

УДК: 62-752.2;
PACS: 81.70.Bt;

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Демпфер на основе эластомера с порошковым наполнителем из магнитомягкого материала

М. А. Косков^{a, b}, Г. В. Степанов^c, А. С. Иванов^{a, b}

^a Институт механики сплошных сред УрО РАН

614013, Пермь, ул. Ак. Королева, 1

email: lesnichiy@icmm.ru

^b Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

email: koskov.m@icmm.ru

^c Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений

111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 38

email: gstepanov@mail.ru

Предложена новая конструкция пассивной демпфирующей опоры, рабочим телом которой является магнитный силиконовый композит с порошковым наполнителем из магнитомягкого материала. Принцип работы демпфера заключается в создании предварительно напряженного состояния полимерной матрицы вследствие действия дополнительных пондеромоторных сил, возникающих во внешнем градиентном магнитном поле. Изготовлен и испытан опытный образец демпфера. Цель испытаний – проверка работоспособности нового демпфера и оценка влияния внешнего магнитного поля на его виброизолирующие свойства. Испытания образца проводились при вертикальном и осевом вибрационном воздействии под нагрузкой, имитирующей демпфируемое изделие (электронные компоненты). По результатам измерения виброускорений строились амплитудно-частотные характеристики демпфера. Представлены результаты контрольных испытаний демпфирующих свойств упругого элемента в нулевом магнитном поле. Показано значительное улучшение демпфирующих свойств устройства (под действием магнитного поля) при вибрационных воздействиях на резонансной частоте. Обсуждаются перспективы применения ферроэластов в системах виброзащиты.

Ключевые слова: виброзащита; амплитудно-частотная характеристика; градиентное магнитное поле; магнитный эластомер

Поступила в редакцию 16.09.2019; принята к опубликованию 23.10.2019

Damper made of elastomer filled with soft magnetic powder

M. A. Koskov^{a, b}, G. V. Stepanov^c, A. S. Ivanov^{a, b}

^a Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

Ak. Korolev str. 1, 614013, Perm

email: lesnichiy@icmm.ru

^b Perm State University, Bukireva str. 15, 614990, Perm

email: koskov.m@icmm.ru

^c State Research Institute of chemistry and technologies of organoelement compounds

Shosse Entuziastov 38, 111123, Moscow

email: gstepanov@mail.ru

A new design of a passive damping support has been proposed. The working body of the support is made of a silicone composite material uniformly filled ferromagnetic powder. The working body of the damper was in a gradient magnetic field. The principle of operation of the damper is based on preliminary mechanical stress arising in the polymer matrix under the action of ponderomotive magnetic forces. A prototype device was manufactured and tested. The purpose of the tests was to test the operability of the new damper and study the effect of the gradient magnetic field on its vibration-isolating properties. The tests were carried out under the influence of vertical and axial vibration. The product protected from vibration (electronic components) was imitated using a load. The amplitude-frequency characteristics of the damper were built as a result of tests. Control tests were carried out in a zero magnetic field. The results of the control tests are presented in this article. A significant improvement in the damping properties of the device under the influence of a magnetic field during vibration at a resonant frequency is shown. Prospects for the use of magnetic silicone composites in vibration protection systems are described in this article.

Keywords: vibration protection; amplitude-frequency characteristic; gradient magnetic field; magnetic elastomer

Received 16.09.2019; accepted 23.10.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-05-10

