РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 816 442**(13) **C1**

(51) МПК
G01R 5/00 (2006.01)
H02M 11/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 5/00 (2024.01); H02M 11/00 (2024.01)

(21)(22) Заявка: **2023128967, 09.11.2023**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.11.2023

Дата регистрации:
29.03.2024

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **09.11.2023**

(45) Опубликовано: **29.03.2024** Бюл. № **10**

Адрес для переписки:
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, Центр интеллектуальной собственности, Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):
Кудреватых Николай Владимирович (RU),
Гусев Сергей Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **Article: "WATT BALANCES AND THE FUTURE OF THE KILOGRAM", Simposio de Metrologia, Inter Am. Metrol. Syst. 9-13.), January 2006. Статья: "ELECTROMAGNETIC SYSTEM TO REALIZING A UNIT OF MASS", Ж. Измерительная техника, номер 12, Опубликовано - 2021, стр. 48-55. RU 2778488 C1, 22.08.2022. RU 147368 U1, 10.11.2014. US 5590031 A1, 31.12.1996. US 6015175** (см. прод.)

(54) ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

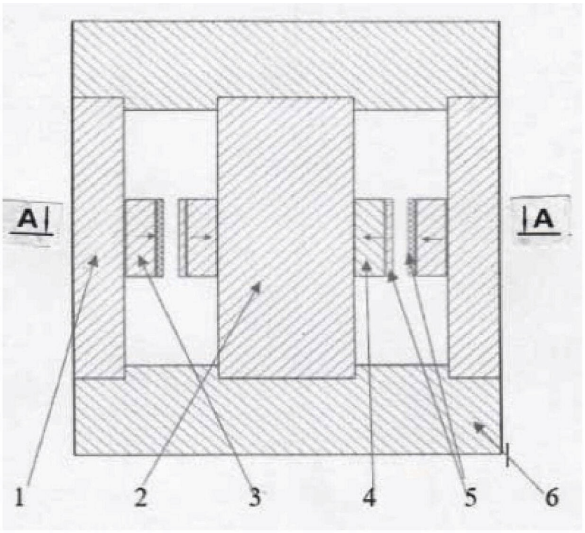
(57) Реферат:

Электромагнитная система (ЭМС) предназначена для использования в метрологии массы (весы Ватта (Киббла)). Состоит из источника циркулярного магнитного поля (ИЦМП) и многовитковой измерительной катушки, обеспечивающих требуемую величину коэффициента преобразования «сила-ток». ИЦМП изготовлен в форме цилиндра в составе: полого внутри цилиндрического корпуса (ЦК) и внутреннего цилиндрического магнитопровода (ВЦМ) (оба элемента из магнитомягкого материала (ММ)), формирующих совокупно кольцевидную полость (КП) внутри ЦК, постоянных магнитов внутри КП в виде двух плотно собранных колец из идентичных по размерам и магнитному моменту трапециевидных по форме магнитов, установленных в геометрическом центре КП напротив друг друга соответственно на внутренней поверхности ЦК и на поверхности ВЦМ с обращенными к друг другу разноименными магнитными полюсами. На образующие кольцевой зазор (КЗ) полюсные поверхности обоих колец помещены полюсные наконечники также в форме кольца с на порядок меньшей, чем у магнитов, радиальной толщиной и одинаковой с магнитами высотой из ММ. Торцы ЦК и ВЦМ плотно замыкаются круглыми пластинами из ММ с диаметром, равным наружному диаметру ЦК, формируя совместно с ЦК замкнутый магнитопровод у всего ИЦМП. В КЗ помещена на специальном каркасе многовитковая измерительная катушка (ИК), преобразующая энергию электрического тока в механическую работу. Техническим результатом при реализации заявленного решения является повышение эффективности использования

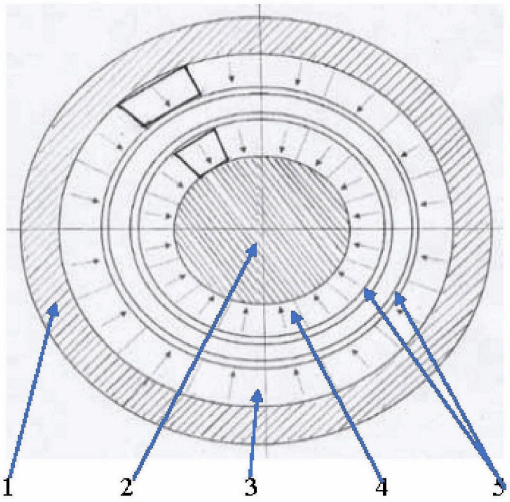
RU 2816442 C1

RU 2816442 C1

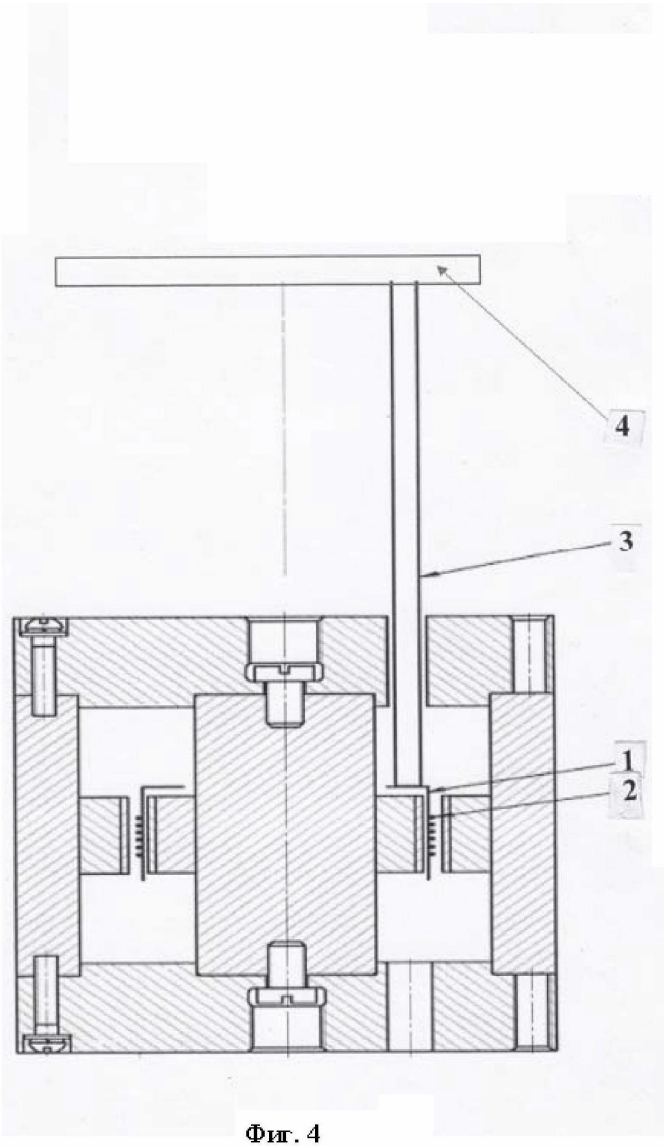
магнитного потока магнитов для создания циркулярного магнитного поля в КЗ, а также повышение точности измерений массы тел величиной до одного килограмма при применении ЭМС в весах Ватта, вследствие отсутствия дополнительного вклада в магнитное поле КЗ от пропускаемого электрического тока по обмотке ИК, помещенной в КЗ, и отсутствия градиента величины индуктивности ИК при ее перемещении в центральной области КЗ ИЦМП. 7 ил.



