцией, величину которой можно регулировать изменением значения тока в намагничивающих катушках *1* и *1'*.

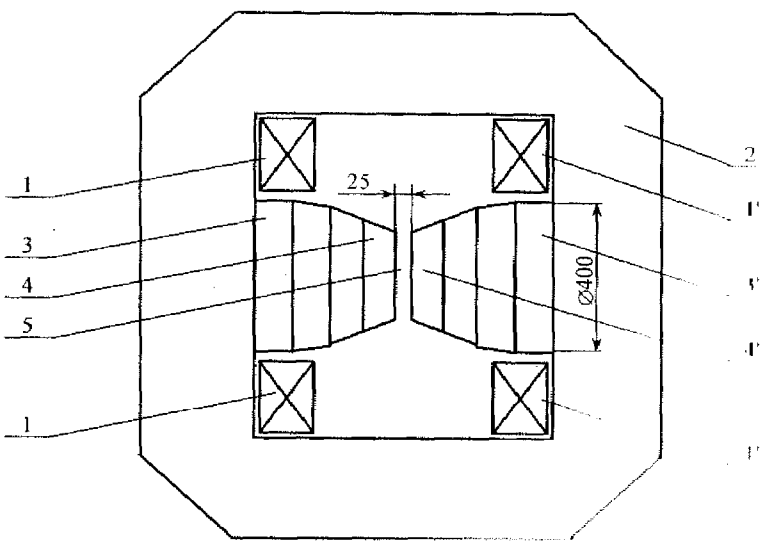

Рис. 1. Схема электромагнита

Следует отметить, что при проектировании электромагнита, используемого для эталона магнитной индукции Республики Беларусь, были заложены характеристики, превосходящие минимально требуемые по размерам рабочей области и степени однородности индукции в ней, позволяющие в дальнейшем осуществить модернизацию эталона. На основании рекомендаций [2—4] и требуемого объема однородного поля для размещения датчиков ЯМР величина зазора *l* между полюсами элек-

