

УДК 531.768; 537.635

Михаил Андреевич Косков

ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, младший научный сотрудник лаборатории «Динамика дисперсных систем», Россия, Пермь, телефон (342) 237-83-25, e-mail: koskov.m@icmm.ru

Алексей Сергеевич Иванов

ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук, доцент, зав. лабораторией «Динамика дисперсных систем», Россия, Пермь, телефон (342) 237-83-25, e-mail: lesnichy@icmm.ru

Магнитная система одноосного инерционного магнитожидкостного акселерометра

Авторское резюме

Состояние вопроса. Существует актуальная инженерно-физическая проблема проектирования инерционных магнитожидкостных акселерометров, пригодных для измерения динамических воздействий. Основной недостаток современных конструкций – нелинейная характеристика отклика на внешнее воздействие, ограничивающая область применения датчиков случаем квазистатического воздействия (датчик угла наклона). Причина нелинейности заключается в конструкции магнитомеханической системы упругого подвеса инертной массы, выполненной в виде пары постоянных кольцевых магнитов. Указанный недостаток можно устранить путем целенаправленного проектирования осесимметричной электромагнитной системы, генерирующей магнитное поле с линейным вдоль оси симметрии градиентом напряженности. В связи с этим актуальной задачей является решение указанной проблемы и экспериментальная апробация результатов на лабораторном макете датчика.

Материалы и методы. Для расчета электромагнитных систем, составленных из постоянных магнитов и намагничивающих катушек, использован алгоритм Монте-Карло, реализованный на языке программирования C++. Измерения наиболее важных с точки зрения цели исследования параметров магнитного поля произведены на собранном макете электромагнитной системы акселерометра.

Результаты. Выполнен расчет электромагнитной системы, генерирующей постоянное магнитное поле с линейным вдоль оси симметрии градиентом напряженности. Демонстрируется применимость метода Монте-Карло для решения подобных инженерных задач. Произведены измерения напряженности магнитного поля заданной конфигурации. Измерена сила, действующая со стороны магнитного поля на тестовый чувствительный элемент с постоянным магнитным моментом. Проведено сравнение расчетного магнитного поля с полем реальной системы, показавшее удовлетворительное согласие расчетных данных с реальными. Демонстрируется линейная зависимость возвращающей силы от координаты смещения тела с постоянным магнитным моментом из положения равновесия.

Выводы. Линеаризация отклика механической части инерционного магнитожидкостного датчика на внешнее воздействие достигается путем подбора требуемой конфигурации его магнитной системы, что в перспективе позволит производить надежные измерения как статических, так и динамических величин.

Ключевые слова: магнитная жидкость, электромагнитный подвес, линейный градиент напряженности, инерционный акселерометр

Michael Andreevich Koskov

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Disperse Systems Dynamics, Russia, Perm, telephone (342) 237-83-25, e-mail: koskov.m@icmm.ru

Aleksey Sergeevich Ivanov

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of Disperse Systems Dynamics Laboratory, Russia, Perm, telephone (342) 237-83-25, e-mail: lesnichy@icmm.ru

Magnetic system of uniaxial inertial ferrofluid accelerometer

Abstract

Background. Today, a physical problem of engineering design of inertial magnetic fluid accelerometers to measure dynamic processes is relevant. The main drawback of modern sensors is the nonlinear characteristic of the forced response, which limits the application area of the sensors to the case of quasi-static action (tilt angle sensor). The reason of nonlinearity is the design of the magneto-mechanical system of the elastic suspension of the inertial mass made in the form of a pair of permanent ring magnets. This drawback can be eliminated by designing an axisymmetric electromagnetic system that generates a magnetic field with a linear intensity gradient along the symmetry axis. Thus, the paper is devoted to this problem and experimental improvement of the results on a laboratory sensor prototype.

Materials and methods. The Monte Carlo algorithm is used to calculate electromagnetic system containing permanent magnets and magnetizing coils. The algorithm is implemented using the C++ programming language. Measurements of the most important parameters of the magnetic field from the point of view of the purpose of the study are carried out on the assembled model of the electromagnetic system of the accelerometer.

Results. The calculation of electromagnetic system that generate permanent magnetic field with linear intensity gradient along the symmetry axis is carried out. The applicability of the Monte Carlo method to solve similar engineering problems is shown. The measurements of the magnetic field strength of a given configuration have been made. The force of the magnetic field acting on the test sensitive element with a constant magnetic moment is measured. A comparison of the calculated magnetic field with the field of a real system is carried out. It shows satisfactory agreement between the calculated data and the real ones. A linear dependence of the restoring force on the displacement coordinate of a body with a constant magnetic moment from the equilibrium position is shown.

Conclusions. The linearization of the response of the mechanical part of the magnetic fluid accelerometer is achieved by choosing the desired configuration of its electromagnetic system, which allows making reliable measurements of both static and dynamic quantities.

Key words: magnetic fluid, electromagnetic suspension, linear intensity gradient, inertial accelerometer

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.6.026-036

Состояние вопроса. Одноосные акселерометры получили широкое применение в промышленности, транспортной отрасли, бытовой технике и других отраслях народного хозяйства. Интерес к электро-механическим датчикам, измеряющим поступательное ускорение, обуславливает постоянную необходимость разработки и усовершенствования конструкций таких устройств. В этом смысле перспективной представляется разработка акселерометров, инертный элемент которых находится в подвесе из магнитной жидкости [1–6]. Магнитная жидкость представляет собой устойчивый коллоидный раствор ферро- или ферритмагнитных частиц в немагнитной жидкости-носителе [7–9]. Такой коллоид во внешнем магнитном поле проявляет сильные парамагнитные свойства и втягивается в область с максимальной напряженностью поля. Обладающая собственным магнитным полем, инертная масса (чувствительный к ускорению элемент акселерометра), будучи помещенной в магнитную жидкость, окажется во взвешенном состоянии [7], даже если плотность материала инертной

