

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФЕРА НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОГО МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ЭЛАСТОМЕРА

© 2024

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

А. К. Шагимуратова студент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
alina_shagimuratova@icloud.com

И. В. Макеев инженер;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
vano656565@mail.ru

В. А. Бахарев студент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
v.bakharev.wow@yandex.ru

В. В. Муханов аспирант;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
vovamuhanov1998@mail.ru

Представлена конструкция демпфера на основе многослойного магнитоэологического эластомера, который обладает повышенной нагрузочной способностью (до 500 Н) и работает во всех режимах виброизоляции в зависимости от управляющего сигнала. Представлена конструкция системы охлаждения демпфера. Проведены вибрационные испытания демпфера и получены его амплитудно-частотные характеристики, представлены исследования переходных процессов перемещения демпфера при ступенчатом управляющем сигнале.

Вибрационная защита; виброизоляция; многослойный магнитоэологический эластомер; актуатор; деформация; перемещение; амплитудно-частотная характеристика; переходный процесс

Цитирование: Базиненков А.М., Шагимуратова А.К., Макеев И.В., Бахарев В.А., Муханов В.В. Исследование характеристик демпфера на основе многослойного магнитоэологического эластомера // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 89-99.
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-89-99

Введение

Вибрационная защита (виброзащита) – это совокупность средств и методов уменьшения вибрации, воспринимаемой защищаемыми объектами. Защищаемыми объектами могут быть находящиеся в зоне действия вибрации люди, управляющие машинами, обслуживающий персонал; здания или иные сооружения; машины, аппараты, приборы, детали, узлы, механизмы и устройства, входящие в состав машины, работа которой порождает вибрацию. Под виброизоляцией понимают наиболее распространенный метод виброзащиты технологических машин и оборудования, заключающийся в уменьшении передачи вибрации от источника возбуждения к защищаемому объекту при помощи устройств, помещаемых между ними (виброизоляторов) [1].

Магнитоэологические (МР) материалы способны обратимо изменять форму, реологические и вязкоупругие свойства под воздействием внешнего магнитного поля, что позволяет не только использовать их в качестве рабочего тела механизма перемещений, но и виброизолятора. Очень широкое распространение получили МР эластомеры (МРЭ) и МР жидкости (МРЖ), которые уже давно и активно используются для пассивных виброизоляционных устройств [2]. МРЭ являются твердотельными аналогами МРЖ и состоят из магнитных частиц размером от 1 до 30 мкм, помещенных

в полимерную матрицу или гель с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ). Композиты обладают упругими свойствами, и магнитные частицы не осаждаются в матрице, в отличие от МРЖ. Внешнее магнитное поле способно влиять на магнитные частицы МРЭ, что приводит к обратимому локальному изменению формы и реологических свойств этих материалов. Благодаря этому МРЭ нашли широкое применение в различных демпфирующих и виброизоляционных устройствах.

Демпфер на основе многослойного магнитореологического эластомера

Разработке эффективного устройства виброизоляции на основе МРЭ посвящено большое число научных работ, при этом объектом виброизоляции выступает как прецизионное оборудование, так и целые здания.

Кольцевая платформа с МРЭ призмами, представленная в [3], состоит из неподвижной и подвижной стальных пластин; МРЭ, расположенных между ними; электромагнитных катушек, охватывающих эластомеры и стальных сердечников. Расположение эластомерных элементов позволяет за счёт компрессионного сжатия МРЭ и большего количества демпфирующих элементов выдерживать значительную вертикальную нагрузку.

