



Получено: 25.04.2022 г. | Принято: 30.04.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.232.238>

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.П.Михайлов¹, д.т.н., проф., ORCID: 0000-0003-3638-7932 / mikhailov@bmstu.ru
А.А.Копылов¹, аспирант, ORCID: 0000-0001-5528-6518

Аннотация. Дано описание платформы, содержащей демпфера на основе магнитореологического (МР) эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования. Представлены результаты экспериментальных исследований активного демпфера и определены коэффициенты передачи амплитуды виброперемещений в низкочастотном диапазоне.

Ключевые слова: магнитореологический эластомер, виброизоляция, активная и пассивная виброизоляция, демпфер, коэффициент передачи амплитуды виброперемещений

Для цитирования: В.П. Михайлов, А.А. Копылов. Исследование платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 3–4. С. 232–238. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.232.238>

Received: 25.04.2022 | Accepted: 30.04.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.232.238>

Original paper

RESEARCH OF THE PLATFORM FOR ACTIVE VIBRATION ISOLATION OF THE NANOTECHNOLOGICAL EQUIPMENT

V.P.Mikhailov¹, Doct. of Sci. (Tech), Prof., ORCID: 0000-0003-3638-7932 / mikhailov@bmstu.ru
A.A.Kopylov¹, Post-graduate, ORCID: 0000-0001-5528-6518

Abstract. The platform containing dampers based on a magnetorheological (MR) elastomer applied for active vibration isolation of nanotechnological equipment is described. The results of experimental studies of an active damper are presented and amplitude transmission coefficients of vibration displacements in the low-frequency range are determined.

Keywords: magnetorheological elastomer, vibration isolation, active and passive vibration isolation, damper, vibration amplitude transfer coefficient

For citation: V.P. Mikhailov, A.A. Kopylov. Research of platform for active vibration isolation of nanotechnological equipment. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 3–4. PP. 232–238. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.232.238>

ВВЕДЕНИЕ

Для защиты нанотехнологического оборудования (оборудования для микро- и нанолитографии, электронных микроскопов, сканирующих

зондовых микроскопов и др.) от внешних вибрационных возмущений применяются различные типы виброизолирующих систем (пневматических, гидравлических, пьезоэлектрических и др.),

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия / Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

которые подразделяются на пассивные и активные [1-3].

Пассивные системы эффективно подавляют вибрации при частотах более 50 Гц, при этом в низкочастотной области такие системы малоэффективны, так как не могут скомпенсировать резонансные явления. Для виброизоляции в низкочастотном диапазоне применяют системы активной виброизоляции, использующие энергию дополнительного источника. Наибольшей эффективностью обладают современные системы, объединяющие в себе активную и пассивную виброизоляцию [4-9].

ОПИСАНИЕ ПЛАТФОРМЫ И ДЕМПФЕРА ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ С ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Платформа для активной виброизоляции (рис.1) представляет собой две плиты, между которыми располагаются четыре узла пассивной системы квазиузеловой жесткости на основе упругой подвески с массовыми корректорами и четыре активных демпфера на основе магнитоэологического (МР) эластомера [10-14].

Для проведения исследований активного демпфера был собран стенд, общий вид которого показан на рис.2, а схема на рис.3. Активный демпфер I (рис.3) содержит жесткий центр 1, мембрану 2 из МР эластомера, корпус 3, электромагнитную катушку 4, сердечник 5, основание демпфера 6.

Активный демпфер (поз. 1 на рис.3) работает следующим образом. При подаче управляющего тока в электромагнитную катушку 4 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. Между сердечником 5 и мембраной 2 из МР эластомера формируется осевое магнитное поле с заданной индукцией. Под действием магнитной индукции мембрана 2 из МР эластомера начинает деформироваться в осевом направлении в пределах воздушного зазора и перемещать жесткий центр 1.

