



Автоматизация стенда по исследованию магнитного гистерезиса демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера

В. С. Табакаев студент;
Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, г. Москва;
email: vladimirt530@gmail.com

А. М. Базиненков кандидат технических наук, доцент;
Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, г. Москва;
email: ambazinenkov@bmstu.ru

Л. В. Костин студент;
Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, г. Москва;
email: ikostin2002@mail.ru

Широкое использование электронного прецизионного оборудования обуславливает необходимость исследований, направленных на разработку и усовершенствование средств защиты от вибрационного воздействия. 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 активной виброизоляции, осуществляемой демпфером, определяется качеством его переходных процессов, технологией изготовления и составом многослойного магнитореологического эластомера. Время переходного процесса позволяет определить быстродействие системы, а следовательно, и частоты, в пределах которых устройство может эффективно работать в активном режиме. Результаты исследований показали, что максимальное время переходного процесса составило 106 мс, что соответствует эффективной работе в диапазоне низких частот до 9,5 Гц.

Ключевые слова: *вибрационная защита; виброизоляция; многослойный магнитореологический эластомер; магнитореологический демпфер; переходные процессы; система автоматического управления*

Цитирование: Табакаев, В. С. Автоматизация стенда по исследованию магнитного гистерезиса демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера / В. С. Табакаев, А. М. Базиненков, Л. В. Костин // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 87-95. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-87-95

Введение

Пассивные системы виброизоляции оказываются недостаточно эффективными при низкочастотных возмущениях и широкополосной вибрации, что ограничивает их применение в прецизионном оборудовании. В таких случаях всё большее распространение получают полуактивные и активные системы виброизоляции, которые компенсируют внешние возму-

щающие силы дополнительным источником энергии, минимизируя вибрации защищаемого объекта или его относительное смещение [1, 2].

Активные системы на основе пьезоэлектриков демонстрируют высокую эффективность, однако имеют недостатки, такие как низкая эффективность виброизоляции на низких частотах (до 10 Гц), ограниченные возможности виброизоляции в пассивном и полуактивном режиме и сложность управления. В отличие от них, демпферы, изготовленные из высокоэластичных или «интеллектуальных» материалов, становятся всё более популярными. Особый интерес представляют демпферы на основе магнитореологического эластомера (МРЭ), который позволяет управлять упругими свойствами и формой рабочего тела при помощи внешнего магнитного поля. Многослойная же структура МРЭ значительно повышает нагрузочную способность устройства.

Преимущества МРЭ включают возможность быстрого изменения его свойств, что определяется переходными процессами [3]. Однако меньшая скорость реакции может наблюдаться из-за упругих процессов, что влияет на общую эффективность системы. Эффективность виброизоляции таких демпферов зависит от их структуры, используемых материалов, технологии изготовления и состава многослойного МРЭ. Изменения конструкции могут значительно повлиять на быстродействие системы, что критично для эффективности активной виброизоляции. Быстродействие системы напрямую связано с её способностью к быстрой реакции на внешние воздействия [4], что особенно важно для демпферов, предназначенных для подавления вибраций в реальном времени.

Многие аналогичные устройства находятся на этапе разработки конструкции и требуют значительных доработок для стабилизации и повторяемости характеристик [5–8]. В связи с этим исследования, направленные на изучение переходных процессов в демпферах на основе МРЭ, имеют высокую актуальность. МРЭ предлагают уникальные возможности для создания адаптивных и высокоэффективных демпфирующих систем, которые могут динамически изменять свои свойства в зависимости от внешних условий. Однако, несмотря на потенциал этих материалов, в настоящее время существует недостаток исследований, посвящённых переходным процессам в демпферах на основе МРЭ.

Таким образом, изучение переходных процессов в демпферах на основе МРЭ представляет собой важное направление исследований, которое может привести к значительным достижениям в управлении динамическими системами, что важно как для разработки новых высокоэффективных устройств, так и для улучшения существующих технологий в различных отраслях промышленности.

1 Конструкция объекта исследований – магнитореологического демпфера

Демпфер на основе многослойного МРЭ включает электромагнитную систему и многослойный МРЭ композит (рисунок 1). Композит состоит из чередующихся стальных и МРЭ дисков. Электромагнитная система включает броневой сердечник, постоянный магнит и электромагнитную катушку [9].

