

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37> EDN: KLHNQF**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИЙ**

Научная статья

Сплендер П.В.^{1,*}, Сайкин М.С.²¹ORCID : 0009-0001-6274-0771;^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (splender03[at]mail.ru)

Предложена: 25.02.2026; Принята: 10.06.2026; Опубликовано: 17.06.2026

Аннотация

Проведены численные исследования значений магнитной индукции для конструкций магнитожидкостных датчиков вибраций с внутренним и внешним расположением чувствительного элемента.

Рассмотрены магнитожидкостные датчики вибраций с магнитным подвесом, изготовленным из магнитных материалов с различными свойствами и геометрическими размерами.

По результатам численных исследований получены зависимости значений магнитной индукции в магнитном подвесе магнитожидкостного датчика при использовании магнитных материалов с разными свойствами и размерами от расстояния между чувствительным элементом и статическими постоянными магнитами. Это позволит выбрать размеры постоянных магнитов магнитожидкостных датчиков вибраций и их характеристики на этапе проектирования.

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

NUMERICAL STUDY OF THE MAGNETIC FIELD PARAMETERS OF MAGNETIC FLUID VIBRATION SENSORS

Research article

Splender P.V.^{1,*}, Saikin M.S.²¹ORCID : 0009-0001-6274-0771;^{1,2} Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation

* Corresponding author (splender03[at]mail.ru)

Suggested: 25.02.2026; Accepted: 10.06.2026; Published: 17.06.2026

Abstract

Numerical studies have been carried out on the magnetic induction values for magnetic fluid vibration sensor designs with the sensing element positioned internally and externally.

Magnetic fluid vibration sensors with magnetic suspensions made from magnetic materials with different properties and geometric dimensions are examined.

Numerical research has yielded dependencies between the magnetic induction values in the magnetic suspension of a magnetic fluid vibration sensor — when using magnetic materials with different properties and dimensions — and the distance between the sensing element and the static permanent magnets. This will make it possible to select the dimensions of the permanent magnets in magnetohydrodynamic vibration sensors and their characteristics at the design stage.

Keywords: magnetic fluid vibration sensor, magnetic induction, sensing element, magnetic fluid, permanent magnet.

Введение

В настоящее время для виброконтроля узлов машиностроения, энергетики, авиационного и судового оборудования применяют датчики, работа которых основана на различных принципах действия [1], [2]. Магнитожидкостные датчики имеют более высокую чувствительность измерений по сравнению с традиционными типами датчиков, что позволяет повысить контроль параметров и надежность работы технических узлов и снизить время регистрации переходного процесса.

Магнитожидкостный датчик вибраций (МЖДВ) включает в себя магнитный подвес, состоящий из чувствительного элемента в форме кольцевого постоянного магнита и двух статических магнитов, расположенных соосно и намагниченных одноименными полюсами относительно полюсов чувствительного элемента. Между чувствительным элементом и корпусом МЖДВ находится магнитная жидкость (МЖ). Наличие магнитной жидкости позволяет обеспечить левитацию чувствительного элемента и минимальное трение при движении его в осевом направлении.

Актуальность работы связана с созданием магнитожидкостных датчиков вибраций с высокой чувствительностью и точностью для технического оборудования различного назначения. Отсюда вытекают задачи по проведению исследований параметров магнитного поля в магнитожидкостных датчиках вибраций.

Методы исследований

Численные исследования параметров магнитного поля МЖДВ проведены на конечно-элементных моделях, созданных в трёх интегрированных средах: FEMM, ELCUT и QuickField с учетом граничных условий Дирихле-Неймана. Использование нескольких программных сред позволяет оценить корректность проведённых расчётов. При проведении исследований изменялись характеристики постоянных магнитов и расстояние между чувствительным элементом и статическими постоянными магнитами. Исследования проведены для четырех типоразмеров кольцевых постоянных магнитов: $20 \times 12 \times 5$, $15 \times 10 \times 4$, $10 \times 7 \times 3$, $5 \times 3 \times 2$. Значения коэрцитивной силы этих магнитов следующие: $H_c = 540$ кА/м, 716 кА/м и 800 кА/м.