1. Введение

Повсеместное использование электронного оборудования обуславливает необходимость исследований, направленных на разработку и усовершенствование средств защиты электронных устройств от ударных и вибрационных воздействий [1]. В настоящее время для этой цели используются различные по конструкции демпфирующие системы. Широкое применение нашли демпферы, рабочее тело которых изготовлено из высокоэластичных материалов [2, 3]. Часто используется силиконовая резина, например, в изделии [4]. Активно обсуждается целесообразность изготовления демпфирующих систем с применением ферроэластов – магнитных силиконовых композитов [5–7]. Ферроэласт представляет собой упругую силиконовую матрицу с порошковым наполнителем из ферромагнитного материала, равномерно распределённого по всему объёму тела. Частицы наполнителя имеют микронные и субмикронные размеры. Интерес к демпферам на основе ферроэластов обусловлен возможностью управления упругими свойствами и формой рабочего тела демпфера при помощи внешнего магнитного поля [8]. Обе возможности используются при создании как пассивных, так и активных систем виброзащиты [9]. Данная работа посвящена исследованию пассивного демпфера новой конструкции (автор – Г. В. Степанов, ГНИИХТЭОС, г. Москва).

Цель работы – изучение упругих и диссипативных свойств демпфера с силиконовой матрицей и порошковым ферромагнитным наполнителем под воздействием магнитного поля при вертикальном и осевом вибрационном воздействиях.

2. Детали эксперимента

Устройство демпфирующей опоры новой конструкции изображено на рис. 1. Демпфер состоит

из двух дисковых неодим-кобальтовых магнитов, ориентированных друг к другу одноимёнными полюсами. Между магнитами располагается рабочее тело демпфера – ферроэласт, имеющий форму цилиндра кругового сечения либо цилиндрического слоя. Устройство размещается между полезной нагрузкой и источником вибрации, например, в виде упругого подвеса между электронным устройством и его шасси (корпусом).

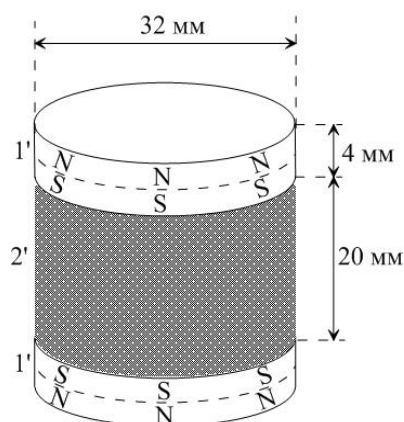


Рис. 1. Опытный образец демпфера: 1' – дисковые неодим-кобальтовые магниты, 2' – рабочее тело из ферроэласта

Работа устройства заключается в ослаблении вибрационных воздействий за счет диссипации энергии упругих колебаний в рабочем теле демпфера. В отличие от демпфирующих систем на основе немагнитных эластомеров, восстановление формы рабочего тела осуществляется за счёт не только энтропийной упругости эластичной матрицы, но и магнитных пондеромоторных сил, обусловленных взаимодействием поля постоянных магнитов с порошковым наполнителем матрицы.

Демпфер изначально находится в напряжённом состоянии, обусловленном одновременно притяжением ферроэласта к полюсам постоянных маг-

нитов и их взаимным отталкиванием. В центральном сечении, где поле постоянных магнитов равно нулю, механические напряжения, обусловленные действием пондеромоторных сил, отсутствуют.

В опытных образцах демпфера рабочее тело удерживалось между магнитами только за счет магнитных сил. Для изготовления рабочего тела использовался ферроэласт на основе силиконовой смеси ИРП 1354 и порошка карбонильного железа, объёмная доля которого в образце ферроэласти составляла около 0.4.

Для изучения свойств демпфера при воздействии вертикальной вибрации была изготовлена экспериментальная установка, представленная на рис. 2. На столе электродинамического вибростенда ВЭДС-400 жёстко закреплялась стальная пластина. К пластине крепились две цилиндрические алюминиевые направляющие. Между направляющими устанавливался испытуемый демпфер, на который сверху опускался цилиндрический стальной груз массой 0.95 кг, имитирующий защищаемое от вибрации изделие. Направляющие предотвращали смещение груза в горизонтальном направлении, но позволяли свободно двигаться в вертикальном. Центры масс груза и демпфера находились на одной вертикали. Демпфер удерживался между пластиной и грузом посредством притяжения к ним постоянных магнитов.