На катушку подаётся управляющий ток, создающий магнитное поле, которое пронизывает всю систему и изменяет жёсткость и реологические свойства МРЭ композита. Постоянный магнит (сплав NdFeB НмБ 210/160 ГОСТ 52956-2008) держит композит в напряжённом состоянии. Направление тока через катушку определяет направление перемещения постоянного магнита, жёстко соединённого с верхним фланцем демпфера.

Корпус и фланцы демпфера изготовлены из магнитомягкой углеродистой Стали 20 ГОСТ 1050-2013, каркас катушки – из алюминиевого сплава Д16Т ГОСТ 4784-2019, обмотка катушки и тепловые трубки – из меди 859-2014.

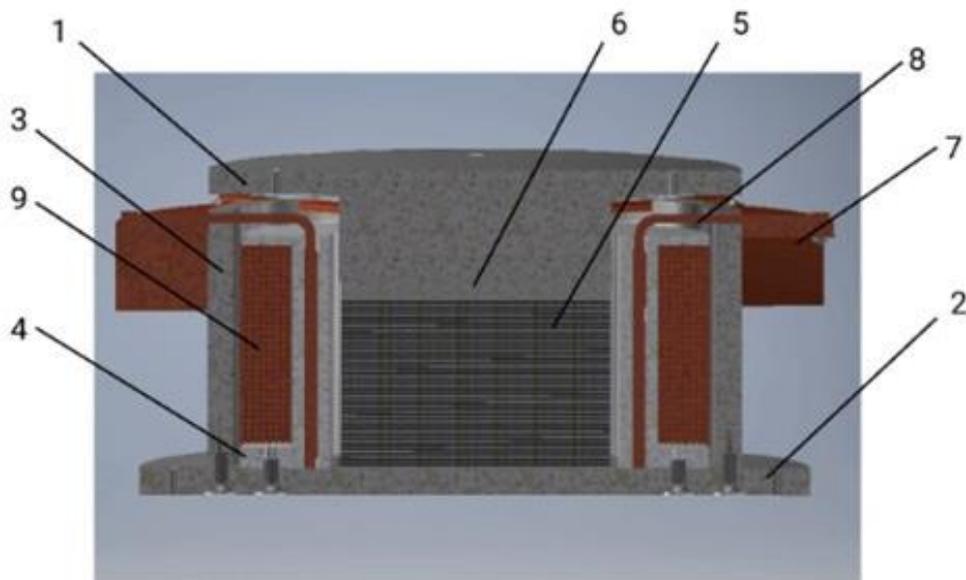


Рисунок 1 – Магнитореологический демпфер
1 – верхний фланец; 2 – нижний фланец; 3 – корпус; 4 – каркас катушки; 5 – МРЭ композит;
6 – постоянный магнит; 7 – радиатор; 8 – тепловая трубка; 9 – катушка

В ходе исследования было необходимо определить, как конструктивные элементы влияют на переходные процессы в многослойной структуре демпфера на основе МРЭ.

МРЭ обладают способностью изменять свою вязкость и жёсткость под действием магнитного поля. Однако, из-за переходных процессов нарастания магнитного поля в магнитопроводе и изменения характеристик материала в магнитном поле появляется эффект запаздывания в работе демпфера. Поэтому необходимо минимизировать длительность этих переходных процессов.

Возможность управления величиной переходных процессов в устройствах на основе МРЭ позволяет более эффективно подстраиваться под внешние возмущения по сравнению с другими типами демпферов. Исследование переходных процессов позволяет оценить диапазон частот эффективной виброизоляции и коэффициент передачи амплитуды вибраций демпфера, зависящие от быстродействия системы. Чем быстрее переходный процесс, тем более широкий диапазон частот может быть эффективно покрыт, обеспечивая лучшую виброизоляцию.

