Оригинальная статья / Original article

УДК 534.1:62-752.2
https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-76-88

CC BY 4.0

Динамические испытания демпфера на основе эластомера с ферромагнитным порошковым наполнителем

С.А. Сомов[1]✉, М.А. Косков [1], А.С. Иванов [1], Г.В. Степанов[2]

[1] Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук
ул. Академика Королева, д. 1, г. Пермь 614013, Российская Федерация

[2] Государственный Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений
ш. Энтузиастов, д. 38, г. Москва 105118, Российская Федерация

✉ e-mail: somov.s@icmm.ru

Резюме

Цель. *Экспериментальное исследование вибрационных характеристик пассивного демпфера, использующего эластомер с ферромагнитным порошковым наполнителем в качестве рабочего тела.*

Методы. *Измерение амплитудно-частотных характеристик одноосного демпфера на вибрационном стенде в широком диапазоне частот гармонического воздействия. Тестовые испытания демпфера выполнены в нагруженном и не нагруженном состояниях, варьируя имитируемую полезную нагрузку от 0 до 600 г с шагом по 200 г.*

Результаты. *Изготовлены одноосные демпферы оригинальной конструкции Г.В. Степанова, состоящие из двух цилиндрических намагничивающихся эластомеров, расположенных между трех кольцевых постоянных магнитов, обращенных друг к другу одноименными полюсами. Упругие элементы установлены в разборных несущих корпусах, оборудованных фланцами для болтового крепления к платформе вибростенда. Корпуса изготовлены из пластика методом 3D-печати. В широком диапазоне вибрационных нагрузок исследовано влияние магнитного поля на виброзащитные характеристики демпфера путем замены постоянных магнитов на немагнитные шайбы. Амплитудно-частотные характеристики демпферов представляют собой типичные для подобных промышленных изделий зависимости с небольшой полосой пропускания в области нижних частот и резонансным пиком, после которого передаточная функция монотонно спадает. Измеренные характеристики демонстрируют, что наличие постоянных магнитов в конструкции демпфера приводит к значительному снижению коэффициента передачи на резонансной частоте при одновременном увеличении полосы пропускания.*

Вывод. *Эластомеры с порошковым ферромагнитным наполнителем являются перспективными материалами для изготовления демпферов новых конструкций. Использование сил магнитного взаимодействия частиц наполнителя в полимерной матрице усиливает диссипативные свойства демпфера, что снижает отклик системы на собственной резонансной частоте, что демонстрирует перспективность их применения для защиты электронных устройств в условиях вибрационных нагрузок.*

© Сомов С.А., Косков М.А., Иванов А.С., Степанов Г.В., 2025

Ключевые слова: *вибрационные испытания; демпфер; магнитный эластомер; вибрационная защита; порошковый наполнитель.*

Финансирование: *Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы AAAA-A20-120020690030-5.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Динамические испытания демпфера на основе эластомера с ферромагнитным порошковым наполнителем / С.А. Сомов, М.А. Косков, А.С. Иванов, Г.В. Степанов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 76–88. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-76-88.

Поступила в редакцию 04.04.2025 *Подписана в печать 30.05.2025* *Опубликована 30.06.2025*

Dynamic tests of a shock absorber based on elastomer with ferromagnetic micron-sized powder filler

Sergey A. Somov[1]✉, Mikhail A. Koskov[1], Aleksey S. Ivanov[1], Gennadiy V. Stepanov[2]

[1] Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences
1 Akademika Koroleva Str., Perm 614013, Russian Federation

[2] State Order of the Red Banner of Labor Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds
38 Enthusiastov highway, Moscow 105118, Russian Federation

✉ e-mail: somov.s@icmm.ru

Abstract

Purpose. *Experimental study of the vibration characteristics of a passive damper using an elastomer with ferromagnetic powder filler as a working body.*
Methods. *Measurement of amplitude-frequency characteristics of a uniaxial damper on a vibration test bench in a wide range of frequencies of harmonic action. Laboratory tests of the damper were performed in the loaded and unloaded conditions, varying the simulated payload from 0 to 600 g in 200 g increments.*
Results. *Uniaxial dampers of the original design of Stepanov G.V., consisting of two cylindrical magnetizable elastomers located between three ring permanent magnets facing each other with same poles, were manufactured. The elastic elements are placed inside an assembled supporting housings equipped with flanges for bolting to the vibration test platform. The housings were made of plastic by 3D printing. In a wide range of vibration loads the influence of the magnetic field on the vibration-protective characteristics of the damper by replacing permanent magnets with non-magnetic washers was investigated. The amplitude-frequency characteristics of the dampers are typical for similar industrial products with a small bandwidth in the lower frequency region and a resonance peak after which the transfer function monotonically decreases. The measured characteristics demonstrate that the presence of permanent magnets in the damper design leads to a significant reduction of the transmission coefficient at the resonant frequency while increasing the bandwidth.*
Conclusion. *Elastomers with powder ferromagnetic filler are promising materials for manufacturing dampers of new designs. The use of magnetic interaction forces of filler particles in the polymer matrix enhances dissipative properties of the damper, which reduces the response of the system at its own resonant frequency, which demonstrates the prospects of their application for the protection of electronic devices under vibration loads.*

