

Научная статья

УДК 006.91:633:537.636.531.751.3:537

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-48-55>

Электромагнитная система для реализации единицы массы

Екатерина Александровна Волегова^{1✉}, Сергей Витальевич Андреев²,
Николай Владимирович Кудреватых³, Виктория Евгеньевна Мальцева⁴,
Татьяна Ивановна Маслова⁵, Дмитрий Сергеевич Незнахин⁶, Сергей Владимирович Сердюков⁷,
Андрей Николаевич Уржумцев⁸, Алексей Сергеевич Волегов⁹

^{1, 5, 7, 9} Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Екатеринбург, Россия

^{2, 3, 4, 6, 8, 9} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹volegovaea@uniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3754-0743>

²sergey.andreev@urfu.ru

³nikolai.kudrevatykh@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0996-6974>

⁴viktoria.maltseva@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8412-0960>

⁵maslova@uniim.ru

⁶d.s.neznakhin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5175-4473>

⁷serdyukovsv@uniim.ru

⁸andrei.urzhumtsev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0335-7684>

⁹alexey.volegov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0902-0636>

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований магнитных характеристик электромагнитной системы прототипа весов Киббла. На основе прототипа рассмотрены технические решения, которые могут быть применены при создании первичного эталона килограмма на фундаментальных физических константах. Использован метод конечных элементов для расчёта геометрических форм и размеров элементов системы с целью получения постоянного значения коэффициента преобразования BL вдоль оси системы. По результатам расчётов спроектирована и изготовлена электромагнитная система. На основе 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 разработана установка, предназначенная для измерения топологии магнитного поля в зазоре магнитной системы. Проведены экспериментальные исследования распределения магнитной индукции в зазоре электромагнитной системы и снаружи этой системы. Определены силовые характеристики электромагнитной системы. Установлено влияние электрического тока, протекающего по катушке в режиме взвешивания, на изменение потокоцепления катушки. Определено положение катушки в режиме взвешивания, в котором коэффициент преобразования магнитной системы не зависит от силы электрического тока в катушке.

Ключевые слова: эталон, весы Киббла, килограмм, магнитная индукция, электромагнитная система, ГЭТ 198-2017, метод конечных элементов

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам научно-исследовательского отдела эталонов и научных исследований в области измерений линейных ускорений, гравиметрии и угла ФГУП ВНИИМ им. Д. И. Менделеева за интересные и продуктивные дискуссии.

Финансирование: работа выполнена в рамках НИР «Исследование путей создания эталона килограмма на основе ватт-весов», шифр «Баланс» (государственный контракт № 120-85/2020 от 15.09.2020) и при частичной поддержке ГЗ УрФУ FEUZ-2020-0051.

Для цитирования: Волегова Е. А., Андреев С. В., Кудреватых Н. В., Мальцева В. Е., Маслова Т. И., Незнахин Д. С., Сердюков С. В., Уржумцев А. Н., Волегов А. С. Электромагнитная система для реализации единицы массы // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 48–55.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-48-55>

Electromagnetic system to realizing a unit of mass

Ekaterina A. Volegova^{1✉}, Sergey V. Andreev², Nikolai V. Kudrevatykh³, Viktoria E. Maltseva⁴, Tatiana I. Maslova⁵,
Dmitriy S. Neznakhin⁶, Sergey V. Serdiukov⁷, Andrei N. Urzhumtsev⁸, Aleksey S. Volegov⁹

^{1, 5, 7, 9} UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM), Ekaterinburg, Russia

^{2, 3, 4, 6, 8, 9} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹volegovaea@uniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3754-0743>

²sergey.andreev@urfu.ru

³nikolai.kudrevatykh@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0996-6974>

⁴viktoria.maltseva@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8412-0960>

⁵maslova@uniim.ru

⁶d.s.neznakhin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5175-4473>

⁷serdyukovsv@uniim.ru

⁸andrei.urzhumtsev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0335-7684>

⁹alexey.volegov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0902-0636>

Abstract. Results of theoretical and experimental studies of the magnetic characteristics of the electromagnetic system of the prototype Kibble balance is presented. On the basis of the prototype, technical solutions that can be applied in the development of the primary kilogram standard based on the fundamental physical constants are considered. The finite element method was used to design the geometric shapes and dimensions of the system elements in order to obtain a constant value of the conversion coefficient BL . The electromagnetic system was designed and manufactured. On the basis of the State primary standard unit of magnetic losses, magnetic flux density of the constant magnetic field in the range from 0.1 to 2.5 T and magnetic flux in the range from $1 \cdot 10^{-5}$ to $3 \cdot 10^{-2}$ Wb GET 198-2017 the installation designed for measuring the topology of the magnetic field in the magnetic system gap was developed. Experimental studies of magnetic flux density distribution in the air gap of the electromagnetic system and outside of it were carried out. The force characteristics of the electromagnetic system were determined. The influence of electric current flowing through the coil in the weighing mode on the change of coil flux linkage was determined. The position of the coil in the weighing mode in which the coefficient of conversion of the magnetic system does not depend on the strength of the electric current in the coil is determined.