Основная часть

Цель работы состояла в расчете параметров магнитного поля магнитного подвеса МЖДВ при изменении характеристик, размеров постоянных магнитов и расстояний между ними.

Отсюда вытекают основные задачи исследований по определению параметров магнитной индукции в магнитном подвесе датчика и разработке рекомендаций по выбору постоянных магнитов на этапе проектирования МЖДВ.

При анализе конструктивных схем датчиков [3], [4], [5] можно выделить две основные схемы конструкций, одна из которых имеет разомкнутый магнитопровод, а другая — замкнутый магнитопровод. Наиболее широкое применение нашла схема с разомкнутым магнитопроводом. Существует два конструктивных варианта схем с разомкнутым магнитопроводом: в одном из них (рис. 1а) чувствительный элемент расположен внутри корпуса датчика [6], а в другом — с его внешней стороны (рис. 1б) [7].

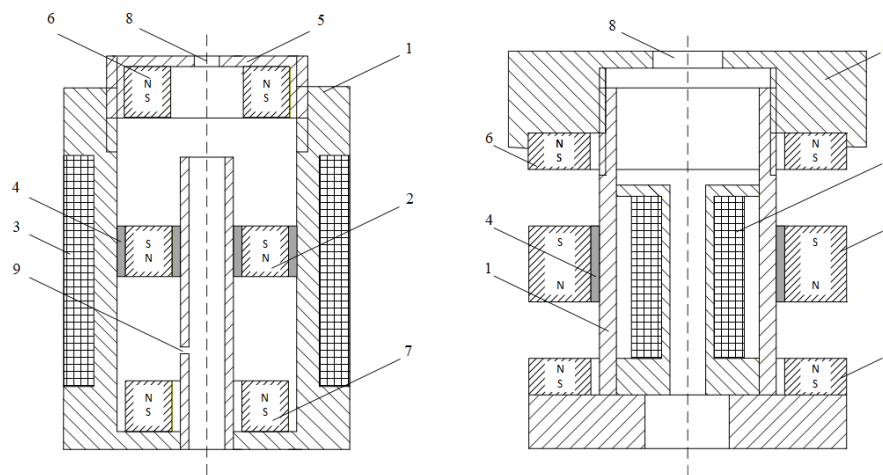


Рисунок 1 - Конструкции магнитожидкостных датчиков вибраций:

а) с внутренним расположением чувствительного элемента; б) с внешним расположением чувствительного элемента

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37.1>

Примечание: 1 – немагнитный корпус; 2 – чувствительный элемент; 3 – измерительная обмотка; 4 – магнитная жидкость; 5 – торцевая крышка; 6, 7 – статические постоянные магниты; 8, 9 – сквозные отверстия

Немагнитный корпус 1 магнитожидкостных датчиков жестко соединен с оборудованием, вибрации от которого передаются на чувствительный элемент 2. Чувствительный элемент перемещается в вертикальном направлении, и магнитное поле, созданное им, наводит ЭДС в измерительной обмотке 3. Магнитная жидкость 4 обеспечивает левитацию чувствительного элемента и его перемещение при минимальном трении. В обоих датчиках в торцевой крышке 5 установлен статический постоянный магнит 6. Торцевая крышка может перемещаться вдоль оси корпуса датчика в вертикальном направлении, что позволяет производить регулирование значений измеряемых частот.

Статический постоянный магнит 7 фиксируется на немагнитном корпусе. Чувствительный элемент своими одноименными полюсами направлен к одноименным полюсам статических магнитов 6 и 7, что обеспечивает возникновение сил отталкивания между ними и препятствует их соприкосновению.

В качестве материалов магнитов выбраны высококоэрцитивные материалы из сплавов самарий-кобальт или неодим-железо-бор, которые обеспечивают высокие энергетические параметры магнитного подвеса датчика при его минимальных габаритах [8].

При выборе марки магнитной жидкости для магнитожидкостных датчиков вибраций необходимо соблюдать следующие требования: магнитная жидкость должна иметь низкую вязкость, обладать стабильностью своих физических свойств в магнитном поле и обеспечивать требуемый по условиям эксплуатации датчиков температурный диапазон. Таким требованиям соответствует МЖ марки Т40, изготовленная на основе керосина в соответствии с ТУ 49-2-3-85 в СКТБ «Полюс» [9].