А-А



Фиг. 3



Фиг. 4

(56) (продолжение):
A1, 18.01.2000.

RU 2816442 C1

RU 2816442 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 816 442**(13) **C1**

(51) Int. Cl.
G01R 5/00 (2006.01)
H02M 11/00 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G01R 5/00 (2024.01); H02M 11/00 (2024.01)

(21)(22) Application: **2023128967, 09.11.2023**

(24) Effective date for property rights:
09.11.2023

Registration date:
29.03.2024

Priority:
(22) Date of filing: **09.11.2023**

(45) Date of publication: **29.03.2024** Bull. № **10**

Mail address:
620002, g. Ekaterinburg, ul. Mira, 19, UrFU, Tsentr intellektualnoj sobstvennosti, Marks T.V.

(72) Inventor(s):
Kudrevatykh Nikolai Vladimirovich (RU),
Gusev Sergei Viktorovich (RU)

(73) Proprietor(s):
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin (RU)

(54) ELECTROMAGNETIC SYSTEM

(57) Abstract:

FIELD: physics.

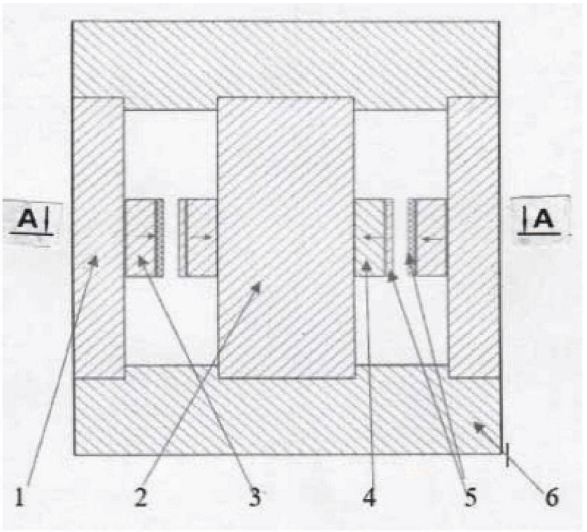
SUBSTANCE: electromagnetic system (EMS) is intended for use in mass metrology (watt balance (Kibble)). It consists of a circular magnetic field source (CMFS) and a multi-turn measuring coil, which provide the required value of the “force-current” conversion coefficient. CMFS is made in the form of a cylinder consisting of: a hollow inside cylindrical housing (CH) and an internal cylindrical magnetic conductor (ICMC) (both elements are made of soft magnetic material (SMM)), forming collectively annular cavity (AC) inside CH, permanent magnets inside AC in form of two tightly assembled rings of trapezoid-shaped magnets identical in size and magnetic moment, installed in geometric centre of AC opposite each other on inner surface of CH and on surface of ICMC with opposite magnetic poles facing each other. On the pole surfaces of both rings forming the annular space (AS) there are pole tips also in the form of a ring with radial thickness which is an order of magnitude smaller than that of the magnets and the same height as the SMM magnets. Ends of CH and ICMC are tightly closed by round plates from SMM with diameter equal to external diameter of CH, forming together with CH a closed magnetic conductor of the whole CMFS. In AS there is a multiturn measuring coil (MC) placed on a special frame, which converts energy of electric current into mechanical work.

EFFECT: increased efficiency of using magnetic flux of magnets for creation of circular magnetic field in AS, and high accuracy of measuring the mass of bodies with a value of up to one kilogram when using EMS in watt balances, due to the absence of an additional contribution to the magnetic field of the AS from the passed electric current through the MC winding placed in the AS, and the absence of a gradient of the MC inductance value when it moves in the CMFS AS central region.