Ключевые элементы многослойного МРЭ изолятора [4] представляют собой многослойные изоляторы с чередующимися стальными и силиконовыми композитными слоями. Силиконовые слои – МРЭ, наполненные карбонильным железом с углеродными нанотрубками, чередующимися послойно в силиконе. Углеродные нанотрубки уменьшают инерционность системы и увеличивают устойчивость без значительного повышения её жёсткости. Управляющим фактором также является внешнее магнитное поле, изменяющее размеры и реологические свойства композитных элементов. В ряде работ, рассматривающих подобную конструкцию, нагрузочная способность таких устройств достигает 200 кг в зависимости от размеров демпфирующего элемента. Основной областью применения таких элементов является виброизоляция несущих конструкций мостов и зданий. Рассмотренные научные статьи и патенты рассматривают многослойные структуры демпферов при горизонтально направленных вибрационных возмущениях, которые характерны для землетрясений, и ни в одной работе не рассмотрена деформация многослойной структуры под действием внешнего магнитного поля. Обосновать это можно тем, что вертикальные микрометровые и нанометровые перемещения не значимы в массивных конструкциях, поскольку предполагаемая амплитуда природных колебаний при землетрясениях и других стихийных воздействиях достигает десятков миллиметров. Кроме того, при незначительном вертикальном сжатии структура МРЭ может выдерживать большую нагрузку точного технологического оборудования – прецизионных станков, вакуумных камер, микроскопов атомарного разрешения.

Активная резинометаллическая опора [5] представляет собой адаптивную опору для транспортных мостов и по габаритам совпадает с часто используемой пассивной резинометаллической опорой. Каждый демпфер такой платформы состоит из чередующихся слоёв МРЭ и стальных листов, а сама платформа содержит четыре стойки, сформированные катушками индуктивности со стальными сердечниками, МРЭ и двумя плитами: неподвижной плитой-основанием и верхней подвижной. Кроме того, МРЭ являются еще и чувствительными элементами, регистрирующими степень нагружения платформы за счёт изменения их резистивных свойств вследствие приложения переменной вертикальной нагрузки. Достаточная для измерения сопротивления электрическая проводимость эластомеров достигается за счёт добавления в состав МРЭ частиц углерода.

Гибридный слоистый МРЭ демпфер [6] не отличается по общему принципу работы и устройству от других многослойных демпфирующих элементов, но имеет дополнительные постоянные магниты с осевой намагниченностью, которые позволяют за счет своей остаточной намагниченности управлять увеличением и уменьшением свойств структуры, а не только односторонне изменять их, как в предыдущих вариантах, а также управлять растяжением и сжатием в прямом и обратном направлении.

Объектом исследований в настоящей работе является демпфер повышенной грузоподъёмности на основе многослойного МРЭ (рис. 1), разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Он состоит из основания 4, крышки 6, корпуса 2, обмотки катушки индуктивности 1, каркаса катушки 7, многослойного МР композита (МРЭ) 5 и магнита 3. В конструкции демпфера используется многослойный МРЭ, который представляет собой чередующиеся слои дисков из МРЭ и стальных дисков из магнитомягкого материала (в данном случае Сталь 20). Многослойный МРЭ, который обеспечивает структуре дополнительную жёсткость, уменьшает потери магнитного потока, тем самым увеличивая его эффективность [7].

Демпфер может работать во всех трёх режимах виброизоляции: пассивном, полупассивном, активном.

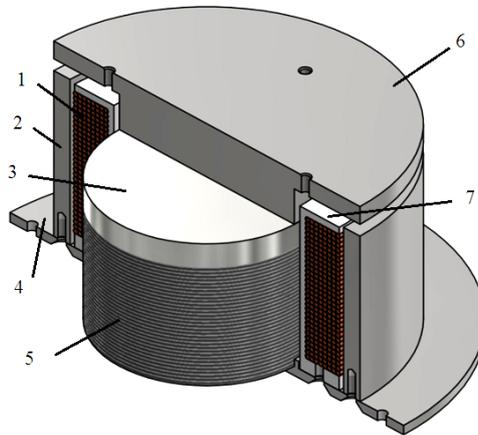


Рис. 1. Демпфер на основе многослойного магнитоэластического эластомера:
 1 – катушка индуктивности; 2 – корпус; 3 – постоянный магнит; 4 – основание;
 5 – МРЭ композит; 6 – крышка; 7 – каркас катушки

На катушку индуктивности подаётся управляющий ток, магнитный поток пронизывает магнитопровод (броневой сердечник), ось симметрии катушки и многослойный МР композит (МРЭ). Характеристики МР композита изменяются в зависимости от силы управляющего тока, а композит упруго сжимается в направлении середины оси катушки или упруго восстанавливает свою форму. Постоянный магнит держит МР композит в поджатом состоянии.

