

СИСТЕМА АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ВЫСОКОВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.П. Михайлов, А.А. Копылов, А.В. Казаков

АННОТАЦИЯ

Дано описание системы активной виброизоляции на основе магнито реологических (МР) эластомеров для прецизионного высоковакуумного оборудования. Представлены результаты экспериментальных исследований системы активной виброизоляции и определены коэффициенты передачи амплитуды виброперемещений в низкочастотном диапазоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СИСТЕМА АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ, ВЫСОКОВАКУУМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛАСТОМЕР, ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ АМПЛИТУДЫ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEM FOR PRECISION HIGH VACUUM EQUIPMENT

V. P. Mikhailov, A. A. Kopylov, A.V. Kazakov

ANSTRACT

A description of an active vibration isolation system based on magnetorheological (MR) elastomers for precision high-vacuum equipment is given. The results of experimental studies of the active vibration isolation system are presented and the transmission coefficients of the amplitude of vibration displacements in the low-frequency range are determined.

KEYWORDS

ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEM, HIGH VACUUM EQUIPMENT, MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMER, CLOSED-LOOP CONTROL SYSTEM, TRANSMISSION COEFFICIENT OF VIBRATION DISPLACEMENT AMPLITUDE

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие нанотехнологий и разработка современного прецизионного высоковакуумного технологического и аналитического оборудования (оборудования для микро- и нанолитографии, прецизионной обработки электронными и ионными пучками, электронных микроскопов, сканирующих зондовых микроскопов и др.) приводит к необходимости его защиты от внешних вибраций. В настоящее время применяются различные типы виброзащитных систем (пружинных, резиновых, пневматических, гидравлических, пьезоэлектрических и др.) которые подразделяются на пассивные и активные [1-3]. Пассивные системы эффективно защищают от вибраций при частотах более 50 Гц. При этом, в низкочастотной области от 0,3 до 50 Гц такие системы малоэффективны, так как не могут скомпенсировать резонансные явления, определяемые конструкцией защищаемого оборудования. Для виброзащиты в низкочастотном диапазоне применяют активные системы, использующие энергию дополнительного источника и работающие, как правило, в противофазе к возмущающим вибрационным воздействиям. Наибольшей эффективностью

обладают современные системы, объединяющие в себе пассивную и активную виброизоляцию [4-12] и работающие в широком диапазоне частот от 0,3 до 100 Гц и более. Представленная работа является продолжением исследований авторов, ранее описанных в ряде статей [13-15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Экспериментальный стенд для исследования системы активной виброизоляции представляет собой платформу, содержащую следующие элементы: две плиты, между которыми располагаются четыре узла упругой подвески квазиулевого жёсткости с массовыми корректорами и четыре активных демпфера на основе магнитоэологических (МР) эластомеров [10-15]. Общий вид стенда показан на рис. 1, а схема на рис. 2.

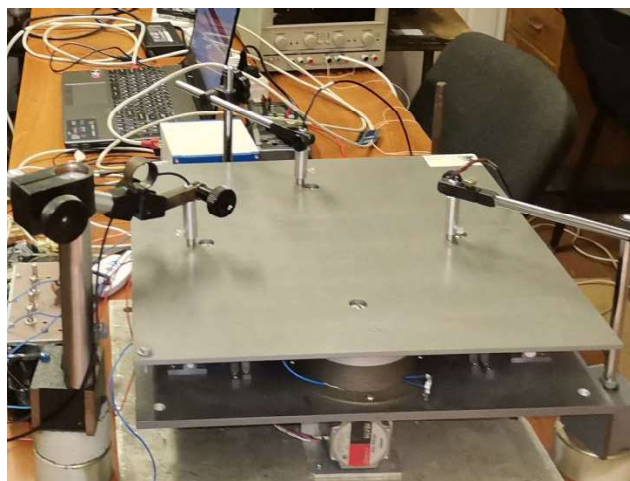
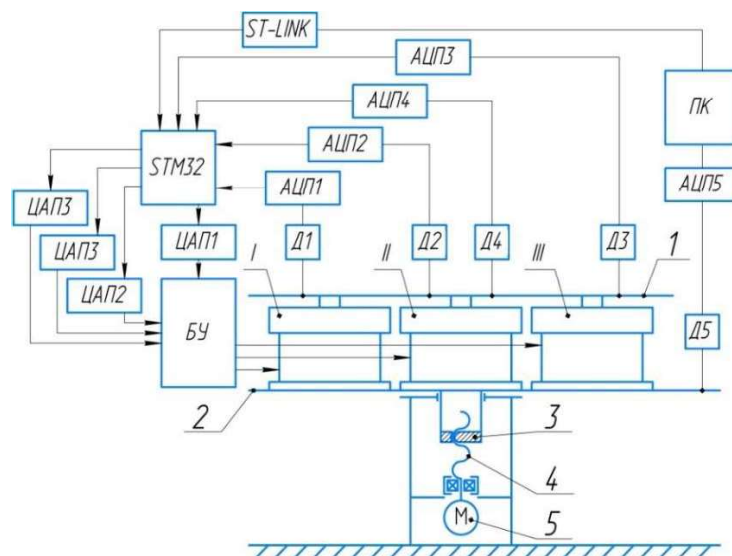