При изменении расстояния между магнитами осуществляется регулировка чувствительности измерений. При уменьшении этого расстояния увеличивается сила отталкивания чувствительного элемента. Чувствительность измерений снижается, и регистрируемые величины находятся в области низкой частоты. Для повышения

чувствительности измерений в диапазоне высоких частот увеличивается расстояние между чувствительным элементом и статическими магнитами.

Для повышения чувствительности измерений вибраций необходимо обеспечить равенство давлений в датчике. Это достигается выполнением отверстий 8 и 9.

Измерительным узлом датчика является магнитный подвес, в котором равновесие чувствительного элемента должны обеспечивать статические магниты за счёт равенства создаваемых ими сил отталкивания (рис. 2). Однако на чувствительный элемент действует и сила тяжести, которая совпадает по направлению с одной из сил отталкивания. Эти силы суммируются в направлении статического магнита 7, и чувствительный элемент смещается в его направлении. Величина зазора Δ_2 становится меньше зазора Δ_1 . Это приводит к нарушению настроек датчика и вызывает появление погрешности измерений уровня вибраций [10], [11].

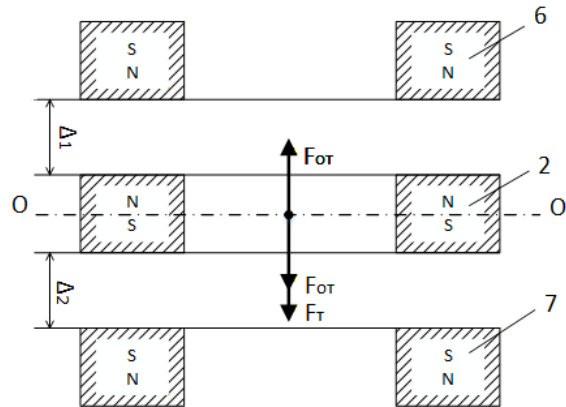


Рисунок 2 - Силы, действующие на чувствительный элемент в магнитном подвесе

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37.2>

Для обеспечения необходимой точности проводимых МЖДВ измерений предлагаются следующие конструктивные меры по компенсации силы тяжести, действующей на чувствительный элемент. К таким мерам относятся:

- увеличения площади статического кольцевого постоянного магнита, установленного на основании датчика;
- выбор кольцевого постоянного магнита, расположенного на основании датчика, с более высокими значениями энергетических параметров по сравнению с постоянным магнитом, установленным в торцевой крышке.

Для определения соотношений между размерами верхнего и нижнего постоянных магнитов магнитного подвеса в средах ELCUT, FEMM и QuickField проведены численные исследования распределения магнитной индукции в магнитном подвесе МЖДВ [12]. Получены значения средней магнитной индукции в зазорах Δ_1 и Δ_2 .

Результаты численных исследований магнитной индукции магнитожидкостного подвеса

На рисунках 3, 4, 5, 6 приведены расчетные графики средних значений магнитной индукции в магнитожидкостных датчиках с различными геометрическими размерами магнитного подвеса при изменении коэрцитивной силы постоянных магнитов. Результаты расчетов магнитной индукции при использовании сред QuickField, ELCUT и FEMM имеют отличия, которые составляют 1,5–2,0%. Погрешность расчетных результатов по сравнению с экспериментальными составляет 5–8%. Число конечных элементов для каждого варианта расчета составляло 158000–159000.