Keywords: measurement standard, Kibble balance, kilogram, magnetic flux density, electromagnetic system, GET 198-2017, finite element method

Acknowledgments: the authors are grateful to the staff of the research department of measurement standards and research in the field of linear acceleration, gravimetry, and angle measurements of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology for interesting and productive discussions.

Financial Support: the work was carried out within the research project "Research of ways to create a standard kilogram based on watt-balance", cipher "Balance" (state contract № 120-85/2020 from 15.09.2020) and with partial support from SC UrFU FEUZ-2020-0051.

Введение. Решение по переопределению единицы массы через значение постоянной Планка, принятое на проходившей в 2018 г. XXVI Генеральной конференции по мерам и весам, вступило в силу во Всемирный день метрологии 20 мая 2019 г. Значение килограмма установлено фиксацией численного значения постоянной Планка $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Единица [Дж·с] эквивалентна $[кг \cdot м^2 \cdot с^{-1}]$, где метр и секунда определены через фундаментальные физические константы [1]. Практическая реализация переопределения килограмма на основе фундаментальных физических констант и квантовых эффектов становится возможной с применением специального оборудования – ватт-весов (или весов Киббла) [2].

В деятельности по созданию эталона килограмма на основе весов Киббла вовлечены не менее десяти национальных метрологических институтов и лабораторий. Наиболее известные из них – BIPM (Франция), NIST (США), MSL (Новая Зеландия), PTB (Германия), METAS (Швейцария), NPL (Великобритания), NRC (Канада), KRISS (Республика Корея).

Основная идея весов Киббла заключается во взаимодействии катушки, по которой протекает электрический ток, с магнитным полем определённой симметрии. На разных этапах развития весов Киббла магнитное поле создавалось сверхпроводящими соленоидами, электромагнитами [3] и магнитными системами на основе постоянных магнитов. В настоящий момент все действующие весы Киббла работают на основе магнитных систем на постоянных магнитах, что обусловлено высокими временной и температурной стабильностями магнитных систем такого типа, а также отсутствием большого количества вспомогательных элементов.

Вспомогательными элементами в случае электромагнита являются источник питания намагничивающих обмоток и система их охлаждения. Причём последняя должна обеспечивать постоянный теплоотвод вне зависимости от температуры окружающего воздуха. В случае сверхпроводящих соленоидов необходимо использование криокулеров и существенное экранирование сверхпроводников от нагрева. Поскольку взвешивание осуществляется в вакууме, дополнительные вводы газовых и водяных линий усложняют вакуумную систему и ухудшают возможность юстировки магнитной системы. Криокулеры и системы охлаждения во время своей работы вибрируют, а источники питания имеют нестабильность силы выходного электрического тока, что ухудшает метрологические характеристики весов.

В существующих весах Киббла используется несколько вариантов магнитных систем, которые целесообразно классифицировать по количеству рабочих зазоров и, соответственно, катушек. В весах Киббла NPL [4, 5] используются магнитные системы с двумя зазорами, что, по мнению авторов этих работ, позволяет нивелировать изменение вертикальной компоненты магнитного поля. В остальных вариантах весов используется магнитная система с одним зазором [6–11]. Магнитные системы с одним зазором отличаются друг от друга, их можно классифицировать по ряду параметров, таких как форма зазора, количество магнитов и др. Во всех магнитных системах весов Киббла используется воздушный зазор, образованный боковыми поверхностями коаксиальных цилиндров различных радиусов. В этом зазоре формируется радиальное распределение магнитной индукции. При коаксиальном расположении катушки цилиндрической формы в таком зазоре и пропускании

через неё электрического тока на катушку будет действовать сила, направленная вдоль оси катушки:

$$F = I \int B dl,$$

где I – сила электрического тока; B – магнитная индукция; dl – бесконечно короткий элемент проводника.

Эта сила противодействует силе тяжести при взвешивании. В режиме калибровки весов Киббла катушка перемещается с постоянной скоростью вдоль зазора, в результате чего в ней наводится электродвижущая сила (ЭДС) ε , равная произведению скорости движения катушки вдоль оси dz/dt и интеграла произведения магнитной индукции в месте расположения элемента катушки в зазоре по объёму расположения проводника:

$$\varepsilon = \frac{dz}{dt} \int B dl.$$

Основная идея Б. Киббла заключается в том, что в обоих режимах работы весов Киббла (взвешивание и калибровка) значение $\int B dl$ одинаково и не требует отдельного измерения.

Цель настоящей работы заключается в разработке и создании электромагнитной системы, на основе которой можно построить весы Киббла. Электромагнитная система состоит из магнитной системы на постоянных магнитах и обеспечивает радиальное распределение магнитной индукции в рабочем зазоре, образованном боковыми поверхностями коаксиальных цилиндров различных радиусов, а также катушки с подвесом, по которой в режиме взвешивания пропускается электрический

ток, компенсирующий силу тяжести, а в режиме калибровки измеряется электрическое напряжение на выводах катушки.

Моделирование и изготовление электромагнитной системы. Для реализации идеи Б. Киббла необходимо, чтобы на расстоянии рабочего хода катушки выражение $\int B dl$ было постоянным независимо от создаваемой силы, компенсирующей силу тяжести. В этом случае можно записать

$$\int B dl = BL,$$

где L – длина проводника катушки.