массы в несколько раз превышает плотность коллоида. Использование магнитной жидкости в конструкции механической части акселерометров связано с двумя важными преимуществами: во-первых, высокой чувствительностью датчика к малым ускорениям, обусловленной тем, что чувствительный элемент не испытывает сухого трения; во-вторых, потенциально невысокой стоимостью подобных устройств в силу неиспользования полупроводниковых и любых других технологий производства, к которым предъявляются повышенные требования по точности и качеству изготовления. Несмотря на вышеуказанные преимущества, на сегодняшний день коммерчески успешных образцов магнитожидкостных акселерометров не существует. Успешному внедрению конструкции одноосного акселерометра, разработанной еще во второй половине XX века и описанной, например, в [2, 3, 7, 10], помешало принципиально неустранимое явление магнитофореза в магнитном коллоиде [11, 12]. Концентрация магнитных частиц вблизи магнитных полюсов чувствительного элемента возрастает

со временем, что влечет сильный дрейф нуля такого датчика при сохранении его высокой чувствительности. Решение этой проблемы было достигнуто устранением магнитной жидкости из процесса формирования полезного сигнала путем сведения ее объема в датчике до минимума, необходимого лишь для устранения сухого трения чувствительного элемента о корпус устройства. Различные варианты конструкций таких датчиков описаны в [13–15]. Впрочем, и эти конструкции обладают одним существенным недостатком: смещение инертной массы от положения равновесия нелинейно зависит от величины внешнего воздействия. Упругая возвращающая сила возникает при взаимодействии постоянных магнитов, закрепленных на чувствительном элементе, с внешним магнитным полем, источником которого также являются постоянные магниты, размещенные на корпусе устройства. Если символом μ обозначить модуль магнитного момента некоторой выделенной части чувствительного элемента, то сила, действующая на эту часть, может быть рассчитана по формуле

$$F = -\mu_0 \mu \nabla H, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная; ∇H – градиент модуля напряженности поля постоянных магнитов, закрепленных на корпусе.

Поскольку поле постоянного магнита H имеет сложную геометрию, то и сила, действующая на чувствительный элемент, нелинейным образом зависит от его положения внутри датчика [15]. В результате надежно измеряемым оказывается только постоянное ускорение, а динамическое внешнее воздействие можно лишь детектировать [16, 17].

Надежное измерение динамического воздействия возможно, если упругая сила (1) линейно зависит от смещения инертной массы [18]. Чувствительный элемент представляет собой систему постоянных магнитов, покрытых слоем магнитоэластичной смазки (μ постоянен), поэтому требование линейности можно удовлетворить, добившись линейной зависимости градиента ∇H внешнего магнитного поля вдоль измерительной оси датчика.

Характерная величина градиента напряженности магнитного поля, необходимого для удержания чувствительного элемента (инертной массы) внутри датчи-

ка, оценивается по отношению магнитной силы к силе инерции:

$$\frac{\mu_0 M \nabla H}{\rho g} > 1, \quad (2)$$

где M – намагниченность материала чувствительного элемента; ρ – его плотность; g – ускорение.

Если в качестве чувствительного элемента используется постоянный магнит «неодим-железо-бор N35», остаточная намагниченность которого при комнатной температуре $M = 9,6 \cdot 10^5$ А/м¹, а плотность $\rho = 7,6$ г/см³, то в поле силы тяжести ускорение и искомое значение градиента (2) принимают соответственно значения $g = 9,8$ м/с² и $\nabla H > 6,3 \cdot 10^4$ А/м². Для надежного удержания чувствительного элемента, в конструкции которого имеются немагнитные элементы, требуется магнитное поле с градиентом напряженности не менее 10^5 А/м². Однако чрезмерно увеличивать ∇H недопустимо, так как это приведет к отрыву магнитоэластичной смазки от чувствительного элемента. Магнитная жидкость удерживается в виде двух капель вблизи полюсов чувствительного элемента, где характерный градиент напряженности поля составляет порядка 10^7 А/м². Следовательно, это значение является верхней границей для ∇H магнитной системы датчика. В зависимости от конкретных инженерных требований, от магнитной системы, удерживающей чувствительный элемент в рабочей области акселерометра, может потребоваться поле с градиентом $\nabla H \sim 10^5$ – 10^7 А/м².

Метод линеаризации градиента магнитного поля. Осесимметричную магнитную систему, создающую магнитное поле с линейным вдоль оси симметрии градиентом, можно рассчитать методом Монте-Карло. Суть метода применительно к данной задаче заключается в переборе псевдослучайных конфигураций источников магнитного поля до получения оптимальной конфигурации в соответствии с критерием линейности градиента поля.

При расчетах рассматривалось два вида источников поля: намагничивающие катушки и постоянные магниты. Много-слойные цилиндрические проволочные ка-

¹ Permanent Magnet Selection and Design Handbook [сайт]: <https://www.magcraft.com> [обн. 8.07.2017; цит. 28.06.2021]. Дост.: <https://cdn2.magcraft.com/pdf/Permanent-Magnet-Selection-and-Design-Handbook.pdf>

тушки прямоугольного поперечного сечения без ферромагнитного сердечника просты и сравнительно недороги в изготовлении. Напряженность магнитного поля H вдоль оси симметрии таких катушек рассчитывается в хорошо известном приближении однородной плотности тока j во всем поперечном сечении [19]:

$$H = \frac{j}{2} \left[a \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + a^2}}{r + \sqrt{r^2 + a^2}} \right) + b \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + b^2}}{r + \sqrt{r^2 + b^2}} \right) \right],$$

$$a = z + \frac{h}{2}, \quad b = z - \frac{h}{2}. \quad (3)$$

Здесь z – расстояние на оси катушки от ее геометрического центра до точки, в которой рассчитывается напряженность поля; h – высота намотки; R и r – внешний и внутренний радиусы катушки соответственно.

Заметим, что характерное значение напряженности магнитного поля, создаваемого намагничивающей катушкой из медного провода, не требующей дополнительного жидкостного охлаждения, составляет 10^3 – 10^4 А/м, а характерное значение градиента 10^4 – 10^5 А/м² недостаточное для удержания чувствительного элемента при воздействии ускорения больше ускорения свободного падения. Для удержания инертной массы при воздействии перегрузки в несколько единиц g требуется магнитное поле, градиент напряженности которого на порядок больше (10^6 А/м²), чем у поля, создаваемого проволоочной катушкой. Этому требованию соответствует поле на оси аксиально-намагниченного цилиндрического или кольцевого ферритового магнита [20]. Напряженность H поля вдоль оси симметрии такого магнита можно рассчитать методом эквивалентного соленоида [19, 20], т. е. предполагая, что остаточная намагниченность M_r однородна по величине и направлению во всем объеме магнита:

$$H = \frac{M_r}{2} \left(\frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} - \frac{b}{\sqrt{R^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{r^2 + b^2}} \right),$$

$$a = z + \frac{h}{2}, \quad b = z - \frac{h}{2}. \quad (4)$$

Здесь, аналогично (3): R – внешний, r – внутренний радиус кольцевого магнита; h – его толщина; z – расстояние вдоль оси от его геометрического центра.