В табл. 1 представлены технические характеристики конструкции МР демпфера.

Таблица 1. Технические характеристики МР демпфера

Параметр	Значение
Нагрузочная способность	до 50 кг
Рабочий ток на катушке	от 0 до 2 А
Погрешность позиционирования	1 мкм
Диапазон деформаций композита	от 0 до 2 мм

При работе демпфера на высоких токах (более 1,5 А) продолжительное время происходит нагрев катушки и, соответственно, самого демпфера. Из-за этого есть риск перегрева катушки и дрейф её характеристик, потеря магнитных свойств постоянным магнитом и расплавления лаковой изоляции медного провода обмотки катушки с последующим выходом из строя устройства из-за отказа функционирования.

Для решения задачи снижения нагрева в работе предложено добавить в конструкцию систему охлаждения, которая не будет иметь движущихся элементов и вызывать дополнительных вибраций. Выбрана система охлаждения на основе тепловых трубок, так как они компактные и не создают дополнительных вибраций и радиатора, который повышает эффективность рассеивания тепла.

Предлагаемый в работе демпфер на основе многослойного МРЭ (рис. 2) состоит из нижнего фланца 2, корпуса 3, верхнего фланца 1, обмотки катушки 9, каркаса катушки 4, многослойного МР композита 5, магнита 6, восьми тепловых трубок 8 и радиатора 7.

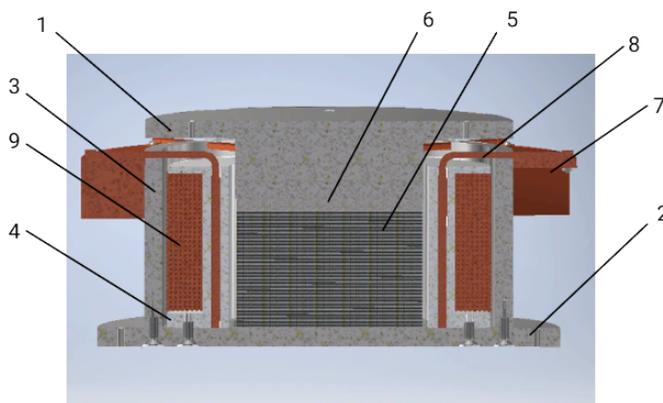


Рис. 2. Демпфер на основе многослойного магнитоэластического эластомера с системой охлаждения:

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

Демпферы устанавливаются на платформу виброизоляции. Платформа (рис. 3) состоит из верхней подвижной плиты 1, нижней неподвижной плиты 3, гранитного основания 4, четырёх демпферов на основе многослойного МРЭ 2, датчиков виброускорения 5. Характеристики платформы представлены в табл. 2.



Рис. 3. Разрабатываемая модель платформы:

1 – верхняя плита; 2 – демпфер; 3 – нижняя плита; 4 – гранитное основание; 5 – датчики виброускорения

Внешние вибрации передаются к гранитному основанию, где поглощается часть вибраций. Оставшиеся вибрации передаются на композитный МРЭ, где часть вибраций пассивно гасится за счёт вязкостно-упругих свойств силиконовой матрицы. Вертикальные вибрации регистрируются акселерометрическими датчиками и передаются в виде аналогового сигнала в блок управления, который задаёт управляющий ток, подаваемый на катушки МРЭ демпферов. Управляющий ток создаёт колебания в контуре, возбуждающие магнитное поле вокруг катушки, которое в зависимости от своего направления втягивает или отталкивает постоянный магнит, установленный на МРЭ композите, и перемещает подвижную часть демпфера, а, следовательно, верхнюю плиту платформы.