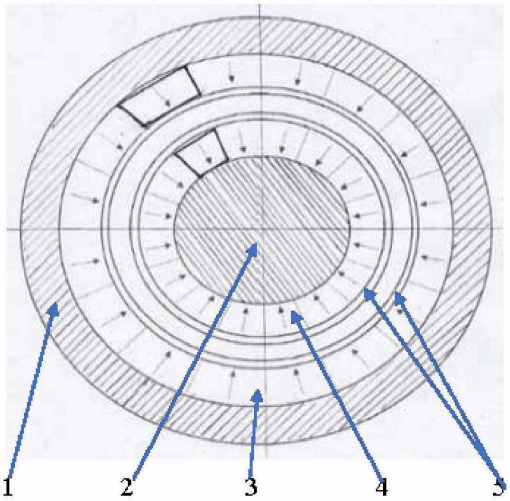
1 cl, 7 dwg

RU 2816442 C1

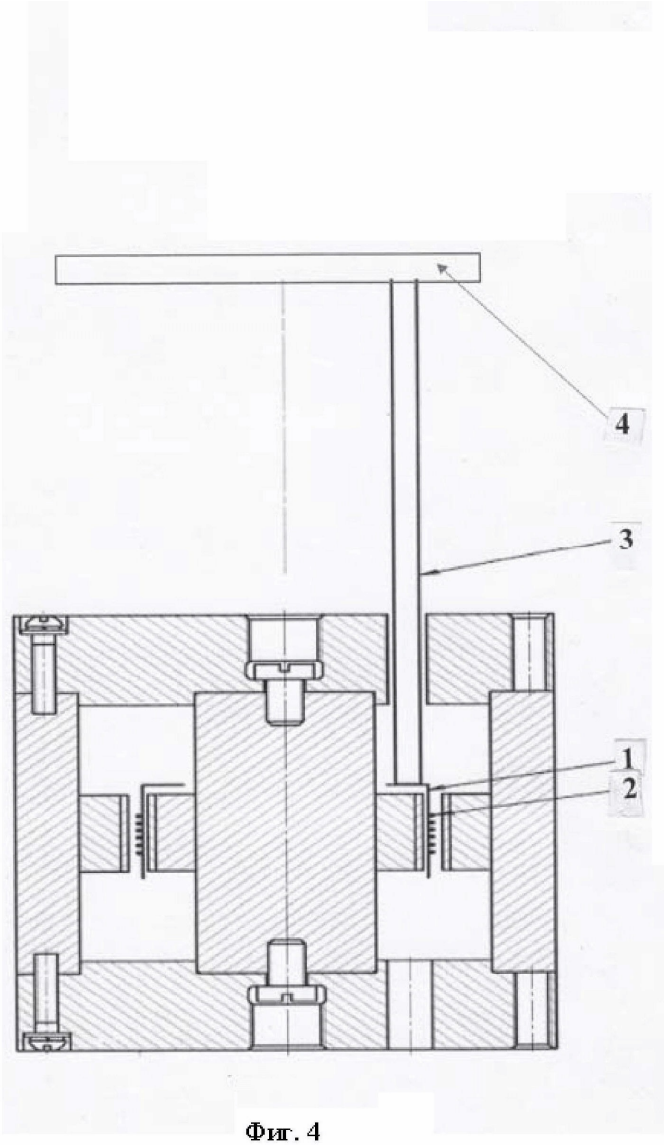
RU 2816442 C1



А-А



Фиг. 3



Фиг. 4

RU 2816442 C1

Изобретение относится к электромагнитным системам (ЭМС) преобразующим энергию электрического тока в механическую работу, и может быть использована в метрологии для определении массы тела -m масштаба одного килограмма и величины постоянной Планка -h с помощью так называемых Ватт-весов (весов Киббла) (D. Haddad, F. Seifert, L. S. Chao, S. Li,1,D. B. Newell, J. R. Pratt, C. Williams, and S. Schlamminger, Invited Article: A precise instrument to determine the Planck constant, and the future kilogram // REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 87, 061301, 2016).

Известна конструкция электромагнитной системы для таких весов (Michael Stock, WATT BALANCES AND THE FUTURE OF THE KILOGRAM, Simposio de Metrología 2006, 25 al 27 de Octubre, p.1-6; *INFOSIM Inf. Bull. Inter Am. Metrol. Syst.* 9–13.), состоящая из источника циркулярного магнитного поля (ИЦМП) на постоянных магнитах (в таком ИЦМП вектор магнитной индукции в кольцевом рабочем пространстве при обходе по окружности плавно поворачивается на 360^{o}), включающего в себя полый цилиндрический корпус (ярмо) из магнитомягкого материала и внутренний цилиндрический магнитопровод (ВЦМ) также из магнитомягкого материала, двух постоянных магнитов в форме кольца установленных по одному на каждый из торцов ВЦМ с аксиальной ориентацией остаточной намагниченности и обращенными навстречу друг другу одноименными магнитными полюсами. Обратные стороны (полюса) магнитов замыкаются на цилиндрический корпус посредством круглых пластин из магнитомягкого материала, формируя таким образом замкнутый магнитопровод. Цилиндрический корпус и внутренний магнитопровод со специальными выступами формируют кольцевой рабочий зазор (КЗ) ИЦМП, в который помещается измерительная катушка, являющаяся вторым необходимым элементом ЭМС. Схема конструкции такой ЭМС представлена на фиг. 1.

Существенным требованием к паре кольцевых магнитов является их идентичность по величине создаваемого магнитного потока, что необходимо для обеспечения постоянства модуля радиальной компоненты индукции циркулярного магнитного поля (B^{r}) вдоль вертикальной оси -z ($B^{r}(z)$)в области геометрического центра КЗ. Нахождение идентичных по магнитному потоку цельных кольцевых магнитов является трудно решаемой задачей, если таковые имеют значительные размеры (существуют технологические пределы по изготовлению крупноразмерных цельных магнитов, и кроме того. в серийном производстве всегда имеет место существенный разброс их параметров). Эта проблема была решена при создании ИЦМП в наиболее близкой к заявляемой в настоящем изобретении электромагнитной системе, используемой в США в весах Ватта модели NIST-4 (F. Seifert, A. Panna, S. Li, B.Han, L. Chao, A.Cao, D. Haddad, H. Choi, L. Haley, S. Schlamminger, Construction, Measurement, Shimming, and Performance of the NIST-4 Magnet System // Physics. ins-det, 6 May 2014, pp.1-26) путем установки кольцевых магнитов, набранных из более мелких магнитов, которые подвергаются перед сборкой в кольцо тщательной селекции на идентичность их магнитных характеристик. В результате удается создать близкие по магнитным потокам требуемые композитные кольцевые магниты. Схема конструкции этого ИЦМП представлена на фиг. 2. К недостаткам его конструкции относятся: 1) невысокая эффективность использования запасенной в магнитах магнитной энергии, поскольку значительная часть их магнитного потока рассеивается в ярме, состоящем из нескольких элементов и «не доходит» до КЗ (магниты расположены «далеко» от рабочей полости). Два других недостатка ЭМС на базе этого ИЦМП, вытекают из рассмотрения алгоритма расчета массы тела определяемой с помощью весов Ватта. В состоянии их равновесия, сила