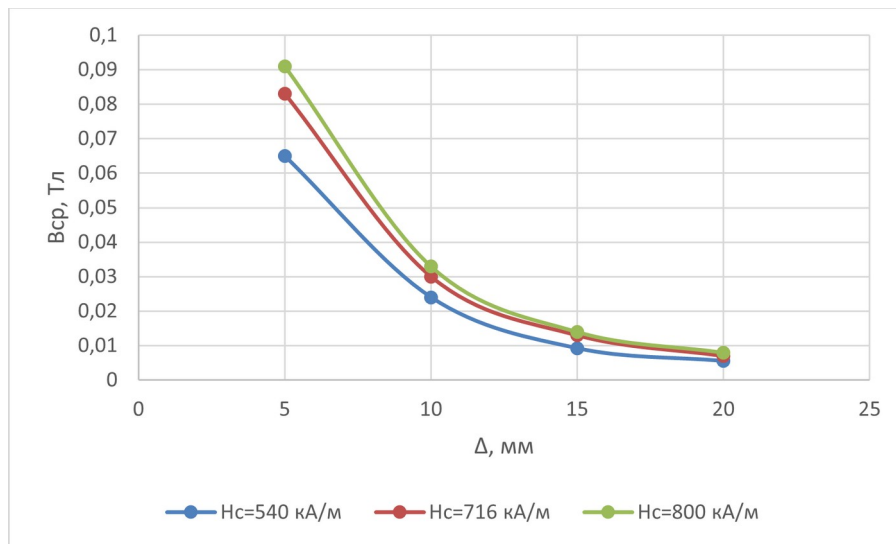


Рисунок 3 - Зависимость средней магнитной индукции от расстояния между чувствительным элементом и постоянными статическими магнитами с размерами $20 \times 12 \times 5$ при различных значениях коэрцитивной силы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37.3>

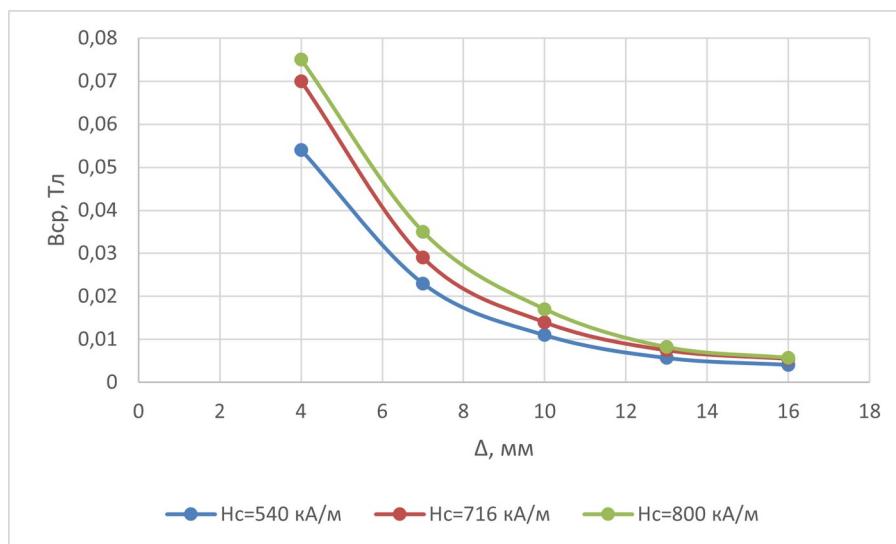


Рисунок 4 - Зависимость средней магнитной индукции от расстояния между чувствительным элементом и постоянными статическими магнитами с размерами $15 \times 10 \times 4$ при различных значениях коэрцитивной силы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37.4>