Следует оговориться, что предположение об однородности намагниченности во всем объеме довольно грубое. Так, например, согласно этому предположению, вбли-

зи острых кромок магнита напряженность размагничивающего поля превосходит коэрцитивную силу [19]. Кроме того, распределение намагниченности в объеме магнита в значительной степени зависит от технологии (т.е. всей предыстории) его изготовления. Впрочем, сравнение результатов измерения напряженности магнитного поля вдоль оси магнита из феррита бария (рис. 1) с результатом расчета по формуле (4) дает приемлемое согласие, достаточное для инженерных расчетов лабораторного макета [21].

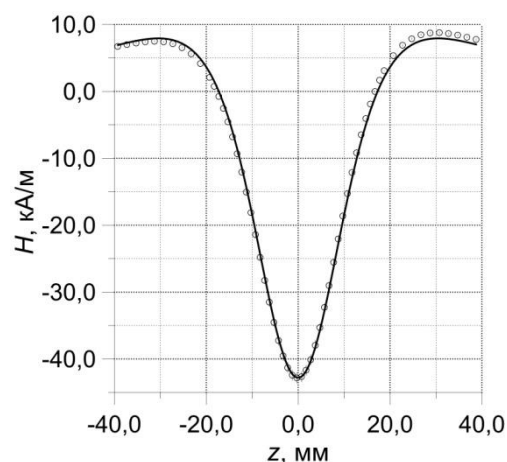


Рис. 1. Напряженность магнитного поля вдоль оси кольцевого ферритового магнита: точки – эксперимент; сплошная линия – расчет по формуле (4)

Алгоритм программы, рассчитывающей конфигурацию магнитной системы с линейным вдоль оси градиентом, представлен на рис. 2. Для большей наглядности алгоритм представлен без привязки к конкретному языку программирования.

Входными данными для алгоритма являются априори известные параметры магнитной системы. Заранее заданным неизменным параметром является длина рабочей области – участка на оси намагничивающей системы, вдоль которого градиент напряженности магнитного поля должен описываться линейной функцией.

Размеры рабочей области главным образом определяются геометрией чувствительного элемента. Заранее заданным параметром также является плотность тока j в катушках, поскольку ее номинальное значение определяется условиями термической стойкости изоляции проводов и требованиями к энергопотреблению устройства, что ограничивает варьирование силы тока в широких пределах. Плотность тока j во всех катушках принималась одинаковой. Такое

решение упрощает процесс сборки устройства, так как подразумевает намотку всех катушек проводом одинакового сечения и последовательное их соединение, что позволяет использовать только один источник стабилизированного постоянного тока для питания всех обмоток. Остаточная намагниченность M_r является свойством материала, из которого изготовлены постоянные магниты, поэтому M_r также является паспортной характеристикой. Геометрические размеры R , r , и h постоянных магнитов в общем случае могут быть произвольными в пределах, обусловленных требованиями механической прочности и возможностями технологии изготовления.

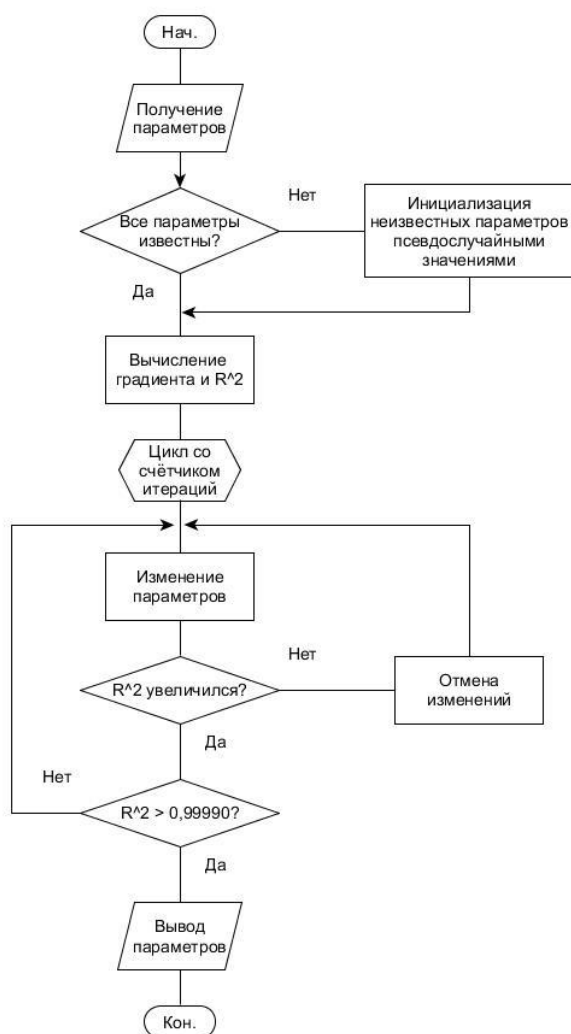


Рис. 2. Общий вид алгоритма Монте-Карло поиска конфигураций магнитных систем с требуемой геометрией поля

Впрочем, на этапе разработки макета акселерометра и апробации технических решений экономически целесообразно использование магнитов стандартных размеров, в том числе имеющих в розничной

продаже. В связи с этим при реализации алгоритма допускалась возможность заранее задавать фиксированные размеры постоянных магнитов. Изменению по ходу выполнения алгоритма у такого магнита подвергается только его расположение относительно рабочей области. Возможность задания фиксированных размеров была предусмотрена и для намагничивающих катушек. Польза такой возможности будет ясна из дальнейшего изложения. Наконец, очевидными обязательными параметрами являются максимальные и минимальные размеры источников поля и их максимальная удаленность от рабочей зоны. Ограничение предельных размеров магнитной системы позволяет избежать технически нереализуемых конфигураций, например, катушек бесконечно большого диаметра. Дополнительно ограничение предельных размеров намагничивающей системы позволяет исключить тривиальный случай, при котором источники магнитного поля находятся столь далеко от рабочей области, что градиент магнитного поля в ней формально описывается линейной функцией с нулевыми коэффициентами.