Рис. 1. Общий вид стенда с установленными датчиками



I, II, III – активные демпферы, IV демпфер не показан; 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – гайка с толкателем; 4 – винт ходовой; 5 – шаговый двигатель; БУ – блок усилителей; Д1, Д2, Д3, Д4, Д5 – датчики емкостные; ПК – персональный компьютер; ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3, ЦАП4 – цифро-аналоговые преобразователи микроконтроллера; АЦП1, АЦП2, АЦП3, АЦП4 – аналогово-

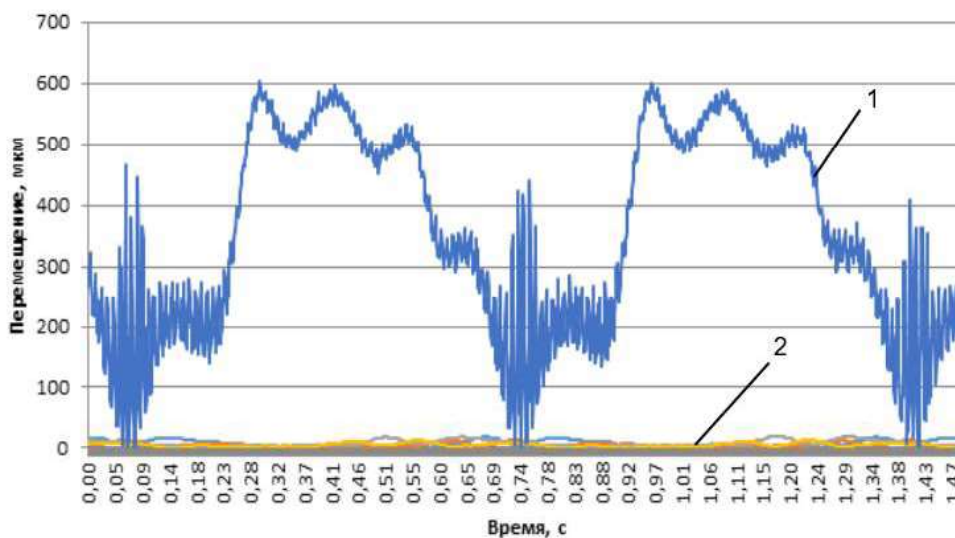
цифровые преобразователи микроконтроллера; АЦП5 – аналогово-цифровой преобразователь ПК;
ST-LINK – программатор; STM32 – микроконтроллер

Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования системы активной виброизоляции с управлением на основе микроконтроллера STM32

В состав замкнутой системы автоматического управления платформы активной виброизоляции входит микроконтроллер на отладочной плате, усилитель, 4-х канальный АЦП и делитель напряжения для чтения показаний каждого датчика перемещения, 4-х канальный ЦАП для передачи аналогового сигнала на усилитель, дисплей для вывода отладочной информации. САУ обеспечивает обработку показаний каждого из четырех емкостных датчиков перемещения, а также выдачу управляющего сигнала, передаваемого на усилитель и затем поступающего в катушку соответствующего активного демпфера, располагаемого под соответствующим датчиком, тем самым создавая необходимое противофазное колебание. Для оценки эффективности работы платформы активной виброизоляции используются показания с емкостных датчиков Д1-Д4, передаваемые на персональный компьютер и сравниваемые с показаниями датчика Д5 установленного на основании платформы. Данные с датчиков записываются в файл и обрабатываются по заданному алгоритму. Используемое оборудование: датчики перемещения емкостные с контроллером датчиков DL6220/ECL2; блок усилителей; блок АЦП/ЦАП USB-6009; регулируемый источник постоянного тока Gratten APS3005S-3D; генератор сигналов Rigol DG1022; микроконтроллер STM32F407VET6 на отладочной плате; персональный компьютер ПК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены эксперименты в диапазоне частот от 0,3 до 100 Гц, при максимальной амплитуде вибрационных перемещений до 300 мкм. На рис. 3 представлен график зависимости перемещения от времени для платформы активной виброизоляции на частоте 1,5 Гц, демонстрирующий снижение амплитуды вибрации с 300 до 10–15 мкм.



