

DOI: 10.18287/2409-4579-2018-4-1-36-40

УДК 62-752.2, 62-752.6

А.М. Базиненков,  
И.В. Макеев,  
А.П. Ротарь,  
Д.А. Иванова,  
В.П. Михайлов

ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская улица, 5, стр.1,  
г. Москва, Российская Федерация,  
105005  
ambazinenkov@bmmstu.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАТФОРМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ

*Для уменьшения воздействия внешних вибрационных возмущений применяются различные способы вибрационной защиты, в числе которых системы активной, полуактивной и пассивной виброизоляции. Для виброизоляции современного прецизионного оборудования предлагается применять платформу виброизоляции на основе магнитоэологических эластомеров. Исследования частотной характеристики данной платформы и возможности управления ею являются необходимыми для определения эффективных режимов работы платформы. При помощи вибрационных испытаний на электродинамической установке была получена зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений от частоты колебаний при разных значениях управляющей силы тока, которая показала, что эффективным является диапазон виброизоляции от 38 до 100 Гц.*

**Ключевые слова:** *Магнитоэологический эластомер; вибрационная защита; полуактивная виброизоляция; демпфер; резонанс; вибрационные испытания; коэффициент передачи амплитуды виброперемещений*

### 1 Введение

В настоящее время применение любого прецизионного оборудования, особенно, нанотехнологического, связано с необходимостью его защиты от вибраций. Исследования показали, что в производственных и лабораторных помещениях вибрационные возмущения с наибольшими амплитудами в 200 мкм достигаются на низких частотах до 10 Гц [1]. Особенно опасны ударные возмущения, максимальные значения которых могут достигать очень больших величин.

### 2 Виброизоляция

Из существующих методов вибрационной защиты наиболее эффективным считается виброизоляция. Обычно различают три метода виброизоляции: пассивную, полуактивную и активную [2]. Сейчас активно применяются активные пьезоэлектрические системы виброизоляции, мировым лидером среди которых является фирма Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG (Германия). Однако данные системы обладают невысокой нагрузочной способностью, низким диапазоном

перемещений (способны изолировать от вибраций небольших амплитуд), а также практически не способны работать в пассивном режиме. Применение гибридных пневматических и пьезоэлектрических систем той же фирмы существенно повышает нагрузочную способность, однако не решает проблему пассивной виброизоляции и малого диапазона перемещений.

Существует платформа с магнитоэологическими призмами, достоинством платформы является то, что она способна выдерживать большую вертикальную нагрузку, чем исследуемая, за счёт компрессионного сжатия магнитоэологического эластомера (МРЭ) и большего количества демпфирующих элементов [3]. Многослойный МРЭ изолятор имеет в своей конструкции углеродные нанотрубки, которые уменьшают инертность системы и увеличивают устойчивость без значительного повышения ее жесткости, что позволяет нести большую вертикальную нагрузку, но для данной конструкции изучено поведение только при горизонтально направленных колебаний. [4]

Платформа виброизоляции на основе МРЭ, разработанная в лаборатории кафедры МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана, особенно

тем, что она способна совмещать в себе все три метода виброизоляции [5]. Целью работы было исследование амплитудно-частотных характеристик платформы виброизоляции в полуактивном режиме при различных величинах внешних магнитных полей для определения диапазона эффективной виброизоляции.

### 3 Платформа виброизоляции на основе МРЭ

Исследуемая платформа достаточно проста и дешева в изготовлении и обслуживании, содержит небольшое количество сложных механических и электрических элементов. Платформа состоит из четырех активных демпферов на основе мембран МРЭ и четырех узлов упругой подвески с квази нулевой жесткостью (рисунок 1).

В качестве рабочего тела в каждом демпфере (рисунок 2) используется магнитореологический эластомер – композитный материал на основе силикона и магнитомягких частиц микрометрового размера, которые при действии внешнего магнитного поля могут обратимо деформироваться и менять вязкоупругопластические свойства.