Keywords: *vibration testing; damper; magnetic elastomer; vibration protection; powder filler.*

Funding: *The work was carried out within the framework of the state budget topic No. AAAA-A20-120020690030-5.*

Conflict of interest: *The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Somov S.A., Koskov M.A., Ivanov A.S., Stepanov G.V. Dynamic tests of a shock absorber based on elastomer with ferromagnetic micron-sized powder filler. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(2):76–88. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-76-88.

Received 04.04.2025 *Accepted 30.05.2025* *Published 30.06.2025*

***

Введение

Повсеместное использование электронного оборудования в различных отраслях промышленности, на сухопутном, морском и авиационном транспорте обусловливает потребность в эффективных средствах защиты от ударных и вибрационных нагрузок (ГОСТ 24346-80). Особенности современных многослойных плат заключаются в высокой плотности монтажа электронных компонентов и, вследствие миниатюризации, значительном тепловыделении, достигающем 10 Вт/см². Это требует принудительного охлаждения с применением габаритных радиаторов из материалов с высокой теплопроводностью, преимущественно меди [1].

Несмотря на снижение общей массы устройств за счёт технического прогресса чувствительность к механическим воздействиям остаётся актуальной проблемой [2]. Для её решения применяются специализированные демпфирующие системы, минимизирующие влияние вибрационных и ударных нагрузок[1]. Наиболее широкое распространение получили демпферы, использующие в качестве рабочего тела прочные и эластичные материалы, такие как силиконовая резина и полиуретан [3]. В зависимости от назначения демпферы классифицируют как амортизаторы или виброизоляторы. Благодаря своей упругости и отсутствию остаточных деформаций силиконовые демпферы эффективно гасят колебания [4].

В последние годы усилилось внимание к ферроэластомерам – материалам, сочетающим эластичную матрицу с магнитным наполнителем [5]. Такие композиты изготавливаются на основе различных эластомеров с равномерным распределением порошкообразного ферримагнитного вещества [6]. Размеры частиц наполнителя, как правило, лежат в микронном и субмикронном диапазонах, что обеспечивает равномерность свойств материала [7]. Одним из ключевых свойств ферроэластомеров является их способность изменять механические характеристики под действием внешнего магнитного поля [8]. Это открывает путь к созданию адаптивных виброизоляционных систем, реагирующих на внешние воздействия [9]. Подобные системы особенно актуальны для защиты чувствительного и высокоточного оборудования [10]. Изучение изменения формы и упругих свойств ферроэластомеров под действием магнитного поля представляет интерес для исследователей, работающих с феррогелями и ферроэластомерами в условиях деформации [11]. Актуальными являются также исследования, направленные на проектирование виброизоляционных систем с учётом магнитоупругих характеристик материалов [12]. Особое внимание уделяется совершенствованию состава ферроэластомеров, в частности с использованием фторорганических и кремнийорганических соединений [13].

Моделирование механического отклика ферроэластомеров с учётом их

[1] E1E931S, E1E4045. Силиконовый каучук // Специальные опоры для электронных компонентов. URL: https://vibrona.ru/wp-content/uploads/2020/01/E1E931S_E1E4045.pdf?ysclid=mbesiguytu593677310 (дата обращения: 20.03.2025).

внутренней структуры позволяет описывать наблюдаемое квазипластичное поведение материала [14]. Теоретические подходы к описанию деформаций в магнитном поле учитывают взаимодействие и ориентацию частиц в эластичной матрице [15]. Математические модели, разработанные для магнитоактивных эластомеров, учитывают магнитные и упругие взаимодействия между частицами наполнителя, что делает возможным описание их поведения при сжатии и растяжении во внешнем магнитном поле [16].

Дополнительно ведутся работы по созданию комбинированных демпфирующих систем, в конструкцию которых входят магнитные жидкости [17] или многослойные структуры с ферроэластомерами [18]. Применение таких материалов позволяет разрабатывать устройства с регулируемыми демпфирующими характеристиками. Анализ поведения многослойных структур демонстрирует эффективность этого подхода в условиях переменных механических воздействий [19].

Целью настоящей работы является описание и исследование лабораторного прототипа демпфера новой конструкции, предложенной Г. В. Степановым, в котором в качестве рабочего тела используется намагничивающийся эластомер.

Материалы и методы

Основным элементом конструкции демпфера, изображенного на рисунке 1, является вязкоупругое рабочее тело 2, выполненное из опытного образца ферроэластомера в форме двух цилиндров с центральными сквозными каналами. Два упругих тела чередуются с тремя дисковыми неодимовыми магнитами 3, обращенными друг к другу одноименными полюсами. При этом образуется слоистая структура, например:

(NS) – ферроэластомер – (SN) – ферроэластомер – (NS).

