

УДК 621.314

РАЗРАБОТКА МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДИАГНОСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

М.С. Сайкин, В.П. Федосеева

Ивановский государственный энергетический университет

В статье представлены разработки конструкций магнитожидкостных датчиков угла наклона и вибраций. Основными преимуществами магнитожидкостных датчиков являются: высокое быстродействие и надёжность, сохранение работоспособности после воздействия значительных нагрузок и вибраций, длительный ресурс работы. Проведён анализ конструктивных схем и определены области их применения. Выполнены численные и экспериментальные исследования магнитожидкостных датчиков, на основании которых проведена оценка их эксплуатационных параметров. Разработаны магнитожидкостные датчики угла наклона и вибраций с возможностью настройки эксплуатационных параметров и повышенным ресурсом работы. Новизна всех конструкций магнитожидкостных датчиков подтверждена охранными документами.

Ключевые слова: магнитожидкостный датчик, чувствительный элемент, магнитная жидкость, постоянный магнит.

Введение

Для диагностики динамического состояния технических объектов применяются различные типы датчиков [1]. Выбор типа датчика зависит от решаемых технических задач. Современный этап развития измерительной техники подразумевает использование новых физических эффектов и разработку конструкций датчиков на их основе. Внедрение магнитных жидкостей в измерительную технику позволило создать принципиально новые конструкции датчиков угла наклона и вибраций. Для расширения областей применения магнитожидкостных датчиков необходимо разработать конструкции, которые будут иметь требуемые характеристики точности и быстродействия, возможность настройки и регулировки диапазона измеряемых величин в зависимости от предъявляемых эксплуатационных требований.

Получение магнитных жидкостей (МЖ) [2] с разными эксплуатационными характеристиками позволило создать различные конструкции магнитожидкостных датчиков.

В одной из них (рис. 1) МЖ выступает в роли сердечника, который, попадая в катушку (измерительную обмотку), изменяет её индуктивность, что позволяет контролировать изменение динамического состояния объекта. Магнитожидкостный датчик состоит из цилиндрического корпуса 1, который частично заполнен магнитной жидкостью 2, представляющей чувствительный элемент.

С наружной поверхности корпуса расположена первичная 3 и вторичные 4 обмотки. Для контроля и замены МЖ в магнитожидкостном датчике установлены крышки 5 с уплотнителями 6.

Принцип действия датчика основан на изменении индуктивности вторичных обмоток при перетекании МЖ внутри корпуса. Обмотки включены по трансформаторной схеме.

Представленная на рис. 1 конструкция датчика имеет ряд недостатков связанных с усилением магнитной седиментации МЖ из-за магнитной адгезии дисперсных магнитных частиц к внутренним стенкам корпуса.

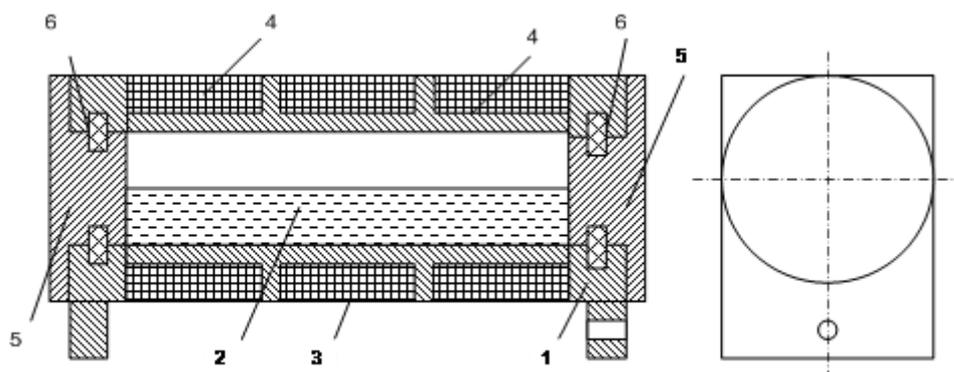


Рис.1. Магнитожидкостный датчик

Это приводит к увеличению времени переходного процесса при резком изменении угла наклона датчика. Магнитная жидкость прилипает к внутренним стенкам корпуса датчика, что затрудняет её перетекание под действием внешних сил и снижает его быстродействие и точность метрологических характеристик. Преимущества данного магни-

тожидкостного датчика: простота конструкции, легкая замена и контроль магнитной жидкости.

Рассмотренная конструкция магнитожидкостного датчика применяется в качестве датчика угла наклона, который имеет эксплуатационные параметры, представленные в табл. 1 [3].

Таблица 1

Технические характеристики магнитожидкостного датчика

Характеристика	Показатели
Диапазон измеряемых углов	$\pm 15^{\circ}$
Точность	± 1 угл. град
Диапазон рабочих температур	$\pm 50^{\circ}\text{C}$
Сохраняет работоспособность после воздействия механических ударов с перегрузкой	1500 м/с^2
Время успокоения после воздействия ударных нагрузок	не более 1,5 с
Масса	не более 0,7 кг
Гарантийный срок хранения и эксплуатации	До 6 лет

Датчик угла наклона осуществляет преобразование вида энергии сигнала (механической величины угла наклона, ускорения, колебаний), идущего от объекта, в другой вид, удобный для передачи информации в пространстве и хранения её в течение определенного времени.

Применение физических свойств магнитной жидкости (МЖ), а именно высокой намагниченности и текучести, позволило создать принципиально новые

датчики угла наклона, которые соединяют в себе достоинства традиционных индуктивных датчиков и жидкостных уровней.

Современные требования, предъявляемые к диагностике динамического состояния оборудования, поставили ряд задач по разработке магнитожидкостных датчиков обладающих высоким быстродействием и повышенной точностью измерений. Возникла необходимость со-

здания такой конструкции магнитожидкостного датчика [4].

Основным узлом датчика является чувствительный к углу наклона или ускорению элемент, который состоит из стального сердечника 1 и двух постоянных магнитов 2 (рис.2). Постоянные магниты изготовлены из «закритических» редкоземельных материалов с остаточной

индукцией $B_r = 0,6 \div 1,2$ Тл и коэрцитивной силой $H_c = 480 \div 960$ кА/м. Магнитная жидкость 3 обеспечивает устойчивый подвес чувствительного элемента и гидродинамический режим трения в зазоре, что позволяет ему перемещаться вдоль корпуса 4 с малым коэффициентом трения.

