



## Исследование демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера

**В. С. Табакаев** студент 4 курса бакалавриата кафедры МТ–11;  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва;  
vladimirt530@gmail.com

**А. М. Базиненков** кандидат технических наук, доцент кафедры МТ – 11;  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва;  
a.bazinenkov@yandex.ru

**Г. Б. Тужба** студент 4 курса бакалавриата кафедры МТ – 11;  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва;  
Tuzhbag@me.com

**А. К. Шагимуратова** магистр;  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва;  
alina\_shagimuratova@icloud.com

*В работе представлено исследование демпфера, принцип действия которого основан на использовании «интеллектуального» материала – многослойного магнитореологического эластомера. Интерес к таким устройствам обусловлен возможностью регулировки упругих свойств, размеров и формы рабочего тела с помощью изменения внешнего магнитного поля, а также большой нагрузочной способностью подобных устройств. Эффективность виброизоляции демпфера определяется конструкцией устройства, технологией изготовления и составом многослойного магнитореологического эластомера. Механический и магнитный гистерезис устройства позволяет оценить управляемость демпфера и его способность поглощать вибрации. Результаты исследований показали наличие симметричной и узкой, не более 7 мкм, петли гистерезиса демпфера на рабочем диапазоне управляющих токов.*

**Ключевые слова:** вибрационная защита; виброизоляция; многослойный магнитореологический эластомер; магнитореологический демпфер; гистерезис

**Цитирование:** Табакаев, В. С. 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. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-1-78-87

---

### Введение

Виброизоляция объектов прецизионного оборудования с помощью пассивных систем оказывается малоэффективной при возмущениях в области низких частот, а также при действии вибрации с широким спектром. В этих случаях всё большее применение находят управляемые системы виброизоляции, получившие название полуактивных и активных. Управление в таких системах сводится к компенсации дополнительным источником энергии внешних вынуждающих сил, вызывающих вибрацию защищаемого объекта или относительное смещение объекта [1, 2, 3].

В настоящее время широкое применение нашли демпферы, рабочее тело которых изготовлено из высокоэластичных материалов или «интеллектуальных материалов». Интерес к демпферам на основе интеллектуального материала, магнитореологического эластомера (МРЭ), обусловлен возможностью управления упругими свойствами и формой рабочего тела демпфера при помощи внешнего магнитного поля, а применение многослойной структуры позволяет повысить нагрузочную способность устройства в десятки раз.

Эффективность виброизоляции демпфера определяется его структурой, применяемыми материалами, а также технологией изготовления и составом многослойного магнитореологического эластомера. Вид и размеры петли механического и магнитного гистерезиса устройства позволяют оценить управляемость демпфера и его способность поглощать вибрации в пассивном и полуактивном режиме работы.

Целью работы является исследование гистерезиса демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера на рабочем диапазоне управляющих токов.

## **1 Актуальность исследования**

Известно, что динамические воздействия на оборудование, в том числе вибрации, могут привести к параметрическим отказам и отказам функционирования оборудования. Применяются различные методы вибрационной защиты, наиболее эффективным из которых является виброизоляция. Всё большее применение находят управляемые системы виброизоляции, получившие название полуактивных и активных. Управление в таких системах сводится к компенсации дополнительным источником энергии внешних вынуждающих сил, вызывающих вибрацию защищаемого объекта, или компенсации механизмом перемещений относительных смещений объекта [1, 2].

Для виброизоляции зданий, мостов и других массивных объектов могут использоваться упругие элементы, эластомеры и пружины, а также материалы особой структуры на основе полиуретанового эластомера с ячеистой структурой [2].

В системах виброизоляции в последнее время часто применяются различные интеллектуальные материалы, которые обладают специальными свойствами и могут реагировать на изменения внешних условий, такие как пьезоэлектрические, магнито- и электрострикционные, электро- и магнитореологические материалы, материалы с памятью формы [4–6]. Причина, по которой данные материалы широко распространены в подобных системах, заключается в том, что они обладают высокой эффективностью виброизоляции, возможностью активного управления свойствами и способны адаптироваться к различным условиям эксплуатации.

