

единицы поверхностной плотности теплового потока // Измерительная техника. 2009. № 10. С. 52–55.

8. **EUROMET** Project №426. Intercomparison of heat flux sensors. Final Report / MKEH Hungarian Trade Licensing Office, Thermometry Department. April 2010.

9. **Геращенко О. А., Грищенко Т. Г., Калинин А. Н., Томбасов Е. А., Черепанов В. Я.** Особенности кондуктивной градуировки преобразователей теплового потока в вакуумном адиабатическом калориметре // Промышленная теплотехника. 1984. Т. 6. № 5. С. 60–64.

10. **Томбасов Е. А., Лозинская О. М., Черепанов В. Я.** Образцовая установка для градуировки и поверки преоб-

разователей теплового потока // Метрология. 1987. № 1. С. 34–38.

11. **Черепанов В. Я.** Методы и средства определения метрологических характеристик контактных преобразователей теплового потока // Измерительная техника. 2004. № 8. С. 17–21.

12. **Вихарева Н. А., Зонова А. Д., Троценко Д. П., Черепанов В. Я., Ямшанов В. А.** Разработка и исследование новых методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотрии // Приборы. 2012. № 10. С. 1–8.

Дата принятия: 04.12.2017.

621.317.4

Государственный первичный эталон единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017

Е. А. ВОЛЕГОВА^{1,2}, М. А. МАЛЫГИН¹, Т. И. МАСЛОВА¹, А. С. ВОЛЕГОВ^{1,2}

¹Уральский научно-исследовательский институт метрологии, Екатеринбург, Россия, e-mail: ekaterina.volegova@gmail.com

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Представлена информация о совершенствовании Государственного первичного эталона единицы мощности магнитных потерь ГЭТ 198–2011. В состав эталона введена установка для воспроизведения единиц магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб. Работы по совершенствованию проходили в 2015–2016 гг. Описаны состав, принцип работы и метрологические характеристики Государственного первичного эталона единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017. Приведена информация о предварительных сличениях.

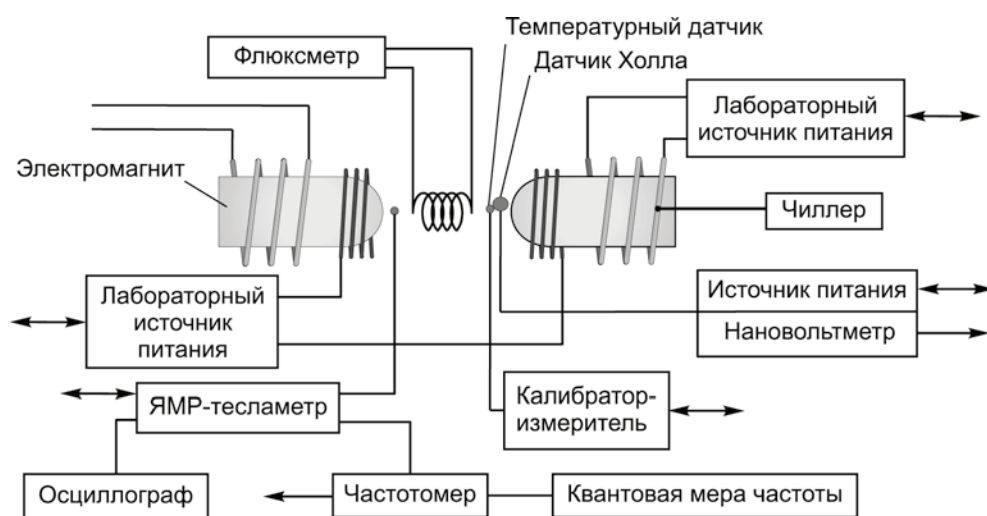
Ключевые слова: эталон, магнитотвёрдые материалы, магнитная индукция, магнитный поток, магнитомягкие материалы, мощность магнитных потерь, дополнительные сличения.

The information on updating the State primary measurement standard of magnetic power losses GET 198–2011 by comprising the setup for reproduction of magnetic flux density in the range 0.1 T to 2.5 T and magnetic flux in the range $1 \cdot 10^{-5}$ Wb to $3 \cdot 10^{-2}$ Wb has conducted in 2015–2016 is presented. The structure, principle of work and the metrological characteristics of this new standard GET 198–2017 are described. Some information about carrying out of preliminary comparisons is presented.

Key words: measurement standard, hard magnetic materials, magnetic flux density, magnetic flux, soft magnetic materials, magnetic power losses, preliminary comparisons.