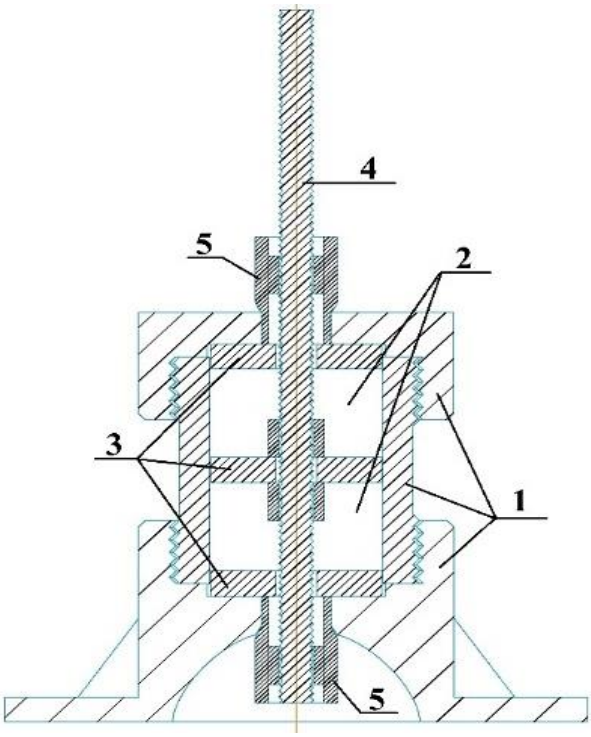


Рис. 1. Конструкция демпфера: 1 – пластиковый корпус; 2 – опытный образец (эластомер); 3 – неодимовые магниты; 4 – направляющий стержень; 5 – втулки; 6 – фланец

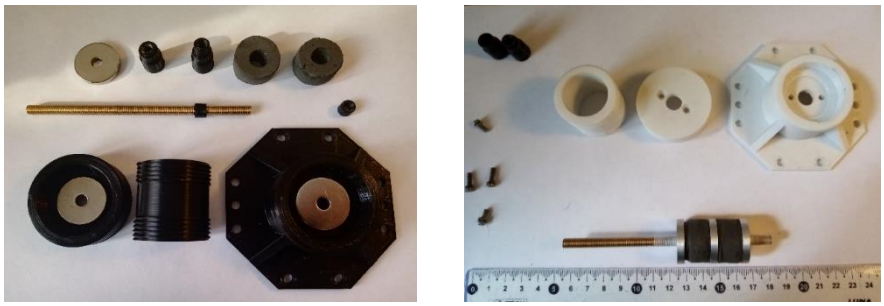
Fig. 1. Damper design: 1 – plastic case; 2 – magnetic elastomer; 3 – neodymium magnets; 4 – guide rod; 5 – bushings; 6 – flange

Такая ориентация магнитных полюсов приводит к взаимному отталкиванию всех трех магнитов, однако при этом каждый из них намагничивает и притягивается к ближайшему объему ферроэластомера. Благодаря магнитному полю в объеме ферроэластомера возникают пондеромоторные силы, позволяющие управлять его упругими свойствами в частности и общими эксплуатационными характеристиками демпфера в целом.

Чередующиеся магниты и эластомеры собраны на штоке демпфера 4, к которому вне корпуса демпфера крепится груз, имитирующий полезную нагрузку (защищаемую электронику). Шток по всей длине имеет резьбу, что позволяет закрепить несколько грузов одновременно и моделировать разные условия нагружения демпфера при вибрационных испытаниях. Крепление элементов конструкции к стержню осуществляется с помощью пластмассовых резьбовых шайб.

Так как полиуретан и резины, используемые в промышленных бескорпусных демпферах, значительно жестче нашего ферроэластомера, то было принято решение разместить его в разборном несущем корпусе 1, оборудованном крепежным фланцем. Корпус был изготовлен методом 3D-печати (рис. 2) на принтере Tevo Tornado из пластика PETG. Несущий корпус позволял защитить эластомер от механических повреждений, обеспечивал удобство монтажа на испытательном стенде и ограничивал движение штока лишь в одном поступательном направлении. Последнее обстоятельство позволяло изучать простейший модельный случай – одномодовое колебание груза с одной степенью свободы.

Для проведения сравнительных испытаний была предложена альтернативная конструкция демпфера, в которой все неодимовые магниты были заменены на аналогичные по размерам алюминиевые диски. Это позволило оценить влияние магнитных сил на демпфирующие характеристики устройства.