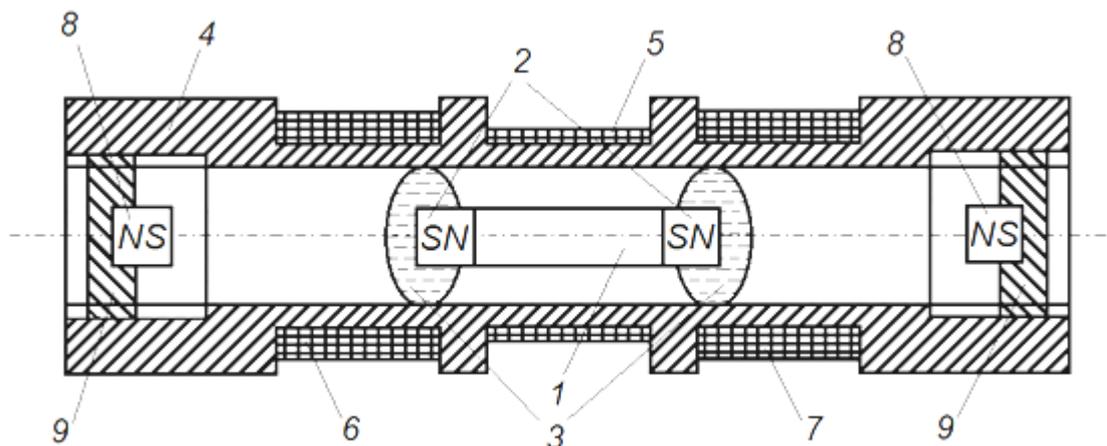


Рис. 2. Магнитожидкостный датчик угла наклона с дисковыми постоянными магнитами

С внешней стороны корпуса датчика расположены три обмотки. По центру корпуса находится генераторная (намагничивающая) обмотка 5, а по краям две измерительные обмотки 6 и 7, которые соединены по схеме дифференциального трансформатора (рис. 2).

При наклоне датчика происходит смещение чувствительного элемента. При этом осевая составляющая силы тяжести уравнивается силой отталкивания со стороны магнитов 8, установленных внутри крышек 9, которые имеют возможность осевого перемещения в корпусе. На выходе датчика появляется сигнал пропорциональный углу наклона или ускорения. Преимущества датчика: чувствительный элемент, левитирующий в МЖ, обеспечивает большее быстродействие по сравнению с датчиком, где в качестве чувствительного элемента используется магнитная жидкость. Основной

недостаток заключается в том, что МЖ на краях постоянных магнитов находится в магнитном поле с высоким значением градиента. Это может оказывать влияние на стабильность свойств магнитной жидкости и приводить к изменению эксплуатационных характеристик магнитожидкостных датчиков с течением времени. Кроме того, при перемещении чувствительного элемента в корпусе датчика создаётся перепад давлений между полостями по обе стороны от чувствительного элемента, что снижает быстродействие этого датчика.

Разработка конструкций магнитожидкостных датчиков

При разработке магнитожидкостных датчиков угла наклона (МЖДУН) и магнитожидкостных датчиков вибраций (МЖДВ) использовался общий подход, при котором решались следующие задачи:

- повышение быстродействия датчика за счёт снижения времени переходного процесса при перемещении чувствительного элемента;

- снижение градиента магнитного поля, действующего на магнитную жидкость;

Повышение быстродействия датчика может быть достигнуто подбором МЖ с наименьшим значением вязкости и применением для чувствительного эле-

мента кольцевых постоянных магнитов, что позволит избежать возникновению перепада давлений в корпусе датчика с обеих сторон чувствительного элемента.

На рис. 3 представлена конструкция МЖДУН [5], в которой уменьшено время переходного процесса при динамическом изменении угла наклона или ускорения технического объекта, которое диагностируется магнитожидкостным датчиком.

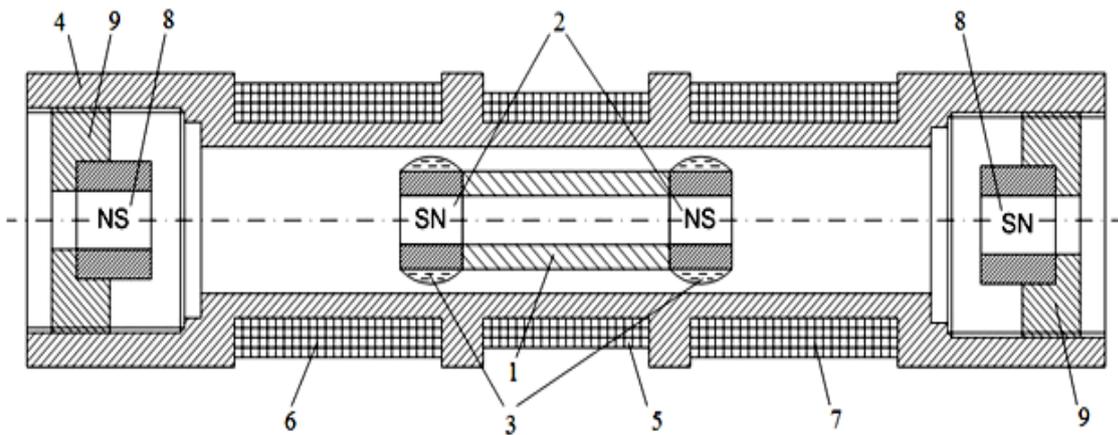


Рис. 3. Магнитожидкостный датчик угла наклона с кольцевыми постоянными магнитами

Достоинства данной конструкции состоят в повышении быстродействия и чувствительности работы МЖДУН за счет использования постоянных магнитов в форме колец. Это позволяет исключить действие перепада давлений, на чувствительный элемент. Кроме этого, в предлагаемой конструкции можно регулировать диапазон измеряемых углов за счёт осевых перемещений торцевых крышек 9, в которых установлены центрирующие магниты 8 вдоль корпуса датчика 4. В этом случае изменяется расстояние между обращёнными друг к другу постоянными центрирующими магнитами 8 и магнитами чувствительного элемента 2. Таким образом, диапазон измеряемых углов увеличивается при уменьшении расстояния между постоянными магнитами 2 чувствительного элемента и центрирующими магнитами 8, а чувстви-

тельность измерений повышается с увеличением этого расстояния.