Таблица 2. Технические характеристики платформы виброизоляции

Техническая характеристика	Значение
Нагрузочная способность	до 200 кг
Рабочий ток	от 1 до 2 А
Погрешность позиционирования	1 мкм
Диапазон перемещений	от 1 до 2 мм
Активная виброизоляция	от 5 до 100 Гц
Пассивная виброизоляция	выше 100 Гц

Исследование переходных процессов перемещения подвижной части демпфера при ступенчатом управляющем сигнале в активном режиме виброизоляции

Активный режим работы демпфера подразумевает минимальное время отклика системы для возможности работы на высоких частотах возмущающих воздействий. Параметры переходного процесса – совершаемое перемещение, перерегулирование и постоянная времени оказывают решающее влияние на быстродействие устройства.

Для проведения данного исследования был применён экспериментальный стенд на основе ёмкостного датчика положения (рис. 4).



Рис. 4. Экспериментальный стенд для исследования зависимости перемещения верхней крышки от величины тока в катушке:
1 – персональный компьютер; 2 – демпфер; 3 – датчик положения

Экспериментальный стенд состоит из демпфера на основе многослойного МРЭ 2 с ёмкостным датчиком положения DL6220 3 и измерительной системой сараNCDT6200, переключателя трёхпозиционного с ручным управлением для смены полярности подключения катушки к блоку питания, лабораторного блока питания 30 В и персонального компьютера 1.

Методика проведения исследования: катушка демпфера в начальный момент не соединена с лабораторным блоком питания, далее на лабораторном блоке питания выставляется требуемое значение напряжения и включается режим записи данных, переключателем катушка подключается к блоку питания прямой полярностью и после выдержки 5 с. отключается, после второй выдержки 5 с. подключается обратной полярностью и выдерживается 5 с. Эксперимент повторяется для интервала напряжения от 0 до 30 В, с шагом 5 В.

В результате исследований были получены графики переходных процессов перемещения подвижного фланца демпфера в активном режиме при ступенчатом входном сигнале (рис. 5).