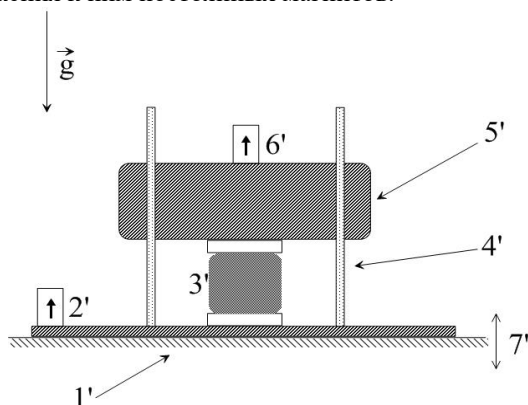


Рис. 2. Схематическое изображение установки для испытания демпфера при вертикальном нагружении: 1' – стол вибростенда с укрепленной на нем металлической пластиной, 2' – датчик акселерометра, регистрирующий ускорение стола (стрелкой указано направление оси датчика), 3' – испытуемый демпфер, 4' – алюминиевые направляющие, 5' – груз, 6' – датчик акселерометра, регистрирующий ускорение груза, 7' – направление колебаний стола

Для измерения виброускорений использовались пьезоэлектрические акселерометры Bruel and Kjaer type 4513. Один датчик закреплялся на пластине, а второй – по центру груза. Сигналы акселерометров считывались и обрабатывались контроллером VR 8500.

Испытания проводились согласно требованиям ПАО «ПНППК» для демпферов оптических гироскопов в частотном диапазоне от 8 Гц до 3 кГц. На частотах 8–20 Гц амплитуда колебаний стола вибростенда задавалась не менее 3.0 мм. В остальном диапазоне частот амплитуда виброускорения стола составляла 5–6 g, где $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$ – модуль ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли.

При таких параметрах эксперимента демпфер испытывает упругие деформации, преобразуя механическую энергию в тепловую, которая отводится посредством теплообмена рабочего тела с остальными частями установки. Простые теоретические оценки, учитывающие баланс механической энергии, поглощаемой демпфером, и тепловой энергии, отводимой от него через торцы, позволяют сделать вывод о том, что при эксплуатации демпфера в указанных режимах работы перепад температур между рабочим телом и демпфируемой массой составляет не более 1 °C (в ходе опытных испытаний нагрев демпфера не был зафиксирован).

Осциллограммы ускорений аппроксимировались функциями $A \sin(\omega t + \varphi)$ (рис. 3). По результатам аппроксимации, для каждой из рабочих частот, вычислялся коэффициент передачи демпфера – отношение амплитуды виброускорения груза к амплитуде виброускорения стола вибростенда. Строилась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента передачи от частоты.

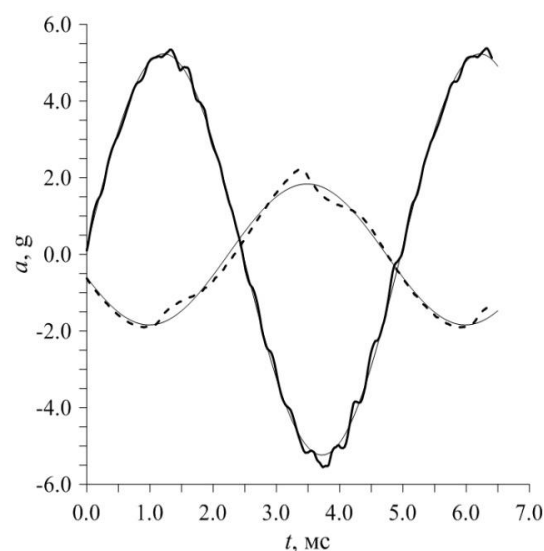


Рис. 3. Пример осциллограммы, полученной при испытаниях демпфера вертикальным нагружением с частотой 200 Гц. Сплошная жирная линия соответствует ускорению стола вибростенда, пунктирная – ускорению груза. Тонкими линиями показаны аппроксимации синусоидами