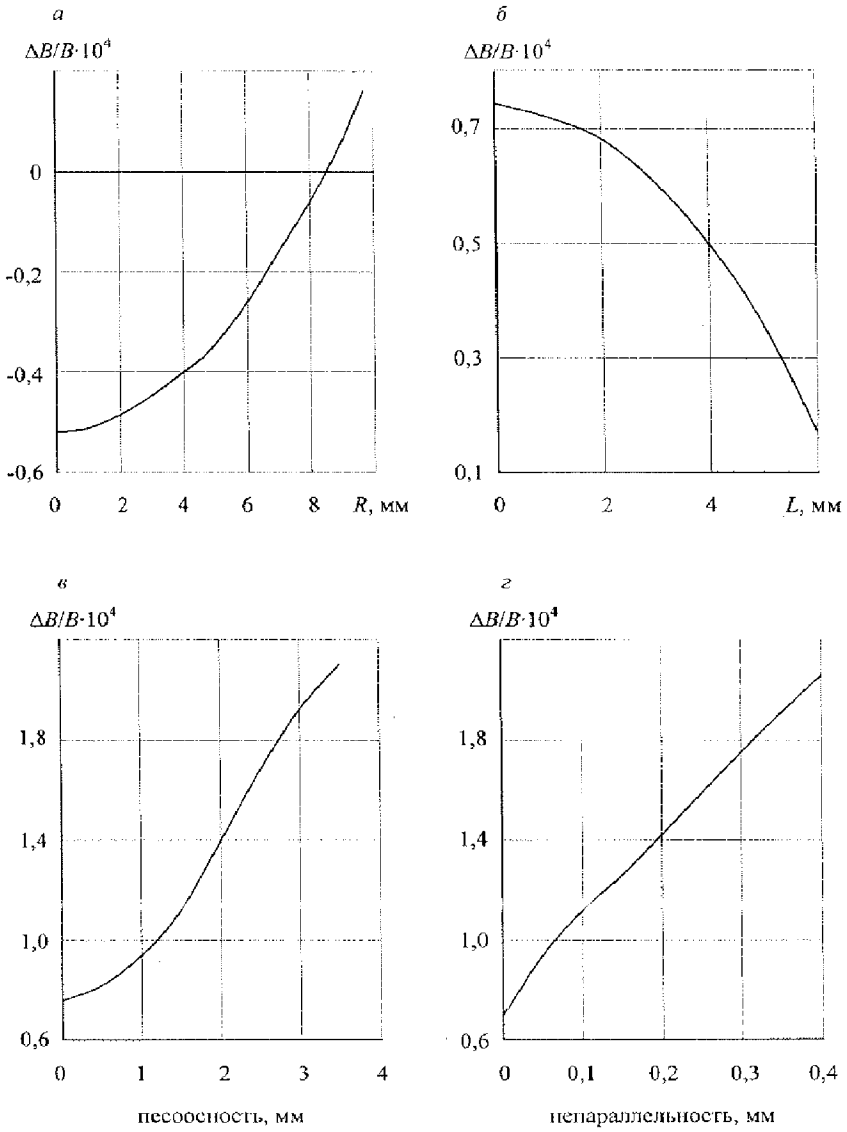

Рис. 2. Неоднородность поля в рабочем объеме при зазоре 25 мм и форме боковой поверхности по уравнению (4): *а*, *б* — соответственно вдоль радиуса торцевой поверхности и образующей, *в*, *г* — обусловленная несоосностью полюсных наконечников и непараллельностью их плоскостей соответственно

тромагнита выбрана равной 25 мм, число ампер-витков, равномерно распределенных между двумя симметрично расположенными катушками, по 24000 в каждой, диаметр зеркала полюсных наконечников 205 мм, диаметр сердечника 400 мм, ярмо имеет сечение 200×400 мм^2. Электромагнит с этими данными позволяет обеспечить расчетную величину индукции в зазоре до 2,1 Т при токе до 2,6 А.

Рабочая область представляет собой цилиндр, ось которого совпадает с осью сердечников и наконечников, радиус равен 10 мм, а длина равна межполюсному расстоянию. В рабочей области межполюсного пространства электромагнита возможна одновременная симметричная установка двух ЯМР-датчиков — измерителей магнитной индукции. При этом их центры находятся на оси рабочей области электромагнита.

Неоднородность поля в рабочей области межполюсного зазора зависит от диаметра, формы и магнитных свойств полюсных наконечников и от величины зазора [4]. Среди материалов, которые можно использовать для изготовления полюсных наконечников (армко-железо, сплавы гиперко и пермендюр), выбран пермендюр, для которого отклонение индукции у края зеркальной поверхности от индукции в центре получается наименьшим [4].

Форма боковой поверхности полюсных наконечников выбрана в соответствии с соотношением [5]:

$$z(r) = 0,5d + 0,613178\left\{\mathrm{ch}\left[0,0756(r - r_0) - 1\right]\right\}, \qquad (2)$$

где z и r — координаты точки на боковой поверхности наконечника в цилиндрической системе координат с началом координат в точке пересечения осевой линии полюсных наконечников с плоскостью, расположенной на одинаковых расстояниях $0,5d$ от зеркальных плоскостей; r_0 — максимальный радиус плоской части поверхности полюсного наконечника. При межполюсном зазоре d = 25 мм и выбранной в соответствии с формулой (2) форме боковой поверхности наконечников неоднородность индукции вдоль радиуса теоретически не превышает $5 \cdot 10^{-3}$% на 1 см по отношению к индукции в центре зазора (рис. 2, *а*), а неоднородность вдоль образующей цилиндра рабочей области $8 \cdot 10^{-3}$% (рис. 2, *б*).