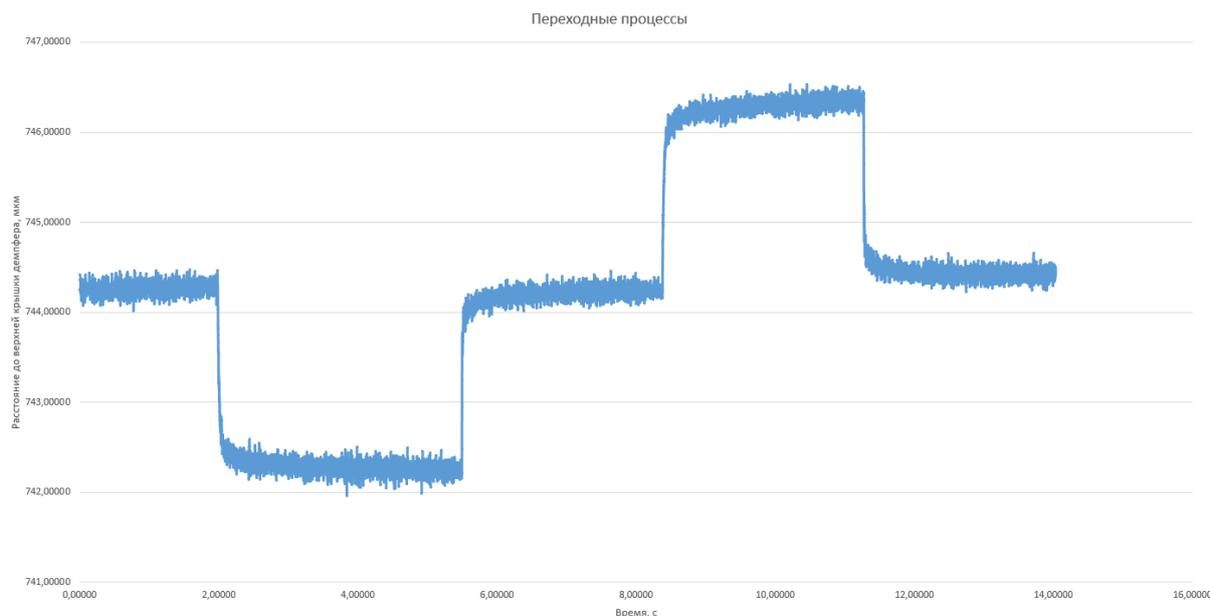


Рис. 5. Переходные процессы при напряжении 5 вольт

Параметры переходных процессов для двух полярностей напряжения на полюсах катушки от 5 до 30 В представлены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры переходных процессов

Напряжение, В	Полярность 1 (вверх)		Полярность 2 (вниз)	
	Перемещение, мкм	Постоянная времени, с.	Перемещение, мкм	Постоянная времени, с.
5	1,90	0,12	1,98	0,22
10	3,97	0,31	4,18	0,56
15	6,18	0,44	6,38	0,55
20	8,35	0,63	8,60	0,68
25	10,43	0,49	10,80	0,42
30	12,41	0,82	13,39	0,65

Полученные значения перемещений незначительно (до 10%) отличаются друг от друга. Постоянные времени не превышают 1 с., что достаточно для работы устройства в полуактивном режиме, а также для работы устройства на низких частотах ниже диапазона от 1 до 10 Гц, где замечена низкая эффективность работы промышленных систем. И данный показатель крайне низок для эффективной работы в активном режиме на высоких частотах более 10 Гц.

Низкое быстродействие связано с дефектами при изготовлении многослойной структуры полимера и может быть существенно улучшено совершенствованием технологии изготовления структуры и введением операции дегазации полимера в вакууме в процессе полимеризации.

Вибрационные испытания демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера

Важным параметром для устройства виброизоляции является собственная резонансная частота и его амплитудно-частотная характеристика. Значение резонансной частоты будет определять диапазон эффективной работы демпфера без управляющего сигнала в пассивном режиме.

Экспериментальный стенд представляет собой вибрационную электродинамическую машину (Data Physics Vibrator V300), на которой с помощью переходной оснастки закреплён испытуемый демпфер (рис. 6). Два датчика виброускорений, установленные на верхнем фланце демпфера и его основании, закреплены с помощью термоформуемого воска.



Рис. 6. Экспериментальный стенд для исследования собственной частоты демпфера

Методика проведения исследования заключается в следующем. Включается управляющая программа, в которой задаются параметры проведения эксперимента: частотный диапазон от 5 до 500 Гц и фиксированная амплитуда виброперемещений 0,1 мм. Далее запускается управляющая программа, по выполнению которой данные о величине виброускорения с двух датчиков экспортируются в текстовый файл.

В результате выполнения эксперимента и обработки результатов был получен график зависимости коэффициента передачи амплитуды вибраций (виброускорения) от частоты внешних вибрационных возмущающих воздействий (рис. 7).

