

# Исследование частотных характеристик актюаторов на основе магнитореологических эластомеров платформы активной виброизоляции для прецизионного вакуумного оборудования

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

ambazinenkov@bmstu.ru

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-ая Бауманская ул, д.5, стр.1

*Современное вакуумное исследовательское и технологическое оборудование чаще всего не может корректно функционировать без системы вибрационной защиты. Перспективным материалом для систем виброизоляции является магнитореологический эластомер (МРЭ).*

*В работе описаны экспериментальные исследования частотных характеристик магнитореологических демпферов, входящих в состав платформы активной виброизоляции прецизионного вакуумного исследовательского и технологического оборудования. Для каждого из четырех МРЭ демпферов платформы проводились вибрационные испытания в диапазоне частот от 15 до 200 Гц с постоянной амплитудой виброперемещений. Получены зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений от частоты для каждого из четырех демпферов при различных значениях управляющего тока на катушке индуктивности демпфера, а также графики изменения резонансных частот и КПАВ в зависимости от управляющего сигнала.*

***Investigation of amplitude-frequency characteristics of magneto-rheological elastomer actuators of an active vibration control platform for precision vacuum equipment. A.M.Bazinenkov, I.V. Makeev, D.A. Ivanova, A.P. Rotari. Modern vacuum research and technological equipment can not function correctly without a vibration protection system. A promising material for vibration protection systems is the magneto-rheological elastomer (MRE).***

*The paper describes experimental research of the amplitude-frequency characteristics of magneto-rheological dampers of the active vibration control platform of precision vacuum research and technological equipment. For each of the four platform MRE dampers, vibration tests were performed in the frequency range from 15 to 200 Hz with a constant amplitude of external vibrations. Graphs of the vibration amplitude transfer coefficient (VATC) on the frequency for each damper are obtained for different values of the control current on the damper control coil, as well as the graphs of the resonance frequency and the VATC depending on the control current signal.*

Широко известно, что вибрационная защита широко применяется в прецизионном исследовательском и технологическом оборудовании, работающем при атмосферном давлении и в условиях высокого вакуума. Наиболее эффективным методом

вибрационной защиты считается виброизоляция [2]. Оборудование может подвергаться вибрационным возмущениям с амплитудой до 200 мкм на низких частотах [1].

Работа посвящена исследованию платформы активной виброизоляции на основе магнитореологических (МР) эластомеров (МРЭ). Платформа состоит из четырех активных демпферов (актюаторов) на основе мембран МРЭ и четырех узлов упругой подвески с квазинулевой жесткостью [3,8].

Особенностью актюаторов платформы является использование в качестве рабочего тела упругой мембраны из МРЭ. Эластомер является «смарт материалом» и способен изменять свои упруговязкопластичные свойства под действием внешнего магнитного поля [4], тем самым, задавая режим работы платформы.

Ранее показано [3], что использование МР эффекта позволяет регулировать в том числе коэффициент жесткости упругой мембраны за счет изменения величины магнитной индукции и, соответственно, частотные характеристики активного демпфера. Благодаря этому можно добиться смещения резонансной частоты демпфера и снижения коэффициента передачи амплитуды виброперемещений. Это позволит настраивать платформу на работу в обусловленном конкретными внешними условиями диапазоне частот. Для оценки эффективности работы актюаторов были проведены вибрационные испытания каждого из четырех демпферов платформы в наиболее распространенном диапазоне частот для помещения расположенного в городской среде – от 15 до 200 Гц [1].

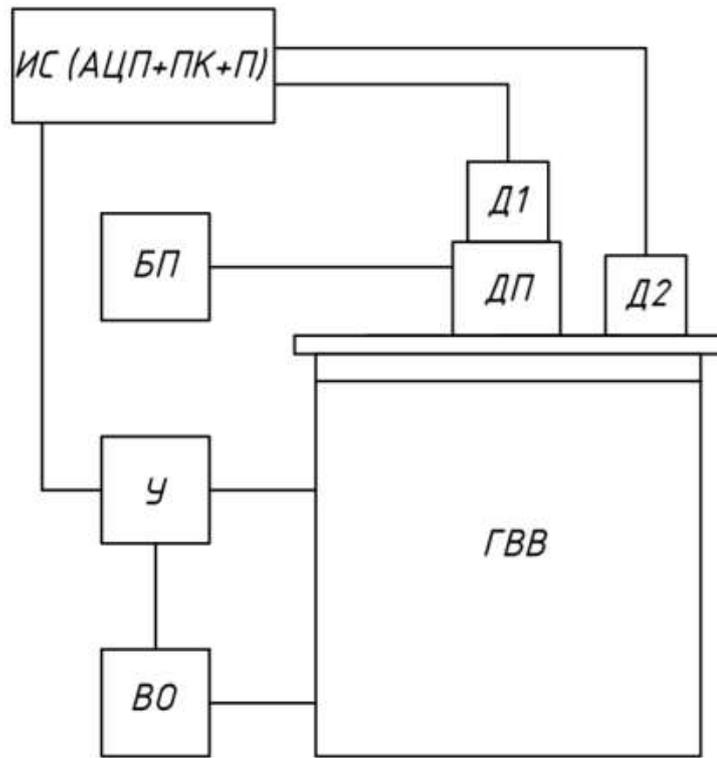
Измерения проводились на однокоординатном электродинамическом стенде для вибрационных испытаний SignlForce V400LT (DataPhysics, Великобритания). Демпфер устанавливался и жестко закреплялся на рабочем столе стенда при помощи штифтов и болтов. Контроль виброускорений основания и подвижного фланца производился при помощи аналоговых акселерометров (рис. 3). В ходе экспериментов САУ стенда поддерживало постоянную амплитуду виброперемещений 125 мкм. Блок-схема проведения эксперимента представлена на рис. 1.