Исследуемая платформа является перспективной, благодаря совмещению в платформе трех видов виброизоляции. Она обеспечивает активную виброизоляцию за счет деформации эластомера, управляемой магнитным полем; полуактивную виброизоляцию – за счет управления вязкоупругопластическими свойствами эластомера; пассивную виброизоляцию – за счет упругой полимерной матрицы МРЭ и системы с квази нулевой жесткостью [6].

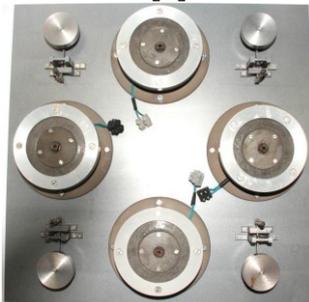


Рисунок 1. Общий вид платформы на основе МРЭ без верхней подвижной плиты

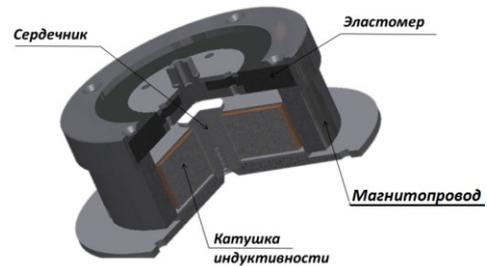


Рисунок 2. Демпфер на основе МРЭ

Изучив частотные характеристики платформы виброизоляции в полуактивном режиме, станет возможным разработать систему управления для работы платформы в режиме полуактивной и активной виброизоляции.

### 4 Испытания платформы. Определение частотных характеристик

Исследования по определению частотной характеристики исследуемой платформы проводились на вибрационной электродинамической установке SignalForce V26, на которую устанавливалась платформа (рисунок 3). С помощью двух акселерометров измерялись ускорения на основании платформы и в центре подвижной плиты. Эксперимент проводился в диапазоне частот от 15 до 100 Гц, при размахе вибрационных возмущений 250 мкм, при изменяющемся управляющем сигнале – силе тока, варьируемом в интервале от 0 до 0,8 А с шагом 0,05 А.

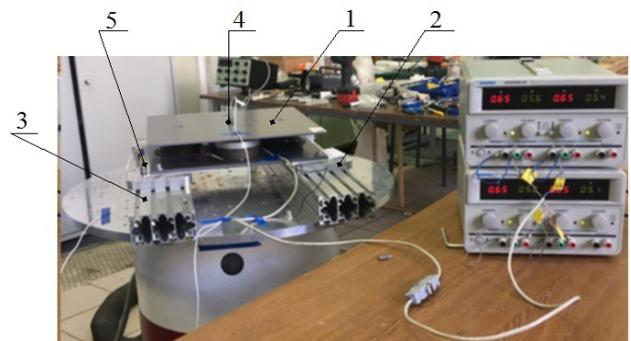


Рисунок 3. Экспериментальный стенд:  
1 – платформа, 2 – переходные пластины, 3 – алюминиевые пластины, 4 – датчик на объекте, 5 – датчик на основании

Отношение полученных ускорений на основании платформы и на его подвижной части является коэффициентом передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ). В ходе обработки результатов был построен график зависимости КПАВ от частот подаваемых на основание платформы (рисунок 4).

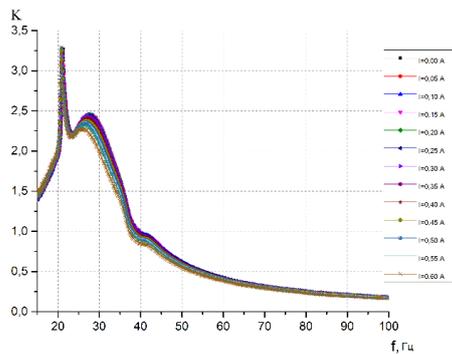


Рисунок 4. Зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений (К) от частоты возмущений (f)

На рисунке видны две резонансные частоты: в области частот, равных 21 и 27 Гц. Эти резонансные частоты могут являться следствием неточностей сборки, приводящих к возмущениям внутри платформы. Эффективная виброизоляция в полуактивном режиме наблюдается начиная с частоты возмущений 38 Гц, где значение КПАВ меньше единицы.