На основание демпфера 6 действуют периодические колебания с заданными характеристиками, генерируемые винтовым виброиздатчиком. Амплитуда перемещений, создаваемых виброиздатчиком, обусловлена шагом резьбы винтовой передачи и углом поворота шагового двигателя 9. Винтовая передача содержит гайку 7 с толкателем и ходовой винт 8. Величина амплитуды перемещений рассчитывается заранее для обеспечения рабочего хода до 0,5 мм. Частота вибраций задается



Рис.1. Общий вид платформы с установленными датчиками
Fig.1. General view of the platform with sensors installed

INTRODUCTION

To protect the nanotechnology equipment (equipment for micro- and nanolithography, electron microscopes, scanning probe microscopes, etc.) against external vibration disturbances, various types of vibration isolation systems (pneumatic, hydraulic, piezoelectric, etc.) are used, which are classified into passive and active ones [1-3].

Passive systems effectively suppress vibration at frequencies above 50 Hz, but in the low-frequency range they are ineffective because they cannot compensate resonance phenomena. Active vibration isolation systems are used for vibration isolation in the low-frequency range, using the energy of an additional source. Modern systems combining active and passive vibration isolation are most effective [4-9].

DESCRIPTION OF THE PLATFORM AND DAMPER FOR ACTIVE VIBRATION ISOLATION WITH CLOSED-LOOP CONTROL

The active vibration isolation platform (Fig.1) consists of two plates between which there are four units of a

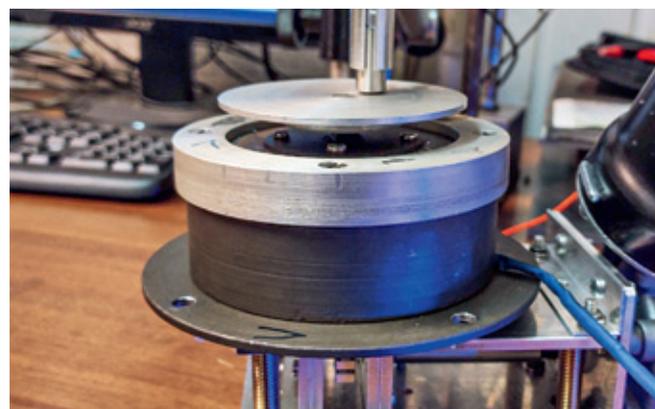


Рис.2. Общий вид стенда для исследования активного демпфера
Fig.2. General view of the active damper test stand

и регулируется во время эксперимента генератором сигналов Rigol DG1022. Принцип работы виброиздателя следующий: в драйвер шагового двигателя 9 подаются напряжение питания и сигнал с требуемой частотой вибрации с генератора сигналов Rigol DG1022. Шаговый двигатель 9 передает вращение на ходовой винт 8, на котором установлена гайка 7. С целью преобразования вращения ходового винта в линейное перемещение гайка 7 фиксирована от поворота и жестко соединена с основанием демпфера 6, обеспечивая точность перемещения демпфера.

Замкнутая система автоматического управления активным демпфером (рис.3) включает в себя микроконтроллер STM32F407VET6 на отладочной плате, блок усилителей (БУ), блок АЦП/ЦАП USB-6009АЦП для чтения показаний емкостных датчиков перемещения Д1, 2, 3 с контроллером датчиков DL6220/ECL2, ЦАП1 для передачи аналогового сигнала на блок усилителей, дисплей персонального компьютера (ПК) для вывода отладочной информации. САУ обеспечивает обработку показаний емкостных датчиков перемещения, а также выдачу управляющего сигнала, передаваемого на блок усилителей и затем поступающего в электромагнитную катушку демпфера, создавая необходимое перемещение. Управляющая программа реализует алгоритм управления по закону ПИ регулятора.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе исследований был проведен эксперимент на частоте 2 Гц. На рис.4 представлен график зависимости перемещения от времени для датчиков Д1 и Д2, на котором показано сравнение работы системы управления на персональном компьютере, снижающее амплитуды вибрации со 150 до 20–25 мкм и системы управления на микропроцессоре, снижающее амплитуды вибрации со 150 до 10–15 мкм.