Возникающая на этапе калибровки весов ЭДС должна быть максимально возможной для повышения точности измерения, а сила электрического тока, протекающего через катушку, – минимальной для уменьшения нагрева катушки и повышения точности измерения. На основании этого сформулируем основные требования, предъявляемые к электромагнитной части весов Киббла:

создание максимально возможной по значению и однородно распределённой по углу магнитной индукции в рабочем зазоре; временная и температурная стабильности магнитной индукции;

независимость индукции (напряжённости магнитного поля) в рабочем зазоре от силы электрического тока, протекающего в катушке.

Значение $\int B dl$ зависит от многих факторов. Основным влияющим фактором является распределение магнитной индукции в зазоре электромагнитной системы, причём в первую очередь в той части зазора, где перемещается катушка.

При разработке электромагнитной системы использовали моделирование методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics. Суть метода заключается

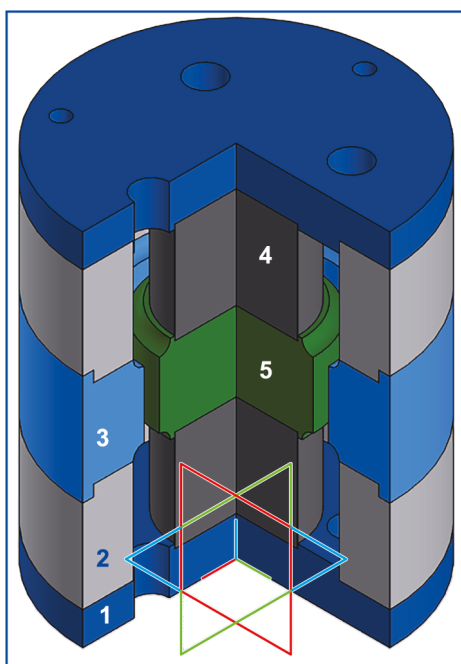


Рис. 1. Объёмная модель магнитной системы:
1 – торцевой элемент ярма; 2 – ярмо; 3, 5 – соответственно наружный и внутренний полюсные наконечники; 4 – магнит

Fig. 1. Volumetric model of the magnetic system:
1 – end element of the yoke; 2 – yoke; 3, 5 – outer and inner pole pieces, respectively; 4 – magnet

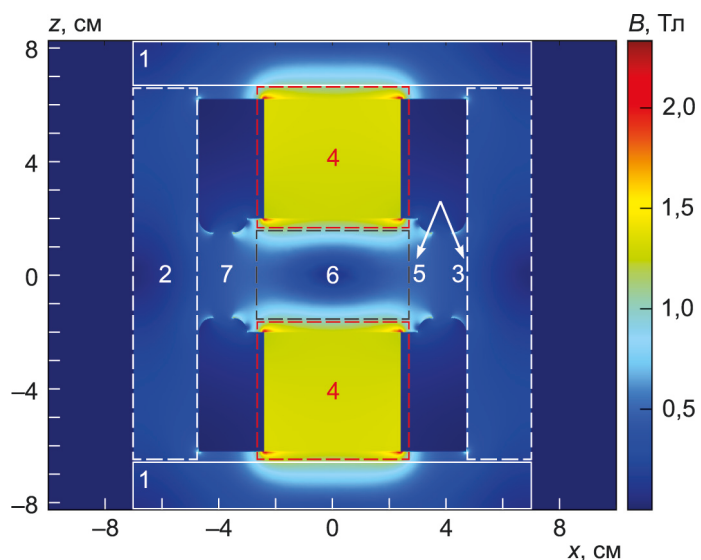


Рис. 2. Распределение модуля вектора магнитной индукции внутри и снаружи магнитной системы:
1–5 – те же, что на рис. 1; 6 – внутренний полюс; 7 – воздушный зазор

Fig. 2. Results of calculating the distribution of the modulus of the magnetic flux density vector in the magnetic system and outside of it:
1–5 – the same as in Fig. 1; 6 – inner pole; 7 – air gap

в численном решении дифференциальных уравнений в частных производных в ограниченных областях пространства.

Однородность радиальной составляющей магнитной индукции и $|B_d|$ вдоль оси системы можно достичь двумя способами:

изготовлением магнитной системы с зазором такой высоты, при которой краевые эффекты не оказывают влияние на распределение магнитной индукции в центральной части;

изготовлением полюсных наконечников специальной формы для компенсации краевых эффектов и обеспечения вертикальной однородности радиальной составляющей магнитной индукции.

Реализация первого способа имеет существенный недостаток, заключающийся в уменьшении магнитной индукции в зазоре, что приводит к необходимости увеличения силы электрического тока в катушке для создания силы, компенсирующей силу тяжести. С этой точки зрения более целесообразным является второй способ, требующий подбора формы и размеров элементов полюсных наконечников.

На рис. 1 представлен разрез объёмной модели магнитной системы. Наружный 3 и внутренний 5 полюсные наконечники имеют форму и размеры, определённые в результате расчётов. Постоянные магниты 4 системы Nd-Fe-B намагничены навстречу друг другу и создают магнитное поле, направленное от внутреннего полюсного наконечника к наружному. Катушка (на рис. 1 не показана) располагается между полюсными наконечниками и приводится в возвратно-поступательное движение тягами (не показаны), проходящими через отверстия в торцевых элементах ярма 1 магнитной системы.