гравитации F_g, действующая на тело массой m – ($F_g = mg$) уравновешена электромагнитной силой -F_{em}, продуцируемой помещенной в КЗ измери-тельной катушкой. Величина F_{em} есть векторная сумма сил Ампера – ($F_a = B^r_w l \cdot I$) и силы F_Z, обусловленной градиентом индуктивности L катушки - ($F_z = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dz}$), называемой в англоязычной литературе *reluctance force* - *RF*(F_Z«толкает» катушку с током независимо от силы Ампера к месту ее положения с максимумом L, находящимся в геометрическом центре КЗ). Т.е. $F_{em} = F_a + F_z$. Обозначения в этих формулах: B^r_w-индукция магнитного поля в КЗ в момент взвешивания, l-длина провода в катушке, I- сила тока, при которой $F_g = F_{em}$, z- координата точки на вертикальной оси в центре КЗ. Возникает вопрос о величине B^r_w. В случае, если ндукция магнитного поля в КЗ не зависит от тока в измерительной катушке, ее значение можно полагать равным таковому, определенному на этапе калибровки, т.е. B^r_k по формуле: $B^r_k = U/(V_z \cdot l)$, где U – ЭДС катушки в режиме калибровки при ее движении в КЗ с магнитной индукцией B^r_kсо скоростью V_z, g -гравитационная постоянная. Масса взвешиваемого тела определяется из соотношения: $mg = B^r_w l I + F_z$. Если считать, что $B^r_w = B^r_k$, а $F_z \approx 0$, для m имеем формулу $m = U I/(V_z \cdot g)$. И так, отсюда очевидны второй и третий недостатки рассматриваемой ЭМС: 2) неодинаковость величин магнитной индукции B^r в КЗ в режимах калибровки весов - B^r_kи взвешивания -B^r_w, вследствие воздействия генерируемого катушкой собственного магнитного поля на магнитомягкие элементы ИЦМП в области КЗ *(т.к.* магнитное поле катушки «подмагничивает» ферро-магнитные элементы ярма, обладающие высокой магнитной проницаемостью и близко расположенные к КЗ); 3) существование не нулевой силы F_z, обусловленной зависимостью индуктивности катушки от ее положения в КЗ. Величины B^r_w и F_z априори не известны и их определение является сложной задачей. В то же время, их не учет может существенно влиять на результат измерения m. С целью минимизации этих факторов, т.е. выполнения условий: $B^r_w = B^r_k$ и $F_z = 0$, а также сохранения высокой эффективности ЭМС, определяемой величиной коэффициента преобразования $K = F_{em}/I$ (н/м) на практике стремятся уменьшать число витков в катушке (снижать ее индуктивность) и минимизировать величину пропускаемого тока (снижать собственное магнитное поле), но добиваться при этом требуемых значений K (развивать усилие до ~10 ньютонов). Это достигается за счет увеличения длины использованного для намотки катушки провода -l, т.е. увеличения диаметра катушки при минимуме витков. При таком подходе ИЦМП на постоянных магнитах неизбежно принимает значительные размеры и массу. В частности, в выше упомянутых весах Ватта модели NIST-4 диаметр катушки составляет ~0,42 м, а вес ИЦМП достигает ~800 кг.

Задачей изобретения является создание ЭМС с ИЦМП на постоянных магнитах с минимальной потерей производимого магнитами «полезного» магнитного потока (минимум полей рассеяния) и, следовательно, меньших массогабаритных параметров, отсутствием реакции (отклика) элементов ИЦМП на протекающий в измерительной

катушке электрический ток (равенство B^r_w и B^r_k), отсутствием зависимости величины индуктивности измерительной катушки от ее местоположения в области зазора (нулевой величины F_z) и повышенной величиной K при относительно малых габаритах и массе ИЦМП.

Указанная задача решается за счет того, что цилиндрический по форме ИЦМП, содержит заключенные в геометрическом центре внутреннего цилиндрического кольцевого пространства, формируемого внешним и внутренним магнитопроводами из магнитомягкого материала, два установленных напротив друг друга кольцевых магнита с радиально направленной остаточной намагниченностью, выполненных наборными из отдельных трапециевидных по форме более мелких магнитов, размещенных на внутренней поверхности цилиндрического корпуса и цилиндрической поверхности внутреннего магнитопровода, формирующих рабочий кольцевой зазор (КЗ) с радиальной ориентацией вектора магнитной индукции в нем. На обращенные к КЗ полюсные поверхности обоих колец разного знака устанавливаются полюсные наконечники также в форме кольца из магнитомягкого материала, на порядок меньшей чем у кольцевых магнитов радиальной толщины и одинаковой с магнитами высоты. Последние обеспечивают плавность поворота вектора радиальной компоненты магнитной индукции в зазоре при движении по окружности в кольцевой рабочей полости КЗ. До сборки в кольцо, каждый трапециевидный магнит намагничивается независимо, его остаточная намагниченность контролируется и доводится до требуемого значения с погрешностью не хуже ±0,2%. Такой подход обеспечивает независимость величины модуля радиальной компоненты магнитной индукции от азимутального угла -φ в плоскости центрального поперечного сечения КЗ ($B^r(\varphi)=const$), что важно для балансировки катушки в зазоре в режиме взвешивания. Торцы внешнего корпуса и внутреннего магнитопровода плотно замыкаются круглыми пластинами из магнитомягкого материала («крышками) с диаметром, равным наружному диаметру цилиндрического корпуса, формируя таким образом совместно с корпусом замкнутый магнитопровод ИЦМП. В пластинах выполнены сквозные отверстия для прохождения без трения штоков каркаса катушки, с помощью которых она подвешивается в центре КЗ, и которые передают развиваемую ей силу Ампера к регистратору.