1 - сигнал с датчика Д5 (без активной виброизоляции); 2 – сигналы с датчиков Д1, Д2, Д3, Д4
Рис. 3. График зависимости перемещения от времени для платформы активной виброизоляции на частоте 1,5 Гц

Для всего диапазона частот рассчитаны коэффициенты передачи амплитуд виброперемещений (КПАВ), как отношение средней амплитуды перемещения с датчиков Д1, Д2, Д3, Д4 к амплитуде перемещения с датчика Д5. Результаты расчётов приведены на рис. 4 (пунктирной линией показана зависимость КПАВ от частоты с базовой настройкой пассивной виброизоляции).

На рис. 4 видна резонансная частота платформы активной виброизоляции с базовой настройкой пассивной виброизоляции, равная 43 Гц. Зона наибольшей эффективности работы платформы в активном режиме располагается в области частот от 0,3 до 36 Гц и от 58 до 100 Гц, где значение КПАВ меньше 0,6.

Для снижения КПАВ в области выявленных резонансных частот была проведена перенастройка системы пассивной виброизоляции, после чего повторно проведены эксперименты в диапазоне частот от 0,3 до 100 Гц, с максимальной амплитудой вибрационных возмущений до 300 мкм (на рис. 4 сплошной линией показана зависимость КПАВ от частоты с перенастроенной пассивной системой виброизоляции).

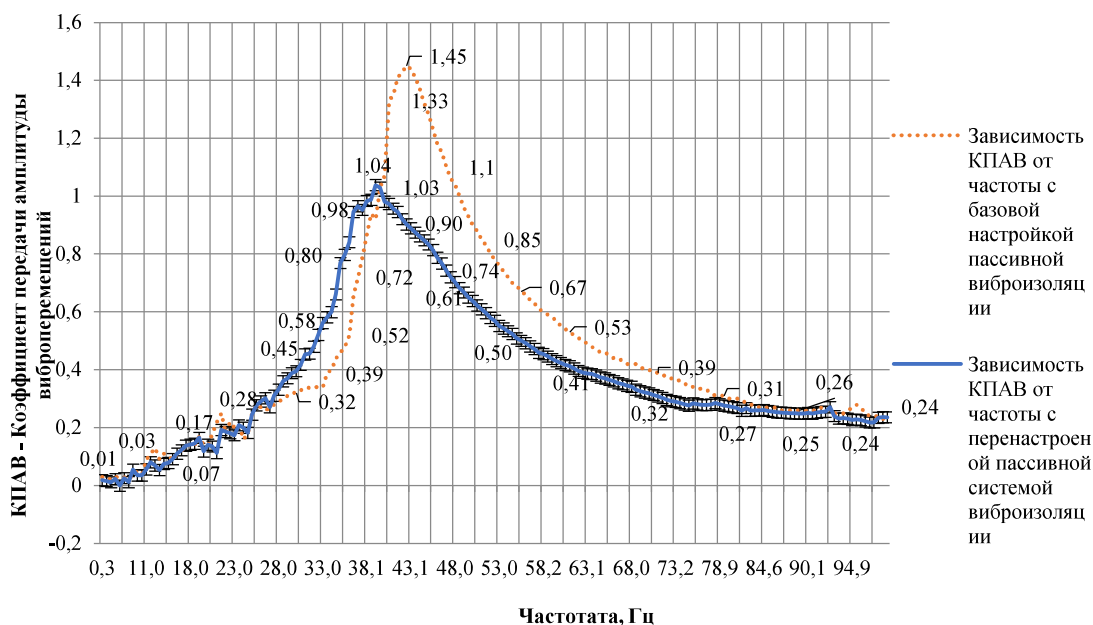


Рис. 4. График зависимости КПАВ от частоты внешних возмущений для базовой настройки пассивной виброизоляции (пунктирная линия) и перенастроенной пассивной системы (сплошная линия) для замкнутой САУ на основе микроконтроллера STM32

График на рис. 4 демонстрирует заметное смещение резонансной частоты платформы активной виброизоляции от 43 до 40 Гц, в результате чего при более низких частотах происходит повышение эффективности работы платформы активной виброизоляции, при этом максимальная величина КПАВ снижается с 1,45 до 1,04.