С целью оценки влияния магнитного поля на виброизолирующие свойства демпфера проводи-

лись контрольные испытания, для чего постоянные магниты заменялись текстолитовыми дисками аналогичных размеров. Крепление ферроэласта к немагнитным дискам осуществлялось с помощью цианакрилового клея. К пластине 1' и грузу 6' (рис. 2.) демпфер крепился посредством болтов. Амплитудно-частотные характеристики демпфера в штатном и контрольном исполнении (в нулевом магнитном поле) представлены на рис. 4.

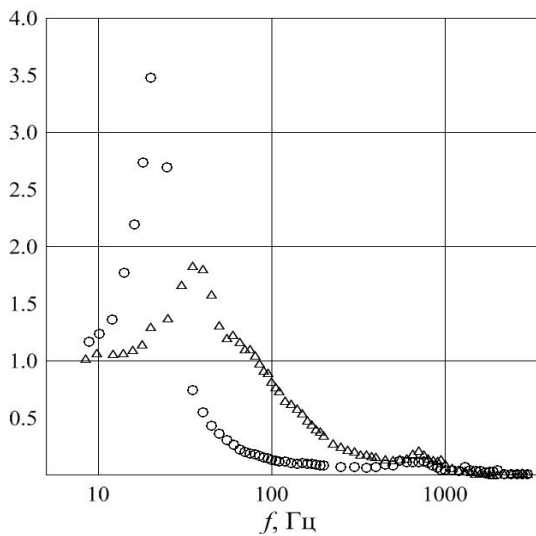


Рис. 4. Коэффициент передачи демпфера от вертикального виброускорения: Δ – в поле постоянных магнитов, $\circ$ – без магнитов

На рис. 4 видно сильное влияние поля постоянных магнитов на АЧХ демпфера. Магнитное поле влияет на положение основного резонансного максимума, а также на величину коэффициента передачи на резонансной частоте ω_p . В отсутствие магнитов резонансная частота составила $\omega_p = 20$ Гц, а коэффициент передачи на ω_p равен 3.5. Аналогичными характеристиками обладают промышленно-производимые силиконовые виброизоляторы [4].

Действие поля постоянных магнитов приводит к увеличению резонансной частоты до 35–40 Гц, уменьшая при этом коэффициент передачи на ω_p до 2. Однако на частотах $\omega > \omega_p$ демпфер с постоянными магнитами оказывается менее эффективным. Так, в отсутствие магнитов коэффициент передачи оказывается меньше, чем e^{-1} на частотах свыше 50 Гц, а с магнитами – 200 Гц. Различие в поведении демпферов фактически исчезает на частотах свыше 1 кГц.

Вибрационное испытание при осевом нагружении производилось на установке, схема которой представлена на рис. 5.

Вибростенд устанавливался в горизонтальном положении. На столе вибростенда жёстко закреплялся угловой кронштейн. Демпфер устанавливался на горизонтальную часть кронштейна. В качестве нагрузки демпфера использовался осесиммет-

ричный груз массой 1 кг, выполненный из немагнитных материалов. Груз закреплялся на демпфере с помощью стальной пластины. В статическом положении центр масс груза находился на расстоянии не более 5 мм от центра масс рабочего тела демпфера. Как и в предыдущем случае, демпфер удерживался между грузом 3' и кронштейном 1' только за счёт притяжения к ним постоянных магнитов.