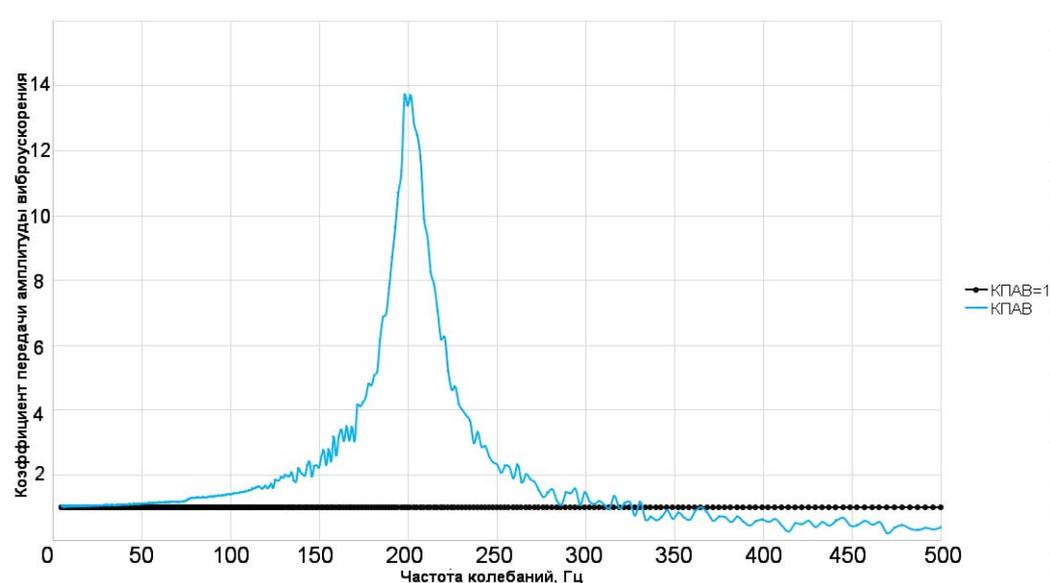


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика демпфера на основе многослойного магнитореологического эластомера

Анализируя график, можно сделать вывод о том, что резонансная частота демпфера составляет 200 ± 5 Гц. При этой частоте максимальный коэффициент передачи амплитуды вибраций (КПАВ) равен 13,71, а эффективное демпфирование колебаний в пассивном режиме начинается с частоты 370 Гц. Резонансная полоса частот обнаружена в диапазоне от 0 Гц до 325 Гц, диапазон КПАВ при этом от 0 до 13,71.

В качестве эксперимента для ограничения амплитуды колебаний и повышения жёсткости между верхним фланцем и корпусом демпфера было установлено кольцевое уплотнение из МРЭ, что придало системе дополнительную жёсткость и ограничило его перемещения. Амплитудно-частотная характеристика системы с уплотнением представлена на рис. 8.