Магнитные материалы во многом определяют уровень технологического развития промышленности, науки, военно-промышленного комплекса. Производимая предприятиями военно-промышленного комплекса продукция (промышленные роботы, обрабатывающие станки, ветрогенераторы, вентильные электродвигатели, системы наведения ракет, системы ориентировки, радары, некоторые виды фазированных антенных решёток) обеспечивает промышленную мощь и обороноспособность страны.

Применяемые в быту изделия (электродвигатели, громкоговорители и др.), содержащие постоянные магниты, определяют уровень комфорта жизни современного человека, поскольку в основном используются в качестве преобразователей электрической энергии в механическую. Дальнейшее развитие и совершенствование технических устройств на основе постоянных магнитов, а также снижение материалоемкости магнитов требуют создания новых магнитотвёрдых материалов (МТМ) с



Блок-схема установки ЦИКЛ-3:
→ выход на персональный компьютер; ↔ вход и выход на персональный компьютер

улучшенными гистерезисными характеристиками, такими как остаточная индукция, коэрцитивная сила по магнитной индукции, коэрцитивная сила по намагниченности, максимальное энергетическое произведение и др. Создание новых композиционных наноструктурированных МТМ невозможно без обеспечения измерений магнитных характеристик этих материалов, что, в свою очередь, диктует необходимость разработки стандартных образцов (СО) магнитных свойств МТМ. Для разработки СО, изготовленных из ферромагнитных материалов по стандартам [1–3], в том числе МТМ на основе редкоземельных металлов по [4], необходимы достаточно высокие постоянные магнитные поля с высокой временной стабильностью для обеспечения возможности измерения предельной петли гистерезиса и учёта эффектов магнитного последствия в образцах.

В 2011 г. в УНИИМ был разработан Государственный первичный эталон единицы мощности магнитных потерь ГЭТ 198–2011, возглавляющий государственную поверочную схему [5], которая обеспечивает воспроизведение и передачу единицы мощности магнитных потерь в Российской Федерации. В качестве средств передачи единицы используются СО утверждённых типов магнитомягких материалов. Для обеспечения возможности создания СО свойств МТМ в состав ГЭТ 198–2011 введена установка ЦИКЛ-3 для воспроизведения единиц магнитной индукции постоянного магнитного поля и магнитного потока, поскольку свойства МТМ определяются в постоянных магнитных полях.

В настоящей работе представлены результаты совершенствования ГЭТ 198–2011 в части расширения измерительных возможностей по воспроизведению единиц магнитной индукции постоянного магнитного поля и магнитного потока.

Приказом Росстандарта № 565 от 17 марта 2017 г. утверждён Государственный первичный эталон единиц мощ-

ности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017. Данный эталон состоит из комплекса следующих технических средств и вспомогательных устройств: установок ЦИКЛ, ЦИКЛ-2, ЦИКЛ-3; образцов магнитомягких материалов для воспроизведения единиц мощности магнитных потерь, удельной мощности магнитных потерь в виде СО удельной мощности магнитных потерь (ГСО 10270-2013 № 18, ГСО 10271-2013 № 2, ГСО 2002-80 № 04, ГСО 2129-89 СОТЭСЛ Комплект № 07).

Установка ЦИКЛ [6] предназначена для хранения и воспроизведения единиц мощности магнит-

ных потерь в образцах из магнитомягких материалов в виде полос размерами 280×30 мм и толщиной 0,1–0,5 мм для аппарата Эпштейна и образцов тороидальной формы, изготовленных согласно требованиям стандартов [7–10] в диапазоне частот 50 Гц – 200 кГц.

Установка ЦИКЛ-2 [6] предназначена для хранения и воспроизведения единиц мощности магнитных потерь в образцах в виде листов из электротехнической стали (длиной 500–600 мм, шириной 500 мм, толщиной 0,20–0,50 мм) и в образцах тороидальной формы, изготовленных согласно требованиям [7, 8, 10] в диапазоне частот 50–1000 Гц.

Установка ЦИКЛ-3 предназначена для хранения и воспроизведения единиц магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне 0,1–2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне $1 \cdot 10^{-5}$ – $3 \cdot 10^{-2}$ Вб. В основе установки ЦИКЛ-3 лежит метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на вынужденной прецессии магнитных моментов ядер водорода или дейтерия. Ядерный магнитный резонанс возникает при взаимодействии парамагнитного газа магнитных моментов ядер с взаимно перпендикулярными измеряемым (поляризующим) и высокочастотным переменным магнитными полями.