2 Описание автоматизированного экспериментального стенда

Автоматизация экспериментального стенда проведена по схеме на рисунке 2, основана на изменении выходного напряжения источника питания б при помощи регулировки потенциометра микроконтроллером Arduino Nano 5. В систему встроены контур обратной связи для точного контроля и подстройки выходного напряжения источника постоянного тока, погрешность которого не превышает 5% номинала выходного напряжения.

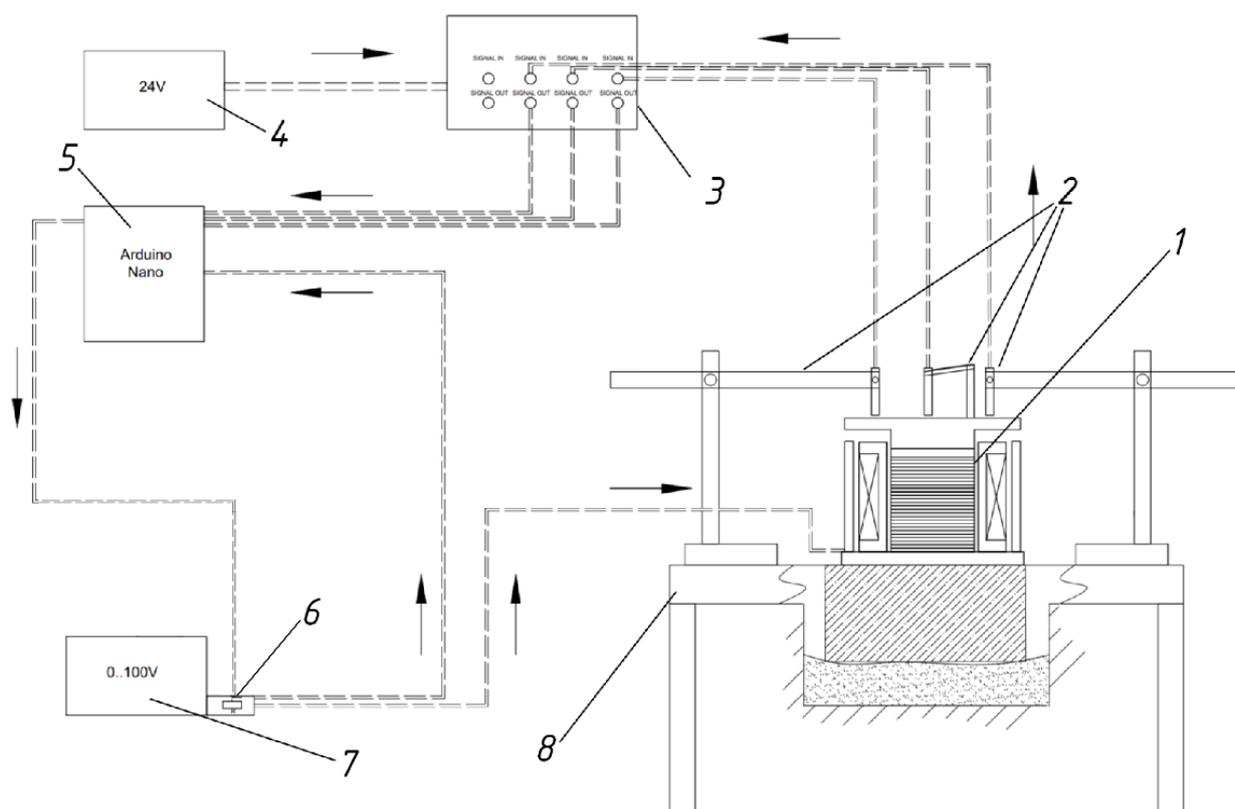


Рисунок 2 – Автоматизированный экспериментальный стенд для исследования зависимости перемещения МРЭ демпфера от величины управляющего тока в катушке
 1 – МРЭ демпфер; 2 – три ёмкостных датчика перемещения; 3 – блок управления датчиков;
 4 – источник питания блока датчиков; 5 – микроконтроллер Arduino Nano; 6 – цифровой потенциометр;
 7 – источник постоянного тока; 8 – антивибрационный стол

Для снижения внешних шумов МР демпфер 1 установлен на антивибрационном столе 8. К демпферу подведены три экранированных ёмкостных датчика перемещения 2. Ёмкостные датчики были использованы ввиду большого диапазона измеряемых величин (до 1 мм), высокой разрешающей способности (0,01 мкм), погрешности, не превышающей 0,01 мкм. Сигнал с датчиков преобразуется блоком управления датчиков 3, питаемым отдельным источником напряжения 4. Далее преобразованный сигнал подаётся на микроконтроллер.