Данная конструкция стала базовой, для разработки конструкций МЖДУН имеющих различные эксплуатационные характеристики и предназначенных для решения широкого круга технических задач [6, 7].

Отличие конструкции магнитожидкостного датчика вибраций от магнитожидкостного датчика угла наклона состоит в том, что на внешней стороне корпуса датчика расположена только одна обмотка [8]. Принцип действия этих датчиков заключается в преобразовании скорости линейной вибрации, которая передаётся чувствительным элементом датчика, в электрическое напряжение. Изменение электрического напряжения фиксируется измерительной обмоткой и обрабатывается электронным преобразо-

вательным блоком. МЖДВ отличаются простотой конструкции и монтажа, высокой надёжностью и чувствительностью.

Чувствительный к действию гармонических, реже негармонических колебаний чувствительный элемент представляет собой кольцевой постоянный магнит 1 (рис. 4). Магнитная жидкость 2 удерживается пондеромоторной силой в зазорах, один из которых с корпусом датчика 3, а другой с полым немагнитопроводным стержнем 4. Наличие магнитной жидкости в зазорах создаёт условия для левитации чувствительного элемента и его перемещения с минимальным коэффициентом трения. На внешней поверх-

ности корпуса расположена измерительная обмотка 5. В торцевой крышке 6, имеющей возможность осевого перемещения, закреплён кольцевой постоянный магнит 7. В немагнитопроводном корпусе расположен кольцевой постоянный магнит 8. Эти магниты ориентированы одноименными полюсами относительно полюсов чувствительного элемента. Наличие сквозных отверстий 9, в крышке 6 и 10 в немагнитопроводном стержне 4 обеспечивают равенство давлений во внутренних объёмах корпуса и внешней среде, что способствует повышению чувствительности измерений.

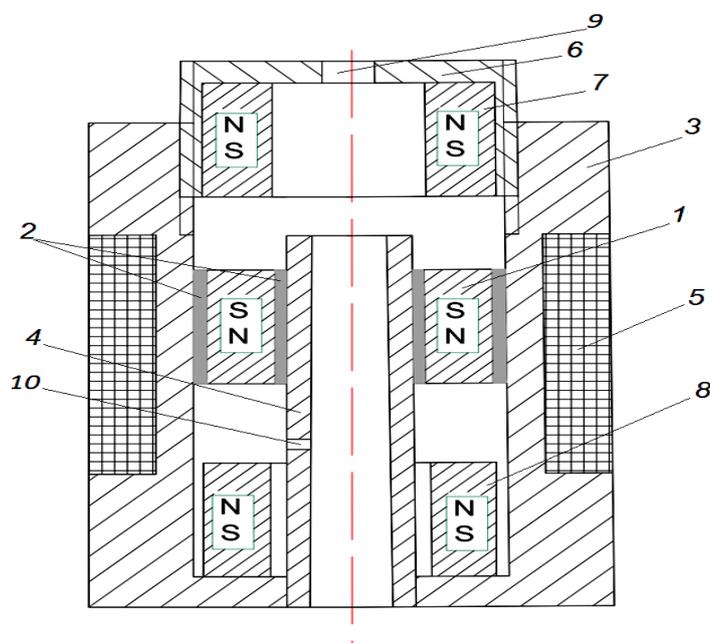


Рис. 4. Магнитожидкостный датчик вибраций

При возникновении вибраций оборудования происходят колебания чувствительного элемента 1. В измерительной обмотке 5 наводится ЭДС, частота которой пропорциональна частоте вибраций. Силы отталкивания, создаваемые кольцевыми постоянными магнитами 7 и 8, препятствуют соприкосновению чувствительного элемента 1 с ними.

Для регулирования чувствительности измерений датчика предусмотрена возможность изменения расстояния между торцевой крышкой 6 и чувствительным элементом 1. Это позволяет регулировать чувствительность датчика в заданном диапазоне измеряемых вибраций. При уменьшении этого расстояния увеличиваются силы отталкивания, дей-

ствующие на чувствительный элемент. Это снижает чувствительность измерений. Контролируемый диапазон частот переходит в низкочастотную область. При увеличении этого расстояния силы отталкивания, действующие на чувствительный элемент, уменьшаются, что приводит к повышению чувствительности измерений вибраций в области высоких частот.

Недостаток конструкций МЖДУН (рис. 3) и МЖДВ (рис. 4) заключается в значительной величине градиента, который действует на МЖ, находящейся на краях чувствительного элемента. Это вызывает расслоение МЖ, что приводит к изменению метрологических характеристик датчиков.

В большинстве разработанных конструкций датчиков МЖ находится в области наибольшего градиента магнитной индукции. Величина градиента магнитной индукции на гранях постоянного магнита может достигать $\nabla \bar{B} = 500$ Тл/м. Для обеспечения стабильности выходных характеристик магнитожидкостных датчиков в течение срока их эксплуатации разработаны конструкции, в которых чувствительные элементы датчиков помещены внутрь втулок, изготовленных из немагнитопроводного материала.

На рис. 5 представлена конструкция МЖДУН [9].

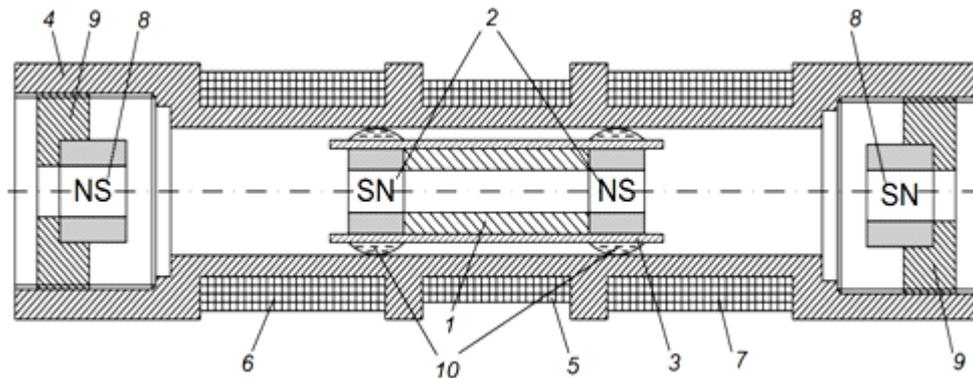


Рис. 5. Магнитожидкостный датчик угла наклона с немагнитопроводной втулкой

Основное отличие этого датчика от МЖДУН (рис. 3) состоит в том, что чувствительный элемент помещён в немагнитопроводную втулку 3, которая имеет длину большую, чем чувствительный элемент. Остальные элементы этой конструкции аналогичны датчику, описание которого приведено выше. Магнитная жидкость 10 обеспечивает устойчивый подвес чувствительного элемента внутри корпуса датчика. Наличие немагнитопроводной втулки 3 позволяет снизить действие градиента магнитной индукции, возникающего на гранях постоянных магнитов в 2-2,5 раза, тем самым

повысить ресурс работы датчика и стабильность его показаний. Изменяя толщину втулки можно найти рациональное значение параметров магнитного поля для МЖДУН, необходимого для удержания чувствительного элемента в корпусе датчика.