После получения входных параметров производится инициализация заранее неизвестных геометрических размеров источников поля псевдослучайными значениями, лежащими в заданных пределах. Разумеется, при инициализации (как и на всех этапах алгоритма) не допускается наложения одного объекта на другой. Так создавалась начальная конфигурация намагничивающей системы, в которой в общем случае расположение и размеры некоторых источников поля заданы заранее, а других – инициализированы случайными значениями.

После инициализации начальной геометрической конфигурации системы вычисляется градиент напряженности поля в рабочей зоне акселерометра. Поскольку для напряженности магнитного поля и его градиента выполняется принцип суперпозиции [19], то градиент поля каждого источника вычислялся в отдельности, а результаты вычислений суммировались. Расчетные формулы для градиентов отдельных источников поля были получены путем дифференцирования формул (3) и (4) по осевой координате z . Опустим явную запись полученных формул ввиду их громоздкости и несущественности для дальнейшего изложения. Результирующий гра-

диент аппроксимируется в пределах рабочей зоны линейной функцией по методу наименьших квадратов. Вычисляется критерий достоверности аппроксимации, в качестве которого используется коэффициент детерминации R^2 [22].

По завершении подготовительных вычислений производится вариация геометрических параметров системы. Среди всех геометрических размеров системы, изменение которых не запрещено изначально, случайно и равновероятно выбирается некоторый размер. Этот размер изменяется на случайную величину, много меньшую характерных размеров системы. Предельное значения этой величины, обеспечивающее наиболее быстрый поиск оптимальной конфигурации, подбирается при предварительном тестировании программы. После изменения размера источника поля вычисляется соответствующее изменение градиента и пересчитывается коэффициент детерминации R^2 линейного аппроксимирующего уравнения. Изменения размеров источников магнитного поля, приводящие к увеличению коэффициента детерминации, сохраняются, а не приводящие – отбрасываются. Варьирование прекращается по достижении $R^2 > 0,99990$. Поскольку достижение столь близкого к единице значения R^2 иногда оказывается невозможным, цикл варьирования допол-

нительно заключается в объемлющий цикл со счетчиком, позволяющим принудительно завершить программу после выполнения заданного предельного числа итераций. По завершении варьирования выводится список оптимальных геометрических параметров магнитной системы.

Описанный выше алгоритм был реализован на языке программирования C++ с использованием стандартных библиотек. Для удобства оперирования с входными и выходными данными все обрабатываемые программно величины масштабировались. Масштаб длины составлял $L = 1$ мм. В качестве масштаба плотности тока была выбрана величина $J = 1$ А/мм², поскольку при плотностях тока порядка J катушки, выполненные медным эмалированным проводом, не нуждаются в дополнительном охлаждении. При таком выборе масштабов единицей измерения напряженности магнитного поля и намагниченности материала магнитов является величина $J \cdot L = 1$ кА/м. Масштаб плотности тока J одновременно является единицей измерения градиента напряженности поля.

Тестирование алгоритма производилось путем построения конфигураций магнитной системы с источниками поля произвольных размеров. Примеры получившихся конфигураций представлены на рис. 3.

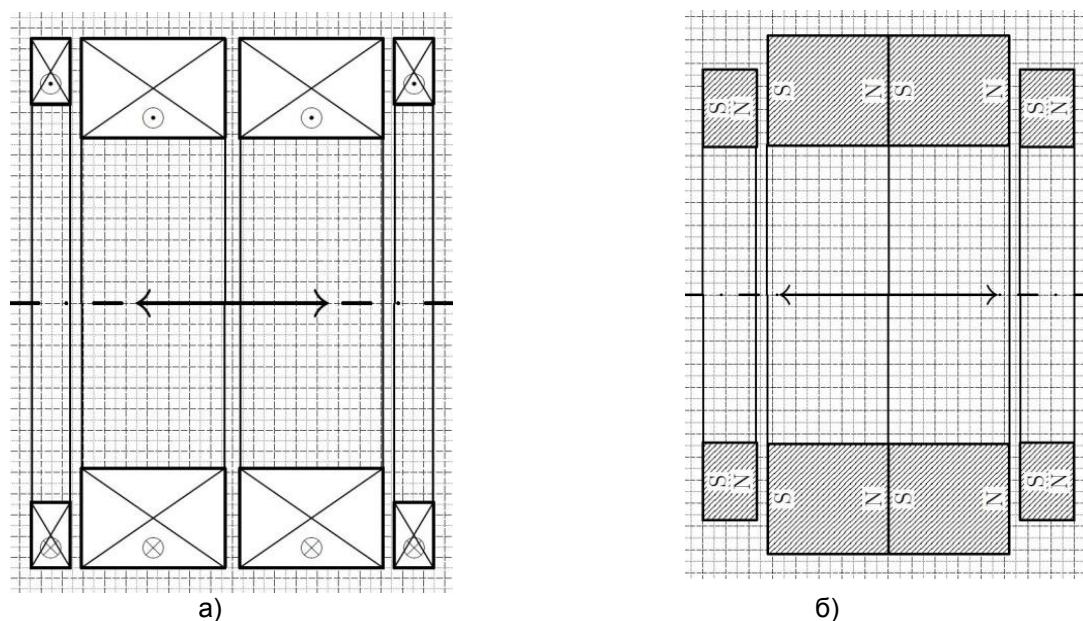


Рис. 3. Примеры осевых сечений магнитных систем с линейным вдоль оси градиентом, сконфигурированных из источников поля произвольных размеров: а – система из магнитных катушек; б – система из кольцевых постоянных магнитов; жирная штрихпунктирная линия – ось симметрии систем; двусторонняя стрелка – область линейного градиента (размер одной клетки фона – 2 мм)

В представленных на рисунке случаях программа завершалась достижением условия $R^2 > 0,99990$. Внимание привлекает магнитная система с линейным вдоль оси градиентом напряженности, состоящая только из постоянных магнитов (рис. 3,б). Эта конфигурация на первый взгляд кажется привлекательной, поскольку не требует силовой цепи питания стабилизированным постоянным током, как, например, система с намагничивающими катушками (рис. 3,а). Однако требования к магнитам для изготовления такой системы оказываются завышенными. Магниты должны быть нестандартных размеров. Их свойства в разумных пределах не должны зависеть от температуры и не должны меняться с течением времени. Более того, рассматриваемая конфигурация требует размещения кольцевых постоянных магнитов на близком расстоянии друг от друга, что неизбежно повлечет взаимное изменение их намагниченности.