а б

Рис. 2. Детали корпуса с магнитной (а) и немагнитной системой (б)

Fig. 2. Damper body parts with magnetic (a) and non-magnetic system (б)

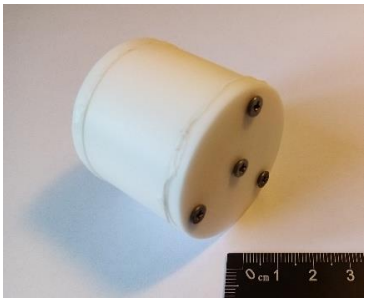


Рис. 3. Форма из фторопласта для отливки эластомеров

Fig. 3. PTFE mold for casting elastomers

В магнитной системе верхний и нижний магниты закреплены в специально предусмотренных углублениях в крышке и основании корпуса демпфера, тогда как центральный магнит жестко закреплён на штоке. Такое расположение обеспечивает устойчивую фиксацию магнитов и их корректное взаимодействие в ходе работы устройства. Одной из ключевых конструктивных особенностей корпуса является ориентация резьбовых соединений: у основания корпуса используется правосторонняя, а у крышки – левосторонняя резьба. Такое решение позволяет собирать систему, вращая исключительно центральный цилиндр, без риска перекручивания эластомера. В немагнитной системе процедура сборки несколько отличается. Эластомер вместе с алюминиевыми дисками сначала собирается на штоке, после чего помещается внутрь корпуса демпфера. Затем верхний и нижний алюминиевые диски фиксируются на соответствующих крышке и основании корпуса с помощью винтов.

Для изготовления однообразных эластомеров была разработана оснастка, изготовленная из фторопласта (рис. 3). Коаксиальная форма оснастки позволяла отливать и полимеризовать ферроэластомер с заданными геометрическими параметрами. Перед проведением экспериментов цилиндрические образцы эластомера нарезались на фрагменты требуемой высоты. С каждой стороны образца приклеивалась прослойка из толстой бумаги, пропитанной цианакриловым клеем. В магнитной системе прочное крепление образца осуществлялось за счёт магнитных сил притяжения ферроэластомера к неодимовым магнитам. В немагнитной системе образцы приклеивались непосредственно к алюминиевым дискам, которые заменяли магниты и выполняли роль опор. Для минимизации разрушения материала и предотвращения его нежелательного трения о стенки корпуса эластомер дополнительно обматывался фторопластовой лентой.

Для надёжной фиксации демпфера на монтажном столе (рис. 4) вибростенда пластиковый корпус крепился десятью болтами диаметром 5 мм. В свою очередь, монтажный стол крепился к штоку вибростенда посредством одного центрального болта диаметром 8 мм. Соосное расположение штока вибростенда, корпуса демпфера и штока демпфера с закреплённой на нем нагрузкой позволило предотвратить смещения и повороты конструкции при проведении длительных вибрационных испытаний.

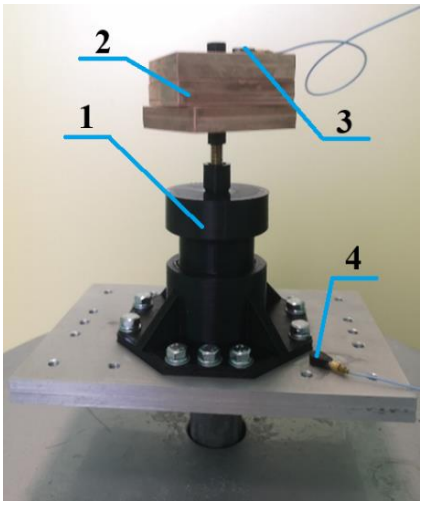


Рис. 4. Макет демпфера (1) на столе вибростенда с закреплённой нагрузкой (2) и акселерометры (3–4)

Fig. 4. Damper model (1) on the vibration test table with fixed load (2) and accelerometers (3–4)

Вначале проводились испытания демпфера с магнитной системой из постоянных неодимовых магнитов. Демпфер в сборе устанавливался на вибростенд, генерирующий механические гармонические колебания с усилием до 1000 Н в диапазоне частот от 2 Гц до 5 кГц. Такой широкий диапазон охватывает как низкочастотные режимы, характерные для квазистатических воздействий, так и высокочастотные колебания, типичные для вибраций, возникающих при работе двигателей и при обтекании тел потоками жидкости или газа в турбулентном режиме.

Для измерения амплитудно-частотной характеристики демпфера использовались пьезоэлектрические акселерометры 352A25 и 352C22, обладающие высокой чувствительностью 2,5 мВ/g и 10 мВ/g соответственно. Первый датчик, измеряющий величину внешнего воздействия, фиксировался непосредственно на столу вибростенда. Второй датчик измерял отклик демпфирующей системы и закреплялся на присоединённой к демпферу массе, имитирующей полезную нагрузку. Акселерометры надежно фиксировались с помощью цианакрилового клея.