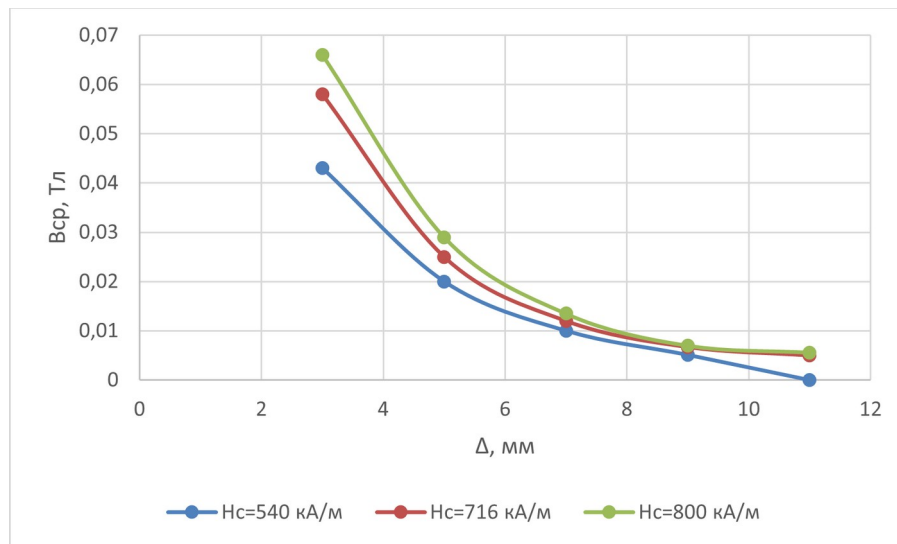


Рисунок 5 - Зависимость средней магнитной индукции от расстояния между чувствительным элементом и постоянными статическими магнитами с размерами 10×7×3 при различных значениях коэрцитивной силы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37.5>

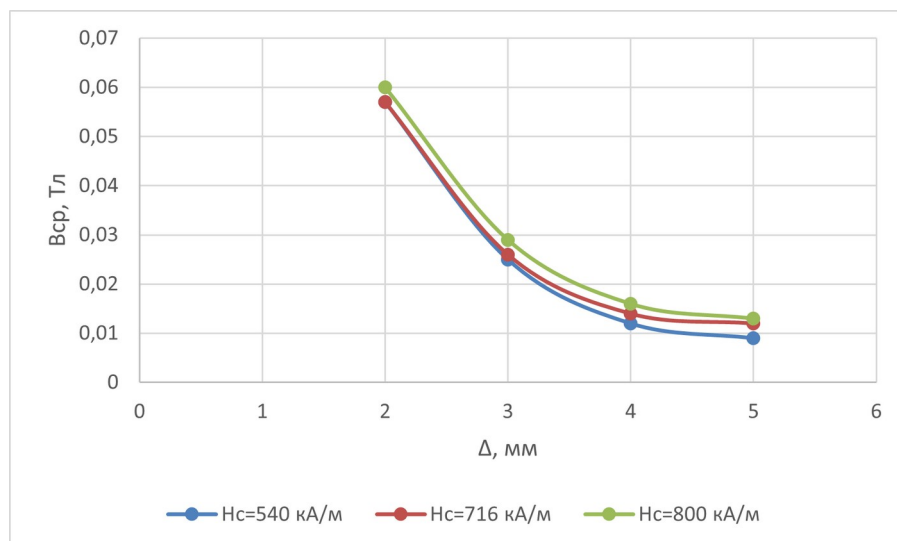


Рисунок 6 - Зависимость средней магнитной индукции от расстояния между чувствительным элементом и постоянными статическими магнитами с размерами 5×3×2 при различных значениях коэрцитивной силы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.37.6>

По результатам численных исследований следует, что компенсация силы тяжести чувствительного элемента и равенство зазоров Δ_1 и Δ_2 обеспечивается за счёт увеличения площади нижних статических магнитов магнитного подвеса по сравнению с верхними магнитами на 15–49%.

Компенсировать силу тяжести чувствительного элемента можно также за счет увеличения коэрцитивной силы нижнего магнита магнитного подвеса на 17–23%. Это достигается выбором нижнего постоянного магнита, имеющего группу по магнитным свойствам на две единицы выше, чем у верхнего магнита магнитного подвеса.

Заключение

На основании численных исследований разработаны рекомендации для выбора постоянных магнитов магнитного подвеса магнитоэластичных датчиков вибраций. Полученные результаты могут быть использованы при создании систем диагностики и мониторинга уровня вибраций технических объектов.

Основные результаты работы состоят в следующем:

- проведён анализ результатов расчёта магнитной индукции в магнитоэластичном датчике вибраций при использовании сред FEMM, ELCUT и QuickField. Полученные результаты отличаются на 1,5–2,0%. Расчётные результаты отличаются от результатов экспериментов в пределах 5–8%, что позволяет использовать полученные рекомендации при проектировании новых магнитоэластичных датчиков вибраций.