Наиболее перспективными для реализации кажутся магнитные системы, включающие и постоянные магниты, и катушки. Роль постоянных магнитов в таких конфигурациях сводится к созданию поля, градиент которого достаточен по величине для удержания инертной массы в рабочей области датчика ($\sim 10^6$ А/м²). Намагничива-

ющие катушки в свою очередь корректируют созданное магнитами поле до требуемой линейной геометрии. Коррекция поля катушками также может быть использована для компенсации температурной зависимости намагниченности постоянных магнитов и ее уменьшения с течением времени путем тонкой подстройки силы тока. Примеры конфигураций, полученных для дисковых ферритовых магнитов стандартных размеров, представлены на рис. 4. Отметим, что изготовление представленных систем не связано с существенными техническими трудностями.

Проверка пригодности алгоритма (рис. 2) и формул (3), (4) для расчета реальных магнитных систем осуществлялась с помощью лабораторного макета одной из возможных конфигураций магнитной системы. Рассматривалась конфигурация системы с размером рабочей области 40 мм. В макете использовались два магнита из феррита бария с аксиально-направленной намагниченностью $M_r = 266$ кА/м. Внутренний радиус магнитов $r = 16$ мм, внешний – $R = 36$ мм, толщина – $h = 10$ мм. Размеры двух корректирующих катушек перед началом расчета не задавались. Плотность тока в катушках принималась равной $j = 1,4$ А/мм².

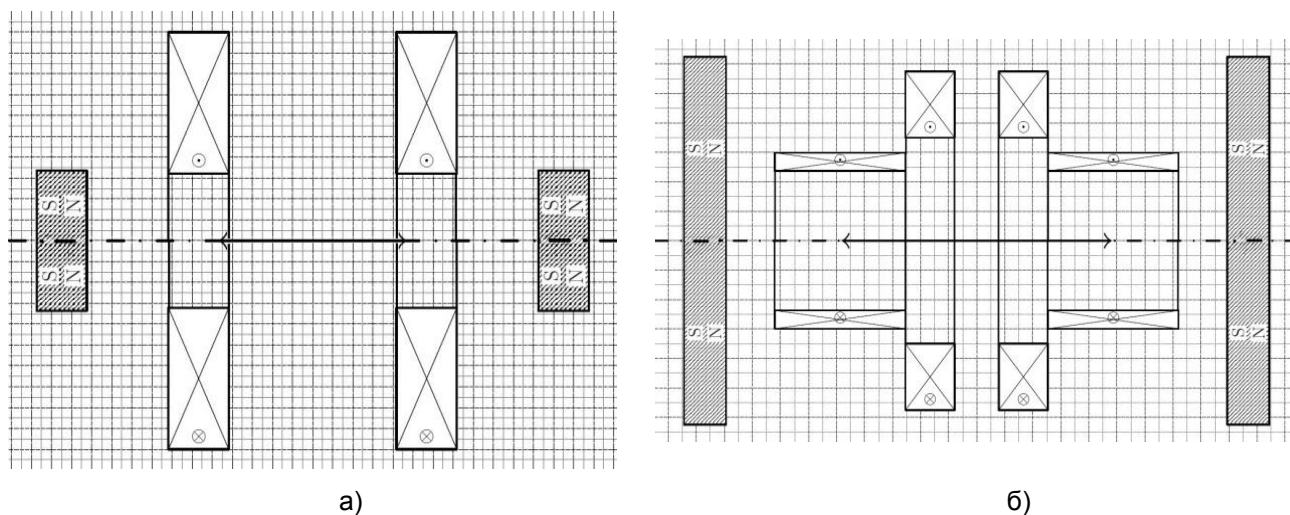


Рис. 4. Примеры осевых сечений магнитных систем с линейным вдоль оси градиентом, сгенерированных для дисковых постоянных магнитов стандартных размеров при $M_r = 300$ кА/м, $j = 2$ А/мм²: а – система из двух дисковых постоянных магнитов и двух корректирующих катушек; б – система из двух дисковых постоянных магнитов и четырех корректирующих катушек; жирная штрихпунктирная линия – ось симметрии систем; двусторонняя стрелка – область линейного градиента (размер одной клетки фона – 2 мм)

Результаты. Наилучшая расчетная линейность градиента напряженности магнитного поля была достигнута при расположении катушек вплотную в геометрическом центре системы (рис. 5), что допускало замену двух корректирующих катушек одной, чем и был обусловлен выбор данной конфигурации как наиболее простой в изготовлении. Полученные в предварительном расчете геометрические размеры корректирующей катушки (в миллиметрах) округлялись для удобства выполнения плотной намотки. После округления размеры катушки фиксировались и производился дополнительный, уточняющий расчет, направленный на частичную компенсацию нелинейности градиента магнитного поля, возникшую при округлении размеров катушки. Компенсация возникшей нелинейности осуществлялась путем варьирования только взаимного расположения элементов магнитной системы.