Влияние несоосности наконечников и непараллельности их плоскостей на неоднородность индукции в рабочем объеме иллюстрируют рис. 2, *в*, *г*. Для выбранной поверхности полюсных наконечников и зазора в 25 мм несоосность в 1 мм так же, как и непараллельность наконечников в 0,1 мм, обусловливает неоднородность поля $1 \cdot 10^{-2}$% на 1 см. В соответствии с [2—4] шероховатость поверхности зеркальной части не превышает 1 мкм, а отклонение от плоскостности — 10 мкм.

Ярмо магнита выбрано двойным, так как вследствие его симметрии действующие большие магнитные силы не нарушают параллельности плоскостей полюсных наконечников и не влияют на однородность индукции магнитного поля в зазоре. Ширина ярма равна максимальному диаметру сердечника, а толщина — половине ширины.

Сечение катушки сделано прямоугольным с шириной 170 и высотой 200 мм. Для лучшей теплопроводности каркасы катушек выполнены из меди толщиной 5 мм. Катушки электромагнита намотаны проводом типа ПЭВ-2 диаметром 1,81 мм, число витков в каждой катушке 800, активное сопротивление катушек 210 Ом, индуктивное 17 Г. Внутренний диаметр намотки 436 мм. Кроме того, на полюсных наконечниках электромагнита расположены дополнительные катушки, которые используются для стабилизации величины индукции в его рабочей области. Чтобы обойтись без принудительного охлаждения во время использования эталона, плотность тока в меди через обмотки электромагнита при максимальной индукции ограничена величиной в 1 А/мм^2. Однако для получения более стабильных характеристик конструкция предусматривает возможность водяного охлаждения обмоток катушек электромагнита.

Стабилизированный источник питания электромагнита. Для регулирования индукции в рабочем объеме электромагнита в пределах 0,05—2 Т разработан специализированный источник питания, обеспечивающий возможность плавного изменения тока в катушках в пределах 0,01—2,6 А. Специфической особенностью, вызвавшей определенные трудности при разработке источника, является необходимость обеспечения высокостабилизированного режима работы на большую индуктивность нагрузки (17 Г) при достаточно высоком выходном напряжении (более 600 В) с потребляемой мощностью до 2 кВт. При этом для получения требуемого уровня временной нестабильности индукции в рабочем объеме электромагнита нестабильность выходного тока источника не должна была превышать 0,01% от установленного значения за 1 мин.

Источник стабилизированного тока ИСТ-1 представляет собой компенсационный стабилизатор с последовательно включенными регулирующим элементом и усилителем обратной связи. Для снижения мощности, рассеиваемой на регулирующем элементе, и уменьшения габаритов и массы трансформатора напряжение на регулирующем элементе стабилизируется с помощью управляемого преобразователя.

Структурная схема источника стабилизированного постоянного тока (ИСТ-1) приведена на рис. 3. Информация об установленном значении выходного тока с элементов управления, расположенных на передней панели, поступает на управляющую схему. Последняя устанавливает требуемую скважность импульсов задающего генератора, сигналы с которого усиливаются мостовым усилителем мощности, в диагональ которого включена первичная обмотка импульсного трансформатора. Снимаемые со вторичной обмотки трансформатора импульсы выпрямляются и фильтруются. Ток через нагрузку изменяется при помощи регулирующего элемента и управляющей схемы, на которую поступает информация с токоизмерительного элемента. Напряжение на регулирующем элементе ограничивается управляющей схемой путем изменения скважности импульсов задающего генератора.