Фотография экспериментального стенда представлена на рис. 2.

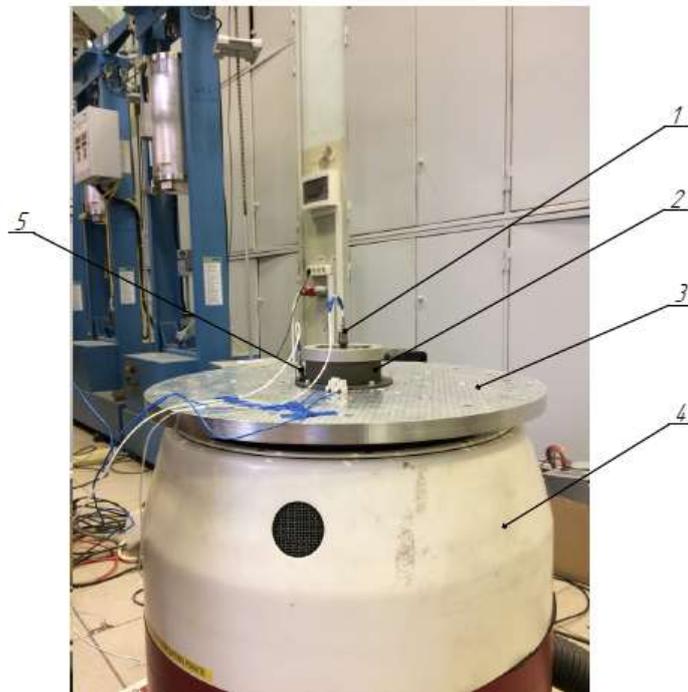
В результате были получены экспериментальные значения виброперемещения для выбранного диапазона частот от 15 до 200 Гц. Обработка данных производилась численно с использованием САПР. Полученные графики зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) от частоты для каждого из четырех демпферов представлены на рис. 3.

На графиках видно смещение резонансной частоты каждого демпфера в область более низких частот в зависимости от управляющего тока на катушке и, соответственно, от внешнего магнитного поля, приложенного к МРЭ актюаторов. Кроме того, происходит снижение КПАВ.