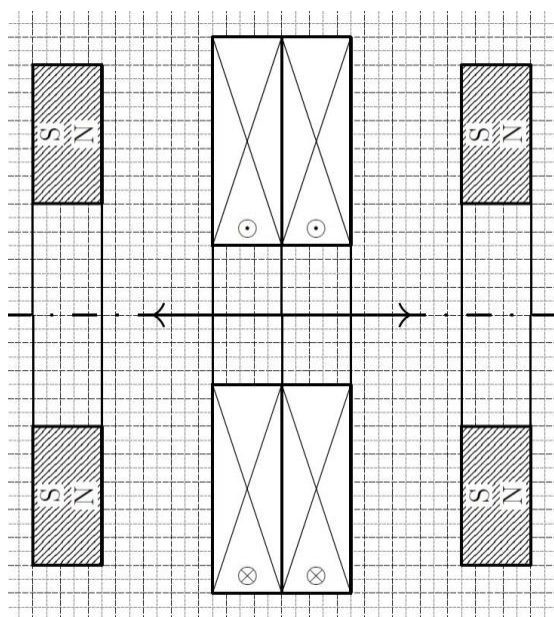


Рис. 5. Конфигурация магнитной системы из двух цилиндрических постоянных магнитов и корректирующей катушки: жирная штрихпунктирная линия – ось симметрии; двусторонняя стрелка – область линейного градиента (размер одной клетки фона – 2 мм)

Корпус магнитной системы с фиксирующими магниты элементами и каркас катушки изготавливались из пластика методом 3D-печати с допусками размеров 0,1 мм. Соединения элементов намагничивающей системы выполнялись с использованием цианакрилового клея. В корректи-

рующую катушку было уложено 600 витков медного эмалированного провода диаметром 0,95 мм. Сопротивление катушки составило 2,3 Ом. Расчетное тепловыделение при питании током 1,4 А составило 4,5 Вт.

Проверка соответствия реальной и расчетной геометрии магнитного поля производилась путем измерения напряженности поля вдоль оси намагничивающей системы с шагом 1,00 мм (рис. 6). В первой серии измерений коррекция геометрии магнитного поля при помощи катушки не осуществлялась (рис. 6, светлые точки). Ток в катушке отсутствовал. По результатам измерений методом конечных разностей вычислялся градиент напряженности магнитного поля (рис. 7, светлые точки). Наблюдается удовлетворительное согласие расчетной и реальной геометрии магнитного поля. Во второй серии опытов, через корректирующую катушку пропусклся стабилизированный постоянный ток (рис. 6, темные точки). Применение корректирующей катушки значительно линеаризует градиент поля намагничивающей системы (рис. 7).

Наиболее важной с точки зрения цели исследования является сила, возвращающая чувствительный элемент в положение равновесия. Тестовый чувствительный элемент представляет собой два одинаковых соосно расположенных цилиндрических магнита типа «неодим-железо-бор N35», намагниченных в аксиальном направлении (рис. 8). Между магнитами установлена цилиндрическая втулка из эпоксидной смолы. К торцам магнитов прикреплены немагнитные штоки, служившие в тестовых опытах для крепления чувствительного элемента к динамометру. Расположен чувствительный элемент в стеклянной трубке, жестко закрепленной в корпусе устройства на его оси. В изготовленном макете была использована магнитная жидкость на основе трансформаторного масла [23], пригодная для работы в сильных градиентных полях. Масса тестового чувствительного элемента с учетом массы, удерживающейся на нем в виде двух капель магнитожидкостной смазки, составила 1,03 г.

Возвращающая сила, действующая со стороны поля магнитной системы на чувствительный элемент, измерялась в зависимости от его смещения от положения равновесия с шагом 0,50 мм (рис. 9). В отсутствии тока корректирующей катушки достоверность аппроксимации R^2 возвра-

щающей силы линейной функцией оказалась не более 0,9988. Этот результат сам по себе является удовлетворительным и достигается за счет наиболее оптимального расположения постоянных магнитов. При подаче питания на корректирующую катушку достоверность аппроксимации

возрастает до 0,9996. Корректирующая катушка дополнительно увеличивает амплитуду возвращающей силы. При смещении чувствительного элемента в 7,50 мм от нулевой точки величина силы превышает 60 мН, что эквивалентно воздействию перегрузки 6g.

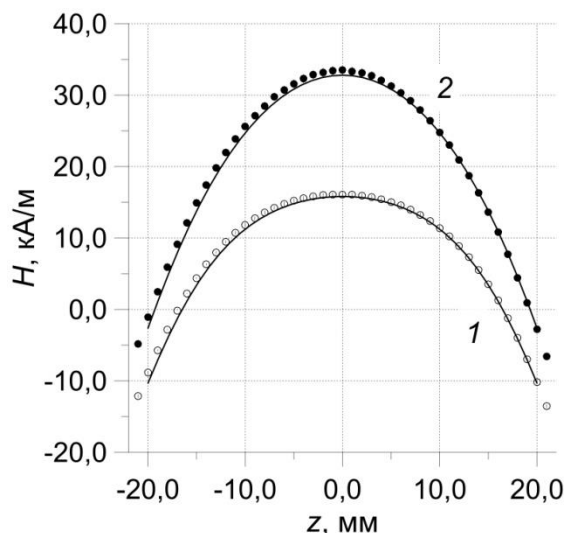


Рис. 6. Напряженность магнитного поля вдоль оси намагничивающей системы: 1 – при нулевом токе в корректирующей катушке; 2 – при плотности тока в корректирующей катушке $1,4 \text{ A/mm}^2$; точки соответствуют измерению тесламетром; сплошные линии – расчетные значения напряженности

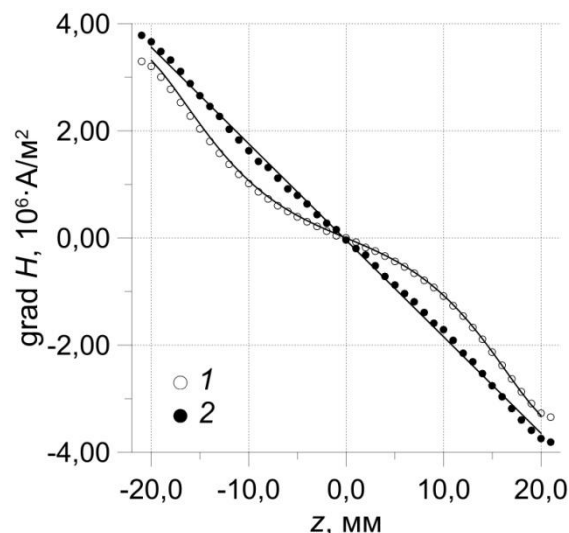


Рис. 7. Градиент напряженности поля вдоль оси намагничивающей системы: 1 – при нулевом токе в корректирующей катушке; 2 – при плотности корректирующего тока $1,4 \text{ A/mm}^2$; точки соответствуют измерению; сплошные линии – предварительному расчету