Сущность изобретения поясняется нижеприводимыми графическими материалами, где на фиг. 1 и фиг. 2 представлены соответственно аналог и прототип источника циркулярного магнитного поля (ИЦМП) в ЭМС, а на фиг. 3 и фиг. 4 - схема конструкции этого ИЦМП в заявляемой ЭМС. Номера позиций на фиг. 1 обозначают: 1 – внешний магнитопровод (ярмо), 2 – внутренний магнитопровод, 3 - кольцевые магниты с аксиальной ориентацией векторов остаточной намагниченности, 4 - замыкающая торцевая круглая пластина, 5 – кольцевой рабочий зазор, 6- измерительная катушка. Обозначения на фиг. 2, те же, что и на фиг. 1, но кольцевые магниты -3 набраны из отдельных элементов (схема сборки -справа). Позиции на фиг. 3, представляющей симметричный продольный и поперечный разрезы конструкции ИЦМП согласно заявляемому изобретению с двумя внутренними кольцевыми постоянными магнитами с радиальной ориентацией в них остаточной намагниченности: 1 – внешний магнитопровод, 2 – внутренний магнитопровод, 3- кольцевой постоянный магнит, размещенный на внутренней поверхности внешнего магнитопровода - корпуса (кольцо большего радиуса, 4 – кольцевой постоянный магнит размещенный на внешней цилиндрической поверхности внутреннего магнитопровода (кольцо меньшего радиуса), 5 – кольцевой наконечник. 6 – замыкающая торцевая круглая пластина. Принципиальная

схема размещения измерительной катушки в ИЦМП показана на фиг. 4. Позиции обозначают: 1- каркас катушки, 2 – многослойная обмотка, 3 -шток подвеса (3 шт.), 4 – перемычка штоков (одновременно площадка для размещения грузов).

Была изготовлена экспериментальная ЭМС согласно формуле настоящего изобретения с двумя композитными кольцевыми радиально намагниченными магнитами и магнитомягкими наконечниками на них, формирующими кольце-вой зазор. Радиальная толщина и высота обоих кольцевых магнитов соответственно составляли 10 мм и 30 мм, их диаметры: у большего кольца, внешний - 116 мм, внутренний – 96 мм; у внутреннего, внешний -76 мм, внутренний – 56 мм. Толщина кольцевых полюсных наконечников – 1 мм. Размеры полости кольцевого зазора: больший диаметр -94 мм, меньший – 78 мм, высота – 30 мм. Кольцевые магниты выполнены из отдельных трапециевидных по форме магнитов (16 шт. в большом кольце; 17 шт. в малом кольце). Материал магнита - сплав Nd-Fe-B, марка - N 42, производитель Ningbo Permanent Magnets Co, LTD (КНР). Детали магнитопровода и наконечники выполнены из стали марки 10895, имеющей высокую магнитную индукцию насыщения.

Чертеж созданного ИЦМП, представлен на фиг. 5. (продольный разрез). Позиции: 1 – цилиндрический внешний корпус (ЦВК), 2 – внутренний цилиндрический элемент (ВЦЭ) магнитопровода, 3- кольцевой магнит большего, 4- кольцевой магнит меньшего радиуса, 5 – кольцевые полюсные наконечники, 6- замыкающая пластина («крышка»). В каждой из двух крышек выполнены отверстия для прохода штоков корпуса катушки (3 отверстия диаметром 16 мм, разнесенные по окружности диаметром 79 мм на 120^{o} друг от друга).

Для обеспечения постоянства величины B^{r}приобходе по центральному кругу КЗ, все трапециевидные магниты (элементы колец), были испытаны на величину магнитного момента в свободном состоянии после их намагничивания однополярным импульсом магнитного поля с амплитудой 3555 кА/м (45 кЭ) и длительностью 0,02 сек. Контроль магнитного момента каждого магнита производился по его потокосцеплению с катушкой Гельмгольца, измеряемого флюксметром EF-5 (производитель Magnet Physik, Германия). Из каждой группы трапециевидных магнитов одного типа, отбирались таковые с наиболее близкими значениями размерных параметров и магнитного момента и инсталлировались в заданные позиции с фиксацией эпоксидным клеем. После сборки производились замеры индукции магнитного поляпо центральной окружности КЗ в зависимости от азимутального угла φ - $B^{r}_{,z=0}(\varphi)$ *и* вдоль вертикальной оси z - $B^{r}_{,r=43}$ *(z)* с помощью специального сканера, оснащенного прецизионным магнитометром на датчике холла (*A.I. Rokeakh, M. Yu.Artemov, Precision Hall Effect magnetometer // Rev. Sci. Instrum 94, 034702 (2023); doi: 10.1063/5.0131896).* Зависимость $B^{r}_{,z=0}(\varphi)$ определялась при снятой верхней пластине («крышке»). Было найдено, что средняя величина модуля индукции магнитного поля в КЗ составила 0,59 Тл (5900 Э), с отклонениями ± 0,6% при движении зонда по кругу внутри КЗ с полным оборотом на 360^{o}. После финальной сборки ИЦМП были измерены зависимости $B^{r}_{r=43}$ *(z)* по всем каналам (зонд вводился в отверстия, предназначенные для прохода штоков корпуса катушки). Все зависимости $B^{r}_{r=43}$ *(z)* имели «П-образный» вид с плато в центре КЗ (z=0) с величиной $B^{r}_{r=43}$ на уровне (0,610 ± 0,004) Тл в интервале z = ± 2,5 мм.