Испытания проводились в соответствии с протоколом, рекомендованным ПАО «ПНППК» к испытаниям гироскопов. Согласно этим требованиям тестирование выполнялось в диапазоне частот от 10 Гц до 2 кГц, при этом амплитуда вибрационного ускорения варьировалась в зависимости от частоты. В диапазоне от 10 Гц до 100 Гц уровень нагрузки линейно увеличивался от 4g до 6g, где g – модуль ускорения свободного падения ($g \approx 9{,}8$ м/с^2). При дальнейшем повышении частоты (от 100 Гц до 2 кГц) величина вибрационного воздействия поддерживалась на постоянном уровне 6g. Предложенный протокол испытаний позволяет проверить работоспособность устройств в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации на наземном, водном и воздушном транспорте.

Выбор режима вибрационных испытаний, контроль параметров вибростенда, а также сбор данных осуществлялись с использованием специализированного программного обеспечения VisProbe от разработчика «Висом». Этот программный комплекс позволяет в режиме реального времени отслеживать вибрационные характеристики, регистрировать данные с подключённых датчиков и автоматически строить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) испытываемого изделия.

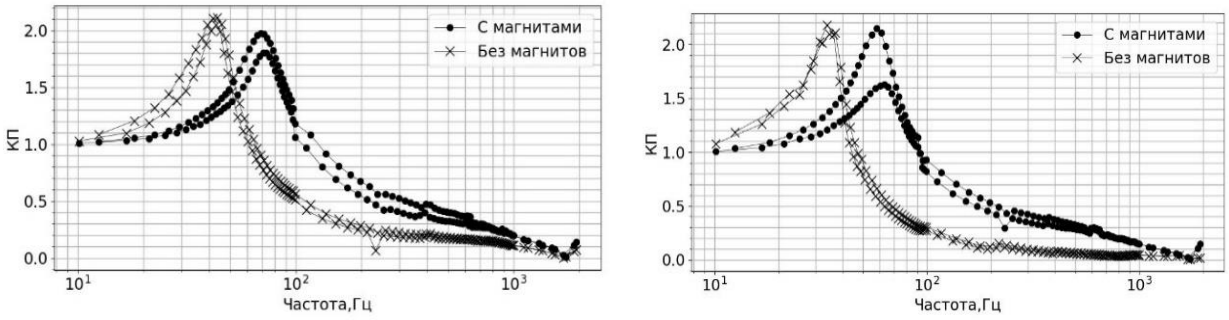
После завершения цикла испытаний для конфигурации с магнитной системой аналогичная серия тестов проводилась для демпфера в немагнитном исполнении, когда постоянные магниты заменялись алюминиевыми дисками того же размера. Проведение тестов по описанному ранее протоколу позволило получить сопоставимые результаты и провести корректный сравнительный анализ. Такая процедура обеспечивает объективную оценку вклада магнитного поля в формирование демпфирующих свойств устройства. Сопоставление АЧХ обеих систем – магнитной и немагнитной – позволило установить влияние магнитного поля на ослабление резонансных колебаний и уровень передаваемых вибраций.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведённых вибрационных испытаний представлены в виде частотной зависимости коэффициента передачи (КП) демпфера, определяемого как отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала, что позволяет количественно оценить эффективность демпфирования на различных частотах внешнего воздействия. Анализ полученных данных показал, что наличие постоянного магнитного поля оказывает значительное влияние на амплитудно-ча-

стотные характеристики демпфера. На соответствующих графиках (рис. 5) видно смещение положения основного резонансного пика.

При отсутствии магнитов резонансная частота демпфера составляла $\omega_{рез} = 45$ Гц. При введении постоянного магнитного поля резонансная частота сместилась в область более высоких значений – до 75 Гц. Такое поведение можно объяснить увеличением жёсткости магнитного эластомера за счёт пондеромоторных сил, возникающих при взаимодействии ферромагнитного эластомера с магнитным полем.



а б

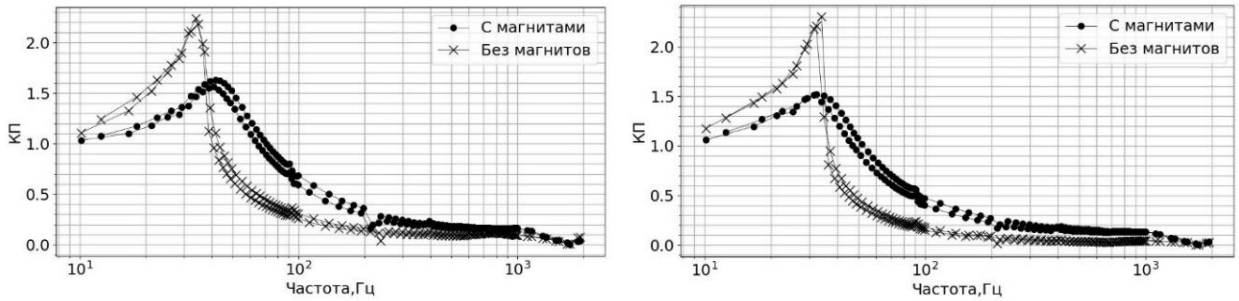
Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика демпфера с грузом 400 г (а) и 600 г (б). Диаметр ограничивающего цилиндра 25 мм

Fig. 5. Amplitude-frequency dependence for the damper with (a) 400 g load and (б) 600 g load. The diameter of the limiting cylinder is 25 mm

Однако при частотах, превышающих резонансную ($\omega > \omega_{рез}$), эффективность демпфера с магнитами начинала снижаться по сравнению с немагнитной системой. В высокочастотной области различия между системами становились менее выраженными, что свидетельствует о минимальном влиянии магнитного поля на характеристики демпфера в этом диапазоне.