Были проведены также эксперименты в диапазоне частот от 0,5 до 20 Гц и определены зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) от частоты внешних возмущений для замкнутых систем автоматического управления, реализованных на персональном компьютере и микроконтроллере (рис.5). КПАВ показывает, какая доля виброперемещений передается при вибрациях с основания демпфера на жесткий центр мембраны из МР-эластомера. Этот параметр важен для оценки эффективности работы активного демпфера и платформ

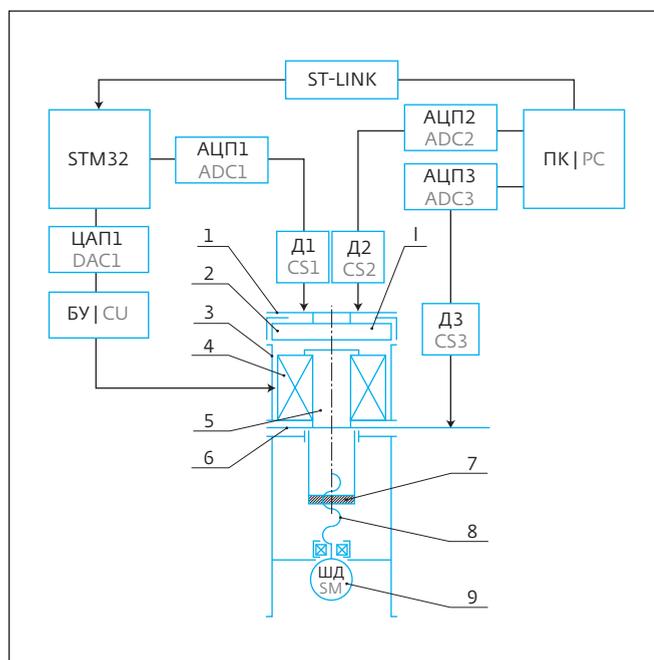


Рис.3. Схема лабораторного стенда для исследования активного демпфера с замкнутой системой управления на основе микроконтроллера: 1 – активный демпфер; 1 – жесткий центр; 2 – мембрана из МР-эластомера; 3 – корпус; 4 – электромагнитная катушка; 5 – сердечник демпфера; 6 – основание демпфера; 7 – гайка с толкателем; 8 – винт ходовой; 9 – шаговый двигатель; БУ – блок усилителей; Д1, Д2, Д3 – датчики емкостные; ПК – персональный компьютер; ЦАП1 – цифро-аналоговый преобразователь микроконтроллера; АЦП1 – аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера; АЦП2, АЦП3 – аналогово-цифровые преобразователи; ST-LINK – программатор; STM32 – микроконтроллер

Fig.3. Schematic diagram of laboratory stand for study of the active damper with closed-loop control system based on microcontroller: 1 – active damper; 1 – rigid centre; 2 – MP elastomer membrane; 3 – case; 4 – electromagnetic coil; 5 – damper core; 6 – damper base; 7 – nut with push rod; 8 – screw shaft; 9 – stepping motor; CU – amplifier unit; D1, D2, D3 – capacitive sensors; PC – personal computer; DAC1 – microcontroller digital-to-analog converter; ADC1 – microcontroller analog-digital converter; ADC2, ADC3 – analog-digital converters; ST-LINK – programmer; STM32 – microcontroller

passive quasi-zero rigid system based on an elastic suspension with mass correctors, and four active dampers based on magnetorheological (MR) elastomer [10–14].

In order to investigate the active damper, a stand was assembled which general view is shown in Fig.2 and the schematic diagram in Fig.3. The active damper I (Fig.3) contains rigid centre 1, membrane 2 made of MP elastomer, body 3, electromagnetic coil 4, core 5 and damper base 6.