Далее, были исследованы «силовые» параметры ЭМС с использованием измерительной катушки. Каркас катушки (фиг. 6) изготавливали из слабомагнитного

диэлектрического материала (оргстекло), Его отличительными особенностями явились увеличенный объем пространства, предназначенного для нанесения многовитковой обмотки (12 слоев, 1200 витков, провод ПЭЛ – 0,17) и специальные ободки, защищающие обмотку от повреждения при касаниях о стенки КЗ. ЭМС устанавливалась на платформе рычажных весов, а выходящие из трех отверстий в «крышке» штоки каркаса катушки перемыкались пластиной из оргстекла, которая соединялась с левым «плечом» рычага весов с помощью жесткой тяги. Вся сборка уравновешивалась грузом в 0,141кг (на правой чашке весов) в состоянии, соответствующем нахождению средины обмотки катушки строго в центре КЗ ИЦМП (фото на фиг. 7). На перемычку помещали мерные гирьки массой от 0,05 до 1,00 кг, вызывающие разбалансировку весов. Их возврат в исходное состояние достигался пропусканием постоянного электрического тока через обмотку катушки «правильной» полярности. Результаты измерений величины K представлены в ниже приводимой таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений величины коэффициента преобразования -K в созданной ЭМС согласно формулы заявляемого изобретения

Масса гири (кг)	I (A) min	I (A) max	K, (Н/А)		K ср.(Н/А)
0,05	0,0026		191		191
0,10	0,0051		191		191
0,15	0,0077		191		191
0,20	0,0103		190		190
0,25	0,0127	0,0129	194	191	192
0,30	0,0150	0,0156	196	188	192
0,35	0,0171	0,0187	201	183	192
0,40	0,0198	0,0212	198	185	191
0,45	0,0226	0,0231	195	191	193
0,50	0,0253	0,0258	194	190	192
0,55	0,0277	0,0287	195	188	191
0,60	0,0307	0,0305	192	193	192
0,65	0,0325	0,0338	196	189	192
0,70	0,0347	0,0372	198	184	191
0,75	0,0370	0,0401	199	183	191
0,80	0,0408	0,0421	192	186	189
0,85	0,0425	0,0438	196	186	191
0,90	0,0465	0,0474	190	186	188
0,95	0,0486	0,0498	192	187	189
1,00	0,0507	0,0520	194	189	191

Как видно, величина коэффициента преобразования созданной ЭМС при взвешивании тел массой в диапазоне 0,05 ÷1,00 кг практически не зависит от величины тока в катушке (в пределах погрешности измерений ± 0,5%) и следовательно развиваемое усилие обусловлено только силой Ампера ($F_A = B^r \cdot l \cdot I$, *где* B^r – индукция магнитного поля *в* КЗ)при пропускании тока в диапазоне $I = 0{,}003 \div 0{,}05$ А. Следовательно, величина индукции магнитного поля в КЗ ИЦМП сохраняется неизменной (будет равна таковой в режиме калибровки), и в ней отсутствует F_z вклад, величина которого должна быть согласно формуле $F_z = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dz}$пропорциональна квадрату силы электрического тока (по крайней мере он ниже предела разрешения у использованных весов). Представляется, что причиной такой «нечувствительности» КЗ к магнитному полю катушки у созданной согласно заявляемого изобретения ЭМС, является низкая величина магнитной проницаемости - μ материалов, из которых изготовлены элементы ИЦМП,

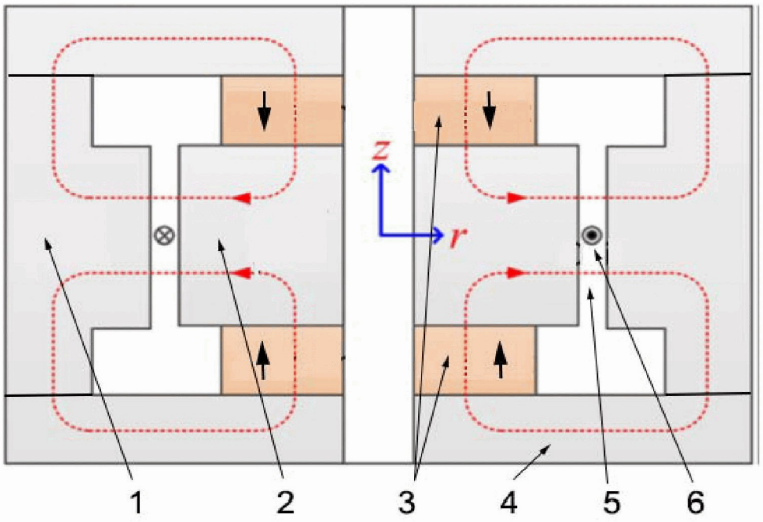
формирующие КЗ (как у высоко-коэрцитивных магнитов в рабочей точке, так и полюсных наконечников находящихся в состоянии магнитного насыщения ($\mu \approx 1$), что и обеспечивает слабую или нулевую «реакцию» КЗ ИЦМП на токи в измерительной катушке величиной до 0,05А. Отметим также, что созданная ЭМС по своим размерам и массе в десятки раз меньше таковой у прототипа (15 кг против 800 кг), хотя при этом способна «взвешивать» тела массой до 1 кг. Тем самым, она отличается еще и более низкой стоимостью используемых материалов и существенно меньшими трудозатратами на изготовление входящих в ее состав узлов, их сборке и юстировке.

Таким образом, технический результат изобретения заключается:1) в повышении эффективности использования магнитного потока магнитов для создания циркулярного магнитного поля в КЗ; 2) в повышении точности измерений массы тел величиной до одного килограмма при применении ЭМС в весах Ватта, вследствие отсутствии дополнительного вклада в магнитное поле КЗ от пропускаемого электрического тока по обмотке ИК, помещенной в КЗ и отсутствия градиента величины индуктивности ИК при ее перемещении в центральной области КЗ ИЦМП.