Полученные результаты показывают, что платформа активной виброизоляции с замкнутой системой управления на основе микроконтроллера STM32 способна эффективно уменьшать амплитуду виброперемещений в диапазоне опасных для высокочувствительного технологического и аналитического оборудования частот 0,3-33 Гц и от 51-100 Гц с КПАВ менее 0,6. При этом в диапазоне частот от 0,3-10 Гц КПАВ составляет величину 0,01-0,1.

ВЫВОДЫ

Система, объединяющая пассивную и активную виброизоляцию, в частности, пассивную систему квазиулевого жёсткости на основе упругой подвески с массовыми корректорами и активную систему на основе МР эластомеров с замкнутой системой управления на основе микроконтроллера, эффективно уменьшает амплитуду виброперемещений в диапазоне опасных для прецизионного высоковакуумного технологического и аналитического оборудования частот 0,3–33 Гц и от 51–100 Гц с КПАВ менее 0,6. При этом в диапазоне частот от 0,3–10 Гц КПАВ составляет величину 0,01–0,1.

Пассивная система виброизоляции на основе упругой подвески квазиулевого жёсткости с массовыми корректорами позволяет регулировать резонансную частоту платформы активной виброизоляции, в частности смещать её от 43 до 40 Гц, в результате чего при более низких частотах происходит повышение эффективности работы платформы активной виброизоляции, при этом максимальная величина КПАВ снижается с 1,45 до 1,04.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Wigglesworth, S. Jordan. *Semicond. Int.*, 2009, 32, 10, pp 4–26
2. Böse Holger Würzburg, Röder Rene Grossenlupnitz. US Patent No. 20080318045 A1. Appl. No. 11/574397, 25.08.2005, Date of Patent 27.08.2004
3. Yu. K. Gruzevich, V. A. Soldatenkov, V. M. Achil'diev, A. D. Levkovich, A. N. Bedro, M. N. Komarova, and I.V.Voronin. *Journal of Optical Technology*. Vol. 85, Issue 5, pp 308-313 (2018) <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000308>
4. Active Vibration Isolation. Accurion. <http://www accurion.com>.
5. Ovchinnikov I., Brancevich P. 2017 *Procedia Engineering*. 176, pp 610-617 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.304
6. Krestnikovskiy K.V., Panovko G.Ya., Shokhin A.E. 2016 *Vibroengineering Procedia*. 8, pp 208-212
7. Panovko G., Shokhin A., Eremeykin S. 2016 *Vibroengineering Procedia*. 8, pp 174-178 (in Russian)
8. Chernikov, S.A. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. (2015) 44: 439. <https://doi.org/10.3103/S1052618815050052>
9. Micro-Epsilon capaNCDT 6200 // URL: <https://www.microepsilon.com/download/manuals/man--capaNCDT-6200--en.pdf> (дата обращения: 16.05.2019)
10. Borin D.Y., Bergmann C., Odenbach S. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. T. 497. P. 165959
11. Zubarev A., Chirikov D., Borin D. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. T. 498. P. 166129
12. Zubarev A., Chirikov D., Stepanov G., Borin D., Lopez-Lopez M.T. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2018. T. 498. pp 86-95
13. V.P. Mikhailov, A.M. Bazinenkov, A.V. Kazakov, A.P. Rotar' and D.A. Ivanova. Active vibration isolation of high-vacuum nanotechnology equipment // *Journal of Physics: Conf. Series* 1313 (2019) 012041 doi: 10.1088/1742-6596/1313/1/012041
14. V.P. Mikhailov, A.M. Bazinenkov and A.V. Kazakov. Active vibration isolation of nanotechnology equipment // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 709 (2020) 044046 doi:10.1088/1757-899X/709/4/044046

15. В.П. Михайлов, А.А. Копылов. Исследование платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования // Наноиндустрия. 2022. Т. 15, № 3-4. С. 232–240. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.232.238>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В.П. Михайлов – доктор технических наук, профессор кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: mikhailov@bmstu.ru

А.А. Копылов – аспирант кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: wertyoz@bk.ru

А.В. Казаков – аспирант кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: kazalexander@mail.ru