На рис. 2 представлены результаты расчётов распределения модуля вектора магнитной индукции внутри и снаружи магнитной системы. При расчётах в модель закладывались константы материала магнитов (остаточная намагниченность $M_r = 1100$ кА/М) и магнитомягких элементов (относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1000$). Модуль магнитной индукции за пределами постоянных магнитов максимален вблизи границ магнитомягких элементов, непосредственно примыкающих к магнитам. В этих областях происходит основное рассеяние магнитного потока, не связанное с созданием радиального поля в кольцевом зазоре системы. Оно связано с тем, что кратчайшее расстояние между полюсами магнита параллельно образующей и частичное замыкание магнитного потока происходит именно в этом месте. От постоянных магнитов, ориентированных друг к другу одноимёнными полюсами, магнитный поток расходится к внутреннему полюсному наконечнику, вблизи углов которого наблюдаются локальные области с повышенным значением магнитной индукции. При этом в центральной части зазора индукция по высоте неизменна.

На рис. 3 представлены расчётные и экспериментальные зависимости радиальной компоненты магнитной индукции в зазоре магнитной системы при различном расположении датчика Холла и при его смещении на 1 мм от центра зазора к наружному полюсу в полностью собранной магнитной системе (б, экспериментальная зависимость); датчик Холла находится на равном расстоянии от внутреннего и наружного полюсных наконечников (1, 1') и на расстояниях 1 мм от внутреннего (2, 2') и наружного (3, 3') полюсных наконечников

абсцисс. Вблизи как внутреннего, так и наружного полюсов наблюдаются краевые особенности в виде локального увеличения радиальной компоненты магнитной индукции. Также вблизи обоих полюсов зависимости $B_r(z)$ выпуклые в разные стороны, в то время как в середине зазора есть область, в которой $B_r(z)$ постоянна. Разнонаправленная выпуклость $B_r(z)$ в зазоре вблизи внутреннего и наружного полюсов позволяет варьировать профиль измеряемой ЭДС в режиме калибровки весов и компенсирующей силы в режиме взвешивания путём изменения диаметра катушки.

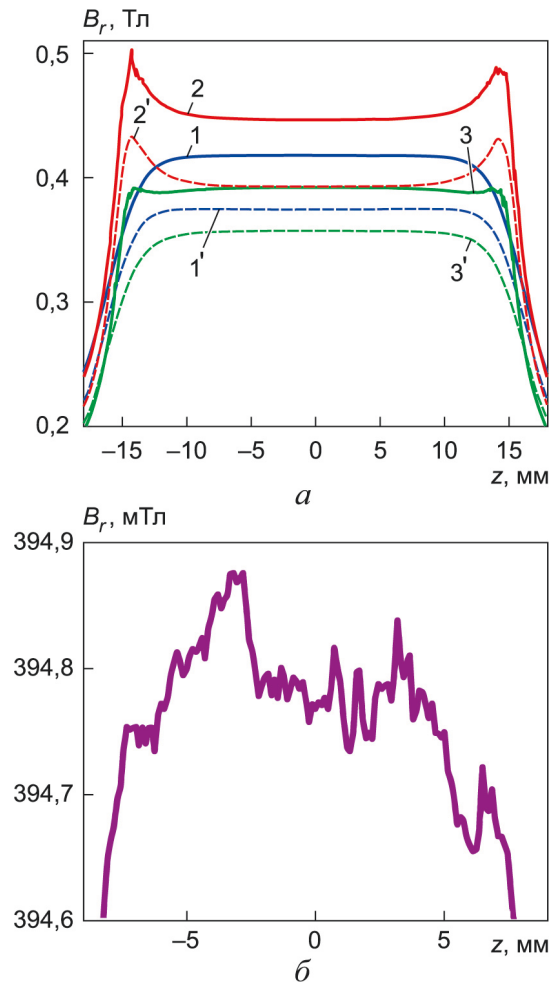


Рис. 3. Расчётные (1–3) и экспериментальные (1'–3') зависимости радиальной компоненты магнитной индукции в зазоре магнитной системы при различном расположении датчика Холла (а) и при его смещении на 1 мм от центра зазора к наружному полюсу в полностью собранной магнитной системе (б, экспериментальная зависимость); датчик Холла находится на равном расстоянии от внутреннего и наружного полюсных наконечников (1, 1') и на расстояниях 1 мм от внутреннего (2, 2') и наружного (3, 3') полюсных наконечников

Fig. 3. Calculated (1–3) and experimental (1'–3') dependences of the radial component of magnetic flux density in the magnetic system air gap at different location of the Hall sensor (a) and at its displacement by 1 mm from the center of the air gap to the outer pole in the fully assembled magnetic system (b, experimental dependence); the Hall sensor is at an equal distance from the inner and outer pole pieces (1, 1') and at 1 mm distances from the inner (2, 2') and outer (3, 3') pole pieces

По результатам моделирования на токарных и фрезерных станках с числовым программным управлением изготовлены элементы магнитной системы. Магнитомягкие элементы системы выполнены из сортовой электротехнической нелегированной стали марки СТ10895. После механической обработки магнитомягкие элементы были отожжены при температуре 300 °С для снятия напряжений и временной стабилизации магнитной проницаемости. Использованы цилиндрические постоянные магниты системы Nd-Fe-B марки N48 с осевой текстурой. Магниты помещены в защитный каркас, цилиндрическая поверхность которого изготовлена из алюминия, а торцевые поверхности – из стали марки СТ10895. Выбрана посадка по торцевым поверхностям всех элементов системы. Элементы системы отцентрированы по образующим цилиндров. Посадка по этим элементам выбрана с зазором ввиду невозможности запрессовывания деталей и необходимости обеспечения разборки и повторной сборки системы. Зазоры при центровке системы привели к смещению оси внутреннего магнитного полюса относительно оси наружного приблизительно на 150 мкм.