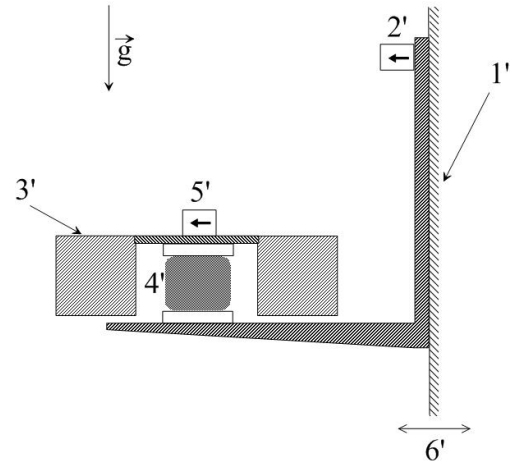


Рис. 5. Схема установки для испытаний демпфера горизонтальной вибрацией в вертикальном разрезе. 1' – стол вибростенда с кронштейном, 2' – датчик акселерометра, регистрирующий ускорение стола, 3' – груз в виде толстого кольца, 4' – испытуемый демпфер, 5' – датчик акселерометра, измеряющий ускорение груза, 6' – направление колебаний стола

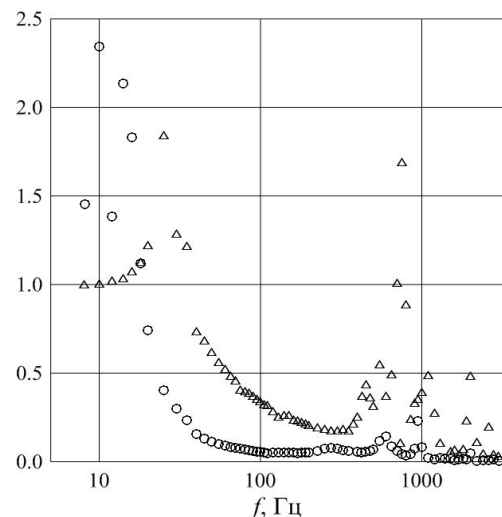


Рис. 6. Коэффициент передачи демпфера от горизонтального виброускорения в зависимости от частоты: Δ – в поле постоянных магнитов, $\circ$ – без магнитов

В контрольных испытаниях крепление текстолитовых дисков к кронштейну и грузу осуществлялось при помощи болтов. Во избежание разру-

шения демпфера значение амплитуды вибрационного воздействия в диапазоне частот от 40–950 Гц было снижено до 3–4 g. На меньших частотах амплитуда колебаний стола не превышала 1 мм. Превышение указанных параметров приводило к поломке демпфера (текстолитовые шайбы отрывались от ферроэласти). Амплитудно-частотные характеристики представлены на рис. 6.

Как и в случае вертикальных вибраций, включение магнитов в конструкцию демпфера существенно влияет на амплитудно-частотную характеристику системы. Во всем диапазоне частот коэффициент передачи демпфера с магнитами не превышает 2. Основная резонансная частота $\omega_p = 25$ Гц. Резонансные явления наблюдаются и в интервале частот 650–800 Гц. В отсутствие магнитного поля коэффициент передачи достигает максимального значения 2.3 на частоте в 10 Гц. На частотах свыше 20 Гц усиления колебаний не происходит.

3. Заключение

Результаты испытаний позволяют говорить о наличии перспектив использования ферроэластов в системах пассивной виброзащиты. Наиболее интересным свойством испытанных демпфирующих опор является снижение коэффициента передачи при резонансе под воздействием поля постоянных магнитов. Коэффициент передачи вертикальных вибраций при резонансе уменьшился более чем на 40 %. Данное свойство, четко проявляющееся ещё на этапе опытных образцов, может быть использовано при проектировании демпфирующих систем, работающих в широком частотном диапазоне. Удобной представляется возможность задания параметров рабочего тела при его изготовлении путем варьирования объёмной доли ферромагнитного наполнителя. Следует отметить рост коэффициента передачи вибрации вдали от основного резонанса при воздействии градиентного магнитного поля на рабочее тело демпфера. Очевидно, это является следствием увеличения жесткости рабочего тела вследствие действия магнитных объёмных сил, обеспечивающих дополнительный механизм упругости. С учетом активных исследований, направленных на повышение эксплуатационных характеристик силиконовых резин [10], последнее может позволить уменьшить размеры демпферов, с сохранением их функциональных и прочностных качеств.

Работа выполнена А. С. Ивановым и М. А. Косковым в рамках гос. бюджетной темы «Динамика концентрированных ферроколлоидов при больших энергиях межчастичных взаимодействий» (ГР № 01201457908). Тестовый образец демпфера изготовлен Г. В. Степановым в рамках проекта РФФИ № 19-53-12039\19.

Список литературы

1. ГОСТ 24346-80 М.: Стандартиформ, 2010. 28 с.
2. Мартин Дж. М., Смит У. К. Производство и применение резинотехнических изделий. СПб.: Профессия, 2006. 480 с.
3. Сергаева М. Ю., Цисс В. Г. Обоснование работоспособности виброзащиты систем авиационного оборудования // Омский научный вестник. Механика, машиностроение. 2005. Т. 30. № 1.
4. Damper E1E931S & E1E4045 Datasheet. Hutchinson Stop-Choc GmbH & Co.KG. Renningen, 2014.
5. Горбунов А. И., Михайлов В. П., Степанов Г. В., Борин Д. Ю., Андриянов А. А., Темнов Д. В., Семеренко Д. А. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2008. Вып. 70. № 1. С. 90–107.
6. Михайлов В. П., Зобов И. К., Селиваненко А. С. Демпфер на основе магнитореологического эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования // Инженерный журнал: наука и инновации: электронное научно-техническое издание. 2013. Вып. 18. № 6, 50.
7. Васько В. М., Гребенюк С. Н., Решевская Е. С. Определение напряженно-деформированного состояния эластомерного виброизолятора // Вісник Запорізького національного університету. 2015. № 3. С. 36–41.
8. 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.
9. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования. М.: Стройиздат, 1972, 160 с.
10. Венедиктова М. А., Наумов И. С., Чайкун А. М., Елисеев О. А. Современные тенденции фторсилоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S3. С. 17–24.

References

1. GOST 24346-80 Moscow.: Standartinform, 2010. 28 p. (in Russian)
2. Martin J. M., Smith W. K. *Handbook of rubber technology*. Volume 2. CBS Publishers & Distributors, 2004
3. Sergaeva M. Yu., Tsyss V. G. Justification of the health of the vibration protection systems of aviation equipment. *The Journal Omsk Scientific Bulletin*. 2005. Vol 30. No 1. (in Russian)

4. *Damper E1E931S & E1E4045 Datasheet*. Hutchinson Stop-Choc GmbH & Co.KG. Renningen, 2014.
5. Gorbunov A. I., Mikhailov V. P., Stepanov G. V., Borin D. Yu., Adrianov A. A., Temnov D. V., Semerenko D. A. Investigation of properties and new application of magnetic silicon composites. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. 2008. Vol. 70. No 1. P. 90–107.
6. Mikhailov V. P., Zobov I. K., Selivanenko A. S. Damper based on the magnetorheological elastomer for active vibration isolation of nanotechnological equipment. *Engineering Journal: Science and Innovation. Electronic Science and Engineering Publication*, 2013, vol. 18, no. 6, 50. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-6-813
7. Vasco V. M., Grebenuyk S.M., Reshevskaya E. S. A determination of stress-strain state of elastomeric isolator. *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and Mathematical Sciences*, 2015, no. 3, pp. 36–41.
8. Raikher Yu. L., Stolbov O. V. Deformation of an ellipsoidal ferrogel sample in a uniform magnetic field. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 3, pp. 434–443.
9. *Guidelines for the design of vibration isolation of machines and equipment*. Moscow.: Stroyizdat, 1972, 160 p. (in Russian)
10. 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). *Aviation Materials and Technologies*, 2014, no. S3, pp. 17–24.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-05-10

Please cite this article in English as:

Koskov M. A., Stepanov G. V., Ivanov A. S. Damper made of elastomer filled with soft magnetic powder. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4., pp. 5–10. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-05-10