– найдены основные соотношения между размерами статических постоянных магнитов магнитного подвеса магнитоожидкостных датчиков вибраций, что обеспечивает требуемую точность измерений вибраций технологического и энергетического оборудования;

– выполнены расчётные исследования, и получены соотношения между магнитными характеристиками статических магнитов магнитного подвеса: нижний статический магнит должен иметь значения коэрцитивной силы на 17–23% выше, чем верхний статический магнит.

– из результатов численных исследований в интегрированных средах FEMM, ELCUT и QuickField найдены значения магнитной индукции в зазорах Δ_1 и Δ_2 , которые составляют 0,005–0,095 Тл при изменении величины зазора.

– на основании анализа свойств магнитных жидкостей даны рекомендации по выбору магнитной жидкости марки Т40, изготовленной на основе керосина в соответствии с ТУ 49-2-3-85 в СКТБ «Полус». Рабочий температурный диапазон этой магнитной жидкости составляет $\pm 50^\circ\text{C}$.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Фрейдин Я. Современные датчики : справочник / Я. Фрейдин. — Москва : Техносфера, 2021. — 800 с.
2. Зудин В.Л. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий : учебное пособие для вузов / В.Л. Зудин, Ю.П. Жуков, А.Г. Маланов. — 2-е изд. — Москва : Юрайт, 2024. — 199 с.
3. Федосеева В.П. Разработка магнитоожидкостных виброметрических датчиков / В.П. Федосеева, М.С. Сайкин // 19-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям : сборник научных трудов. — Иваново, 2020. — С. 262–268.
4. Сайкин М.С. Разработка и исследование магнитоожидкостных вибродатчиков с магнитным подвесом на кольцевых постоянных магнитах / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева // Вестник Рыбинского государственного авиационно-технического университета имени П.А. Соловьёва. — 2021. — № 3 (58). — С. 65–71.
5. Сайкин М.С. Разработка и анализ конструкций магнитоожидкостных датчиков вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева // Международный научно-исследовательский журнал. — 2021. — № 12 (114). — С. 92–101.
6. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций : пат. 1890891 РФ, МПК G01H 11/02 / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. — № 2019102636; заявл. 2019-01-30; опубл. 2019-05-13. — 6 с.
7. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций : пат. 195546 РФ, МПК G01H 11/02 / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. — № 2019127832; заявл. 2019-09-03; опубл. 2020-01-31. — Бюл. № 4. — 6 с.
8. Лагуткина Д.Ю. Современные магнитные материалы в электротехнике : учебное пособие / Д.Ю. Лагуткина, М.С. Сайкин. — Иваново, 2018. — 104 с.
9. Курченков А.Г. Магнитные жидкости — новый эффективный материал / А.Г. Курченков // Механизация и автоматизация производства. — 1990. — № 4. — С. 38.
10. Спендер П.В. Конструктивные пути совершенствования магнитоожидкостных датчиков вибраций / П.В. Спендер, М.С. Сайкин // 21-я Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям : сборник научных трудов. — Иваново, 2024. — С. 191–198.
11. Сайкин М.С. Магнитоожидкостные датчики диагностики вибраций машиностроительных узлов энергетического оборудования электрических станций / М.С. Сайкин, П.В. Спендер // Вестник Рыбинского государственного авиационно-технического университета имени П.А. Соловьёва. — 2025. — № 1 (72). — С. 39–45.
12. Спендер П.В. Моделирование магнитного поля магнитоожидкостного датчика вибраций в программной среде QUICK FIELD / П.В. Спендер, М.С. Сайкин // Надёжность и долговечность машин и механизмов : материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции. — Иваново : Пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. — С. 337–341.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Freidin Ya. Sovremennyye datchiki [Modern sensors] : handbook / Ya. Frejdin. — Moscow : Tekhnosfera, 2021. — 800 p. [in Russian]
2. Zudin V.L. Datchiki: izmerenie peremeshhenij, deformacij i usilij [Sensors: measurement of displacements, deformations and forces] : textbook for universities / V.L. Zudin, Ju.P. Zhukov, A.G. Malanov. — 2nd edition. — Moscow : Yurait, 2024. — 199 p. [in Russian]
3. Fedoseeva V.P. Razrabotka magnitozhidkostnyh vibrometricheskikh datchikov [Development of magnetic fluid vibrometric sensors] / V.P. Fedoseeva, M.S. Saikin // 19-ja Mezhdunarodnaja Pljosskaja nauchnaja konferencija po nanodispersnym magnitnym zhidkostjam [19th International Plyos Scientific Conference on Nanodisperse Magnetic Fluids] : collection of scientific papers. — Ivanovo, 2020. — P. 262–268. [in Russian]