Описание измерительной установки. При создании макета электромагнитной системы исследовано распределение (радиальное, аксиальное и угловое) магнитной индукции в зазоре магнитной системы и разработана установка, позволяющая сканировать (картировать) это распределение. Установка содержит электронное оборудование, входящее в состав 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 [12]. Дополнительно использованы поворотный столик с возможностью смещения оси вращения этого столика, а также система для двухкоординатного перемещения датчика Холла. Распределения магнитной индукции в зазоре магнитной системы определяли с помощью датчика Холла. Ввиду температурной зависимости концентрации носителей заряда в полупроводнике, из которого изготовлен датчик Холла, необходимо учитывать изменения температуры для введения поправок в коэффициент Холла конкретного датчика. С этой целью применён платиновый плёночный термометр сопротивления. Датчик Холла и термометр сопротивления расположены в непосредственной близости и имеют тепловой контакт. Влияние магнитного поля, создаваемого зондирующим током термометра сопротивления, учитывается в процессе калибровки датчика Холла.

Сопротивление температурного датчика измеряется цифровым калибратором-мультиметром Keithley 2400 (Keithley, США). Подключение выполнено по четырёхпроводной схеме для исключения влияния сопротивления подводящих проводов. Сила зондирующего тока составляет 100 мкА. Датчик Холла питается от калибратора-мультиметра Keithley 2400. ЭДС датчика Холла измеряется нановольтметром Keithley 2182A (Keithley, США). Поскольку в измерительной цепи присутствуют контакты медных проводов различной чистоты, возникают медленно меняющиеся паразитные термоЭДС. Для их устранения применяется метод измерения на квазипеременном токе. Электрический ток в

квазистатическом режиме пропускается через датчик Холла в разных направлениях, а результаты измерений холловского сопротивления усредняются, в результате чего все нечётные составляющие термоЭДС не оказывают влияния на полученный результат.

Калибровка измерительной установки выполнена в диапазоне температур 18–26 °С. По результатам калибровки определены поправочные функции к коэффициенту преобразования датчика Холла по магнитной индукции и температуре в двумерном пространстве. Поправочная функция по индукции представляет собой полином третьей степени, по температуре – второй. Отклонение показаний измерительной системы от действительного значения магнитной индукции в указанном температурном диапазоне во временном интервале 30 дней после калибровки $\delta B < 0,02\%$.

Система сканирования состоит из рамы на основе алюминиевого профиля, на которой смонтированы стальные направляющие. По направляющим по вертикали и горизонтали перемещается каретка с установленным на ней щупом с датчиком Холла. Перемещение происходит посредством винтовой передачи, вращение винтов реализуется шаговыми электродвигателями. Соответствие действительного перемещения каретки заданному программным обеспечением определено с применением внешнего энкодера на расстояниях 20–100 мм и микрокатрами на расстояниях 2–15 мм. Нелинейность перемещения каретки составляет 0,5–1 %. При установке всех элементов сканера магнитной индукции, включая датчик Холла, и магнитной системы использованы самовыравнивающийся лазерный нивелир, система зеркал и экранов и проконтролировано распределение магнитной индукции в рабочем зазоре.

Исследование характеристик магнитной системы. На рис. 3, а пунктирными кривыми представлены экспериментальные зависимости радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре магнитной системы без верхнего торцевого элемента ярма. Измерения проведены вдоль линий, параллельных оси системы и расположенных в центре зазора (равное расстояние от внутреннего и наружного полюсных наконечников), на расстояниях 1,0 мм от внутреннего полюсного наконечника и 1,7 мм от наружного полюсного наконечника – соответственно кривые 1'–3'. Вследствие закрепления датчика Холла на длинной балке для возможности сканирования магнитной системы высотой более 150 мм уменьшить дистанцию до наружного полюса невозможно. Этим обусловлены расхождения формы экспериментальных кривых распределения индукции вблизи наружного полюса по сравнению с результатами расчёта. В целом расчётные и экспериментальные результаты совпадают, однако смещены друг относительно друга на значение индукции, что обусловлено отсутствием верхнего торцевого элемента ярма. Расчётные зависимости магнитной индукции, имеющие выпуклость вверх и вниз ближе к наружному и внутреннему полюсам соответственно, позволяют изготовить катушку таких размеров и формы, чтобы получить линейную зависимость коэффициента преобразования BL .