Аналогичное техническое решение реализовано в магнитожидкостном датчике вибраций (рис. 6) [10]. Его отличие от конструкции МЖДВ (рис. 4) состоит в том, что чувствительный элемент 1 помещён в защитный немагнитопроводный кожух, состоящий из двух частей 11 и 12.

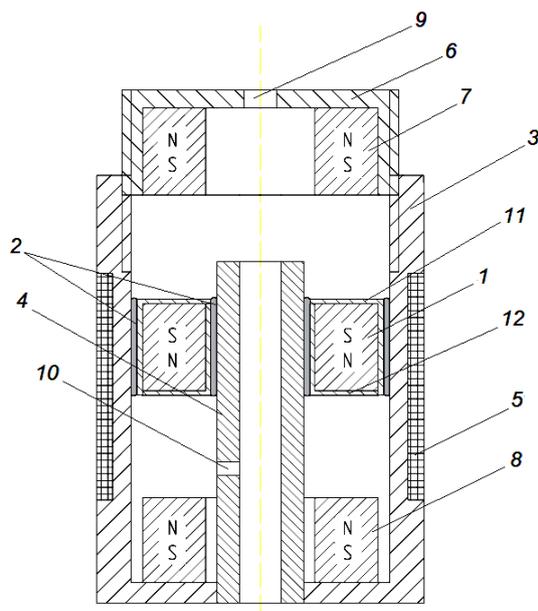


Рис. 6. Магнитожидкостный датчик вибраций с защитным кожухом

Экспериментальная часть

Для моделирования магнитного поля магнитожидкостных датчиков использовался метод конечных элементов с учётом граничных условий Дирихле-Неймана. Основные расчётные результаты получены на основе вычислительных экспериментов с использованием возможности программных пакетов ELCUT и FEMM [11, 12].

Расчёты проводились для двумерного плоскомеридианного поля в цилиндрических координатах.

Пример триангуляции расчётной области магнитожидкостного датчика в среде ELCUT с учетом граничных условий Дирихле Неймана представлен на рис. 7.

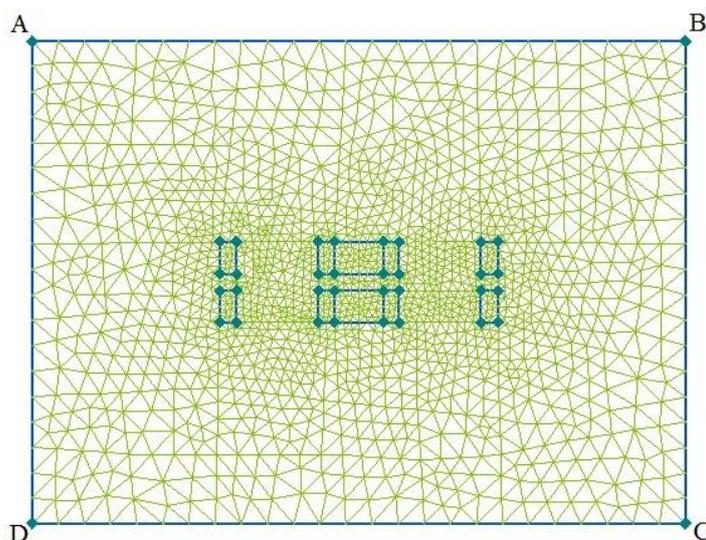


Рис. 7. Картина триангуляции расчетной области МЖДУН с кольцевыми магнитами в среде ELCUT

При этом внешняя граница расчетной области, на которой должно выполняться условие Дирихле ($A_{AB}=A_{BC}=A_{CD}=A_{DA}=0$), должна находиться на расстоянии не менее 3-х кратного значения радиуса постоянных магнитов. Это позволяет избежать искажения картины магнитного потока рассея-

ния, которая определяет рабочую точку постоянного магнита и, следовательно, условие подвеса сердечника.

Картина силовых линий магнитного поля магнитожидкостного датчика, полученная в среде FEMM представлена на рис. 8.

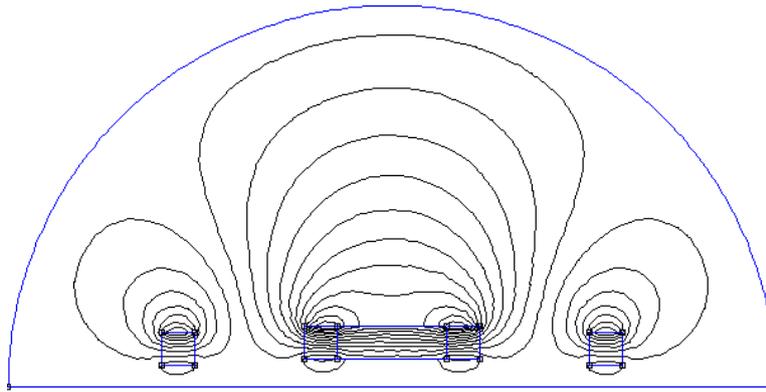


Рис. 8. Картина силовых линий магнитного поля магнитожидкостного датчика

Для расчёта силы подвеса, создаваемой постоянным магнитом, внутри слоя МЖ толщиной dz выделялся элементарный объем dV (рис. 9), в котором напряжённость магнитного поля и намагниченность МЖ можно считать постоянными величинами:

$$dV = dS \cdot dz, \tag{1}$$

где $dS = r \cdot dr \cdot d\varphi$ – площадь; r – текущее значение расстояния от центра постоянного магнита до элементарного объема dV ; $d\varphi$ – элементарное приращение угла φ образованного направлением действия силы dF и вертикалью; dF – сила, создаваемая объемом МЖ dV ; dr – элементарное приращение расстояния r .