Сравнивая графики для различных значений управляющей силы тока, видно, что увеличение силы тока, напрямую связанное с увеличением магнитного поля, воздействующего на МРЭ, смещает частоты резонансов в область более низких частот.

Относительно предыдущих испытаний демпферов [7] резонансы системы в целом сместились в область низких частот, предположительно за счет значительного увеличения массы платформы по сравнению с массой одного демпфера.

При сравнении двух графиков при максимальной силе тока 0,8 А и при отсутствии тока получено, что коэффициент передачи амплитуды виброперемещений первого резонанса при увеличении тока увеличивается

на 10%, второго резонанса - уменьшается на 10%.

## 5 Заключение

Проведенный эксперимент по исследованию АЧХ платформы позволил оценить диапазон эффективной виброизоляции платформы в полуактивном режиме: от 38 до 100 Гц. При увеличении частоты колебаний влияние управляющего тока на КПАВ не значительно.

КПАВ первого резонанса с увеличением управляющего тока увеличивается максимум в 1,02 раза, для второго резонанса уменьшается максимум в 1,08 раза. Изменение КПАВ нельзя назвать значительным.

Увеличение управляющего тока позволяет несколько сместить оба резонанса в область более низких частот, однако величины в единицы герц на данных частотах недостаточно для эффективной работы платформы.

Следующим этапом работы будет изучение причин появления дополнительных резонансных частот и методы их устранения, а также программирование автоматизированной системы управления активным режимом виброизоляции.

## 6 Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность кафедре РК-5 «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана и, особенно, доц. Киселеву И.А., за помощь, оказанную в проведении исследований и предоставленную экспериментальную базу.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, базовая часть Государственного задания № 9.8503.2017/БП в сфере научной деятельности.

### Список использованных источников

[1] Гордеев Б. А. Повышение качества поверки средств измерения механических величин / Б. А. Гордеев, К. В. Голубева // Приволжский научный журнал. – Нижний Новгород: ГОУ ВПО ННГАСУ. – 2010. – № 2. – С. 61 – 67.

[2] Асташев В. К. Защита от вибрации и ударов / В. К. Асташев [и др.] // Вибрации в технике: Справочник; [под ред. В. Н. Челомея]. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. – 456 с.

[3] Ginder J. M. “Magnetorheological elastomers: properties and applications” / J. M. Ginder, M. E. Nichols, L. D. Elie, J. L. Tardiff // Proc. SPIE 3675, Smart Structures and Materials 1999: Smart Materials Technologies. – 12 July 1999. – Vol. 3575. – 8 p.; DOI:10.1117/12.352787.

[4] Li W. H. Magnetorheological Elastomers and Their Applications / Li W. H., Zhang X. Z., Du H. // Advances in Elastomers I. Advanced Structured Materials Visakh P. (ed.), Thomas S. (ed.), Chandra A. (ed.),

Mathew A. (ed.), Springer, Berlin, Heidelberg. – 2013. – Vol 11. – P. 357-375.

[5] Mikhailov V. P. A Vibration-Control Platform on the Basis of Magnetorheological Elastomers / V. P. Mikhailov, A. M. Bazinenkov // Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Vol. 59. – № 1. – P. 131-135.

[6] Алабужев П. М. Виброзащитные системы с квазиулевым жесткостью / П. М. Алабужев, А. А. Гритчин, Л. И. Ким, Г. С. Мигиренко, В. Ф. Хон, П. Т. Степанов. – М.: Машиностроение, 1986. – 96 с.