(57) Формула изобретения

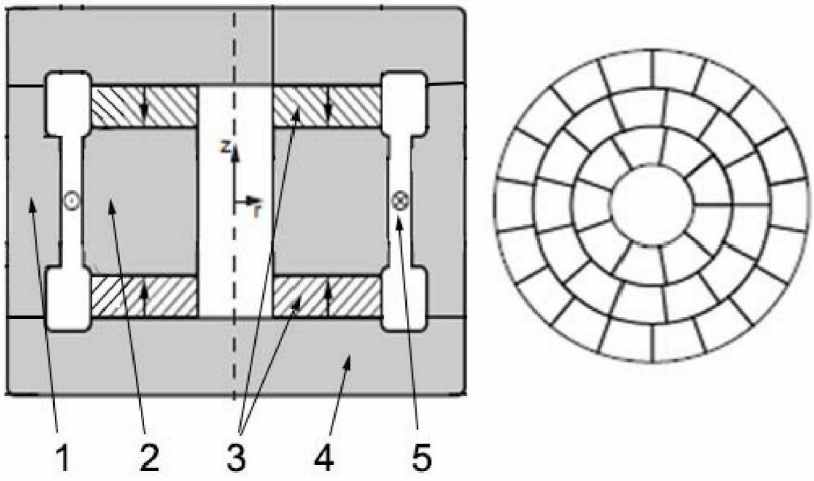
Электромагнитная система (ЭМС), состоящая из источника циркулярного магнитного поля (ИЦМП) в форме полого цилиндрического корпуса (ЦК) и внутреннего цилиндрического магнитопровода (ВЦМ), изготовленных из магнитомягкого материала, формирующих кольцевидную полость внутри ЦК, двух кольцевых постоянных магнитов, выполненных наборными, и измерительной катушки во внутренней кольцевой полости, отличающаяся тем, что кольцевые магниты установлены внутри кольцевой полости напротив друг друга в геометрическом центре ИЦМП, соответственно на внутренней поверхности ЦК и на цилиндрической поверхности ВЦМ с обращенными друг к другу разноименными магнитными полюсами, образуя радиальное распределение вектора остаточной намагниченности в теле каждого кольца, а на полюсных поверхностях колец, обращенных к зазору, установлены полюсные наконечники из магнитомягкого материала также в форме кольца с на порядок меньшей, чем у магнитов, радиальной толщиной и одинаковой с магнитами высотой, торцы ЦК и ВЦМ плотно замкнуты круглыми пластинами из магнитомягкого материала с диаметром, равным наружному диаметру корпуса, в пластинах созданы сквозные отверстия, обеспечивающие доступ внутрь ИЦМП и выход штоков каркаса измерительной катушки, выполненной на каркасе многослойной и многовитковой.