На рис. 3, б представлена зависимость $B_r(z)$ при смещении датчика Холла приблизительно на 1 мм от центра

зазора к наружному полюсу магнитной системы с катушкой. После установки верхнего торцевого элемента ярма изменилось замыкание магнитного потока, что привело к увеличению B_r в рабочем зазоре при сохранении зависимости $B_r(z)$. Неоднородность B_r на расстоянии, равном сумме высоты катушки и её рабочего хода (4 мм), составляет 7,3 мТл/мм, что эквивалентно относительной неоднородности магнитной индукции при рабочем перемещении катушки 0,05 %.

Исследовано влияния силы электрического тока, протекающего через катушку в процессе взвешивания, на коэффициент преобразования магнитной системы BL . Для этого изготовлена пробная катушка, состоящая из пяти обмоток по 16 витков каждая, расположенных одна поверх другой. Одна из пяти обмоток в процессе эксперимента подключалась к флюксметру для регистрации изменения магнитного потокоцепления при перемещении катушки вдоль оси системы, а через четыре остальные обмотки, включённые последовательно, пропусклся электрический ток силой 200 мА. Ток пропусклся в двух направлениях поочерёдно. По результатам измерений построены зависимости разности значений магнитного потока, создаваемого в четырёх обмотках, без электрического тока и при пропускании электрического тока. Результаты измерений приведены на рис. 4 («+», «-» – полярности протекающего электрического тока). Измерения выполнены при перемещении катушки на 1 мм. При этом полное изменение потокоцепления составило 1430 мкВб. Разброс точек на зависимостях обусловлен нелинейностью перемещения катушки и воспроизводится в той или иной степени на всех кривых. Аппроксимирующие линейные функции 4 построены по результатам измерений трёх катушек с пропуском тока одной полярности. В центре магнитной системы пропускание электрического тока по катушке не приводит к изменению коэффициента преобразования BL . Отклонение положения катушки от центра магнитной системы приводит к отклонению BL от такового без пропускания электрического тока по катушке, причём знак отклонения определяется полярностью тока. Расположение катушки в центре электромагнитной системы в режиме взвешивания позволяет исключить влияние магнитного поля, создаваемого протекающим по катушке током, на BL системы.

Основной технической характеристикой электромагнитной системы является коэффициент преобразования силы электрического тока, протекающего по катушке, в развиваемую механическую силу, действующую со стороны радиальной магнитной индукции на витки с током. По результатам измерений

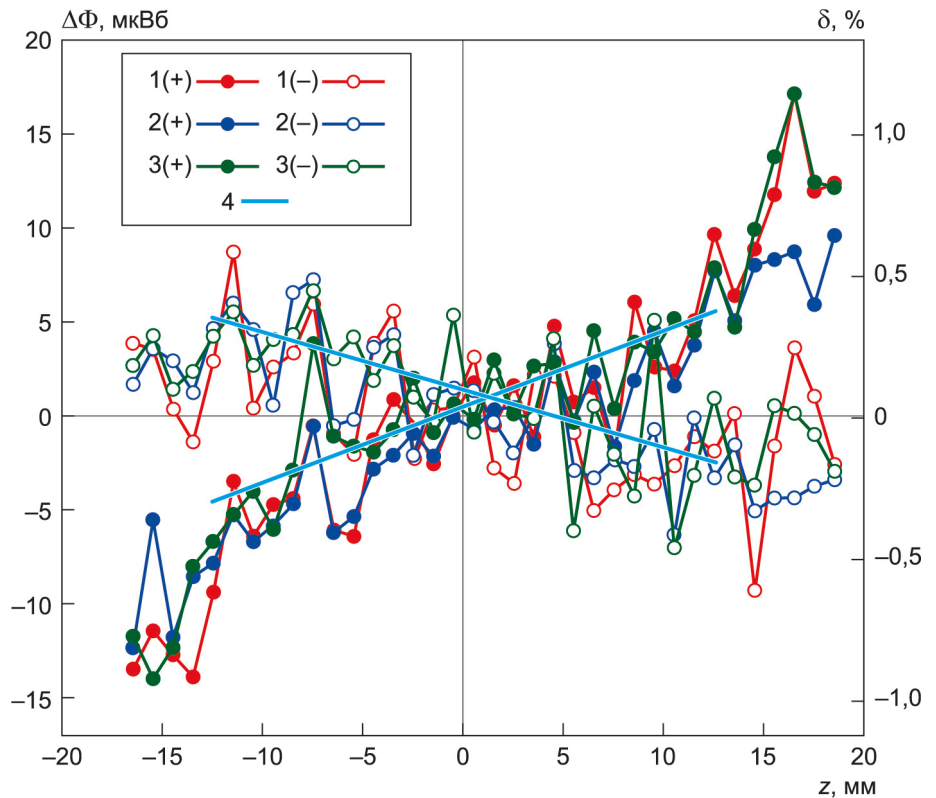


Рис. 4. Зависимость изменения магнитного потока $\Delta\Phi$ от положения Z катушки при подключении флюксметра к первой (1(+), 1(-)), третьей (2(+), 2(-)), пятой (3(+), 3(-)) обмоткам и протекании электрического тока через остальные обмотки при полярности «+» и «-»; 4 – аппроксимирующие линейные функции; δ – относительное отклонение магнитного потока