Блок-схема установки ЦИКЛ-3 приведена на рисунке. В установке ЦИКЛ-3 для создания магнитного поля используется электромагнит, питание которого осуществляется от лабораторного источника питания TDK – Lambda GEN125-120-3P4 в режиме стабилизации силы выходного электрического тока. Диаметр полюсов электромагнита составляет 250 мм, межполюсное расстояние – 40 мм. Намагничивающие катушки электромагнита намотаны из полых медных трубок квадратного сечения, внутри которых в процессе эксплуатации циркулирует охлаждающая жидкость (вода или водный раствор этиленгликоля). Чиллер выполняет принудительную циркуляцию охлаждающей жидкости и отвод тепловой энергии, выделяющейся в намагничивающих

катушках. Геометрия катушек приближена к геометрии колец Гельмгольца. Катушки отделены от материала ярма термоизоляционным материалом, препятствующим нагреву ярма электромагнита от намагничивающих катушек и изменению его магнитной проницаемости. Магнитная индукция измеряется посредством датчика ЯМР тесламетра Metrolab PT2025. Для обеспечения возможности измерения магнитной индукции во всём диапазоне заявленных значений используется пять датчиков.

Измерение частоты ЯМР осуществляется как тесламетром Metrolab PT2025, так и внешним частотомером SR625 с квантовой мерой частоты. Последний выполняет измерения с частотой 10 Гц. Корректность определения условий резонанса амплитудным детектором тесламетра оценивается по форме сигнала ЯМР и модулирующего поля, выводимых на осциллограф Tektronix DPO 3032.

При поверке и калибровке катушек больших размеров для периодической проверки однородности поля и исследования распределения индукции в зазоре электромагнита используются датчики Холла. Питание датчика Холла осуществляется от источника-измерителя Keithley 2400. Электродвижущая сила (ЭДС) с датчика Холла измеряется посредством нановольтметра Keithley 2182A. Для уменьшения влияния паразитных источников ЭДС по механизму Риги–Ледюка, Нернста–Эттингаузена и др. измерения проводятся на квазипеременном электрическом токе. Для учёта влияния температуры на коэффициент преобразования датчика Холла в тепловом контакте с последним смонтирован платиновый термометр сопротивления, электрическое сопротивление которого определяется калибратором-измерителем Keithley 2400 по четырёхпроводной схеме.

Изменения потокоцепления измерительной катушки измеряются флюксометром Magnet-Physik EF5. Измерения возможны как при стационарной индукции в зазоре электромагнита, так и при её изменении.

Сбор информации, управление средствами измерений, входящими в состав установки ЦИКЛ-3, осуществляется специализированной программой, разработанной в среде LabVIEW.

Особенностью установки ЦИКЛ-3 является возможность воспроизведения значений магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне 0,1–2,5 Тл со средним квадратическим отклонением (СКО) $9 \cdot 10^{-7}$. Столь малое значение СКО обеспечивается программной системой управления и совместным использованием двух лабораторных источников питания (TDK-Lambda GEN125-120-3P4 и Tektronix PWS4305) и двух пар намагничивающих обмоток. Кроме того, большая зона однородности (12 см в диапазоне 0,1–1,5 Тл, 7 см в диапазоне 1,5–2 Тл и 3 см в зоне 2–2,5 Тл) позволяет измерять магнитные характеристики постоянных магнитов больших размеров.

Для оценки измерительных возможностей и подтверждения метрологических характеристик установки ЦИКЛ-3 из состава ГЭТ 198–2017 в части воспроизведения магнитного потока были проведены двухсторонние сличения

Метрологические характеристики установки ЦИКЛ-3 в составе ГЭТ 198–2017

Диапазон воспроизведения магнитной индукции постоянного магнитного поля.....	0,1–2,5 Тл
Стандартная неопределённость воспроизведения магнитной индукции	
по типу А за 10 мин	$9,0 \cdot 10^{-7}$
Стандартная неопределённость воспроизведения магнитной индукции по типу В:	
в диапазоне 0,1–2,0 Тл	$1,0 \cdot 10^{-5}$ – $3,0 \cdot 10^{-5}$
в диапазоне 2,0–2,5 Тл	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Расширенная неопределённость (при $k=2$):	
в диапазоне 0,1–2,0 Тл	$2,0 \cdot 10^{-5}$ – $6,0 \cdot 10^{-5}$
в диапазоне 2,0–2,5 Тл	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Диапазон воспроизведения магнитного потока .	$1,0 \cdot 10^{-5}$ – $3,0 \cdot 10^{-2}$ Вб
Стандартная неопределённость воспроизведения магнитного потока:	
по типу А при 10 независимых измерениях	$8,0 \cdot 10^{-4}$
по типу В	$1,5 \cdot 10^{-4}$ – $7,0 \cdot 10^{-4}$
Расширенная неопределённость (при $k=2$)	$2,0 \cdot 10^{-3}$ – $4,0 \cdot 10^{-3}$

установки с эталонной установкой Физико-технического института (РТВ, Германия). В качестве транспортируемых эталонов сравнения использовались катушки поля с различными значениями постоянной катушки в диапазоне 0,41–19,26 Вб/Тл. Результаты сличений показали эквивалентность эталонных средств измерений стран – участниц сличений.