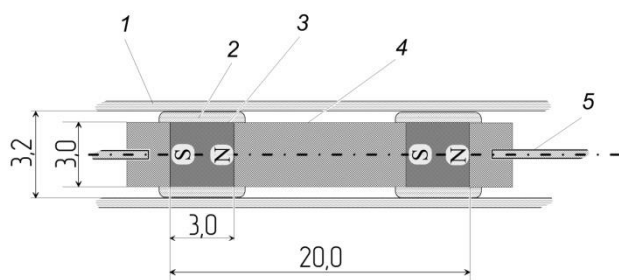


Рис. 8. Чувствительный элемент в осевом разрезе с указанием основных размеров в миллиметрах: 1 – стеклянная трубка, жестко связанная с корпусом датчика; 2 – магнитная жидкость; 3 – постоянный магнит типа «неодим-железо-бор»; 4 – немагнитная цилиндрическая втулка; 5 – шток

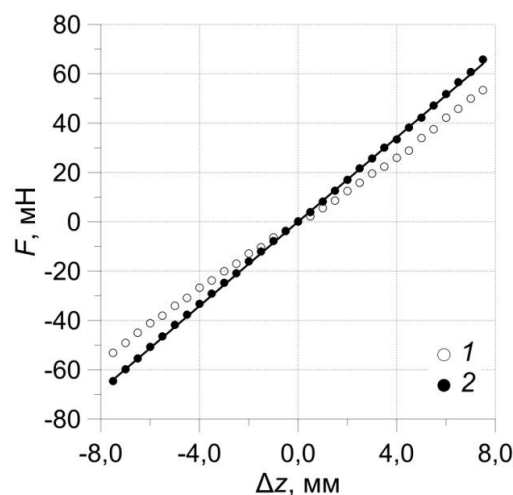


Рис. 9. Зависимость возвращающей силы, действующей на чувствительный элемент, от его смещения от положения равновесия: 1 – при нулевом токе в корректирующей катушке; 2 – при плотности тока в корректирующей катушке $1,4 \text{ A/mm}^2$; сплошная линия соответствует линейной аппроксимации

Выводы. Показано расширение функциональных возможностей одноосных механических магнитоидкостных датчиков ускорения путем линеаризации их отклика на внешнее воздействие. Преимущество линеаризации заключается в возможности надежного измерения не только статического, но и динамического внешнего воздействия. В случае датчика, в котором магнитная жидкость исполняет роль смазки, а роль силы упругости (возвращающей силы) играет сила взаимодействия чувствительного элемента с полем магнитной системы устройства, требование линеаризации удовлетворено путем создания магнитной системы с линейным вдоль оси датчика градиентом напряженности магнитного поля. В диапазоне смещений, эквивалентных действию перегрузки $6g$, достоверность линейной аппроксимации возвращающей силы составила $R^2 > 0,9990$, что является хорошим результатом, по крайней мере на этапе разработки макета устройства.

С практической точки зрения надежное измерение динамических воздействий позволит в перспективе применять магнитоидкостные датчики ускорений в промышленности, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства, где требуется одновременно высокая чувствительность и низкая стоимость производства датчика.

В теоретическом плане, следует отметить универсальность и гибкость алгоритма Монте-Карло для расчета магнитных систем с требуемой геометрией поля. Расчеты, проведенные по предложенному алгоритму, показали хорошее согласование с экспериментальными результатами. В связи с этим перспективным направлением дальнейших исследований является доработка алгоритма путем введения в него моделей источников магнитного поля, учитывающих их взаимное влияние и температурную зависимость свойств.

К настоящему времени основным результатом проведенного исследования является получение линейного отклика механической части одноосного инерционного магнитоидкостного акселерометра на приложенное внешнее воздействие.

Список литературы

1. **Quan L., Li D.** Use of Magnetic Fluid in Accelerometers // *Journal of Sensors*. – 2014. – Vol. 2014. – P. 9. DOI: 10.1155/2014/375623.
2. **Pat.** 2241785A UK G01P 15/13. Accelerometer incorporating fluid suspended magnet / K.S. Evans; published 11.09.1991.
3. **Pat.** 0293784B1 DE, FR, UK G01P 15/08. Acceleration sensor / I. Takaharu; published 30.11.1994. Bulletin: 88/49.
4. **Pat.** 0059990A1 USA G01P 15/00. Magnetofluidic accelerometer with active suspension / D.V. Simonenko, A.E. Suprun, Yu.I. Romanov; published 23.03.2006.
5. **Pat.** 0857945B1 DE, FR, UK, IT, SE G01C 9/06, G01P 15/03, G01P 15/08. Ferrofluid sensor / K. Raj; published 30.07.2003. Bulletin: 2003/31.
6. **Pat.** 0214889A1 USA G01P 15/00. Magnetofluidic unidirectional accelerometer / A.G. Pristup; published 20.09.2007.
7. **Розенцвейг Р.** Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
8. **Шлиомис М.И.** Магнитные жидкости // УФН. – 1974. – Т. 112, № 2. – С. 427–458. DOI: 10.1070/PU1974v017n02ABEH004332.
9. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 184 с.
10. **Bailey R.L.** Lesser known application of ferrofluids // *JMMM*. – 1983. – Vol. 39, issue 1–2. – P. 178–182. DOI: 10.1016/0304-8853(83)90428-6.
11. **Pshenichnikov A.F., Ivanov A.S.** Magnetophoresis of particles and aggregates in concentrated magnetic fluids // *Phys. Rev. E*. – 2012. – Vol. 86. – P. 051401. DOI: 10.1103/PhysRevE.86.051401.
12. **Pshenichnikov A.F., Elfimova E.A., Ivanov A.O.** Magnetophoresis, sedimentation, and diffusion of particles in concentrated magnetic fluids // *The Journal of Chemical Physics*. – 2011. – Vol. 134. – P. 184508. DOI: 10.1063/1.3586806.
13. **Pat.** 166054 МПК G01C 9/20. Магнитоидкостное устройство для определения угла наклона / М.С. Сайкин, Д.Ю. Морозова; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31.
14. **Pat.** 5452520A USA G01C 9/06. Ferrofluid inclinometer / K. Raj, C. Ionescu; published 26.09.1995.
15. **Lagutkina D.Yu., Saikin M.S.** The research and development of inclination angle magnetic fluid detector with a movable sensing based on permanent magnets // *JMMM*. – 2017. – Vol. 431. – P. 149–151.
16. **Pat.** 198257 СПК G01H 11/02. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, М.Г. Марков, В.П. Федосеева; опубл. 29.06.2020, Бюл. № 19.
17. **Сайкин М.С., Федосеева В.П.** Разработка и исследование магнитоидкостных вибродатчиков с магнитным подвесом на кольцевых постоянных магнитах // *Вестник рыбинской государственной авиационной академии им. П.А. Соловьева*. – 2021. – Вып. 58, № 3. – С. 65–70.