Fig. 4. Change in magnetic flux $\Delta\Phi$ vs the coil position Z when the fluxmeter is connected to the first (1(+), 1(-)), third (2(+), 2(-)), and fifth (3(+), 3(-)) windings and electric current flows through other windings with polarity “+” and “-”; 4 – approximating linear functions; δ – relative deviation of magnetic flux

распределения магнитной индукции в зазоре магнитной системы разработана и изготовлена двухсекционная катушка, содержащая 106 и 105 витков в секциях. Высота намотки 13 мм, средний диаметр катушки 78,5 мм. Измеренная зависимость действующей на катушку силы Ампера от силы электрического тока, протекающего по ней при включённых последовательно секциях, представлена на рис. 5. Указанная зависимость линейна, коэффициент преобразования электромагнитной системы составляет 21,3 Н/А. На рис. 5 также приведена зависимость отклонения $\Delta F = F_a - F_{\text{и}}$ измеренных значений $F_{\text{и}}$ силы Ампера от значений F_a , рассчитанных по аппроксимирующей функции, от силы электрического тока (невязка аппроксимирующей функции и экспериментальных значений точек). Наблюдается практически линейная зависимость невязки от силы электрического тока в диапазоне $-23...+25$ мА. При значениях -24 и -25 мА наблюдается резкое отклонение невязки от нуля. Такие особенности вызваны отклонением катушки от первоначального положения при её подъёме и неточном совпадении центра масс катушки и с центром действующей силы Ампера. Другими словами, при силе электрического тока -24 мА сила Ампера, действующая на обмотку катушки, становится больше силы тяжести, действующей на каркас. Центр тяжести катушки

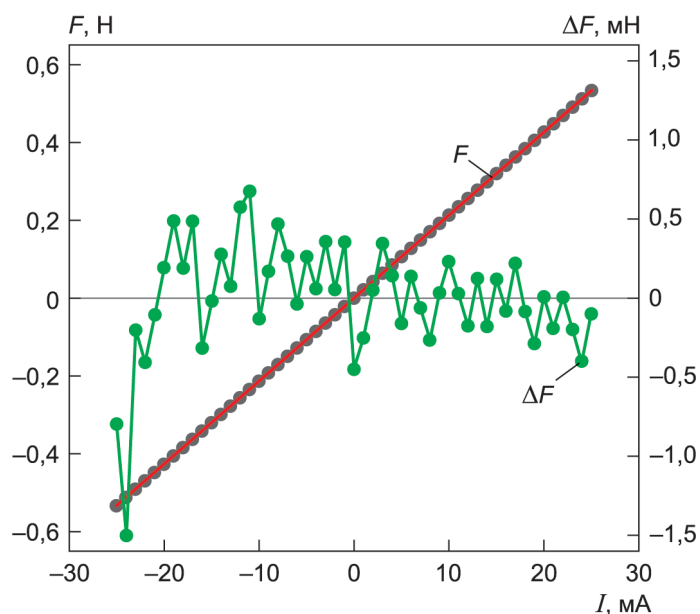


Рис. 5. Зависимость силы Ампера F от силы электрического тока I в катушке электромагнитной системы; $\Delta F = F_a - F_i$

Fig. 5. Ampere force F vs. electric current I in the electromagnetic system coil; $\Delta F = F_a - F_m$

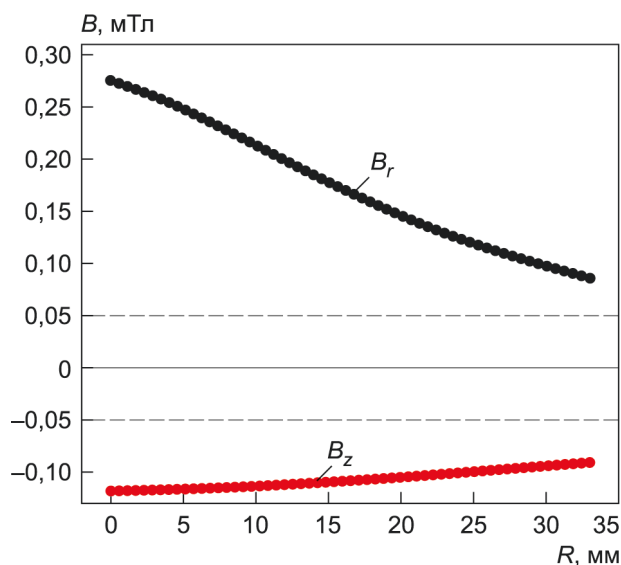


Рис. 6. Зависимости радиальной B_r и осевой B_z компонент магнитной индукции B от расстояния R между датчиком Холла и электромагнитной системой; пунктирные линии – область примерных значений вертикальной компоненты магнитной индукции Земли на 55–60° с.ш.

Fig. 6. Dependences of the radial B_r and axial B_z components of the magnetic flux density B on the distance R between the Hall sensor and the electromagnetic system; dashed lines are the area of approximate values of the vertical component of the Earth's magnetic flux density 55–60° N

с подвесом располагается выше центра действия силы Ампера, что при их неточном вертикальном расположении приводит к возникновению горизонтального крутящего момента и перекосу катушки в зазоре.