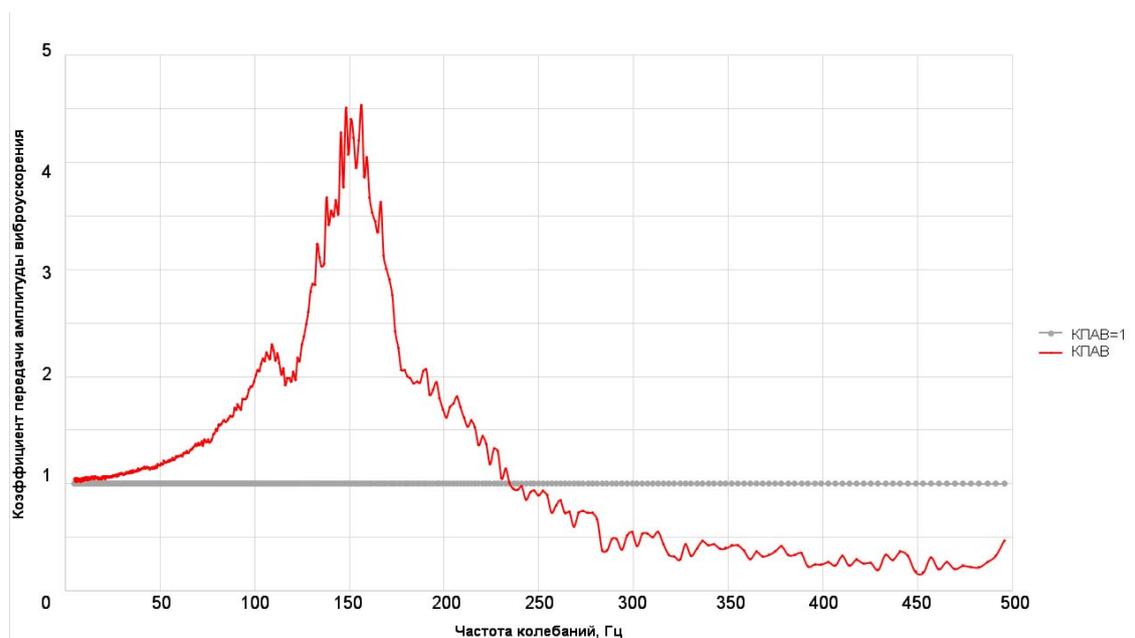


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика системы с уплотнением из магнитореологического эластомера

Резонансная частота системы сместилась в область низких частот и составила 150 ± 5 Гц, при этом коэффициент передачи амплитуды вибраций (КПАВ) достиг 4,5, а эффективное демпфирование колебаний осуществлялось с частоты 250 Гц. Резонансное значение КПАВ значительно уменьшилось, однако вследствие добавления ещё одного упругого элемента и возникновения двух дополнительных стыков появилась ещё одна резонансная частота 110 ± 5 Гц.

По графикам можно наблюдать значительные электрические шумы, которые, тем не менее, не оказали влияние на характер кривых и качество экспериментов.

Значения КПАВ в широком диапазоне превышают 1. Это является следствием того, что все вибрационные испытания в работе проводились без имитации нагрузки на верхний фланец от объекта виброизоляции. Из-за большой жёсткости и малой массы верхнего фланца при малой инерционности подвижной части на резонансных частотах наблюдается резкое и многократное увеличение КПАВ. Решить эту задачу можно созданием оснастки и установкой груза весом от 10 до 30 кг на верхний фланец, что значительно сдвинет резонанс в область низких частот и будет соответствовать реальным условиям эксплуатации демпфера.

Выводы

Наиболее эффективным методом вибрационной защиты оборудования является виброизоляция за счет разрыва физической связи между источником и объектом. Существующие коммерческие системы виброизоляции, как правило, способны работать только в одном из режимов виброизоляции: пассивном, активном или полупассивном и недостаточно эффективны на низких частотах внешних вибрационных возмущений.

Представленная в работе система виброизоляции на основе магнитореологического эластомера способна совмещать работу в нескольких режимах виброизоляции, за счет уникального свойства магнитореологического эластомера изменять свои реологические свойства под действием внешнего магнитного поля.

Предложенная система охлаждения магнитореологического демпфера способна отвести 100 Вт тепла при работе устройства на предельных управляющих токах до 2 А.

Время переходного процесса демпфера при работе в активном режиме на управляющем напряжении 30 В составляет до 800 мс и связано с естественными эффектами релаксации напряжений в структуре магнитореологического эластомера, а также с дефектами при изготовлении многослойной структуры полимера и может быть существенно улучшено совершенствованием технологии изготовления структуры и введением дополнительных операций в технологический процесс изготовления многослойной структуры.

Вибрационные испытания разработанной конструкции магнитореологического демпфера показали, что резонансная частота устройства составляет 150 ± 5 Гц или 200 ± 5 Гц в зависимости от его модификации, а КПАВ при резонансе варьируется от 4 до 14 единиц.

Заключение

Разработанная пассивная система охлаждения магнитореологического демпфера на основе тепловых трубок и радиатора позволила уменьшить перегрев катушки демпфера при работе на высоких токах до 2 А.

Исследованы характеристики демпфера, переходные процессы при работе в активном режиме на ступенчатых управляющих сигналах и амплитудно-частотные характеристики для двух модификаций устройства, на основе которых сделан вывод об эффективности предлагаемой системы.