[7] Иванова Д. А. Исследование влияния управляющего сигнала силы тока на амплитудно-частотную характеристику демпферов на основе магнитореологических эластомеров / Д. А. Иванова, А. П. Ротарь, И. В. Макеев // Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая весна: Машиностроительные технологии. – М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 3-6 апреля 2018. – С. 431-433.

## DETERMINATION OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF A MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS VIBRATION CONTROL PLATFORM

Alexey M. Bazinenkov,  
Ivan V. Makeev,  
Anastasia P. Rotari,  
Darya A. Ivanova,  
Valeriy P. Mikhailov

Bauman Moscow State Technical  
University (National Research  
University),  
Moscow, Russian Federation,  
105005  
ambazinenkov@bmstu.ru

*To reduce the effects of external vibration disturbances, various methods of vibration protection are used, including active, semi-active and passive vibration isolation systems. For vibration isolation of modern precision equipment, it is proposed to use a plate-like vibration isolation based on magnetorheological elastomers. Studies of the frequency characteristics of this platform and its management capabilities are necessary to determine the effective modes of operation of the platform. Thanks to the tests on the vibration electrodynamic installation, the dependence of the coefficient of transfer of the amplitude of vibration displacement on the oscillation frequency at different currents was obtained and showed that the effective range of vibration isolation is from 38 to 100 Hz.*

**Key words:** Magnetorheological elastomer; vibration protection; semi-active vibration control; damper; resonance; vibration tests; vibration amplitude transmission coefficient

## References

- [1] Gordeev, B.A. and Golubeva, K.V. (2012), "Improving the quality of verification of metrological equipment for mechanical value" ["Povyshenie kachestva poverki sredstv izmereniya mekhanicheskikh velichin" Privolzhskij nauchnyj zhurnal], *Privolzhskij Science Magazine*, Nizhny Novgorod, Russia, vol. 2, pp. 61 – 67.
- [2] Astashev, V.K. (1981), "Protection against vibration and shock" [Zashchita ot vibratsii i udarov], in Chelomey, V.N. (ed.), *Vibrations in Technology*, [Vibratsii v tekhnike], Mashinostroenie, Moscow, Russia, vol. 6, 456 p.
- [3] Ginder, J.M., Nichols, M.E., Elie, L.D. and Tardiff, J.L. (1999), Magnetorheological elastomers: properties and applications, *Smart Structures and Materials 1999: Smart Materials Technologies*, Newport Beach, CA, US, 12 July 1999, vol. 3675, 8 p.
- [4] Li, W.H., Zhang, X.Z. and Du, H. (2013), *Magnetorheological Elastomers and Their Applications*, in: Visakh P. (ed.), Thomas S. (ed.), Chandra A. (ed.), Mathew A. (ed.), *Advances in Elastomers I. Advanced Structured Materials*, Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 11, pp. 357-374.
- [5] Mikhailov, V.P. and Bazinenkov, A.M. (2016), "Vibration-Control Platform on the Basis of Magnetorheological Elastomers", *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 59, no. 1, pp. 131-135.
- [6] Alabuzhev, P.M., Gritchin, A.A., Kim, L.I., Khon, V.F. and Stepanov, P.T. (1986), "Vibration protecting and measuring systems with quasi-zero stiffness" [Vibro-zashchitnye sistemy s kvazinulevoj zhestkost'yu], Mashinostroenie, Moscow, Russia, 96 p.
- [7] Ivanova, D.A., Rotar, A.P. and Makeev, I.V. (2018), "Investigation of the effect of the current control signal on the amplitude-frequency characteristic of dampers based on magnetorheological elastomers" [Issledovanie vliyaniya upravlyayushchego signala sily toka na amplitudno-chastotnyuyu harakteristiku dempferov na osnove magnitoreologicheskikh ehlastomerov], *Russian Scientific and Technical Conference of Students "Student Spring": Mechanical Engineering* [Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov "Studencheskaya vesna": Mashinostroitel'nye tekhnologii], BMSTU, Moscow, Russia, 3-6 April, 2018, 431-433 p.