Данные с ёмкостных датчиков преобразуются модульной многоканальной измерительной системой MICRO-EPSILON CapaNCDT 6200 и сохраняются в ЭВМ с помощью программного обеспечения DT6200 TOOL. Производится 6 замеров с шагом в 0,22 А, после каждого измерения происходит смена полярности и в течение 5 с производится перемагничивание МРЭ структуры при величине силы тока на катушке, равной 0,22 А. Вид стенда для проведения эксперимента представлен на рисунке 2.

При проведении исследований переходных процессов в демпфере на основе МРЭ были сделаны определённые допущения. Важно было обеспечить постоянство физических факторов, таких как температура, влажность и давление. Их воздействие принималось постоянным, а их колебания – не влияющими на измерения переходных процессов в МР демпфере.

Предполагается, что механические свойства всех компонентов системы остаются неизменными в течение всего периода экспериментов, исключая влияние износа или деградации материалов на результаты исследований.

3 Исследование переходных процессов магнитореологического демпфера

Проведённые эксперименты позволили получить данные о переходных процессах в исследуемом демпфере при изменении управляющих токов в заданном диапазоне, а также выявить зависимость положения подвижной части демпфера от управляющего тока, подаваемого на катушку. На рисунке 3 представлена зависимость перемещения верхнего фланца демпфера от времени, прошедшего с момента подачи управляющего тока на катушку индуктивности. При этом данный результат не учитывает временные задержки, связанные с системой автоматизации, поскольку начальный момент отсчёта соответствует началу перемещения верхнего фланца.

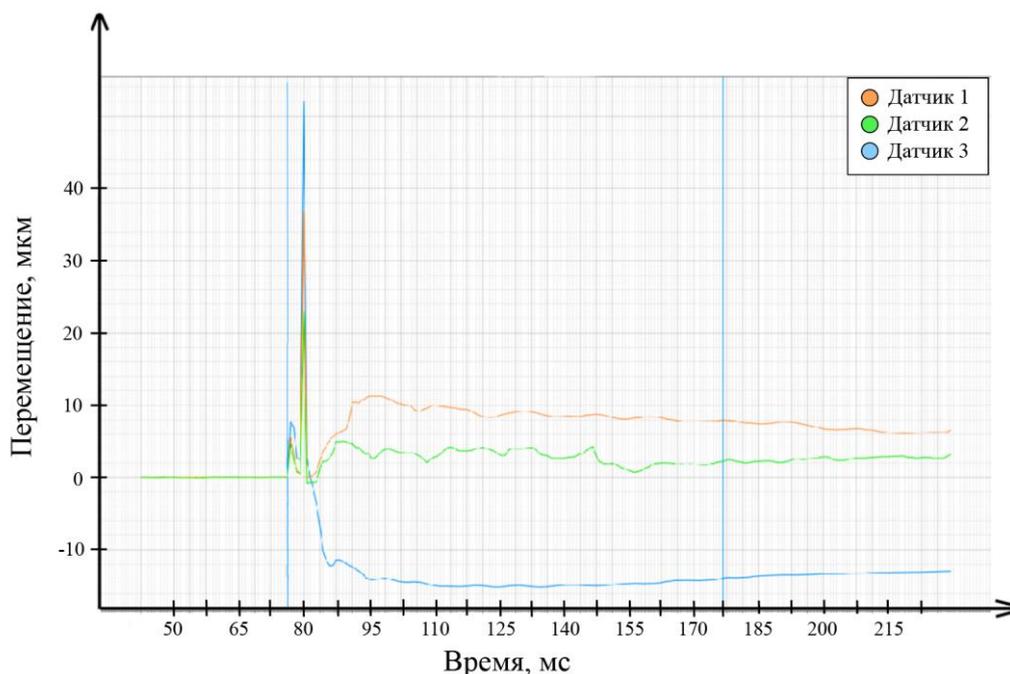


Рисунок 3 – Переходный процесс магнитореологического демпфера при величине управляющего тока, равной 0,67 А