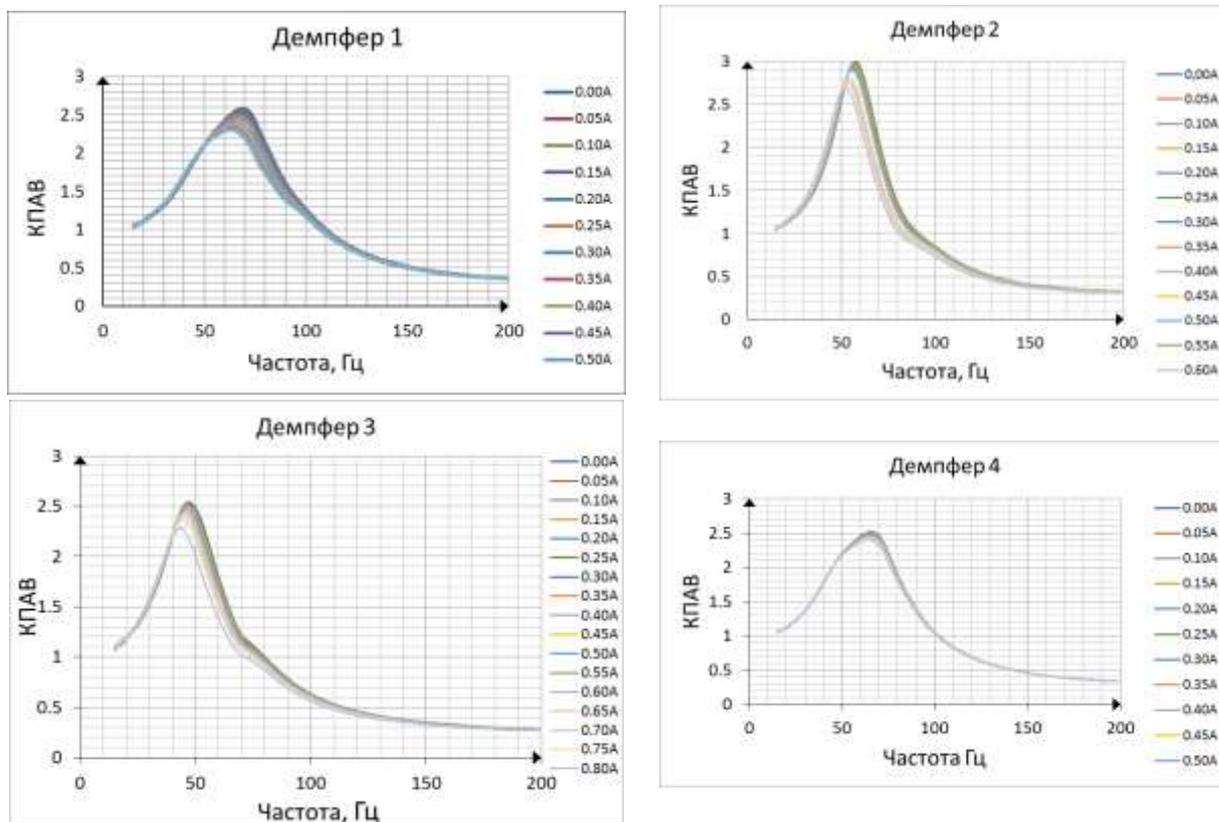
Для определения масштабов изменения параметров АЧХ актюаторов, используя полученные экспериментальные данные, построены графики изменения КПАВ от управляющего тока (рис. 4) и графики изменения резонансной частоты от управляющего тока (рис. 5).



**Рис. 1.** Блок-схема проведения эксперимента: ПК – персональный компьютер, БП – двухканальный лабораторный блок питания Mastech, ГВВ – генератор вибрационных возмущений, вибрационная электродинамическая установка (DataPhysics Vibrator V300), Д1 и Д2 – акселерометры, ДП – МР демпфер.

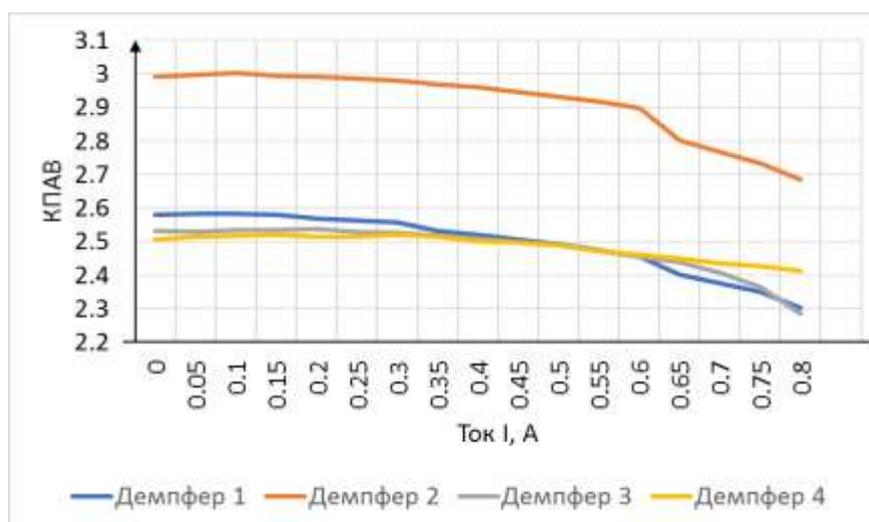


**Рис. 2.** Экспериментальный стенд: 1 – акселерометр, 2 – МР демпфер, 3 – стол станда, 4 – вибрационный стенд, 5 – акселерометр.

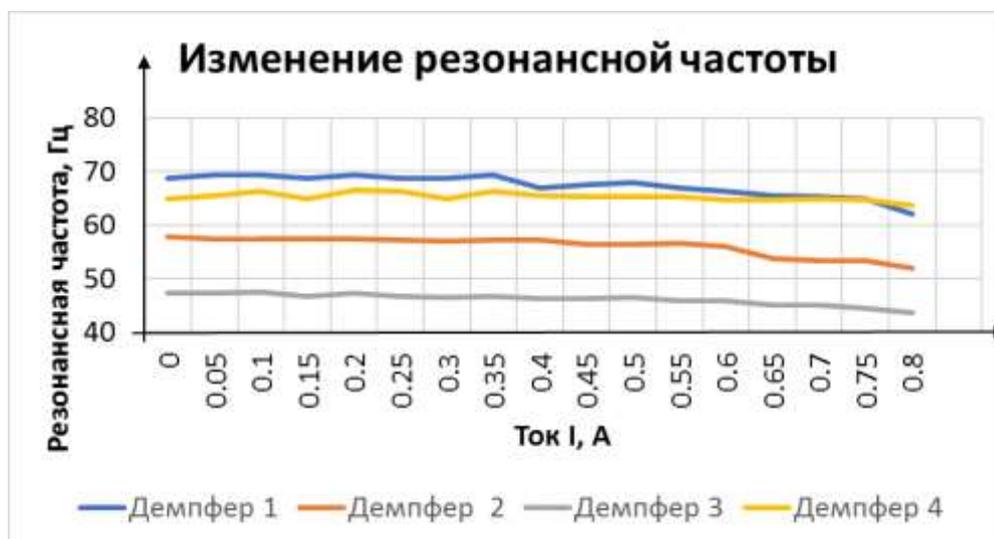


**Рис. 3.** Графики зависимости КПАВ демпферов от частоты внешних колебаний.

На графиках видно незначительное снижение КПАВ при повышении управляющего тока и незначительное смещение резонансной частоты актюаторов в область низких частот. Эти явления могут быть следствием МР эффекта в эластомере при приложении к нему магнитного поля. Частицы МРЭ смещаются из своего начального положения, стремясь выстроиться по направлению силовых линий приложенного поля, и тем самым, вызывают изменение реологических свойств МРЭ.



**Рис. 4.** График изменения КПАВ в зависимости от управляющего тока на резонансных частотах.



**Рис. 5.** График изменения резонансных частот в зависимости от управляющего тока.

Однако, в полимере возникает поле радиального направления, что не приводит к значительному изменению его характеристик и для эффективной работы актюаторов и всей платформы необходимо обеспечить их работу в активном режиме виброизоляции.

### Заключение

Проведенные в работе исследования актюаторов платформы активной виброизоляции в полуактивном режиме работы резонансная частота каждого актюатора смещается в сторону более низких частот с увеличением управляющего сигнала, поданного на катушку. Для каждого из четырех демпферов смещение резонансной частоты соответственно составляет -7,33; -5,83; -3,7 и -2,97 Гц соответственно. КПАВ при резонансе уменьшается с увеличением управляющего тока, поданного на катушку для каждого демпфера соответственно в 1,122; 1,117; 1,11 и 1,045 раза. Актюаторы обеспечивают эффективную виброизоляцию в диапазоне частот от 100 до 200 Гц, но управляющий ток с увеличением частоты оказывает все меньшее влияние. Кроме того, можно видеть, что форма резонансных пиков у демпферов попарно отличается, это может быть обусловлено неоднородностью состава эластомеров разных актюаторов. Обеспечение эффективной виброизоляции в диапазоне частот до 100 Гц возможно только при работе актюаторов и платформы в режиме активной виброизоляции.

### Литература

1. Голубева К.В. Повышение качества поверки геодезического оборудования в метрологических лабораториях: дисс. ... канд. техн. наук. Москва. 2012. 131 с.
2. Защита от вибрации и ударов // Вибрации в технике: Справочник (в 6 томах) Под ред. К.В. Фролова. Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т.6. 456 с.

3. 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. – pp. 131-135.
4. Степанов Г.В., Крамаренко Е.Ю., Перов Н.С., Семисалова А.С., Борин Д.Ю., Богданов В.В., Семеренко Д.А., Бахтияров А.В., Свиридова Л.Д., Стороженко П.А. Магнитоактивный полимер с магнитотвёрдым наполнителем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 4. – С. 106-137.
5. Ginder John M., Nichols Mark E., Elie Larry D., Tardiff Janice L., Magnetorheological elastomers: properties and applications, Proc. SPIE 3675, Smart Structures and Materials 1999: Smart Materials Technologies, (12 July 1999); DOI:10.1117/12.352787.
6. Li W.H., Zhang X.Z., Du H. (2013) Magnetorheological Elastomers and Their Applications. In: Visakh P., Thomas S., Chandra A., Mathew A. (eds) Advances in Elastomers I. Advanced Structured Materials, vol 11. Springer, Berlin, Heidelberg.
7. Виброзащитные системы с квази нулевой жесткостью Под ред. К.М. Рагульска. – Л.: Машиностроение, 1986. – 96 с.
8. Иванова Д.А., Ротарь А.П., Макеев И.В. Исследование влияния управляющего сигнала силы тока на амплитудно-частотную характеристику демпферов на основе магнитореологических эластомеров // Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая весна: Машиностроительные технологии. – 2018.