Дополнительно в рамках исследования был проведён ряд экспериментов с использованием цилиндров корпуса различного диаметра – 25 мм (рис. 5) и 27 мм (рис. 6). Полученные результаты показали, что увеличение диаметра цилиндра до 27 мм приводит к смещению резонансной частоты в область более низких значений как для магнитной, так и для немагнитной системы, а также КП на резонансной частоте составил 2,3 для немагнитной системы и 1,5 для магнитной, что свидетельствует о снижении КП при воздействии постоянного магнитного поля. Это объясняется тем, что при увеличенном диаметре цилиндра уменьшается степень ограничения сжатия магнитного эластомера, что, в свою очередь, снижает его жёсткость.

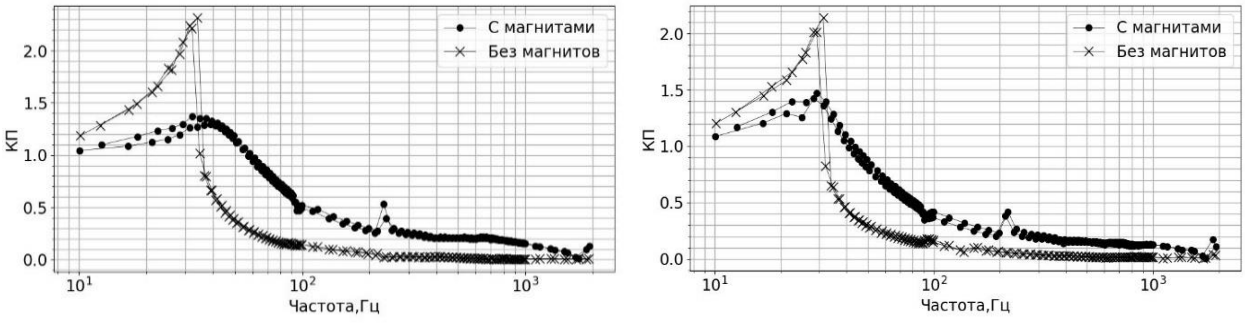
Также исследовалось влияние фторопластовой ленты, используемой для защиты эластомера от взаимодействия со стенками корпуса (рис. 7). Удаление ленты практически не повлияло на амплитудно-частотные характеристики демпфера, однако в ходе продолжительных испытаний в немагнитной системе наблюдалось частичное разрушение поверхности эластомера. Это указывает на необходимость подбора материала для инкапсуляции рабочего тела демпфера. Такой материал должен, с одной стороны, надёжно защищать магнитный эластомер от механического разрушения, а с другой – не вносить существенного вклада в изменение его упругих и демпфирующих характеристик.



а б

Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика демпфера с грузом 400 г (а) и 600 г (б). Диаметр ограничивающего цилиндра 27 мм

Fig. 6. Amplitude-frequency dependence for the damper with a) 400 g and b) 600 g load. The diameter of the limiting cylinder is 27 mm



а б

Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика демпфера с грузом 400 г (а) и 600 г (б) в отсутствие фторопластовой ленты. Диаметр ограничивающего цилиндра 27 мм

Fig. 7. Amplitude-frequency dependence for the damper with (a) 400 g load and (б) 600 g load in the absence of PTFE tape. The diameter of the limiting cylinder is 27 mm

Таким образом, результаты испытаний подтверждают значительную роль магнитного поля в формировании демпфирующих свойств устройства, а также подчёркивают важность выбора геометрических параметров и конструктивных решений, обеспечивающих долгосрочную стабильность характеристик демпфера при многократных циклических нагрузках.

Выводы

В работе представлен новый тип демпфера на основе намагничивающегося эластомера, разработанный по концепции Г.В. Степанова. Изготовлены и экспериментально исследованы два макета с различными конфигурациями системы: один с постоянными магнитами, другой – с алюминиевыми дисками, имеющими идентичные геометрические параметры. В ходе экспериментов проведены измерения амплитудно-частотных характеристик в диапазоне 10 Гц – 2 кГц, а также виброускорений при различных нагрузках (0–600 г). Результаты показали, что магнитное поле оказывает значительное влияние на параметры демпфирования, обеспечивая возможность управления как резонансной частотой, так и амплитудой колебаний. Таким образом, разработка демпферов данной конструкции представляется перспективной для создания адаптивных виброзащитных систем с регулируемыми характеристиками.

Список литературы

1. Мартин Дж.М., Смит У.К. Производство и применение резинотехнических изделий. СПб.: Профессия, 2006. 480 с.

2. Сергаева М.Ю., Цисс В.Г. Обоснование работоспособности виброизоляторов систем виброзащиты авиационного оборудования // Омский научный вестник, 2005. Т. 30, № 1. С. 109-113.

3. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов / А.И. Горбунов, В.П. Михайлов, Г.В. Степанов, Д.Ю. Борин, А.А. Андриянов, Д.В. Темнов [и др.] // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2008. Вып. 70, № 1. С. 90–107.

4. Михайлов В.П., Зобов И.К., Селиваненко А.С. Демпфер на основе магнитореологического эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 6 (18). С. 50.

5. Васько В.М., Гребенюк С.Н., Решевская Е.С. Определение напряженно-деформированного состояния эластомерного виброизолятора // Вісник Запорізького національного університету. 2015. № 3. С. 36-41.

6. Косков М.А., Степанов Г.В., Иванов А.С. Демпфер на основе эластомера с порошковым наполнителем из магнитомягкого материала // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 4. С. 5-10. https://doi.org/10.17072/1994-3598-2019-4-05-10.

7. Magnetoactive elastomer based on superparamagnetic nanoparticles with Curie point close to room temperature / Yu.I. Dzhezherya, Xu W., S.V. Cherepov, Yu.B. Skirta, V.M. Kalita, A.V. Bodnaruk [et al.] // Materials & Design. 2021. Vol. 197. Art. no. 109281. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109281.

8. Development of magnetorheological elastomers-based tuned mass damper for building protection from seismic events / S. Sun, J. Yang, H. Du, S. Zhang, T. Yan, M. Nakaro [et al.] // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2018. Vol. 29. P. 1777-1789. https://doi.org/10.1177/1045389X17754265.

9. Study on the vibration suppression of a flexible carbody for urban railway vehicles with a magnetorheological elastomer-based dynamic vibration absorber / Y.P. Wen, Q. Sun, Y. Zou, H.M. You // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2019. Vol. 234. P. 749-764.

10. Research and development of vibration dampers based on magnetorheological elastomers / W.J. Guo, Y.P. Luo, Z.R. Gu, X.H. Zhou, Y.C. Zhu // Open Access Library Journal. 2023. Vol. 10. https://doi.org/10.4236/oalib.1109881.

11. Райхер Ю.Л., Столбов О.В. Деформация эллипсоидального образца феррогеля в однородном магнитном поле // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46, № 3. С. 153–164.

12. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования. М.: Стройиздат, 1972. 160 с.

13. Современные тенденции фторсилоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе (обзор) / М. А. Венедиктова, И. С. Наумов, А. М. Чайкун, О. А. Елисеев // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S3. С. 17-24.

14. Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Модель магнитоактивного эластомера со структурным параметром // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 75-87. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-75-87.

15. Мусихин А.Ю., Зубарев А.Ю. Магнитоупругие свойства в изотропных магнитных эластомерах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 115-130. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-115-130.

16. Столбов О.В. Моделирование эффекта псевдопластичности в магнитоактивном эластомере при сжатии и растяжении // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 100-109. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-4-100-109.

17. Демпфирование колебательной системы с неполной герметизацией воздушной полости магнитной жидкостью / Е.В. Шельдешова, А.А. Чураев, Н.М. Игнатенко, Ю.А. Неручев, П.А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 128-145. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-128-145.

18. Механические свойства силиконового полимера с магнитным наполнителем в магнитном поле / И.С. Сутарина, К.К. Новиков, Е.А. Соколов, К.А. Матарыкин, П.А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 178-191. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-178-190.

19. Исследование демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера / В.С. Табакаев, А.М. Базиненков, Г.Б. Тужба, А.К. Шагимуратова // Динамика и виброакустика. 2024. Т. 10, № 1. С. 78–87. https://doi.org/10.18287/2409-4579-2024-10-1-78-87.

References

1. Martin J.M., Smith W.K. Handbook of rubber technology. Vol. 2. CBS Publishers & Distibutors, 2004.

2. Sergaeva M.Yu., Tsyss V.G. Justification of the health of the vibration protection systems of aviation equipment. *Omskii nauchnyi vestnik = The Journal Omsk Scientific Bulletin*. 2005;30(1):109-113. (In Russ.)

3. Gorbunov A.I., Mikhailov V.P., Stepanov G.V., Borin D.Yu., Adrianov A.A., Temnov D.V., et al. Investigation of properties and new application of magnetic silicon composites. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. 2008;70(1):90-107. (In Russ.)

4. Mikhailov V.P., Zobov I.K., Selivanenko A.S. Damper based on the magnetorheological elastomer for active vibration isolation of nanotechnological equipment. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Electronic Science and Engineering Publication*. 2013;18(6):50. (In Russ.) https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-6-813.

5. Vasco V.M., Grebenuyk S.M., Reshevskaya E.S. A determination of stress-stain state of elastomeric isolator. *Bulletin of Zaporozhzye National University*. 2015;(3):36-41. (In Russ.)

6. Koskov M.A., Stepanov G.V., Ivanov A.S. Damper made of elastomer filled with soft magnetic powder. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika = Bulletin of Perm University. Physics*. 2019;(4):5-10. (In Russ.) https://doi.org/10.17072/1994-3598-2019-4-05-10.

7. Dzhezherya Yu.I., Xu W., Cherepov S.V., Skirta Yu.B., Kalita V.M., Bodnaruk A.V., et al. Magnetoactive elastomer based on superparamagnetic nanoparticles with Curie point close to room temperature. *Materials & Design*. 2021;197:109281. https://doi.org/10.1016/j.matdes. 2020.109281.

8. Sun S., Yang J., Du H., Zhang S., Yan T., Nakaro M., et al. Development of magnetorheological elastomers-based tuned mass damper for building protection from seismic events. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018;29:1777-1789. https://doi.org/10.1177/1045389X17754265.

9. Wen Y.P., Sun Q., Zou Y., You H.M. Study on the vibration suppression of a flexible carbody for urban railway vehicles with a magnetorheological elastomer-based dynamic vibration absorber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019;234:749-764. https://doi.org/10.1177/0954409719865370.

10. Guo W.J., Luo Y.P., Gu Z.R., Zhou X.H., Zhu Y.C. Research and development of vibration dampers based on magnetorheological elastomers. *Open Access Library Journal*. 2023;10(4):1-11. https://doi.org/10.4236/oalib.1109881 (In Russ.)

11. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Deformation of an ellipsoidal ferrogel sample in a uniform magnetic field. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2005;46(3):434-443. (In Russ.)

12. Guidelines for the design of vibration isolation of machines and equipment. Moscow: Stroyizdat; 1972. 160 p. (In Russ.)

13. Venediktova M.A., Naumov I.S., Chaykin A.M., Eliseev O.A. Current trends in fluorosiloxane and siloxane rubbers and rubber compounds based thereon (overview). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2014;(S3):17-24. (In Russ.)

14. Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Model of a magnetoactive elastomer with structure parameter. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(4):75-87. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-75-87.

15. Musikhin A.Yu., Zubarev A.Yu. Magnetoelastic properties in isotropic magnetic elastomers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2024;14(4):115-130. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-115-130.

16. Stolbov O.V. Simulation of the pseudoplasticity effect in a magnetoactive elastomer under compression and tension. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2022;12(4):100-109. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-4-100-109.

17. Shel'deshova E.V., Churaev A.A., Ignatenko N.M., Neruchev Yu.A., Ryapolov P.A. Damping of an oscillatory system with incomplete sealing of the air cavity by a magnetic fluid. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(3):128-145. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-128-145.

18. Sutarina I.Y., Novikov K.K., Sokolov E.A., Matarykin K.A., Ryapolov P.A. Mechanical properties of silicone polymer with magnetic filler in magnetic field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2024;14(3):178-191. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-178-190.

19. Tabakaev V.S., Bazinenkov A.M., Tuzhba G.B., Shagimuratova A.K. Study of a damper based on a multilayer magnetorheological elastomer. *Dinamika i vibroakustika = Journal of Dynamics and Vibroacoustics*. 2024;10(1):78-87. (In Rus.) https://doi.org/10.18287/2409-4579-2024-10-1-78-87.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сомов Сергей Андреевич, инженер лаборатории «Динамика дисперсных систем», Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: somov.s@icmm.ru,
ORCID: 0000-0002-8902-9410

Sergey A. Somov, Engineer at the "Dynamics of Disperse Systems" laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation,
e-mail: somov.s@icmm.ru,
ORCID: 0000-0002-8902-9410

Косков Михаил Андреевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Динамика дисперсных систем», Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: koskov.m@icmm.ru, ORCID: 0000-0001-8140-7774

Mikhail A. Koskov, Postgraduate Student, Junior researcher at the "Dynamics of disperse systems" Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: koskov.m@icmm.ru, ORCID: 0000-0001-8140-7774

Иванов Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией «Динамика дисперсных систем», Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: lesnichiy@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-1743-3526

Aleksey S. Ivanov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Head of the "Dynamics of disperse systems" Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: lesnichiy@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-1743-3526

Степанов Геннадий Владимирович, заведующий лабораторией «Магнитные порошки и пигменты», Государственный Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: gstepanov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0053-1883

Gennady V. Stepanov, Head of the "Magnetic powders and pigments" Laboratory, State Order of the Red Banner of Labor Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds, Moscow, Russian Federation, e-mail: gstepanov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0053-1883