1



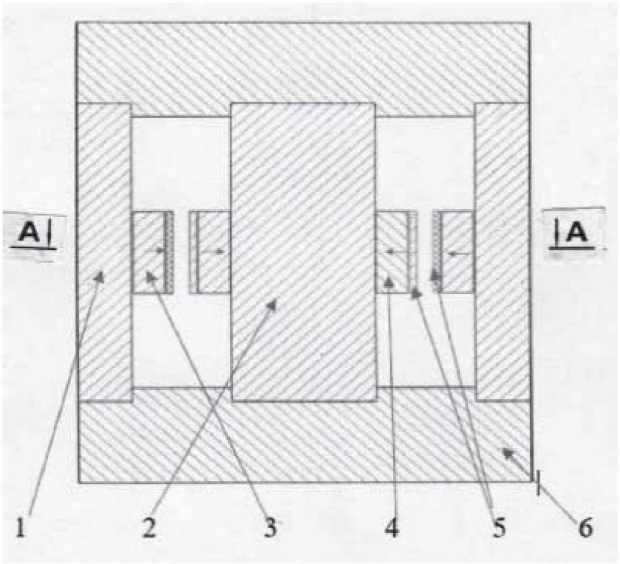
Фиг.1

2

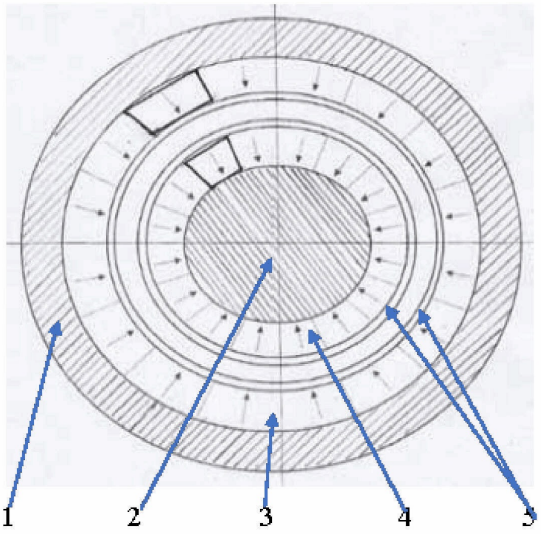


Фиг. 2

3

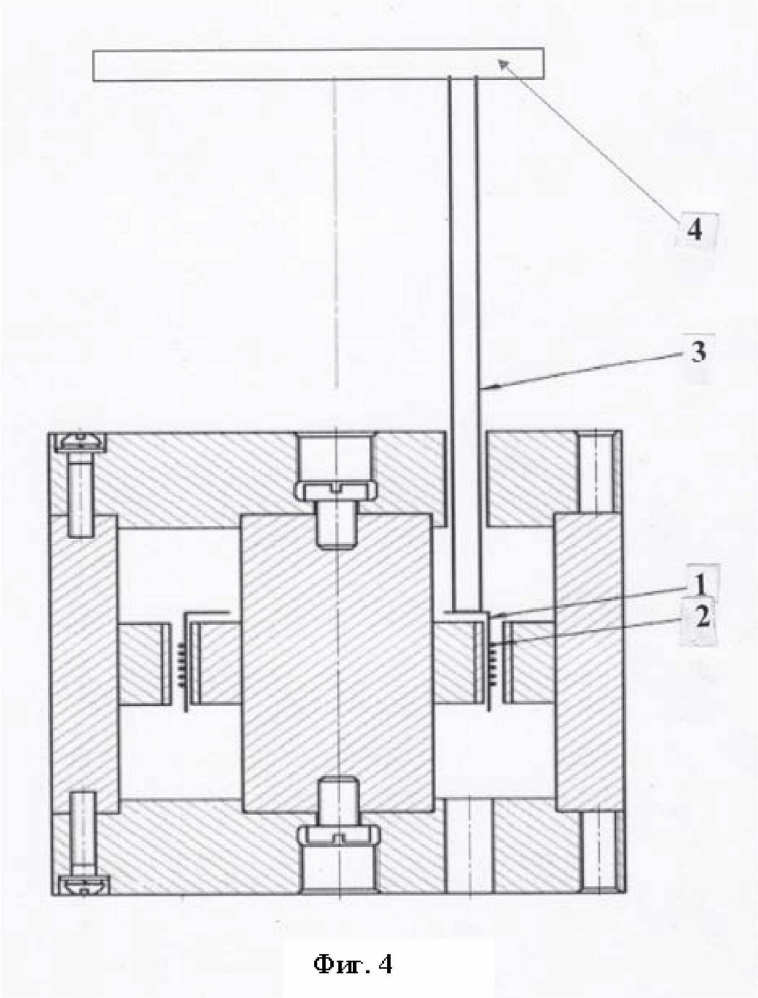


А-А



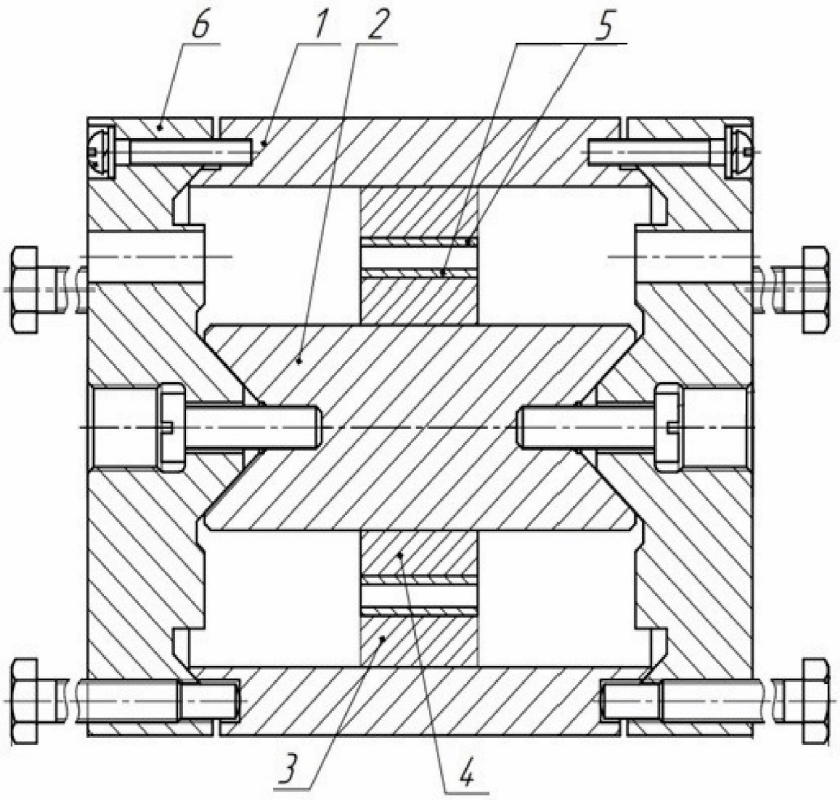
Фиг. 3

4



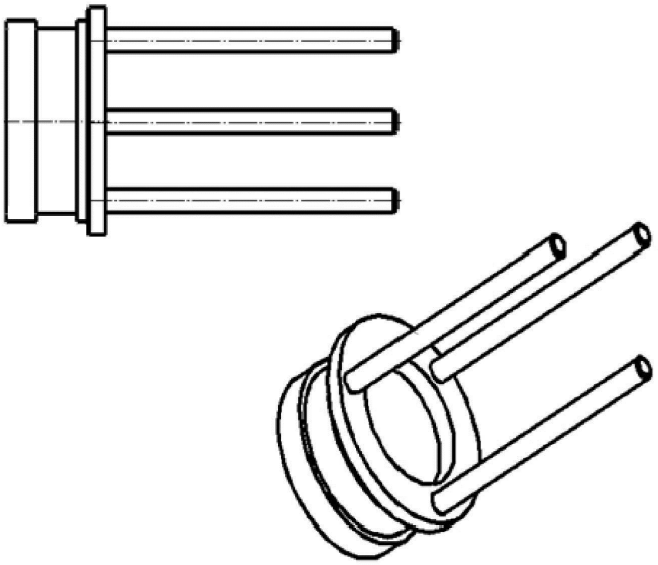
Фиг. 4

5



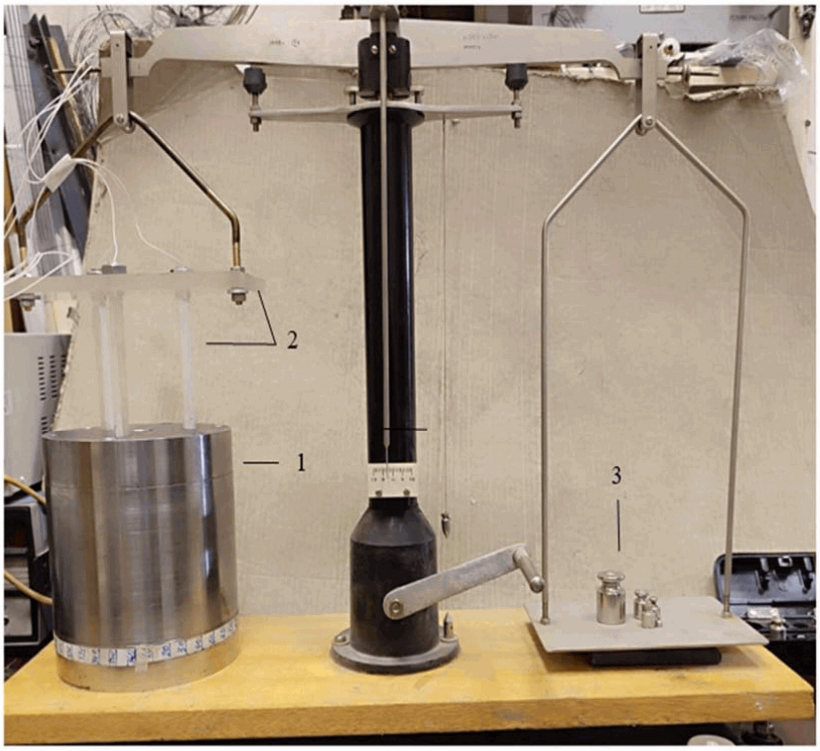
Фиг. 5

6



Фиг. 6

7



Фиг. 7