4. Saikin M.S. Razrabotka i issledovanie magnitozhidkostnyh vibrodatchikov s magnitnym podvesom na kol'cevyyh postojannyh magnetah [Development and research of magnetic fluid vibration sensors with magnetic suspension on ring permanent magnets] / M.S. Saikin, V.P. Fedoseeva // Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviacionno-tehnicheskogo universiteta imeni P.A. Solov'jova [Bulletin of Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov]. — 2021. — № 3 (58). — P. 65–71. [in Russian]
5. Saikin M.S. Razrabotka i analiz konstrukcij magnitozhidkostnyh datchikov vibracij [Development and analysis of designs of magnetic fluid vibration sensors] / M.S. Saikin, V.P. Fedoseeva // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2021. — № 12 (114). — P. 92–101. [in Russian]
6. Saikin M.S. Ustroistvo dlya izmereniya vibratsii [Device for measuring vibrations] : pat. 1890891 Russian Federation, IPC G01H 11/02 / M.S. Saikin, V.P. Fedoseeva; the applicant and the patentee Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. — № 2019102636; appl. 2019-01-30; publ. 2019-05-13. — 6 p. [in Russian]
7. Saikin M.S. Ustroistvo dlya izmereniya vibratsii [Device for measuring vibrations] : pat. 195546 Russian Federation, IPC G01H 11/02 / M.S. Saikin, V.P. Fedoseeva; the applicant and the patentee Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. — № 2019127832; appl. 2019-09-03; publ. 2020-01-31. — Bull. № 4. — 6 p. [in Russian]
8. Lagutkina D.Ju. Sovremennye magnitnye materialy v jelectrotehnike [Modern magnetic materials in electrical engineering] : textbook / D.Ju. Lagutkina, M.S. Saikin. — Ivanovo, 2018. — 104 p. [in Russian]
9. Kurchenkov A.G. Magnitnye zhidkosti — novyj jeffektivnyj material [Magnetic fluids — a new effective material] / A.G. Kurchenkov // Mehanizacija i avtomatizacija proizvodstva [Mechanization and Automation of Production]. — 1990. — № 4. — P. 38. [in Russian]
10. Splender P.V. Konstruktivnye puti sovershenstvovanija magnitozhidkostnyh datchikov vibracij [Design ways to improve magnetic fluid vibration sensors] / P.V. Splender, M.S. Saikin // 21-ja Vserossijskaja s mezhdunarodnym uchastiem Pljoskaja nauchnaja konferencija po nanodispersnym magnitnym zhidkostjam [21st All-Russian Plyos Scientific Conference with international participation on Nanodisperse Magnetic Fluids] : collection of scientific papers. — Ivanovo, 2024. — P. 191–198. [in Russian]
11. Saikin M.S. Magnitozhidkostnye datchiki diagnostiki vibracij mashinostroitel'nyh uzlov jenergeticheskogo oborudovanija jelektricheskikh stancij [Magnetic fluid sensors for vibration diagnostics of machine-building components of power equipment of power plants] / M.S. Saikin, P.V. Splender // Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviacionno-tehnicheskogo universiteta imeni P.A. Solov'jova [Bulletin of Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov]. — 2025. — № 1 (72). — P. 39–45. [in Russian]
12. Splender P.V. Modelirovanie magnitnogo polja magnitozhidkostnogo datchika vibracij v programmnoj srede QUICK FIELD [Simulation of the magnetic field of a magnetic fluid vibration sensor in the QUICK FIELD software environment] / P.V. Splender, M.S. Saikin // Nadjozhnost' i dolgovechnost' mashin i mehanizmov [Reliability and durability of machines and mechanisms] : materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference. — Ivanovo : Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2025. — P. 337–341. [in Russian]