Поскольку электромагнитная система должна войти в состав измерительной установки, то необходимо определить влияние магнитных полей, создаваемых системой (так называемых полей рассеяния) в окружающем её пространстве, и принять возможные меры по уменьшению этих полей для защиты средств измерений от их воздействий. На рис. 6 представлены зависимости компонент B_r , B_z магнитной индукции от расстояния между датчиком Холла и электромагнитной системой. Радиальная компонента B_r измерена снаружи системы примерно посередине её высоты, осевая компонента B_z – вдоль оси системы. Пунктирными линиями указаны примерные значения вертикальной компоненты магнитной индукции Земли на 55–60° с.ш. На расстоянии 30 мм от поверхности системы индукция магнитного поля рассеяния превышает земную не более чем в два раза. На расстоянии 50 мм от системы ни одна из компонент индукции не превышает индукцию земного поля. Такую электромагнитную систему можно использовать в составе весов Киббла без применения дополнительного экранирования.

Заключение. При выполнении работы изготовлены сканер магнитного поля с погрешностью по магнитной индукции, не превышающей 0,02 %, и электромагнитная система для прототипа весов Киббла с коэффициентом преобразования $BL = 2,13$ Н/А. Неоднородность радиальной составляющей магнитной индукции по высоте в электромагнитной системе не превышает 7,3 мТл/мм. По итогам исследований подтверждена принципиальная возможность использования в цилиндрической магнитной системе полюсных наконечников специальной формы для получения радиальной индукции с высокой однородностью. Согласно экспериментальным данным в разработанной магнитной системе есть область, в которой коэффициент преобразования BL не зависит от силы протекающего по катушке электрического тока. Магнитные поля снаружи магнитной системы малы и не влияют на работу средств измерений, расположенных от магнитной системы на расстоянии более 50 мм.

Список источников

1. Draft Resolution A: On the revision of the International System of units (SI) to be submitted to the CGPM at its 26th meeting (2018), available at: <https://www.fysik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/fysik-fpraktikum/2018/Draft-Resolution-A-EN.pdf> (accessed: 23.07.2021).
2. Robinson I. A., Schlamminger S., *Metrologia*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
3. Steiner R. L., Williams E. R., Liu R. and Newell D. B., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 56, no. 2, pp. 592–596. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.890590>
4. Robinson I. A., Berry J., Bull C. et al., *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 8–13 July 2018, Paris, France, IEEE, 2018, pp. 257–258. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501149>
5. Sanchez C. A., Wood D. M., Green R. G., Liard J. O., Inglis D., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 2, pp. S5–S14. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/2/S5>

6. Picard A., Fang H., Kiss A. et al., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 58, no. 4, pp. 924–929. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.2009913>
7. Baumann H., Eichenberger A. L., Cosandier F., et al., *Metrologia*, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 235–242. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/3/235>
8. Kim D., Kim M., Seo M., et al., *Metrologia*, 2020, vol. 57, no. 5, 055006. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab92e0>
9. Sutton C. M., Clarkson M. T., Fung Y. H. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 8–13 July 2018, Paris, France, IEEE, 2018, pp. 71–72. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500889>
10. Thomas M., Ziane D., Pinot P., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 4, pp. 468–480. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7882>
11. Seifert F., Panna A., Li S., et al., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 12, pp. 3027–3038. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2323138>
12. Волегова Е. А., Малыгин М. А., Маслова Т. И., Волегов А. С. 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 // Измерительная техника. 2018. № 3. С. 7–10. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-3-7-10>

References

1. Draft Resolution A: On the revision of the International System of units (SI) to be submitted to the CGPM at its 26th meeting (2018), available at: <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/physik-fpraktikum/2018/Draft-Resolution-A-EN.pdf> (accessed: 23.07.2021).

2. Robinson I. A., Schlamminger S., *Metrologia*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
3. Steiner R. L., Williams E. R., Liu R. and Newell D. B., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 56, no. 2, pp. 592–596. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.890590>
4. Robinson I. A., Berry J., Bull C. et al., *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 8–13 July 2018, Paris, France, IEEE, 2018, pp. 257–258. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501149>
5. Sanchez C. A., Wood D. M., Green R. G., Liard J. O., Ing-lis D., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 2, pp. S5–S14. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/2/S5>
6. Picard A., Fang H., Kiss A. et al., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 58, no. 4, pp. 924–929. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.2009913>
7. Baumann H., Eichenberger A. L., Cosandier F., et al., *Metrologia*, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 235–242. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/3/235>
8. Kim D., Kim M., Seo M., et al., *Metrologia*, 2020, vol. 57, no. 5, 055006. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab92e0>
9. Sutton C. M., Clarkson M. T., Fung Y. H. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 8–13 July 2018, Paris, France, IEEE, 2018, pp. 71–72. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500889>
10. Thomas M., Ziane D., Pinot P., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 4, pp. 468–480. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7882>
11. Seifert F., Panna A., Li S., et al., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 12, pp. 3027–3038. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2323138>
12. Volegova E. A. et al., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 199–202. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1409-2>

Статья поступила в редакцию 13.10.2021; одобрена после рецензирования 19.10.2021; принята к публикации 26.10.2021.
The article was submitted 13.10.2021; approved after reviewing 19.10.2021; accepted for publication 26.10.2021.