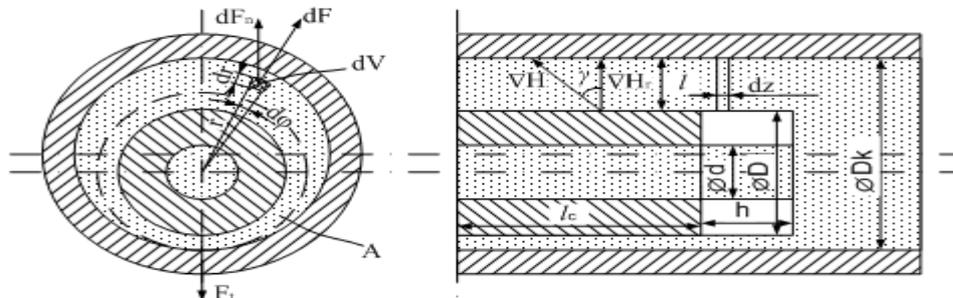


Рис. 9. Схема расчёта силы подвеса сердечника

Сила dF , создаваемая объемом МЖ dV , может быть определена по формуле:

$$dF = -\mu_0 \cdot M^{(0)} \cdot \nabla H^{(0)} \cdot dV \cdot \cos \gamma, \quad (2)$$

где γ – угол между направлением вектора градиента напряжённости магнитного поля и его радиальной составляющей.

Тогда сила подвеса dF_{Π} , создаваемая объемом МЖ dV , определяется по формуле:

$$dF_{\Pi} = dF \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

Подставляя значение силы dF в приведённое выражение, после выполне-

ния преобразований, получаем формулу для расчёта силы подвеса:

$$F_{\Pi} = -2 \int M^{(0)} \cdot \nabla B_r \cdot r \cdot dr \cdot dz \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi, \quad (4)$$

где ∇B_r – радиальная составляющая градиента индукции.

При численном интегрировании уравнения необходимо учесть, что внутри объема, заполненного МЖ, имеется область А (от внешней поверхности втулки чувствительного элемента до пунктирной линии на рисунке 9), в которой значение интеграла обращается в нуль независимо от распределения магнитного поля и характеристик МЖ. Для расчёта силы подвеса необходимо знать величины градиента радиальной составляющей магнитной индукции и намагниченности МЖ.

Тангенциальная компонента магнитного поля много меньше радиальной составляющей, поэтому ее влияние при расчете силы подвеса чувствительного элемента не учитывалось [13,14]. На специально разработанном испытательном стенде проводился физический эксперимент по исследованию силы взаимодействия между кольцевым магнитом чувствительного элемента и магнитом, установленным в крышке или корпусе датчика [15].

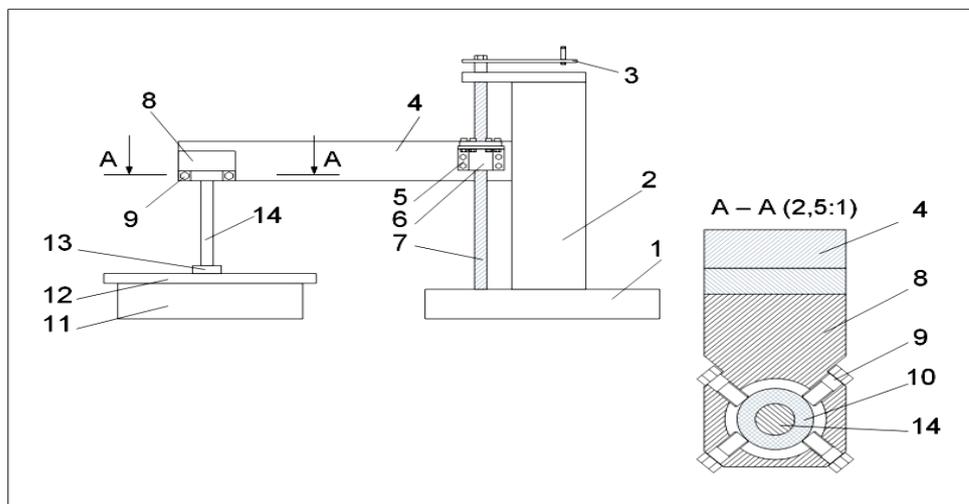


Рис. 10. Схема испытательного стенда

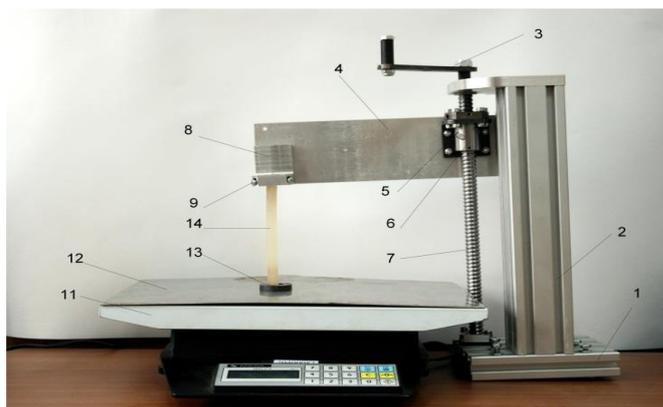


Рис. 11. Внешний вид испытательного стенда

На рис. 10 представлена схема испытательного стенда, а на рис. 11 его внешний вид. Испытательный стенд состоит из двух частей, одна из которых – статическая платформа 1, к которой крепится механический привод 2 с регулировочной ручкой 3. Консоль 4 крепится к механическому приводу посредством прямоугольной площадки 5, с подшипником 6, который закреплён на направляющей 7. К внешнему краю консоли крепится деталь 8, имеющая круглое отверстие, в котором с помощью немагнитных винтов 9 фиксируются постоянный магнит 10. Вторая часть устройства представляет собой электронные весы 11 высокого класса точности с немагнитопроводным столом 12, предназначенным для установки постоянного магнита 13. Фиксация магнитов 10 и 13 вдоль одной оси симметрии достигается использованием направляющих, выполненных в форме немагнитного стержня 14 для кольцевых магнитов или в форме частей полого цилиндра 15 (на рисунке не показаны) для дисковых магнитов.