Таким образом, разработана установка ЦИКЛ-3, входящая в состав ГЭТ 198–2017, характеристики которого соответствуют мировому уровню.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 17809–72.** Материалы магнитотвердые литые. Марки.
2. **ГОСТ 24063–80.** Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры.
3. **ГОСТ 24897–81.** Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки.
4. **ГОСТ Р 52956–2008.** Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры.
5. **ГОСТ Р 8.799–2012.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности магнитных потерь в магнитомягких материалах.
6. **Маслова Т. И., Малюк В. П., Дидик Ю. И., Малыгин М. А.** Государственный первичный эталон единиц мощности магнитных потерь // Измерительная техника. 2013. № 9. С. 3–5.
7. **ГОСТ 12119.4–98.** Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля.
8. **ГОСТ 10160–75.** Сплавы прецизионные магнитомягкие. Технические условия.

9. ГОСТ 12635–67. Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц.

10. ГОСТ Р 53934–2010. Прокат тонколистовой холодно-

катаный из электротехнической анизотропной стали. Технические условия.

Дата принятия: 15.12.2017.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

681.2.088+004.67

Интервальный метод бисекции для метрологически обоснованного поиска корней уравнений с неточно заданными исходными данными

К. К. СЕМЁНОВ, А. А. ЦЕЛИЩЕВА

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: semenov.k.k@gmail.com

Представлена модификация метода бисекции для поиска корня нелинейного уравнения. Данная модификация позволяет использовать метод бисекции для решения уравнений косвенных измерений в полном соответствии с метрологическими требованиями, предъявляемыми к результатам косвенных измерений. Показано, что использование сведений о неточности коэффициентов уравнения, являющихся результатами прямых измерений, позволяет ускорить поиск корня и сопроводить его достоверной оценкой характеристик погрешности.

Ключевые слова: поиск корней нелинейных уравнений, бисекция, косвенные измерения, метрологическое автосопровождение вычислений с неточными данными.

This paper presents the modification of bisection method for searching the nonlinear equation's root that is applicable for solving the indirect measurements equations in full accordance with metrological requirements for their roots as indirect measurements results. The information using on the inaccuracy of the equation coefficients that are the direct measurements results allows speeding up the searching the root and supporting it with the reliable estimation of its error characteristics.

Key words: nonlinear equations root searching, bisection, indirect measurements, metrological self-tracking for inaccurate data processing.

Получаемые в ходе измерений результаты всегда являются неточными. Их значения возмущены погрешностями и потому неопределёнными. Любые результаты расчётов с такими данными также неточны, так как наследуют от них погрешность вне зависимости от того, насколько образцово, корректно и методически безошибочно вычисления были организованы и исполнены. Для обоснованного принятия решений по полученным результатам расчётов необходима оценка пределов их возможной погрешности, выполняемая в полном соответствии с метрологическими требованиями. Расчёты, выполняемые с неточными данными, часто сводятся либо к непосредственным вычислениям значений заданных функций, либо к решению поисковых задач, связанных с определением характерных значений: корней уравнений, точек оптимума, коэффициентов аппроксимирующих функций и т. д. Известны методы, позволяющие реализовать метрологическое сопровождение результатов прямых вычислений в полной мере [1–3]. При решении же поисковых задач часто используют специальные подходы, которые требуют учёта специфики этих задач при оценке погрешности результатов, унаследованной от исходных данных.

Задача оценки корней нелинейных уравнений встречается в метрологической практике при выполнении косвенных и совместных измерений. Действительно, многие физические величины не могут быть измерены непосредственно. Тогда необходимо привлечение математических моделей, описывающих исследуемый объект. Использование математических моделей позволяет осуществить необходимые измерения косвенно, когда ряд величин измеряется напрямую, а искомые значения вычисляются по полученным результатам с помощью известных уравнений взаимосвязи. С математической точки зрения подобные вычисления часто представляют собой решение уравнения с коэффициентами, известными неточно. Поиск корней уравнения осуществляется в вычислительном устройстве измерительной системы, реализующей косвенное измерение, и должен быть подвержен метрологическому контролю, как и любая другая измерительная процедура или преобразование [4–6].

На практике для нахождения решений нелинейных уравнений используют различные итерационные методы. Их применение требует предварительного задания начального