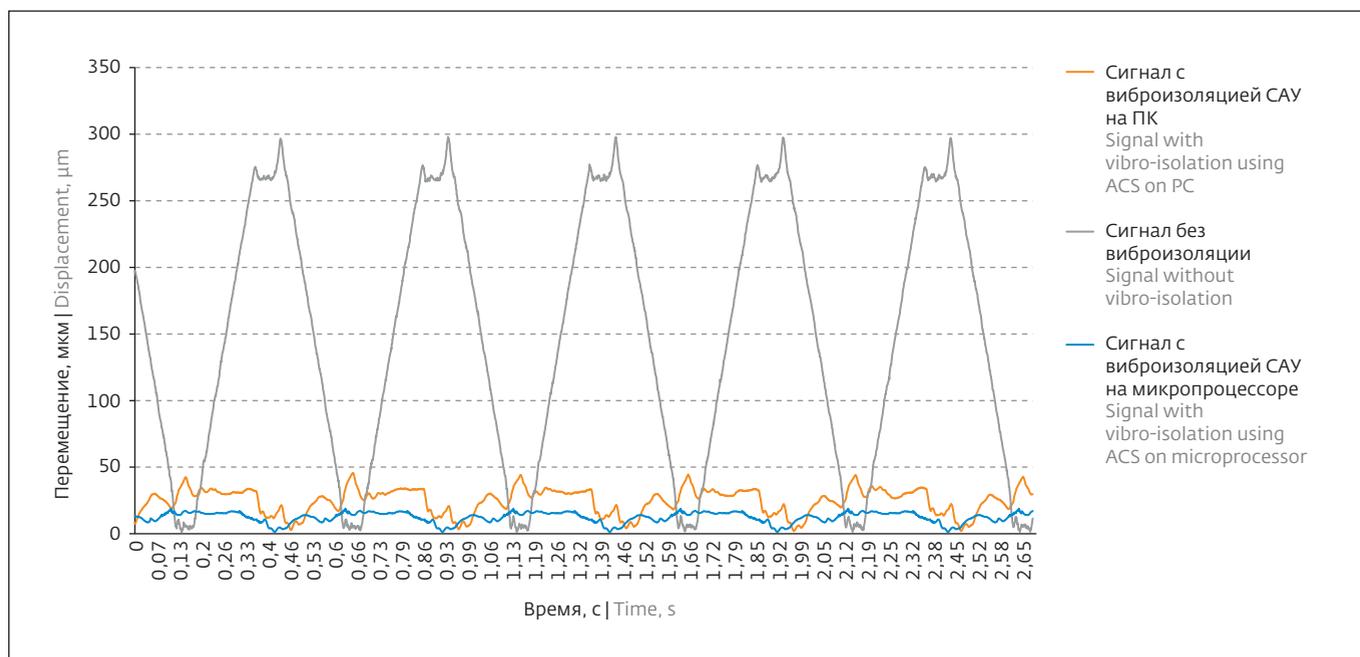


Рис.4. Графики зависимости перемещения от времени датчиков Д1 (сигнал с активной виброизоляцией для САУ на микропроцессоре), Д2 (сигнал с активной виброизоляцией для САУ на персональном компьютере) и Д3 (сигнал без активной виброизоляции)

Fig.4. Displacement diagrams vs. time for D1 sensor (signal with active vibration isolation for microprocessor-based controllers), D2 (signal with active vibration isolation for PC-based controllers) and D3 (signal without active vibration isolation)

в целом, то есть для оценки ее виброизолирующих свойств:

$$\text{КПАВ} = \frac{A_1}{A_0}, \quad (1)$$

где A_1 – амплитуда виброперемещений жесткого центра; A_0 – амплитуда виброперемещений основания демпфера.

График на рис.5 демонстрирует заметное увеличение эффективности виброизоляции в области низких частот для замкнутой системы управления, реализованной на микроконтроллере по сравнению с системой управления на основе персонального компьютера. Полученные результаты показывают, что активный демпфер с замкнутой системой управления на основе микроконтроллера STM32 способен эффективно уменьшать амплитуду виброперемещений в диапазоне опасных для нанотехнологического оборудования частот 0,5–10 Гц, при этом коэффициент передачи амплитуды виброперемещений находится в диапазоне 0,01...0,1.

ВЫВОДЫ

Для защиты нанотехнологического оборудования от внешних вибраций целесообразно

The active damper (item 1, Fig.3) operates as follows. Whenever the control current is applied to solenoid coil 4, closed magnetic field is generated in the coil. Axial magnetic field with a given induction is generated between core 5 and membrane 2 made of MP elastomer. The magnetic induction causes the MP elastomer diaphragm 2 to deform axially within the air gap and move rigid centre 1.