Библиографический список

1. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т. 6. Защита от вибраций и ударов / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.
2. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
3. Kavlicoglu B.M., Liu Y., Sahin H., Wallis B. Soft matrix magnetorheological mounts for shock and vibration isolation: US patent № 8820492. Publ. 02.09.2014.
4. Sun L., Sun H., Li R. Semi-active isolators based on magnetorheological nanocomposites: US patent № 9581214. Publ. 25.12.2014
5. Behrooz M., Yarra S., Mar D., Pinuelas N., Muzinich B., Publicover N.G., Pekcan G., Itani A., Gordaninejad F. A self-sensing magnetorheological elastomer-based adaptive bridge bearing with a wireless data monitoring system // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2016. V. 9803. DOI: 10.1117/12.2218691

6. Deng H.X., Gong X.L. Adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2007. V. 18, Iss. 12. P. 1205-1210. DOI: 10.1177/1045389X07083128

7. Bazinenkov A.M., Makeev I.V., Rotari A.P., Ivanova D.A. Estimation of the position error of the magnetorheological elastomers active vibration control platform for precision vacuum equipment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 387. DOI: 10.1088/1757-899X/387/1/012006

INVESTIGATION OF A MULTILAYER MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMER DAMPER CHARACTERISTICS

© 2024

A. M. Bazinenkov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
ambazinenkov@bmstu.ru

A. K. Shagimuratova Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
alina_shagimuratova@icloud.com

I. V. Makeev Engineer;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
vano656565@mail.ru

V. A. Bakharev Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
v.bakharev.wow@yandex.ru

V. V. Mukhanov Postgraduate Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
vovamuhanov1998@mail.ru

The paper presents the design of a damper based on a multilayer magnetorheological elastomer that has high load capacity, up to 500 N. The damper is able to operate in all vibration control modes, depending on its control signal. The damper cooling system is presented. Vibration tests were carried out and the damper amplitude-frequency characteristics were obtained. The transition process of damper displacement with a control step signal was analyzed.

Vibration protection; vibration isolation; multilayer magnetorheological elastomer; actuator; deformation; displacement; amplitude-frequency response; transition process

Citation: Bazinenkov A.M., Shagimuratova A.K., Makeev I.V., Bakharev V.A., Mukhanov V.V. Investigation of a multilayer magnetorheological elastomer damper characteristics. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 89-99. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-89-99

References

1. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik v 6 t. T. 6. Zashchita ot vibratsiy i udarov / pod red. K.V. Frolova* [Vibration and shock protection]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 456 p.

2. Shul'man Z.P., Kordonskiy V.I. *Magnitoreologicheskiy effekt* [Magnetorheological effect]. Minsk: Nauka i Tekhnika Publ., 1982. 184 p.

3. Kavlicoglu B.M., Liu Y., Sahin H., Wallis B. Soft matrix magnetorheological mounts for shock and vibration isolation: US patent no. 8820492. Publ. 02.09.2014.

4. Sun L., Sun H., Li R. Semi-active isolators based on magnetorheological nanocomposites: US patent no. 9581214. Publ. 25.12.2014

5. Behrooz M., Yarra S., Mar D., Pinuelas N., Muzinich B., Publicover N.G., Pekcan G., Itani A., Gordaninejad F. A self-sensing magnetorheological elastomer-based

adaptive bridge bearing with a wireless data monitoring system. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2016. V. 9803. DOI: 10.1117/12.2218691

6. Deng H.X., Gong X.L. Adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2007. V. 18, Iss. 12. P. 1205-1210. DOI: 10.1177/1045389X07083128

7. Bazinenkov A.M., Makeev I.V., Rotari A.P., Ivanova D.A. Estimation of the position error of the magnetorheological elastomers active vibration control platform for precision vacuum equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 387. DOI: 10.1088/1757-899X/387/1/012006