Можно заметить, что в начальный момент наблюдается значительный импульс, обусловленный особенностями работы блока питания. Для наглядности начало и окончание переходного процесса отмечены синими вертикальными линиями. Различия в показаниях датчиков объясняются неравномерностью перемещения верхнего фланца демпфера, что связано с наличием дефектов в магнитореологической структуре, таких как раковины, поры и агломераты дисперсной фазы, создающих асимметрию в распределении механических напряжений. Окончание переходного процесса определяется по критерию уменьшения колебаний системы до значения, не превышающего уровня шумов (электрических, механических и прочих) и погрешности измерений, которая составляет до 5%.

Проведённые исследования выявили неравномерность длительности переходного процесса в зависимости от величины управляющего тока. Согласно данным, представленным на рисунке 4, максимальное значение длительности переходного процесса, полученное в серии измерений для каждой величины управляющего тока, достигает 106 мс при токе 0,45 А. Таким образом, при текущей конструкции, без учёта влияния системы автоматического управления, демпфер способен эффективно функционировать в активном режиме в диапазоне частот до 9,5 Гц.

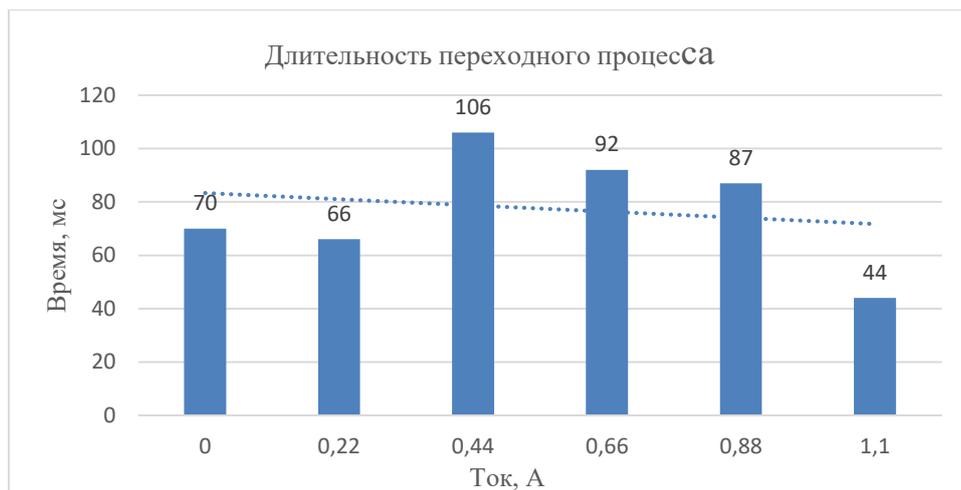


Рисунок 4 – Время переходного процесса магнитореологического демпфера при различных величинах управляющего тока

Аналогичные исследования были проведены с учётом системы автоматизации демпфера, при этом начальный момент отсчитывался с момента отправки сигнала микроконтроллером (пунктирная линия) на блок питания для установления необходимого напряжения (рисунок 5). В результате максимальная длительность переходного процесса увеличилась почти вдвое, достигнув 200 мс. Следовательно, с учётом системы автоматизации текущая конструкция демпфера способна эффективно осуществлять виброизоляцию от возмущений на частотах до 5 Гц.