18. **Теория** колебаний / Г.А. Бендриков, И.В. Иванов, М.Д. Карасев и др. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 328 с.

19. **Смайт В.** Электростатика и электродинамика. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 606 с.

20. **Постоянные магниты.** Справочник / под ред. Ю.М. Пятин. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

21. **Пшеничников А.Ф.** Магнитное поле в окрестности уединенного магнетика // Магнитная гидродинамика. – 1993. – № 1. – С. 37–40.

22. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

23. **Магнитная** жидкость для работы в сильных градиентных полях / А.Ф. Пшеничников, А.В. Лебедев, А.В. Радионов, Д.В. Ефремов // Коллоидный журнал. – 2015. – Т. 77, № 2. – С. 207–213. DOI: 10.7868/S0023291215020159

References

1. Quan, L., Li, D. Use of Magnetic Fluid in Accelerometers. Journal of Sensors, 2014, vol. 2014, p. 9. DOI: 10.1155/2014/375623.

2. Evans, K.S. Accelerometer incorporating fluid suspended magnet. Patent 2241785A GB2241785A UK, 1991.

3. Takaharu, I. Acceleration sensor. Patent EP 0293784B1 DE, FR, UK G01P 15/08, 1994.

4. Simonenko, D.V., Suprun, A.E., Romanov, Yu.I. Magnetofluidic accelerometer with active suspension. Patent US 0059990 A1 USA G01P 15/00, 2006.

5. Raj, K. Ferrofluid sensor. Patent EP 0857945 B1 DE, FR, UK, IT, SE, G01C 9/10, G01C 9/06, G01P 15/03, G01P 15/08, 2003.

6. Pristup, A.G. Magnetofluidic unidirectional accelerometer. Patent US 0214889 A1 USA, G01P 15/00, 2007.

7. Rosensweig, R. Ferrohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

8. Shliomis, M.I. Magnetic Fluids. Soviet Physics Uspekhi, 1974, vol. 17, no. 2, p. 153. DOI: 10.1070/PU1974v017n02ABEH004332

9. Fertman, V.E. Magnetic Fluids Guide Book: Properties and Applications. New York: Hemisphere Publishing Co., 1990.

10. Bailey, R.L. Lesser known application of ferrofluids. JMMM, 1983, vol. 39, issue 1–2, pp. 178–182. DOI: 10.1016/0304-8853(83)90428-6.

11. Pshenichnikov, A.F., Ivanov, A.S. Magnetophoresis of particles and aggregates in concentrat-

ed magnetic fluids. Phys. Rev. E, 2012, vol. 86, p. 051401. DOI: 10.1103/PhysRevE.86.051401.

12. Pshenichnikov, A.F., Elfimova, E.A., Ivanov, A.O. Magnetophoresis, sedimentation, and diffusion of particles in concentrated magnetic fluids. The Journal of Chemical Physics, 2011, vol. 134, p. 184508. DOI: 10.1063/1.3586806.

13. Saykin, M.S., Morozova, D.Yu. *Magnitno-zhidkostnoe ustroystvo dlya opredeleniya ugla naklona* [Magnetofluid tilt detection device]. Patent RF, no. 166054, 2016.

14. Raj, K., Ionescu, C. Ferrofluid inclinometer. Patent US 0214889 A USA, G01C 9/06, 1995.

15. Lagutkina, D.Yu., Saikin, M.S. The research and development of inclination angle magnetic fluid detector with a movable sensing based on permanent magnets. JMMM, 2017, vol. 431, pp. 149–151. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.11.040.

16. Saykin, M.S., Markov, M.G., Fedoseeva, V.P. *Ustroystvo dlya izmereniya vibratsiy* [Vibration measuring device]. Patent RF, no. 198257, 2020.

17. Saykin, M.S., Fedoseeva, V.P. *Razrabotka i issledovanie magnitno-zhidkostnykh vibrodatchikov s magnitnym podvesom na kol'tsevykh postoyannykh magnitakh* [Design and research of magnet-liquid vibration sensors with magnetic suspension on ring permanent magnets]. *Vestnik rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy akademii im. P.A. Solov'eva*, 2021, issue 58, no. 3, pp. 65–70.

18. Bendrikov, G.A., Ivanov, I.V., Karasev, M.D., Medvedev, V.I., Minakova, I.I., Senatorov, K.Yu. *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1983. 328 p.

19. Smythe, W.R. Static and Dynamic Electricity. New York: McGrawHill Co., 1950.

20. Pyatina, Yu.M. (ed.) *Postoyannye magnity* [Permanent Magnets]. Moscow: Energiya, 1980. 488 p.

21. Pshenichnikov, A.F. Magnitnoe pole v okrestnosti uedinennogo magnetika [Magnetic field near a single magnetite]. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1993, no. 1, pp. 37–40.

22. Smirnov, N.V., Dunin-Barkovskiy, I.V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [A course in probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow: Nauka, 1969. 512 p.

23. Pshenichnikov, A.F., Lebedev, A.V., Radionov, A.V., Efremov, D.V. Magnitnaya zhidkost' dlya raboty v sil'nykh gradientnykh pol'yakh [A magnetic fluid for operation in strong gradient fields]. *Kolloidnyy zhurnal*, 2015, vol. 77, no. 2, pp. 196–201. DOI: 10.1134/S1061933X15020155.