Damper base 6 is subject to periodic vibrations with defined characteristics generated by the screw vibration setter. The amplitude of movements generated by the vibration setter is determined by the thread pitch of the screw gear and rotation angle of stepper motor 9. The screw gear contains nut 7 with a pusher and lead screw 8. The displacement amplitude is calculated in advance to ensure the operating stroke of up to 0.5 mm. The vibration frequency is preset and adjusted during the experiment by the Rigol DG1022 signal generator. The principle of setter operation is as follows: stepper motor driver 9 is supplied with voltage and a signal with the required vibration frequency from the Rigol DG1022 signal generator. Stepper motor 9 transmits rotation to screw shaft 8 provided with nut 7. In order to convert rotation of the screw shaft to linear movement,

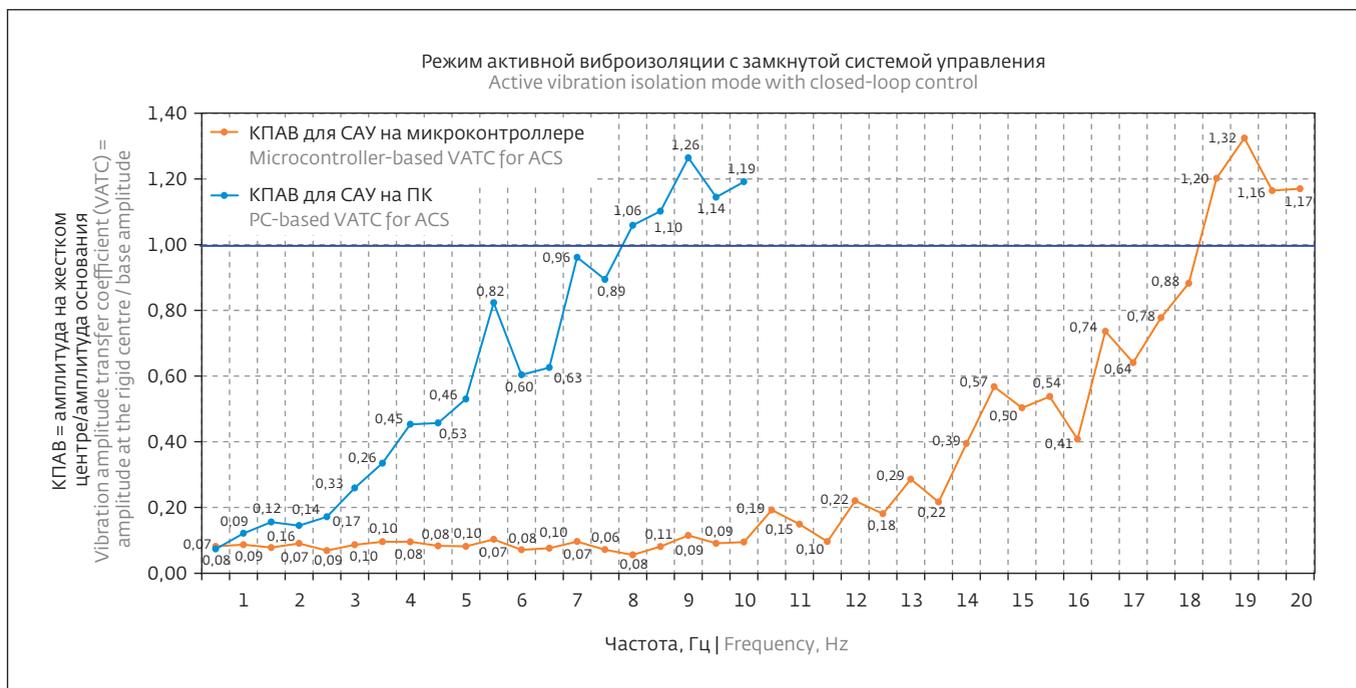


Рис.5. График зависимости КПАВ от частоты внешних возмущений для замкнутых систем автоматического управления, реализованных на персональном компьютере и микроконтроллере

Fig.5. Diagram of VATC versus frequency of external perturbations for closed-loop automatic control systems implemented on a personal computer and a microcontroller

использование активных демпферов и виброизолирующих платформ на основе магнито-реологических эластомеров.