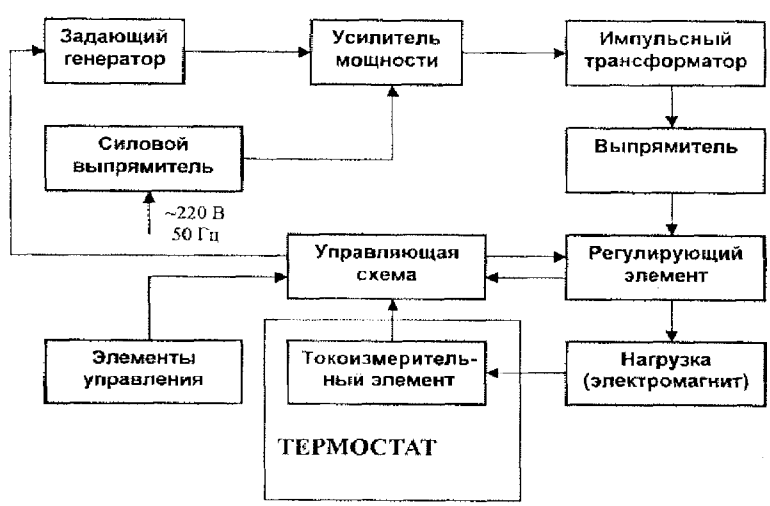

Рис. 3. Структурная схема источника ИСТ-1

Устройство стабилизации магнитного поля. Принцип действия стабилизатора индукции магнитного поля основан на введении отрицательной обратной связи с использованием явления ЯМР, при котором происходит резонансное поглощение энергии высокочастотного магнитного поля системой спинов ядер атомов вещества, помещенного в постоянное магнитное поле. Если стабилизировать частоту высокочастотного поля, то электрический сигнал на выходе спинового детектора зависит от величины и знака отклонения индукции магнитного поля от его резонансного значения. Этот сигнал используется для стабилизации поля с помощью корректирующих катушек электромагнита.

В состав ЯМР-стабилизатора магнитного поля входят базовый блок, подключаемый к корректирующим катушкам электромагнита, и шесть сменных преобразователей, помещаемых в зазор электромагнита и соединяемых кабелем с базовым блоком. Каждый преобразователь содержит спиновый детектор, выполненный по схеме Роллина с кварцевой стабилизацией частоты, и датчик ЯМР. В приборе использованы датчики от серийного ЯМР-магнитометра типа Ш1-1. Базовый блок содержит источник питания, управляемый источник тока, синхронный детектор, генератор модуляции и детектор резонансных условий.

Схема обеспечивает стабилизацию индукции магнитного поля в шести точках диапазона от 0,047 до 1,8 Т при частотах ЯМР 2,000 МГц (0,047 Т); 5,068 (0,12); 8,000 (0,188); 18,000 (0,423); 16,000 (0,97); 12,288 МГц (1,88 Т). Отклонение магнитного поля от установленного значения составляет не более $1 \cdot 10^{-3}$% в 1 мин при стабильности тока питания электромагнита не хуже 10^{-2}% в 1 мин. Режим стабилизации поддерживается при изменении установленной величины магнитного поля не более 5 мТ для всех шести указанных выше значений.

Измеритель магнитной индукции. Наиболее точные из находящихся в настоящее время в обращении измерителей магнитной индукции (тесламетры типов Ш1-1 и Ш1-9) имеют паспортную погрешность измерения более 0,01%, что ограничивает их использование в составе образцовых мер магнитной индукции. Потенциальные возможности метода ЯМР позволяют получать погрешность измерения как минимум на порядок меньше, что и реализовано в ряде описанных в литературе приборов [6, 7], которые представляют собой специализированные конструкции, изготовленные в единичном экземпляре.

Анализ причин сравнительно высокой погрешности прибора типа Ш1-1 показал, что основной вклад в нее обусловлен примененным в приборе методом регистрации сигналов ЯМР с большой (превышающей ширину линии магнитного резонанса) модуляцией измеряемого поля. Другой причиной высокой погрешности прибора Ш1-1 является невысокая стабильность частоты автодинного спинового детектора, которая может изменяться за время после настройки на резонанс и время ее измерения цифровым частотомером.

Модернизация прибора типа Ш1-1 состояла во введении следящего режима работы с использованием малой модуляции [8]. Сигнал ЯМР при этом является почти гармоническим, что дает возможность использовать синхронное детектирование и получить эквивалентную полосу пропускания тракта обработки сигнала вплоть до долей герц. При этом существенно повышается отношение сигнал/шум. Напряжение на выходе синхронного детектора зависит как первая производная от расстройки линии поглощения и равно нулю при точной настройке на резонанс. При этом значительно повышается точность фиксации резонанса и появляется возможность использования этого напряжения для автоматического управления частотой спинового детектора с целью реализации следящего режима работы. В приборе сохранен также и его основной штатный режим работы с большой модуляцией. Он используется для поиска резонанса и предварительной настройки. Затем прибор переключается в следящий режим работы с малой модуляцией.

Экспериментальные исследования точностных характеристик модернизированного прибора типа Ш1-1М, проведенные на ЯМР-спектрометре Института физико-органической химии НАН Беларуси при значении индукции в 2,35 Т (при частоте резонанса протонов 100 МГц), показали, что средняя временная нестабильность измерителя магнитной индукции типа Ш1-1М в течение 1 мин составляет не более $0{,}5 \cdot 10^{-4}$%, а относительная погрешность измерения индукции — не более $3 \cdot 10^{-3}$%. Прибор обеспечивает автоматическое поддержание условий ЯМР при изменении магнитной индукции на ±0,05% для ее значений во всем диапазоне измеряемых полей при неоднородности магнитного поля не более 0,02% на 1 см.

Метрологическая аттестация разработанного измерителя была проведена в НПО «Метрология» (ННЦИМ, г. Харьков, Украина) путем его сличения с эталонным ЯМР-измерителем магнитной индукции, входящим в состав наивысшего по точности в СНГ эталона магнитной индукции [9]. По результатам метрологической аттестации измеритель типа Ш1-1М

был отнесен к образцовым тесламетрам 1-го разряда, его относительная погрешность во всем диапазоне индукции 0,05—2 Т составила менее $3 \cdot 10^{-3}$%.

Частотомер предназначен для измерения частоты f (МГц) ядерного магнитного резонанса, наблюдаемого с помощью тесламетра типа Ш1-1М, и ее последующего использования в расчете величины магнитной индукции. В комплекте эталона магнитной индукции используется частотомер серийного производства типа Ч3-34А. Относительная погрешность измерения частоты с помощью данного частотомера в используемом нами режиме составляет не более $2 \cdot 10^{-6}$, что значительно меньше допустимой.

3. Результаты исследования эталона. Установлены точки, в которых определяют значения метрологических характеристик. Исследованы: диапазон воспроизведения индукции; стабильность установленного значения индукции во времени; время установления рабочего режима; кратковременная нестабильность; неоднородность индукции в рабочем объеме электромагнита; суммарная погрешность эталона.

Установление точек, величина магнитной индукции в которых определяет значение метрологических характеристик. Выбор количества проверяемых точек осуществлен так, чтобы обеспечить проверку соответствия метрологических характеристик нормированным значениям во всем диапазоне воспроизведения магнитной индукции B = 0,05—2 Т. Вышеуказанный диапазон охватывается пятью датчиками тесламетра типа Ш1-1М, один из которых может работать в двух поддиапазонах (при изменении цепи обратной связи спинового детектора). Таким образом, необходимо и достаточно в каждом из поддиапазонов установить по одной контрольной точке (всего 6). Эти точки устанавливаются более или менее произвольно в зависимости от поддиапазона. Так, на первом поддиапазоне в сравнительно слабых полях целесообразно установить эту точку ближе к верхней границе, где сигнал ЯМР больше по величине и меньше шумов.
В сильных полях на последнем поддиапазоне целесообразно контрольную точку устанавливать около его середины, ближе к нижней границе, чтобы уменьшить перегрев катушек электромагнита. Нами для метрологических исследований эталона установлены следующие значения частот ЯМР (контрольных точек индукции для определения метрологических характеристик): 2,000 МГц (0,047 Т); 5,068 (0,12); 8,000 (0,188); 18,000 (0,423); 16,000 (0,97); 12,288 МГц (1,88 Т).

Диапазон воспроизведения магнитной индукции. Достигаемый диапазон воспроизведения магнитной индукции B в зависимости от питающего электромагнит тока показан на рис. 4. Измерения магнитной индукции проводились прибором типа Ш1-1М при пропускании через электромагнит ряда фиксированных значений стабилизированного тока I. Датчики прибора устанавливались в центре рабочего зазора электромагнита. Следует отметить, что количественно ток в катушках электромагнита не связан строго с величиной магнитной индукции. Его значение может служить лишь для ориентировочной оценки индукции в зазоре электромагнита. Важно то, что изменением этого тока добиваются такой частоты резонанса ядер рабочего вещества измерителя магнитной индукции, которая в соответствии с выражением (1) определяет величину индукции.

Исследование стабильности установленного значения индукции во времени и определение времени установления рабочего режима. Стабильность воспроизведения величины магнитной индукции в зазоре электромагнита эталона индукции во многом определяется стабильностью тока, питающего электромагнит, степенью нагрева электромагнита, качеством работы стабилизатора магнитной индукции.

Для оценки временной стабильности величины индукции магнитного поля в зазоре электромагнита эталона и определения времени установления рабочего режима измерения индукции в рабочем объеме электромагнита проводились в течение более 5 ч после его включения при установленном значении стабилизированного тока питания на каждом из поддиапазонов индукции (на 6 частотах), указанных выше. Проведенные измерения показали, что время стабилизации зависит от величины исходной индукции (несколько больше при максимальном значении индукции), однако после 4 ч работы на всех

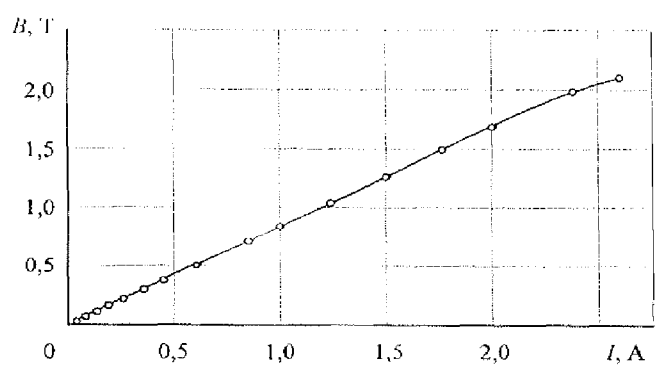

Рис. 4. Зависимость магнитной индукции в зазоре электромагнита от величины питающего тока

поддиапазонах изменения индукции составляют менее 0,05% в 1 ч или в среднем менее 0,01% за 1 мин. Поэтому целесообразно максимальным временем установления рабочего режима считать 4 ч. Однако при работах, не требующих высокой точности измерений, например, при поверке тесламетров, использующих преобразователи Холла, время прогрева эталона может быть сокращено до 1 ч. При этом изменения индукции составляют менее 0,2% в 1 ч или в среднем менее 0,03% за 1 мин.

Для оценки кратковременной стабильности эталона магнитной индукции после прогрева электромагнита в течение 4 ч нами была проведена проверка изменения магнитной индукции в межполюсном зазоре в течение 15 мин с измерениями через каждую минуту (по 3 наблюдениям в течение первых 10 с каждой минуты, которые затем усредняли). Максимальное относительное изменение за 1 мин в процентах составило не более $2 \cdot 10^{-3}$%.

Исследование однородности индукции в рабочем объеме электромагнита. Наличие магнитного поля с отклонением от однородности не более чем 0,05% на 1 см является минимально необходимым условием для получения устойчивого сигнала ЯМР. Улучшение однородности способствует повышению точности измерений.

Исследования однородности индукции в рабочем объеме электромагнита эталона магнитной индукции проводились путем измерения частоты ЯМР, соответствующей значению магнитной индукции на оси полюсной системы, а также на расстоянии 5 мм от оси по вертикали и на расстоянии 5 мм по горизонтали в направлении, перпендикулярном оси полюсной системы. При этом датчик образцового измерителя магнитной индукции был закреплен в пазу стойки (устройства ввода-вывода датчика) и перемещался в указанных направлениях вдоль соответствующих направляющих при вращении головки микрометрических винтов. Значения магнитной индукции, при которых проводились измерения, соответствовали минимальному и максимальному значениям индукции, отвечающим выбранным ранее точкам для определения метрологических характеристик. Максимальное отклонение от однородности составило 0,006% на 1 см.

Погрешность эталона магнитной индукции. Оценка точности эталона магнитной индукции осуществляется путем выявления границ неисключенных систематических погрешностей Θ_0 и определения среднего квадратического отклонения S_0 результата измерений. Систематическая погрешность эталона характеризуется в основном систематической погрешностью образцового тесламетра — измерителя магнитной индукции типа Ш1-1М. Источником систематической погрешности при работе с эталоном магнитной индукции может быть и частотомер. Однако его погрешность при измерении частоты ЯМР в зазоре электромагнита составляет не более 0,0002% и ею можно пренебречь. Поэтому основной задачей по исследованию погрешностей эталона было определение случайной составляющей погрешности. Расчеты по данным экспериментальных исследований показали, что для рабочего диапазона магнитной индукции эталона закон распределения рассеяния наблюдений при оценке случайной составляющей погрешности [10, 11] можно считать нормальным.

При определении погрешности воспроизведения единицы магнитной индукции количество наблюдений в каждой исследуемой точке в соответствии с ГОСТ 8.381—80 [12] принято равным 10. Использовалось значение заданной доверительной вероятности оценок 0,99. Исследуемые точки соответствуют индукциям поля 54,1; 119; 187,8; 422,7; 966,9 и 1880,1 мТ, при которых ЯМР регистрируется на частотах 2,304; 5,068; 8,0; 18,0; 16,0; 12,28 МГц. В указанных полях на эталоне проводились измерения частот ЯМР с интервалом времени в 1 мин.

Границу неисключенной систематической погрешности эталона определяли как относительную погрешность $\Theta_{отн}$ тесламетра типа Ш1-1М, аттестованного на межгосударственном первичном эталоне магнитной индукции:

$$\Theta_0 = \Theta_{отн}. \tag{3}$$

Случайная погрешность определялась как среднее квадратическое отклонение в относительной форме S_0 при $n = 10$ независимых наблюдениях:

$$S_0 = S_{i0} / \sqrt{n}, \tag{4}$$

где S_{i0} — среднее квадратическое отклонение результата наблюдений, вычисляемое по формуле:

$$S_{i0} = \frac{1}{\bar{f}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta f_i^2}{n-1}}, \tag{5}$$

$\Delta f_i = f_i - \overline{f}$; f_i — результат i-го наблюдения; $\overline{f}$ — результат измерений, вычисленный как среднее арифметическое результатов наблюдений.

Расчет, выполненный по результатам проведенных измерений, показал, что случайная погрешность эталона не превышает 0,0004%. Среднее квадратическое отклонение суммы неисключенных систематической и случайной погрешностей $S_{0\Sigma}$ вычисляли по формуле:

$$S_{0\Sigma} = \sqrt{S_0^2 + S_{\Theta_0}^2}\,, \tag{6}$$

где $S_{\Theta_0} = 1/\sqrt{3}\Theta_0$ — среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности.

Суммарная погрешность (доверительные границы суммарной погрешности δ_0) определялась по формуле:

$$\delta_0 = t_\Sigma S_{0\Sigma}\,, \tag{7}$$

где $t_\Sigma = (\Theta_0 + tS_0)/(S_{\Theta_0} + S_0)$; $t = 3{,}17$ при числе наблюдений 10 и доверительной вероятности $P = 0{,}99$. Суммарная относительная погрешность эталона магнитной индукции составила в итоге 0,0035.

Заключение. Разработан эталон магнитной индукции Республики Беларусь. В процессе метрологических исследований, проведенных совместно ИПФ НАН Беларуси и БелГИМ, установлены следующие характеристик эталона:

1. Диапазон изменения магнитной индукции от 0,05 до 2 Т.
2. Рабочий объем — цилиндр диаметром 20 и длиной 25 мм.
3. Максимальное отклонение от однородности в рабочем объеме электромагнита не превышает 0,006% от установленного значения.
4. Изменение магнитной индукции в рабочем объеме за 1 мин не превышает 0,006% от установленного значения.
5. Неисключенная систематическая погрешность эталона равна погрешности эталонного измерителя магнитной индукции типа Ш1-1М, которая не превышает 0,003%.
6. Случайная погрешность эталона характеризуется средним квадратическим отклонением и не превышает 0,0004%.
7. Доверительная граница суммарной погрешности при числе наблюдений 10 и доверительной вероятности 0,99 не превышает 0,0035%.

Метрологические характеристики созданного эталона соответствуют требованиям, предъявляемым межгосударственным стандартом ГОСТ 8.144—97 [9] к средствам измерения и передачи единицы магнитной индукции 1-го разряда. Национальный эталон магнитной индукции является вторичным и в соответствии с поверочной схемой ГОСТ 8.144—97 получает размер единицы магнитной индукции от государственного специального эталона, хранящегося в ННЦИМ (г. Харьков, Украина), обеспечивающего хранение и передачу единицы магнитной индукции в диапазоне 0,05 ... 2 Т со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $1 \cdot 10^{-6}$ при 10 независимых измерениях, и неисключенной систематической погрешностью $3 \cdot 10^{-6}$.

Работа выполнялась в рамках задания по ГНТП «Стандарты» [13]. Созданный метрологический комплекс утвержден в качестве Национального эталона Республики Беларусь. Национальный эталон единицы магнитной индукции (Тесла) размещен для постоянного хранения и эксплуатации в Институте прикладной физики НАН Беларуси.

Литература

1. СТБ 8002—93. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, хранения и применения. Мн., 1993.

2. Кумагаи Х. Электромагниты // Оё буцури. 1974. Т.43, № 3. С. 209—219.

3. Ishikawa and Chikazumi S. // Jap. J. of Applied Physics. 1962. Vol. 1, N. 3. P. 155—173.

4. Вонсовский В. Л., Лухвич А. А., Новиков С. А., Савицкий А. А. // ПТЭ. 1977. № 4. С. 243—246.

5. Кременькова Н. В., Лухвич А. А., Шукевич А. К. В кн.: Физические свойства металлов проблемы неразрушающего контроля. Мн., 1978. С. 223—229.

6. Богатырев Е. Е. // Тр. метролог. ин-тов СССР. 1962. Вып. 67(127). С. 76—88.

7. Зильберштейн Я. А., Зингерман В. И. // Тр. метролог. ин-тов СССР. 1965. Вып. 79(139). С. 56—64.
8. Матюк В. Ф., Пряхин А. Е., Мельгуй М. А., Пиунов В. Д. // Метрология и приборостроение. 2001. № 1—2. С. 39—41.
9. ГОСТ 8.144—97. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,05 до 2 Т. Мн., 2000.
10. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М., 1972.
11. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М., 1970.
12. ГОСТ 8.381—80. Эталоны. Способы выражения погрешностей М., 1980.
13. Климович С. В. // Метрология и приборостроение. 2001. № 3—4. С. 18—20.

V. F. MATYUK, M. A. MELGUI, V. D. PIUNOV, A. E. PRYAKHIN

METROLOGICAL COMPLEX FOR SIMULATION OF THE UNIT OF MAGNETIC INDUCTION OF PERMANENT FIELD

Summary

The construction principle of the designed in the Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences the metrological complex (the primary standard) for keeping in storage and transmission of the unit of magnetic induction of the permanent field in the range of 0,05 up to 2 T is designed and manufactured. The main devices the primary standard consists of are described. The results of investigation of the primary standard are done. The complex is declared as the National primary standard of magnetic induction of Republic Belarus.