В современном оборудовании наибольшее распространение получили пьезоэлектрические материалы. Они обладают способностью преобразования механической энергии в электрическую и наоборот. Такие материалы могут использоваться для динамической компенсации вибраций с погрешностью до долей нанометра [7,8]. Механизмы данного типа выполняются в длинноходовом и короткоходовом исполнении, однако они имеют, как правило, низкую нагрузочную способность и способны работать только в активном режиме виброизоляции.

Перспективными интеллектуальными материалами для виброизоляции являются магнитореологические (МР) материалы. Это композиционные материалы, которые способны менять свои реологические свойства под действием внешнего магнитного поля. К этим материалам относятся и МРЭ, которые активно используются для создания амортизаторов, систем подрессоривания с переменной жёсткостью и демпфирования [6, 9].

В отсутствие магнитного поля демпфер на основе МРЭ будет создавать силу упругости (пассивное сопротивление сдвигу), вызванную только характеристиками матрицы эла-

стомера. Если на демпфер подаётся магнитное поле, МР демпфер создает дополнительную, переменную силу упругости из-за увеличенного модуля сдвига МРЭ. Силу упругости МР демпфера можно непрерывно подстраивать, контролируя напряжённость внешнего магнитного поля [6].

Много работ посвящено исследованию МРЭ, а именно демпфирующим системам на их основе [9–11]. В данных работах основной упор делается на исследование свойств рабочего тела, а также АЧХ демпферов на его основе. Однако, нет информации, как решена задача перегрева конструкции, а также не исследованы характеристики гистерезиса устройств.

Гистерезис – это свойство систем, мгновенный отклик которых на приложенное к ним воздействие зависит в том числе от их предыстории. Гистерезис может влиять на виброизолирующие свойства материалов. Например, магнитный гистерезис приводит к потерям энергии в материалах, что снижает их эффективность в качестве материалов систем виброизоляции.

Системы виброизоляции пассивного и полуактивного типа используют характеристику гистерезиса материалов для повышения эффективности поглощения вибраций. Так, МРЭ могут использоваться в системах активной виброизоляции потому, что они обладают высокой демпфирующей способностью и могут изменять свою жёсткость, вязкость, упругость, пластичность под действием внешнего магнитного поля. Исследование гистерезиса позволяет определить пути повышения демпфирующих свойств этих материалов, что позволит создать более эффективные и точные устройства виброизоляции.

## **2 Конструкция объекта исследований –магнитореологического демпфера**

Демпфер на основе многослойного МРЭ состоит из электромагнитной системы и многослойного МРЭ (композита) (рисунок 1).

МРЭ композит состоит из набора чередующихся 22 стальных дисков (сталь 20) и 21 диска из МРЭ. МРЭ представляет собой полимерную матрицу, в состав которой входят частицы карбонильного железа, силикон и отвердитель в пропорциях 60%, 30% и 10% соответственно.

В электромагнитную систему входит броневой сердечник 1, 2 и 3, постоянный магнит 6 и электромагнитная катушка 9.

На катушку индуктивности 9 подаётся управляющий ток, и при этом в магнитопроводе образуется замкнутый магнитный поток, который пронизывает магнитопровод 1, 2, 3, ось симметрии катушки и многослойный МРЭ 5. Жёсткость МР композита и его реологические свойства изменяются в зависимости от силы управляющего тока и магнитного поля, а также композит упруго сжимается в направлении центра катушки. Постоянный магнит (сплав NdFeB) 6, обладающий остаточной магнитной индукцией 1 Тл, держит МР композит в напряжённом состоянии. От направления протекания тока через катушку зависит направление магнитного поля, а оно определяет, будет ли перемещаться постоянный магнит 6 к центру катушки или в обратную сторону. От этого зависит перемещение верхнего фланца 1 МР демпфера, на котором при эксплуатации будет установлен объект [12].

Корпус демпфера 3 (рисунок 1), верхний 1 и нижний 2 фланцы изготовлены из углеродистой магнитомягкой стали 20. Каркас катушки 9 – из алюминиевого сплава Д16Т. Катушка, тепловые трубки 8, радиатор 7 – из меди М1.

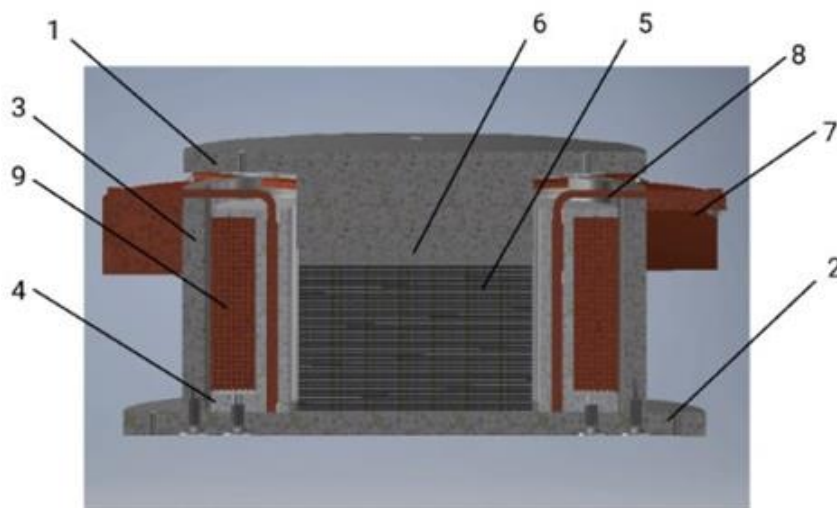


Рисунок 1 – МР демпфер [12]:

1 – верхний фланец; 2 – нижний фланец; 3 – корпус; 4 – каркас катушки; 5 – МРЭ композит; 6 – постоянный магнит; 7 – радиатор; 8 – тепловая трубка; 9 – катушка

При работе демпфера на высоких токах (более 1,8 А) продолжительное время происходит нагрев катушки свыше  $100^{\circ}\text{C}$ . Из-за этого есть риск выхода из строя устройства из-за отказа функционирования вследствие расплавления лаковой изоляции медного провода обмотки катушки и параметрического отказа по параметру "коэффициент передачи амплитуды виброперемещений" из-за изменения от нагрева физических свойств МРЭ. Поэтому в конструкцию была встроена система охлаждения, состоящая из восьми тепловых трубок и радиатора. При нагреве катушки через тепловые трубки происходит передача тепла радиатору, который отводит тепло в окружающую среду [12].

В ходе работы необходимо было выявить, как влияют на деформацию многослойной структуры отдельные элементы конструкции. Так, например, большое влияние может оказать материал дисков, входящих в многослойную структуру на основе МРЭ. Также влияние может оказать внутренняя структура МРЭ, а именно возможные дефекты, такие как поры, раковины, неравномерность распределения частиц дисперсной фазы в объеме эластомера.

### 3 Описание экспериментальной установки

Для измерения петли гистерезиса экспериментальное исследование проводилось на специально разработанном экспериментальном стенде на основе индуктивного датчика (рисунок 2) в диапазоне управляющих электрических токов  $[-0,7; +0,7]$  А. Управляющий ток задавался с шагом в 0,1 А и производились измерения положения подвижного фланца демпфера. Впоследствии менялась полярность приложенного электрического напряжения и внешнего магнитного поля, и действия повторялись.

К катушке подсоединён источник постоянного тока 3 с максимальным напряжением 100 В, с помощью которого регулируется управляющая сила тока на катушке максимум до 2 А. Для контроля выходного напряжения источника питания в цепь подключён вольтметр 4, погрешность которого не превышает 0,5%. На поверхности демпфера 2 установлен чувствительный элемент индуктивного датчика положения 1, считывающий положение объекта в мкм. Датчик экранирован от магнитного поля демпфера.

Данные с мехатронного индуктивного датчика преобразуются аналого-цифровым преобразователем NI USB-6009 и сохраняются в ЭВМ с помощью управляющей программы, написанной с помощью программного обеспечения NI LabView.

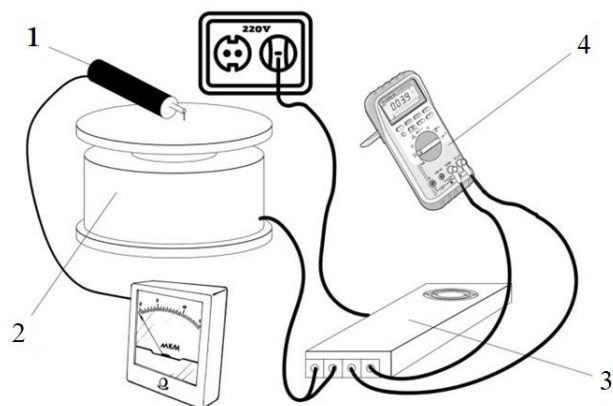
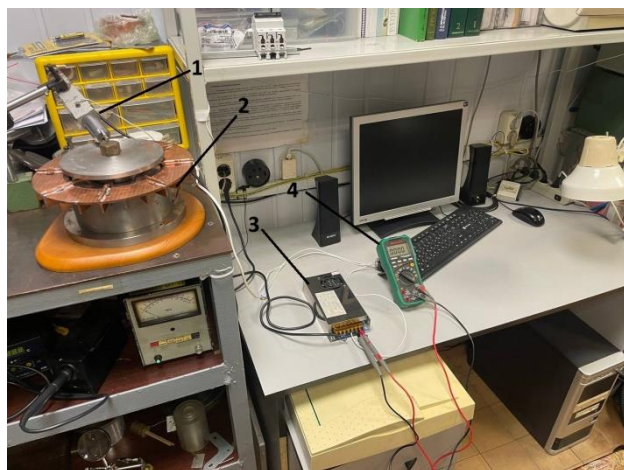


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для исследования зависимости перемещения МР демпфера от величины управляющего тока в катушке: а – внешний вид; б – структурная схема  
 1 – датчик индуктивный мехатронный; 2 – МР демпфер; 3 – источник постоянного тока; 4 – мультиметр

#### 4 Исследование перемещений МР демпфера в зависимости от величины управляющего тока в катушке индуктивности

МРЭ обладают способностью изменять свою вязкость и жесткость под воздействием магнитного поля. Поэтому из-за магнитного гистерезиса изменения в магнитном поле вызывают эффект запаздывания в работе демпфера. Следственно необходимо свести к возможному минимуму размах петли магнитного гистерезиса.

Возможность управления величиной петли магнитного гистерезиса в устройствах на основе МРЭ также позволяет более эффективно подстраиваться под внешние возмущения по сравнению с другими типами демпферов. Помимо этого, исследования гистерезиса позволяют определить коэффициент поглощения энергии колебаний демпфера, который определяется площадью петли механического гистерезиса.

В ходе экспериментов были получены петли гистерезиса исследуемого демпфера при изменения управляющих токов в выбранном диапазоне, зависимость положения подвижной части демпфера от управляющего тока на катушке (рисунок 3).

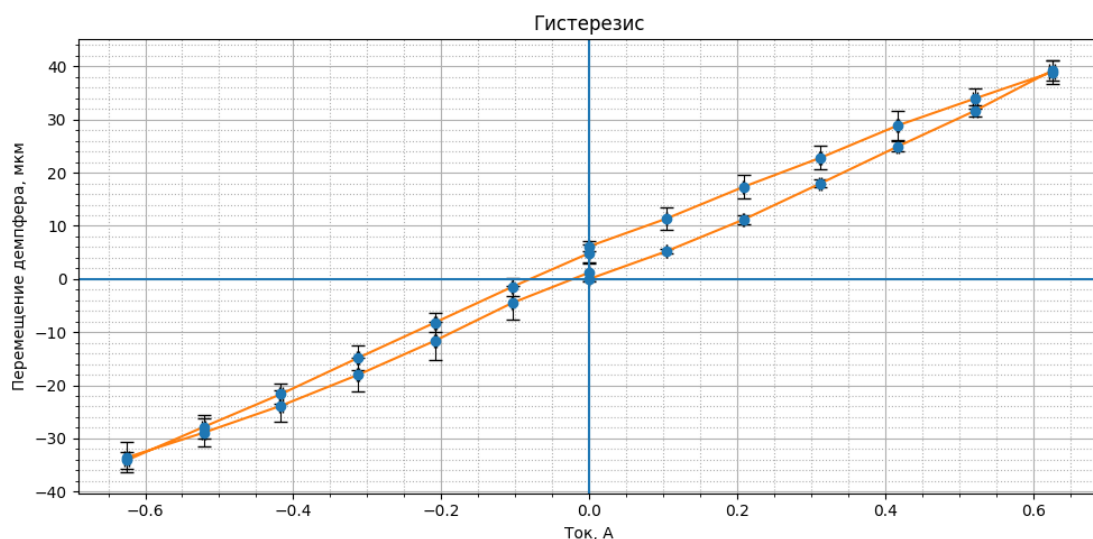


Рисунок 3 – Гистерезис МР демпфера (линии, соединяющие точки, нанесены на график для наглядности результата и не являются математической зависимостью)

На рисунке 3 представлена зависимость перемещения демпфера от управляющего тока с указанием доверительного интервала, рассчитанного для 7 независимых экспериментов по критерию Стьюдента, учтены погрешности вольтметра и индуктивного датчика перемещения.

Значение диапазона изменения управляющего тока  $[-0,7; +0,7]$  А было выбрано экспериментально из соображения сведения температурного влияния к минимуму. МРЭ структура, находящаяся в основе демпфера, при работе на высоких токах быстро нагревается, что ведёт к определённой доле неопределённости результатов измерения перемещений демпфера.

Эксперимент показал хорошую повторяемость. Полученные результаты свидетельствуют о том, что петля гистерезиса в получившемся демпфере достаточно мала, максимальное расхождение прямой и обратной петель изменялось от 0,0 до 7,0 мкм. Узкая петля гистерезиса при исследовании перемещения МР демпфера от величины управляющего тока позволяет говорить о хорошей потенциальной управляемости устройства.

При измерении гистерезиса МР демпфера была подсчитана средняя величина доверительного интервала разброса значений, она составляет 0,4 мкм, что позволяет утверждать, что эксперимент проведён с высокой точностью. При оценке гистерезиса немаловажным параметром является размах петли гистерезиса. Максимальное отклонение в 7,0 мкм достигалось в интервале от  $-0,2$  А до  $+0,2$  А. Разброс 0,4 мкм показывает влияние намагничённости на работу МР демпфера.

Температурное изменение данной системы является незначительным. Обращаясь к раннему исследованию системы охлаждения представленного демпфера [12], можно заметить, что максимальному току в 0,7 А соответствует нагрев МРЭ композита на  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Согласно теоретическому расчёту такой нагрев соответствует перемещению структуры на 2,1 мкм. Согласно исследованию [12] максимальная рабочая температура данного демпфера составляет  $38^{\circ}\text{C}$  и достигается при управляющем токе, равном 1,5 А.

Тем не менее, обнаружено наличие остаточной намагничённости материала магнитопровода, а также дисков многослойной структуры, о чём свидетельствует разброс значений петель в зависимости от номера эксперимента. Также незначительное влияние оказывает тепловое расширение.

Для данного МР демпфера требуется улучшение многослойной МР структуры с целью уменьшения её дефектов или доработка конструкции демпфера для уменьшения зазоров в стыках для получения более узкой петли гистерезиса. Этого можно добиться путём замены материала в металлических дисках МР структуры на электротехническую сталь или за счёт улучшения качества самих МРЭ, путём уменьшения дефектов за счёт увеличения времени дегазации при полимеризации самих эластомеров и всей структуры композита, а также добавления ПАВ при их изготовлении.

## **5 Выводы**

1. В работе рассмотрен МР демпфер. Выявлен недостаток предыдущей конструкции демпфера – перегрев обмотки катушки свыше  $100^{\circ}\text{C}$  при подаче тока в 1,8 А и выше. Установлено, что вследствие такого перегрева может расплавиться лаковая изоляция медной проволоки и произойти короткое замыкание, кроме того, возможно значительное изменение механических свойств МРЭ композита при нагреве. В ходе серии проведённых экспериментов было установлено, что система охлаждения, использовавшаяся в данной установке, успешно справляется с проблемой перегрева, и температура катушки не превышает  $25^{\circ}\text{C}$ .

2. Эксперимент по исследованию гистерезиса конструкции демпфера подтвердил хорошую повторяемость с умеренной шириной петли гистерезиса при 7,0 мкм расхождения

между прямой и обратной петлями. Наличие остаточной намагниченности свидетельствует о дефектах отдельных МРЭ и всей многослойной структуры.

3. Средний доверительный интервал разброса значений в 0,4 мкм указывает на высокую точность эксперимента. Однако максимальное отклонение в 7,0 мкм в интервале от -0,2 А до +0,2 А подтверждает влияние остаточной намагниченности на работу демпфера, что необходимо учесть в ходе разработки управляющих алгоритмов устройства.

4. Для улучшения характеристик гистерезиса рекомендуется повысить качество многослойной структуры, используя электротехническую сталь вместо магнитомягкой стали в составе МРЭ композита. Также повышение качества МРЭ через уменьшение дефектов за счёт модернизации технологии изготовления композита позволит получить более узкую петлю гистерезиса.

### Заключение

В работе проведено исследование демпфера на основе многослойного МРЭ. Рассмотрена его конструкция, выявлены её недостатки и предложены пути улучшения конструкции. Показана актуальность исследования гистерезиса МР демпфера и проведены экспериментальные исследования. Получена средняя величина доверительного интервала разброса значений перемещений  $\pm 0,4$  мкм, что позволяет констатировать высокую точность эксперимента.

Максимальный размах петли гистерезиса равен 7,0 мкм и достигался в интервале от -0.2 А до + 0.2 А.

### Список использованных источников

1. Кузубина, Н. В. Теория виброзащиты и акустической динамики машин / Н. В. Кузубина, А. А. Санников. – Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 167 с.
2. Челомей, В. Н. Вибрации в технике: защита от вибрации и ударов / В. Н. Челомей ; под ред. К. В. Фролова. – Москва: Машиностроение, 1981. – 456 с.
3. Preumont, A. Vibration Control of Active Structures. Volume 179. Solid Mechanics and Its Applications / A. Preumont. – Dordrecht : Springer, 1997 – 266 с.
4. Song, G. Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials / G. Song, V. Sethi, H.-N. Li // Engineering Structures. – September, 2006. – Volume 28, Issue 1. – pp. 1513-1524.
5. Kuo, W. H. Semi-active Control of Vehicle Suspension System Using Electrorheological Dampers / W. H. Kuo, Y. P. Wang, Y. Shiao, J. Guo, M. H. Chiang, Y. K. Din // 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2006.
6. Deng, Hua-xia . Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber/ Hua-xia Deng, Xing-long Gong // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – November 2008. – Volume 13, Issue 9. – pp. 1938-1947.
7. Song, Henan. A novel piezoelectric-based active-passive vibration isolator for low-frequency vibration system and experimental analysis of vibration isolation performance / Henan Song, Xiaobiao Shan, Weijie Hou, Chang Wang, Kaiwei Sun, Tao Xie // Energy. – Volume 278, Part A, 1 September 2023, 127870.
8. Васильев, С. Г. Пьезоэлектрические, пьезоэлектрические и упругие свойства микротрубок дифенилаланина : диссертация ... кандидата физико-математических наук / Васильев Семен Григорьевич ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2016. — 22 с.
9. Gorshkov, V. N. Smart controllable wave dispersion in acoustic metamaterials using magnetorheological elastomers/ V. N. Gorshkov, V. O. Kolupaiev, G. K. Boiger, N. Mehreganian, P. Sareh, A. S. Fallah // Journal of Sound and Vibration. – March 2024. – Volume 572.
10. Fu, J. Magnetorheological elastomer and its application on impact buffer / J. Fu, M. Yu, X. Dong and L. X. Zhu // Journal of Physics : Conference Series. – 2013. – Volume 412 (2013) 012032
11. Zhu, Zhisen. An adaptive and space-energy efficiency vibration absorber system using a self-sensing and tunable magnetorheological elastomer / Zhisen Zhu, Ze Wang, Keren Dai, Xiaofeng Wang, He Zhang, Wenling Zhang // Nano Energy. –2023. – Volume 117, 2023, 108927.

12. Базиненков, А. М. Исследование характеристик демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера / А. М. Базиненков, А. К. Шагимуратова, И. В. Макеев, В. А. Бахарев, В. В. Муханов // Динамика и виброакустика машин (DVM-2022) : сб. докл. шестой междунар. науч.-техн. конф. 21–23 сент. 2022 г. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т) ; под ред. Е. В. Шахматова. - Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2023. - С. 90-92.



## Study of a damper based on a multilayer magnetorheological elastomer

**V. S. Tabakaev** Undergraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology (MT-11);  
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow;  
vladimirt530@gmail.com

**A. M. Bazinenkov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor  
of the Department of Mechanical Engineering Technology (MT-11);  
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow;  
a.bazinenkov@yandex.ru

**G. B. Tuzhba** Undergraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology (MT-11);  
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow;  
Tuzhbag@me.com

**A. K. Shagimuratova** Master of Engineering;  
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow;  
alina\_shagimuratova@icloud.com

*The research presented in the work focuses on a damper that utilizes an "intelligent" material called multilayer magnetorheological elastomer. These devices are of interest due to their ability to adjust the elastic properties, size, and shape of the working body by manipulating the external magnetic field. They also have a high load capacity. The effectiveness of the damper's vibration isolation is determined by its design, manufacturing technology, and the composition of the multilayer magnetorheological elastomer. The mechanical and magnetic hysteresis of the device allows for evaluating the controllability of the damper and its ability to absorb vibrations. Research results indicate the presence of a symmetric and narrow hysteresis loop, not exceeding  $7 \mu\text{m}$ , within the operating range of control currents.*

**Keywords:** vibration protection; vibration isolation; multilayer magnetorheological elastomer; magnetorheological damper; hysteresis

**Citation:** Tabakaev, V. S., Bazinenkov, A. M., Tuzhba, G. B. and Shagimuratova, A. K (2024), "Study of a damper based on a multilayer magnetorheological elastomer", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 1, pp. 78-87. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-1-78-87. (In Russian; abstract in English).

---

### References

1. Kutsubina, N. V. and Sannikov, A. A. (2014), *Teoriya vibrozashchity i akusticheskoy dinamiki mashin* [Theory of Vibration Protection and Acoustic Dynamics of Machines], Ural State Forest Engineering University, 2014, 167 p. (in Russian).
2. Chelomey, V. N., (1981), *Vibratsii v tekhnike: zashchita ot vibratsii i udarov* [Vibrations in Engineering: Vibration and Impact Protection], in Frolov, K. V. (ed.), Mashinostroenie, Moscow, 456 p. (in Russian).
3. Preumont, A. (1997), *Vibration Control of Active Structures*. Volume 179. Solid Mechanics and Its Applications, 266 p.
4. Song, G., Sethi, V. and Li, H.-N. (2006), "Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials", *Engineering Structures*, Volume 28, Issue 11, pp. 1513-1524.
5. Kuo, W. H., Wang, Y. P., Shiao, Y., Guo, J., Chiang, M. H. and Din, Y. K. (2006), "Semi-active Control of Vehicle Suspension System Using Electrorheological Dampers", *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*.
6. Deng, Hua-xia and Gong, Xing-long (2008), "Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Volume 13, Issue 9, pp. 1938-1947.

7. Song, Henan; Shan, Xiaobiao; Hou, Weijie; Wang, Chang; Sun, Kaiwei and Xie, Tao. (2023), "A novel piezoelectric-based active-passive vibration isolator for low-frequency vibration system and experimental analysis of vibration isolation performance", *Energy*, Volume 278, Part A, 1 September 2023, 127870.

8. Vasiliev, S. G. (2016), "P'ezoelektricheskie, piroelektricheskie i uprugie svoystva mikrotrubok difenilalanina" [Piezoelectric, pyroelectric, and elastic properties of microtubules of diphenylalanine], Ph.D. Thesis, Ural Federal University named after the first President of Russia, B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation. (in Russian).

9. Gorshkov, V. N., Kolupaiev, V. O., Boiger, G. K., Mehreganian, N., Sareh, P. and Fallah, A. S (2024), "Smart controllable wave dispersion in acoustic metamaterials using magnetorheological elastomers", *Journal of Sound and Vibration*, March 2024, Volume 572.

10. Fu, J. , Yu, M. , Dong, X. and Zhu, L. X. (2013), "Magnetorheological elastomer and its application on impact buffer", *Journal of Physics : Conference Series*, Volume 412 (2013), 012032.

11. Zhu, Zhisen; Wang, Ze; Dai, Keren; Wang, Xiaofeng; Zhang, He and Zhang, Wenling (2023). "An adaptive and space-energy efficiency vibration absorber system using a self-sensing and tunable magnetorheological elastomer", *Nano Energy*, Volume 117, 108927.

12. Bazinenkov, A. M., Shagimuratova, A. K., Makeev, I. V., Bakharev, V. A. and Mukhanov, V. V. (2023), "Thin-film electrodea of dielectric elastomers actuators based for active vibration control system", *Proceedings of 6th International Conference "Dynamics and Vibroacoustics of Machines" (DVM2022)*, in Shakhmatov, E. V. (ed.), Izdatel'stvo Samarskogo universiteta [Samara University Publ.], pp. 90-92. (in Russian).