Наибольшей эффективностью виброзащиты обладает система, объединяющая в себе активную и пассивную виброизоляцию, в частности активную систему на основе МР-демпферов и пассивную систему квазинулевой жесткости на основе упругой подвески с массовыми корректорами.

Активный демпфер на основе МР-эластомера с замкнутой системой управления на микроконтроллере STM32 эффективно уменьшает вибрации в диапазоне частот 0,5–10 Гц с коэффициентом передачи амплитуды виброперемещений 0,01...0,1.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wigglesworth W., Jordan S. *Semicond. Int.*, 2009, 32, 10, pp. 4–26.

nut 7 is locked against rotation and is rigidly connected to the base of damper 6 thereby ensuring accurate movement of the damper.

The closed-loop automatic control system of the active damper (Fig.3) includes a microcontroller STM32F407VET6 on a debug board, an amplifier unit (UU), an ADC/DAC unit USB-6009ADC for taking readings of the capacitive displacement sensors D1, 2, 3 with a DL6220/ECL2 sensor controller, DAC1 for analog signal transmission to the amplifier unit and a personal computer (PC) for displaying debugging information. The ACS processes readings of the capacitive displacement sensors and outputs the control signal to the amplifier unit and, then, to the electromagnetic damper coil, producing the required displacement. The control program implements the control algorithm according to the PI controller law.

PROCESSING OF EXPERIMENTAL RESULTS

An experiment was carried out at 2 Hz frequency. Fig.4 shows a displacement diagram for D1 and D2 which compares a PC-based control system that reduces vibration amplitudes from 150 μm to 20–25 μm and a microprocessor-based control system that reduces vibration amplitudes from 150 μm to 10–15 μm .



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ИСПЫТАНИЯ • ДИАГНОСТИКА

24-26 октября 2022
МОСКВА • ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

КРУПНЕЙШАЯ ОТРАСЛЕВАЯ ПЛОЩАДКА
В РОССИИ И СНГ



18+
КРУГЛЫХ СТОЛОВ
С УЧАСТИЕМ ЭКСПЕРТОВ



3 000+
РУКОВОДИТЕЛЕЙ
И СПЕЦИАЛИСТОВ



60+
КОМПАНИЙ-ЛИДЕРОВ
В ОБЛАСТИ НК И ТД

НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ • ИННОВАЦИИ
РУКОВОДИТЕЛИ КОМПАНИЙ • КЛЮЧЕВЫЕ ЗАКАЗЧИКИ
ПРЕДСТАВИТЕЛИ ВЛАСТИ • ОТРАСЛЕВЫЕ СМИ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ • ДЕФЕКТОМЕТРИЯ
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ • ИСПЫТАНИЯ • ДИАГНОСТИКА
ОЦЕНКА РИСКА • ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА

В РАМКАХ
РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ НЕДЕЛИ



32 000+
М² ВЫСТАВОЧНОЙ ПЛОЩАДИ



29 000+
ПОСЕТИТЕЛЕЙ



500+
КОМПАНИЙ УЧАСТНИЦ



2. Würzburg B.H., Grossenlupnitz R.R. US Patent No. 20080318045 A1. Appl. No. 11/574397, 25.08.2005, Date of Patent 27.08.2004.
3. Gruzevich Yu.K., Soldatenkov V.A., Achil'diev V.M., Levkovich A.D., Bedro A.N., Komarova M.N., Voronin I.V. Journal of Optical Technology. 2018. Vol. 85, Issue 5, PP. 308–313. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000308>
4. Электронный источник: Active Vibration Isolation. Accurion. <http://www.accurion.com>.
5. Ovchinnikov I., Brancevich P. 2017. Procedia Engineering. 176, PP. 610–617. <https://10.1016/j.proeng.2017.02.304>
6. Krestnikovskiy K.V., Panovko G.Ya., Shokhin A.E. 2016. Vibroengineering Procedia. Vol. 8. PP. 208–212.
7. Panovko G., Shokhin A., Eremeykin S. 2016. Vibroengineering Procedia. Vol. 8. PP. 174–178 (in Russian).
8. Chernikov S.A. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. 44. P. 439. <https://doi.org/10.3103/S1052618815050052>
9. Электронный источник: Micro-Epsilon capaNCDT 6200. <https://www.microepsilon.com/download/manuals/man--capaNCDT-6200-en.pdf> (дата обращения: 16.05.2019).
10. Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 431. PP. 266–268. <https://10.1016/j.jmmm.2016.10.007>
11. Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M., Dolinin P.A., Stepanov G.V. Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61. No. 3. PP. 427–432.
12. Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M., Dolinin P.A., Stepanov G.V. Russian Engineering Research, 2018. Vol. 38. No. 6. PP. 434–437. <https://10.3103/S1068798X18060138>
13. Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M., Kazakov A.V., Rotar A.P., Ivanova D.A. Active vibration isolation of high-vacuum nanotechnology equipment. Journal of Physics: Conf. Series 1313. 2019. P. 012041. <https://10.1088/1742-6596/1313/1/012041>
14. Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M., Kazakov A.V. Active vibration isolation of nanotechnology equipment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709. 2020. P. 044046 <https://10.1088/1757-899X/709/4/044046>