При проведении эксперимента выбирались два постоянных магнита одинаковых размеров и формы. Магниты располагались друг к другу одноименными полюсами. Один из магнитов 10 устанавливался в круглое отверстие детали 8 и закреплялся в нём с помощью немагнитных винтов 9. Для определения веса

второго магнита 13 он устанавливался на немагнитопроводный стол 12 электронных весов 11, и определялась его масса без внешнего воздействия со стороны магнита 10. Затем магниты устанавливались по оси симметрии с помощью направляющих. Вращением регулировочной ручки 3 изменялось расстояние между магнитами 10 и 13. По показаниям электронных весов 11 фиксировалось увеличение массы второго магнита 13. Разность полученного значения и первоначальной массы магнита есть величина силы взаимодействия между постоянными магнитами 10 и 13. С помощью тесла-амперметра фиксировалось значение магнитной индукции между постоянными магнитами при изменении расстояния между ними. На разработанном экспериментальном стенде, был проведён комплекс исследований по определению силы взаимодействия между кольцевыми постоянными магнитами различных размеров и свойств. На рис. 12 представлены зависимости для постоянных магнитов с размерами: $K32 \times 18 \times 5$, $K17,1 \times 10 \times 11$, $K11 \times 6 \times 2,5$. Постоянные магниты имели следующие параметры: остаточная индукция $B_r = 0,95$ Тл, коэрцитивная $H_c = 680$ кА/м. Величина силы взаимодействия определялась на расстоянии $0,1D - D$ от поверхности магнита с шагом $0,1D$, где D – наружный диаметр кольцевого постоянного магнита.

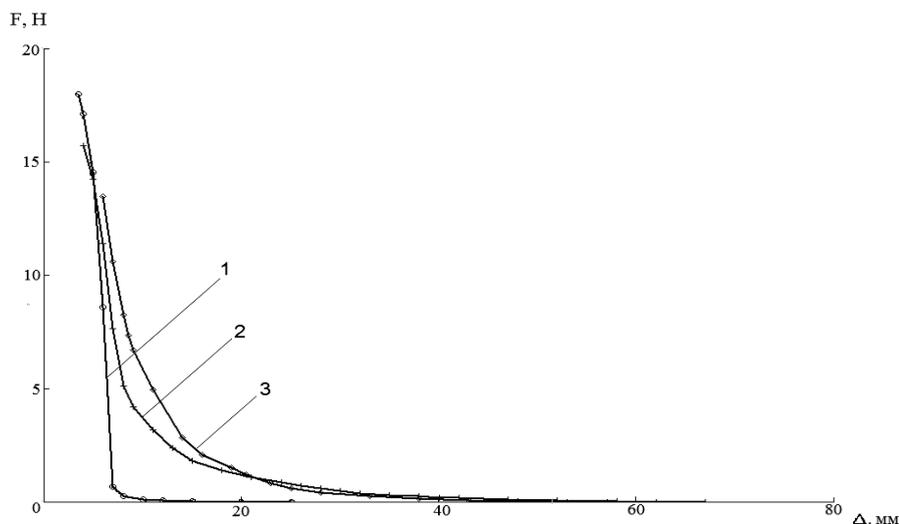


Рис. 12. Экспериментальные зависимости силы взаимодействия между постоянными магнитами
1 - K11×6×2,5; 2 - K17,1×10×11; 3 - K32×18×5

Результаты и обсуждения

Разработаны конструкции магнитожидкостных датчиков диагностики динамического состояния технических объектов. Проведены расчётные и экспериментальные исследования, результаты которых можно использовать при разработке новых конструкций магнитожидкостных датчиков с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Созданы датчики с увеличенным ресурсом работы. Для этих датчиков были получены зависимости магнитной ин-

дукции при соотношениях: $\Delta=0,1D$, $\Delta=0,3D$, $\Delta=0,5D$, $\Delta=D$, где D – наружный диаметр кольцевого магнита, Δ – расстояние между магнитами, а δ – толщина предполагаемого кожуха и представлены на рисунках 13 – 15.

На основании полученных зависимостей проведён расчёт градиента магнитной индукции. Результаты расчёта составили: 0,18-0,017 Тл/мм для наименьшего и 0,097-0,03 Тл/мм для наибольшего размеров магнитов.

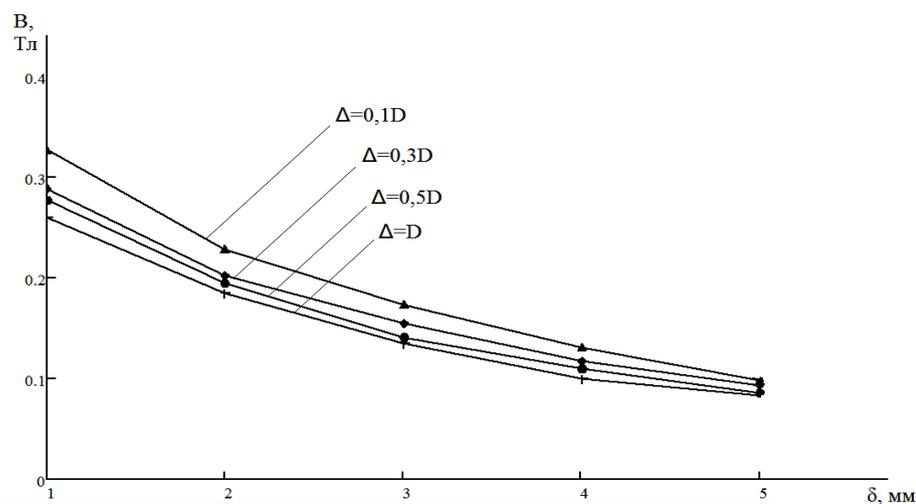


Рис. 13. Значение магнитной индукции при разной толщине кожуха для магнита K32×18×5

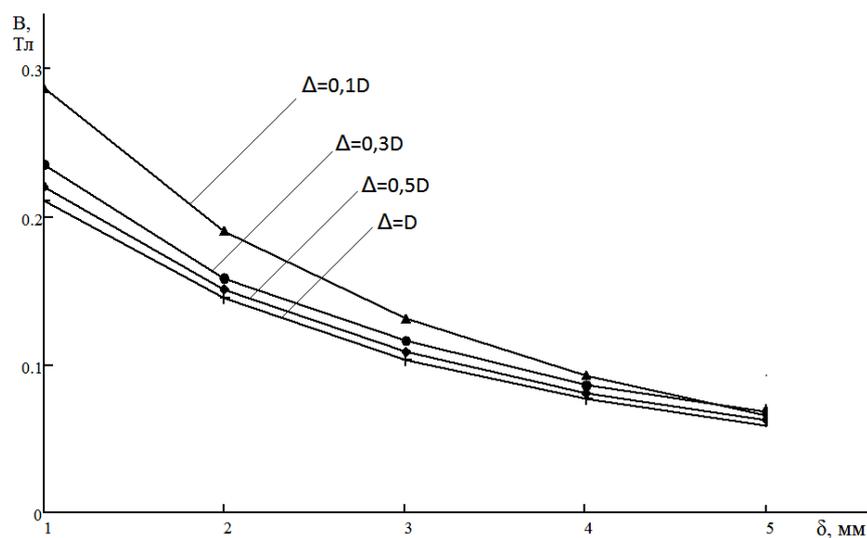


Рис. 14. Значение магнитной индукции при разной толщине кожуха для магнита K17,1×10×11

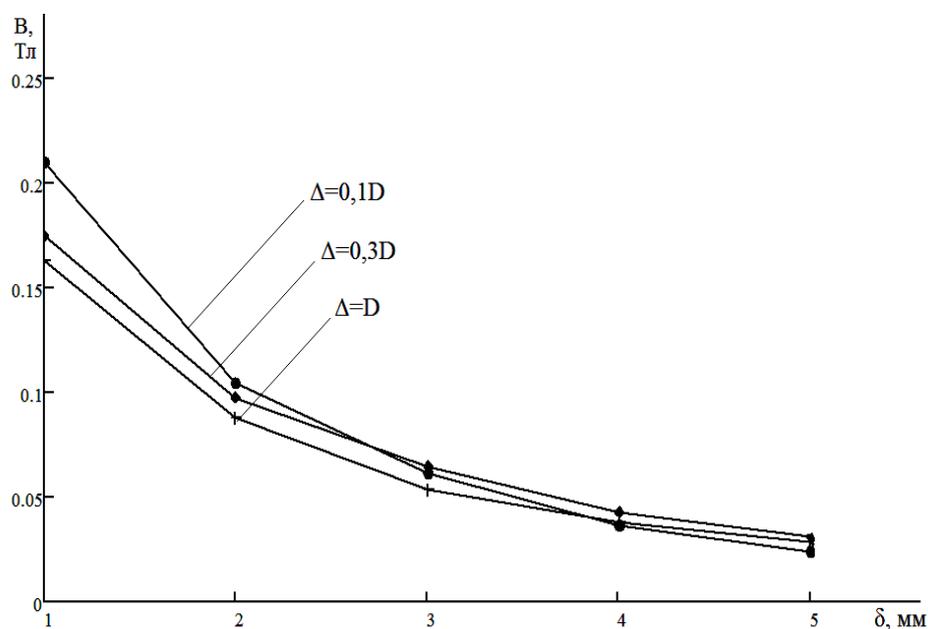


Рис. 15. Значение магнитной индукции при разной толщине кожуха для магнита K11×6×2,5

Найдено значение величины устойчивой левитации чувствительного элемента. Она достигается при градиенте магнитной индукции не менее 0,04 Тл/мм. \

Численные исследования, проведённые на основании моделирования магнитного поля, показали, что толщина кожуха для магнита K11×6×2,5 должна составлять не менее 2 мм, а для магнита

K32×18×5 – не менее 4 мм соответственно.

Выводы

- разработаны конструкции магнитожидкостного датчиков и испытательного стенда, новизна которых подтверждена охранными документами;
- анализ экспериментальных и расчётных результатов, полученных ранее, показал достаточно высокую степень

их совпадения. Погрешность полученных результатов не превышает 12-30%;

- применение магнитожидкостных датчиков угла наклона и вибраций позволит расширить возможности диагностики оборудования различного назначения и увеличить ресурс его работы.

- на основе конечно-элементного моделирования проведен анализ особенностей распределения магнитных полей в рабочем зазоре магнитожидкостных датчиков.

- проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных теоретических выводов.

Ниже представлены эксплуатационные характеристики магнитожидкостных датчиков угла наклона:

Диапазон измеряемых углов $\pm 20^\circ$

Точность, мин. угл. минут ± 5

Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$ ± 50

Сохраняет работоспособность после воздействия

механических ударов с перегрузкой, м/с^2
1500

Время успокоения после воздействия ударных нагрузок, с не более 0,2

Масса, кг не более 0,2

Гарантийный срок хранения и эксплуатации, лет до 10

Магнитожидкостные датчики вибраций имеют следующие эксплуатационные характеристики:

Частотный диапазон, Гц: 4 – 5000;

Чувствительность, мВ/г: свыше 500;

Диапазон ускорений, g: 0,2-300;

Диапазон температур, $^\circ\text{C}$: ± 60

Основными областями применения магнитожидкостных датчиков являются: контроль над угловыми отклонениями промышленных и гражданских объектов строительства, железнодорожного полотна, антенных опор, линий электропередач, стартовых столов ракет, систем автопилотирования. Контроль параметров вибраций проводится при диагностике состояния гидро- и турбогенераторов электрических станций, лопаток газовых

турбин, опор ЛЭП в районах с повышенной сейсмической активностью, авиационных двигателей, в режимах реверса и повышенных динамических нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.

2. Курченков А.Г. Магнитные жидкости – новый эффективный материал в машиностроении // Механизация и автоматизация производства, №4, 1990. – с. 38.

3. Бойко Н.Г., Касаткин С.А., Клюнин А.В. Магнитожидкостные датчики угла наклона, давления, ускорения // Механизация и автоматизация производства, №4, 1990. – с. 14.

4. Михалев Ю.О., Щелькалов Ю.Я., Сабуров И.Е. Численные исследования влияния параметров магнитной системы датчика на подвес сердечника // 8 Международная конференция по магнитным жидкостям: Тез. докл. Плес. 1998. – с. 227-228.

5. Сайкин М.С., Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель RU 113349 U1, 10.02.2012.

6. Морозова Д.Ю., Сайкин М.С. Разработка магнитожидкостных датчиков угла наклона с чувствительным элементом на постоянных магнитах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т.16, № 1-2, 2014. – с. 459-463.

7. Морозова Д.Ю., Сайкин М.С. Магнитожидкостные датчики угла наклона для летательных аппаратов // Вестник Рыбинской государственной авиационно-технологической академии им. П.А. Соловьева, №2 (33), 2015. – с. 109-115.

8. Сайкин М.С., Федосеева В.П. Устройство для измерения вибраций. Патент на полезную модель RU 184838 U1, 12.11.2018.

9. Сайкин М.С., Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель RU 166054 U1, 24.10.2016.

10. Сайкин М.С., Федосеева В.П. Устройство для измерения вибраций. Патент на полезную модель RU 189089 U1, 30.01.2019.

11. Сайкин М.С., Морозова Д.Ю. Численное моделирование распределения магнитной индукции в магнитожидкостном датчике с постоянными магнитами // 15-я Международная Плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: сборник научных трудов, 2012. – с. 316-321.

12. Сайкин М.С., Федосеева В.П. Исследование распределения магнитной индукции в магнитожидкостном датчике вибраций // Надёжность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции. Иваново. 2018. – с. 205-208.

13. Морозова Д.Ю., Сайкин М.С. Расчётное определение силы подвеса чувствительного элемента магнитожидкостного датчика угла наклона // 16-я Международная Плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: сборник научных трудов, 2014. – с. 395-400.

14. D.Yu. Lagutkina, M.S. Saikin The research and development of inclination angle magnetic fluid

detector with a movable sensing element based on permanent magnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. – p.149-151.

15. Лагуткина Д.Ю., Сайкин М.С. Устройство для определения силы взаимодействия между постоянными магнитами. Патент на полезную модель RU 172496 U1, 11.07.2017.

16. Сайкин М.С., Федосеева В.П. Экспериментальное исследование силы взаимодействия постоянных магнитов магнитожидкостного датчика вибраций // Надёжность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции. Иваново. 2019. – с. 163-167.

DEVELOPMENT OF MAGNETIC FLUID SENSORS FOR DYNAMIC STATE DIAGNOSTICS TECHNICAL OBJECTS

M.S. Saykin, V.P. Fedoseeva
Ivanovo State Power Engineering University

The article presents the development of designs for magnetic fluid sensors of inclination angle and vibration. The main advantages of magnetic fluid sensors are: high speed and reliability, retention of performance after exposure to significant loads and vibrations, long service life. The analysis of structural schemes is carried out and the areas of their application are determined. Numerical and experimental studies of magnetic fluid sensors are carried out, on the basis of which their operational parameters are assessed. Magnetic-fluid sensors of the angle of inclination and vibrations have been developed with the possibility of adjusting the operating parameters and an increased service life. The novelty of all designs of magnetic fluid sensors is confirmed by title of protection.

Key words: magnetic fluid sensor, sensing element, magnetic fluid, permanent magnet.

REFERENCES

1. Datchiki: Spravochnoe posobie / Pod obshch. red. V.M. SHarapova, E.S. Polishchuka. – M.: Tekhnosfera, 2012. – 624 s.
2. Kurchenkov A.G. Magnitnye zhidkosti – novyj effektivnyj material v mashinostroenii // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva, №4, 1990. – s. 38.
3. Bojko N.G., Kasatkin S.A., Klyunin A.V. Magnitozhidkostnye datchiki ugla naklona, davleniya, uskoreniya // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva, №4, 1990. – s. 14.
4. Mihalev YU.O., SHCHelykalov YU.YA., Saburov I.E. CHislennyye issledovaniya vliyaniya parametrov magnitnoy sistemy datchika na podves serdechnika // 8 Mezhdunarodnaya konferentsiya po magnitnym zhidkostyam: Tez. dokl. Ples. 1998. – s. 227-228.
5. Sajkin M.S., Morozova D.YU. Magnitozhidkostnoe ustrojstvo dlya opredeleniya ugla naklona. Patent na poleznuyu model' RU 113349 U1, 10.02.2012.
6. Morozova D.YU., Sajkin M.S. Razrabotka magnitozhidkostnyh datchikov ugla naklona s chuvstvitel'nym elementom na postoyannyh magnitah // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, T.16, № 1-2, 2014. – s. 459-463.
7. Morozova D.YU., Sajkin M.S. Magnitozhidkostnye datchiki ugla naklona dlya letatel'nyh apparatov // Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionno-tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solov'eva, №2 (33), 2015. – s. 109-115.
8. Sajkin M.S., Fedoseeva V.P. Ustrojstvo dlya izmereniya vibracij. Patent na poleznuyu model' RU 184838 U1, 12.11.2018.
9. Sajkin M.S., Morozova D.YU. Magnitozhidkostnoe ustrojstvo dlya opredeleniya ugla naklona. Patent na poleznuyu model' RU 166054 U1, 24.10.2016.
10. Sajkin M.S., Fedoseeva V.P. Ustrojstvo dlya izmereniya vibracij. Patent na poleznuyu model' RU 189089 U1, 30.01.2019.

11. Sajkin M.S., Morozova D.YU. CHislennoe modelirovanie raspredeleniya magnitnoj indukcii v magnitnozhidkostnom datchike s postoyannymi magnitami // 15-ya Mezhdunarodnaya Pleskaya nauchnaya konferenciya po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam: sbornik nauchnyh trudov, 2012. – s. 316-321.
12. Sajkin M.S., Fedoseeva V.P. Issledovanie raspredeleniya magnitnoj indukcii v magnitnozhidkostnom datchike vibracij // Nadyozhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov: sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ivanovo. 2018. – s. 205-208.
13. Morozova D.YU., Sajkin M.S. Raschyotnoe opredelenie sily podvesa chuvstvitel'nogo elementa magnitnozhidkostnogo datchika ugla naklona // 16-ya Mezhdunarodnaya Pleskaya nauchnaya konferenciya po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam: sbornik nauchnyh trudov, 2014. – s. 395-400.
14. D.Yu. Lagutkina, M.S. Saikin The research and development of inclination angle magnetic fluid detector with a movable sensing element based on permanent magnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. – p.149-151.
15. Lagutkina D.YU., Sajkin M.S. Ustrojstvo dlya opredeleniya sily vzaimodejstviya mezhdru postoyannymi magnitami. Patent na poleznuyu model' RU 172496 U1, 11.07.2017.
16. Sajkin M.S., Fedoseeva V.P. Eksperimental'noe issledovanie sily vzaimodejstviya postoyannyh magnetov magnitnozhidkostnogo datchika vibracij // Nadyozhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov: sbornik materialov X Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ivanovo. 2019. – s. 163-167.