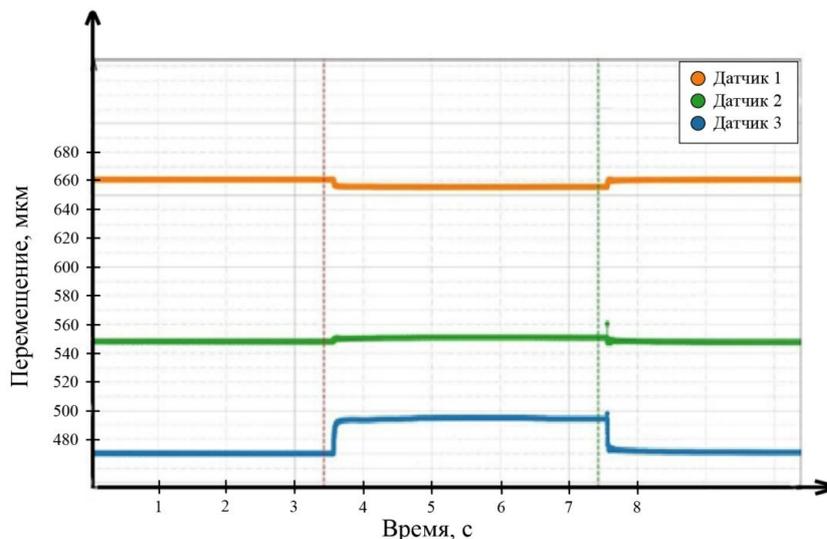


Рисунок 5 – Переходные процессы магнитореологического демпфера

Быстродействие системы можно повысить за счёт замены медленного релейного блока, время срабатывания которого составляет до 30 мс, на MOSFET-транзисторы со временем отклика до 50 нс и использования более производительного контроллера, например ARM Cortex-A, вместо Arduino. Релейный блок управляет сменой полярности протекания тока, а также позволяет установить выходное напряжение блока питания перед его подключением к катушке индуктивности. Микроконтроллер Arduino Nano (ATmega328P) с тактовой частотой 16 МГц не поддерживает параллельную обработку данных ввиду его одноядерной архитектуры, выполняя все вычисления последовательно. Это вызывает задержки при одновремен-

ной обработке сигналов датчиков, управлении токами катушки и обмене данными с другими модулями.

Arduino Nano, не поддерживая параллельные вычисления, не способен обеспечить необходимую производительность. Замена его на более мощный процессор сократит время реакции системы, минимизирует задержки и повысит эффективность активного управления с использованием сложных алгоритмов. Более мощные микроконтроллеры, такие как ARM Cortex-A, обладают многоядерными процессорами с тактовыми частотами от 600 МГц и лучше подходят для решения задач в промышленных масштабах.

Заключение

Современные виброизолирующие платформы имеют недостаток, состоящий в низкой эффективности подавления колебаний при частотах менее 5 Гц и при ударных нагрузках. Именно поэтому в настоящее время популярность приобретают активные платформы виброизоляции на основе интеллектуальных материалов, среди которых особенно выделяется МРЭ благодаря возможности работы во всех трёх режимах виброизоляции: пассивном, полуактивном и активном (в зависимости от способа управления устройствами).

Эксперимент по исследованию переходных процессов магнитореологического демпфера показал, что наибольшее время переходного процесса, ограничивающее диапазон рабочих частот и быстродействие всего устройства, составило 106 мс, что соответствует эффективной виброизоляции в диапазоне до 9,5 Гц. Величина времени связана с упругой природой магнитореологической структуры и магнитными свойствами материалов устройства.

В работе рассмотрена автоматизированная система активной виброизоляции на основе МР демпфера. Установлено, что вследствие влияния быстродействия системы автоматизации демпфера время переходного процесса увеличивается с 106 мс до 200 мс, что существенно ограничивает диапазон виброизоляции устройства. Для уменьшения времени предложено заменить медленный блок реле на быстрые MOSFET транзисторы, а также заменить Arduino на более производительный контроллер, например ARM Cortex-A.

Список использованных источников

1. Куцубина, Н. В. Теория виброзащиты и акустической динамики машин / Н. В. Куцубина, 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. 1981. – 456 с.
3. Liu, T. Magnetorheological elastomers: Materials and applications / T. Liu, Y. Xu // *Smart and functional soft materials*. – 2019. – V. 10.
4. Karnopp, D. Active and semi-active vibration isolation / D. Karnopp // *Journal of Mechanical Design*. – 1995. V. 117, 177-185.
5. Fu, J. Magnetorheological elastomer and its application on impact buffer/ J. Fu, M. Yu, X. M. Dong, L. X. Zhu // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2013. – 412. – 012032.
6. Kavlicoglu, B. Magnetorheological elastomer mount for shock and vibration isolation / B. Kavlicoglu, B. Wallis, H. Sahin, Y. Liu // *Proc. SPIE 7977 Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 79770Y*. – 2011.
7. Liao, G. J. Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer / G. J. Liao, X. L. Gong, S. H. Xuan, C. J. Kang, L. H. Zong // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2012. – V. 23. – pp. 25-33
8. Li, W. Development and simulation evaluation of a magnetorheological elastomer isolator for seat vibration control / W. Li, X. Zhang, H. Du // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2012. – V. 23. – pp. 1041-1048
9. Табакаев, В. С. Исследование демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера/ В. С. Табакаев, А. М. Базиненков, Г. Б. Тужба, А. К. Шагмуратова // *Динамика и виброакустика*. – 2024. – Т. 10, №1. – С. 78–87. DOI:10.18287/2409-4579-2024-10-1-78-87

Automation of a test bench for studying the magnetic hysteresis of a damper based on multilayer magnetorheological elastomer

V. S. Tabakaev	Student; Bauman Moscow State University, Moscow, Russian Federation; email: vladimirt530@gmail.com
A. M. Bazinenkov	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor; Bauman Moscow State University, Moscow, Russian Federation; email: ambazinenkov@bmstu.ru
L. V. Kostin	Student; Bauman Moscow State University, Moscow, Russian Federation; email: ikostin2002@mail.ru

The widespread use of electronic precision equipment necessitates research aimed at the development and improvement of vibration protection means. This study presents an investigation of a damper, the operating principle of which is based on the use of an "intelligent" material – a multilayer magnetorheological elastomer. The interest in such devices is due to their ability to adjust the elastic properties, sizes, and shapes of the working body by changing the external magnetic field, as well as the high load-bearing capacity of such devices. The effectiveness of active vibration isolation using the damper is determined by the quality of its transient processes, manufacturing technology, and the composition of the multilayer magnetorheological elastomer. The transient process time allows for determining the system's responsiveness, and consequently, the frequencies within which the device can operate effectively in active mode. The research results showed that the maximum transient process time was 106 ms, which corresponds to effective operation in the low-frequency range up to 9,5 Hz.

Keywords: vibration protection; vibration isolation; multilayer magnetorheological elastomer; magnetorheological damper; transient processes; automatic control system

Citation: Tabakaev, V. S., Bazinenkov, A. M. and Kostin, L. V. (2025), "Automation of a test bench for studying the magnetic hysteresis of a damper based on multilayer magnetorheological elastomer", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 1, pp. 87-95. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-87-95. (In Russian; abstract in English).

References

1. Kutsubina, N. V. and Sannikov, A. A. (2014), *Teoria vibrozashiti v acusticheskoy dinamiki* [Theory of Vibration Protection and Acoustic Dynamics of Machines], Ural State Forest Engineering University, 167 p. (in Russian)
2. Chelomey, V. N. and Frolova, K. V. (1981), *Vibratsii v tekhnike: zashita ot vibratsii i udarov* [Vibrations in Engineering: Vibration and Impact Protection], 456 p. (in Russian).
3. Liu, T. and Xu, Y. (2019), "Magnetorheological elastomers: Materials and applications", *Smart and functional soft materials*, vol. 10.
4. Karnopp, D. (1995), "Active and semi-active vibration isolation", *Journal of Mechanical Design*, vol. 117, pp. 177-185
5. Fu, J., Yu, M., Dong, X. M. and Zhu, L. X. (2013), "Magnetorheological elastomer and its application on impact buffer", *Journal of Physics: Conference Series*, 412, 012032.
6. Kavlicoglu, B., Wallis, B., Sahin, H and Liu, Y (2011), "Magnetorheological elastomer mount for shock and vibration isolation", *Proc. SPIE 7977 Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 79770Y*
7. Liao, G. J, Gong, X. L., Xuan, S. H., Kang, C. J. and Zong, L.H. (2012), "Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, pp. 25-33

8. Li, W., Zhang, X. and Du, H. (2012), “Development and simulation evaluation of a magnetorheological elastomer isolator for seat vibration control”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, pp. 1041-1048

9. 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)