Декларация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

Experiments were also carried out in the frequency range from 0.5 to 20 Hz and vibration amplitude transfer coefficient (VATC) was determined as a function of the external disturbance frequency for closed-loop automatic control systems implemented in the personal computer and a microcontroller (Fig.5). The VATC indicates how much of the vibration displacement is transferred from a damper base to a rigid centre of the MP elastomer diaphragm. This parameter is important for evaluating performance of an active damper and this platform as a whole, i.e. for assessing its vibration-isolating properties:

$$\text{VATC} = \frac{A_1}{A_0}, \quad (1)$$

where A_1 – amplitude transfer coefficient of rigid centre; A_0 – amplitude of vibration displacement of a damper base.

The graph in Fig.5 shows a noticeable increase in vibration isolation efficiency in the low frequency range for a closed-loop control system implemented in a microcontroller in comparison with a PC-based control system. The results show that the active damper with a closed-loop control system based on STM32 microcontroller can effectively reduce the vibration displacement amplitude in the range of dangerous for nanotechnology equipment frequencies of 0.5–10 Hz, while the vibration displacement amplitude transfer ratio is in the range of 0.01...0.1.

CONCLUSIONS

To protect nanotechnology equipment from external vibrations, it is advisable to use active dampers and vibration-isolating platforms based on magnetorheological elastomers.

The most effective vibration protection is provided by a system which combines active and passive vibration isolation, in particular an active system based on MR dampers and a passive system based on quasi-zero stiffness elastic suspension with mass correctors.

The STM32 microcontroller based active vibration damper with a closed-loop control system effectively reduces vibrations in the frequency range of 0.5–10Hz with a vibration amplitude transfer coefficient of 0.01...0.1.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU. ■

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Я. Фрейдин

СОВРЕМЕННЫЕ ДАТЧИКИ. СПРАВОЧНИК

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2021. — 800 с.
ISBN 978-5-94836-619-7

Цена 1960 руб.

Справочник по современным датчикам можно назвать настольной книгой исследователя в любой области естествознания, поскольку в нем изложены физические принципы, методы разработки и варианты практического использования широкого спектра датчиков в самых разнообразных областях применений. Книга выдержала пять изданий на английском языке, и это не случайно, ведь любая современная система измерений не обходится без применения датчиков, которые являются «переводчиками» окружающей аналоговой природы на язык цифровой техники.

Со времени публикации первого русского издания произошло значительное развитие технологии создания широкого спектра датчиков и детекторов, которые совершили значительный рывок в развитии. Чувствительность датчиков стала выше, габариты — меньше, селективность — лучше, а цены — ниже. Быстро развивается новая, ставшая основной областью применения датчиков в устройствах мобильной связи, поэтому в настоящем издании более подробно рассмотрено данное направление. В книге содержится новая информация по созданию химических и биохимических датчиков, уделено внимание математическому моделированию передаточных характеристик датчиков, используемых при создании измерительных систем и комплексов.

Книга является превосходным справочным пособием для студентов, исследователей, проектировщиков датчиков и специалистов, разрабатывающих измерительные системы.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru