

# ПЛАТФОРМА ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.П. Михайлов, А.А. Копылов

## АННОТАЦИЯ

Дано описание платформы активной виброизоляции на основе магнито-реологических эластомеров для вакуумного оборудования. Разработана математическая модель системы автоматического регулирования активного демпфера с последующим моделированием процесса в среде Simulink MATLAB. Представлены результаты экспериментальных исследований платформы и определены коэффициенты передачи амплитуды виброперемещений в низкочастотном диапазоне.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

АКТИВНАЯ ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ, МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛАСТОМЕРЫ, АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

## PLATFORM FOR ACTIVE VIBRATION ISOLATION OF VACUUM EQUIPMENT

V. P. Mikhailov, A. A. Kopylov

## ABSTRACT

The description of the active vibration isolation platform based on magnetorheological elastomers for vacuum equipment is given. A mathematical model of the active damper automatic control system has been developed with subsequent simulation of the process in the Simulink MATLAB environment. The results of experimental studies of the platform are presented and the transmission coefficients of the amplitude of vibration displacements in the low-frequency range are determined.

## KEYWORDS

ACTIVE VIBRATION ISOLATION, MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS, AUTOMATIC CONTROL

## ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии производства и исследования микро- и наноструктур (плёнок, объёмных структур), обладают широким набором методов формирования и контроля локальных свойств поверхности, для чего необходимо проводить работы с разрешением менее 100 нм [1-3]. К подобному технологическому и исследовательскому оборудованию относятся установки, использующие для обработки и анализа поверхности ионные, электронные или рентгеновские пучки (электронные микроскопы, сканирующие зондовые микроскопы, оборудование для микро- и нанолитографии, оборудование нанолокальной ионной и электронной обработки и др.), а также оптическое излучение (оптические микроскопы высокого разрешения и др.). При этом важнейшей задачей обеспечения качества работы такого оборудования является его эффективная защита от внешних вибрационных воздействий в области низких частот, при которых проявляются резонансные явления. Это особенно важно при интенсивном развитии нанотехнологий,

которые реализуются в основном за счет использования сверхвысоковакуумного оборудования, элементы которого имеют низкую жесткость (тонкостенные вакуумные камеры, сифоны, вводы движения в вакуум и др.) и соответственно, низкие резонансные частоты.

Для этого применяются различные типы виброизолирующих систем, которые подразделяются на пассивные и активные [4-8]. Пассивные системы эффективно подавляют вибрации при частотах более 40-50 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. В зависимости от типа исполнительного механизма активные системы можно разделить на следующие группы: гидравлические, пневматические, электромагнитные, пьезоэлектрические, магнитострикционные, магнитореологические и др. [10-12]

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АКТИВНОГО ДЕМПФЕРА**

Была разработана математическая модель системы автоматического регулирования (САР) активного трехкоординатного магнитореологического (МР) демпфера с последующим моделированием процесса в среде Simulink MATLAB. Фотография платформы активной виброизоляции без верхней плиты показана на рис. 1. Платформа [13-15] представляет собой две плиты, между которыми располагаются четыре активных трехкоординатных или однокоординатных МР-демпфера 1 и четыре узла упругой подвески 2 с квазиулевым жесткостью. В конструкции трехкоординатного МР-демпфера МР-эластомерный элемент выполнен в форме стакана, а в однокоординатном МР-демпфере – в виде мембраны. Схема САР одного из каналов управления МР-демпфера показана на рис. 2.

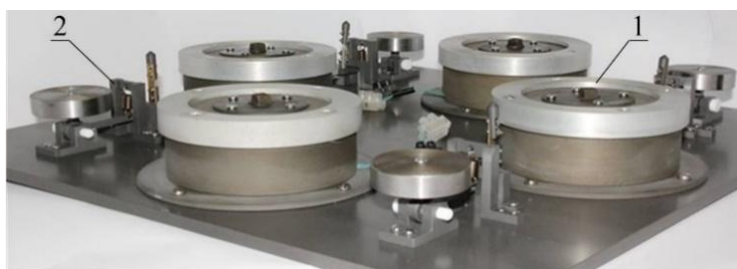


Рис. 1. Фотография платформы активной виброизоляции (верхняя плита не показана)

В состав замкнутой САР платформы активной виброизоляции входит микроконтроллер на отладочной плате STM32, усилитель сигнала, 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. САР обеспечивает обработку показаний каждого из четырех емкостных датчиков перемещения, а также выдачу управляющего сигнала, передаваемого на усилитель и затем в катушку соответствующего активного демпфера, располагаемого под датчиком, тем самым создавая необходимое противофазное колебание. Система имеет независимые каналы регистрации возмущения, формирования управляющего сигнала и

осуществления перемещения для всех защищаемых степеней свободы. Входным воздействием системы является механическое колебание, величиной  $0...1000$  мкм. Это колебание регистрируется емкостным датчиком Д1 [9], и преобразуется в аналоговый сигнал величиной  $0...10$  В, далее сигнал передаётся в блок АЦП2 для преобразования в цифровой сигнал, который поступает для последующей обработки в управляющую программу САР.

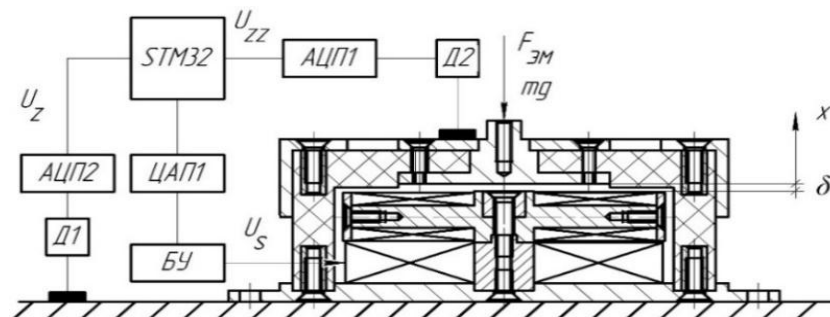


Рис. 2. Схема САР одного из каналов управления МР-демпфера:  $F_{эм}$  – электромагнитная сила,  $U_z$ ,  $U_{zz}$  – сигналы главной и обратной связи;  $U_s$  – управляющее напряжение, БУ – блок усилителей; Д1,2 – датчики емкостные; ЦАП1 – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП1,2 – аналогово-цифровые преобразователи  $\delta$  – перемещение подвижного сердечника; STM32 – микроконтроллер

На основе полученных данных программа вычисляет управляющий сигнал и выдаёт его в цифровом формате в ЦАП1 (Рис. 2), который преобразует цифровой сигнал в аналоговый, величиной  $0...5$  В. Как правило, уровень сигнала, который формирует ЦАП, мал и требует предварительного усиления, поэтому с выхода ЦАП1 сигнал поступает на вход блока усилителя БУ, где усиливается до необходимого уровня  $U_s$ , и передаётся в катушку МР-демпфера. Под действием управляющего напряжения  $U_s$ , в катушке возникает ток  $I$ , создавая магнитное поле с индукцией  $B$  в рабочем зазоре демпфера, формируя электромагнитную силу  $F_{эм}$ , что приводит к перемещению подвижного сердечника на величину  $\delta$ . Подвижный сердечник является жёстким центром мембраны из МР-эластомера и соединяется с верхней плитой платформы. Перемещение подвижного сердечника измеряется емкостным датчиком Д2, после чего этот аналоговый сигнал, пропорциональный величине перемещения  $\delta$ , преобразуется АЦП1 в цифровой сигнал  $U_{zz}$  и поступает в микроконтроллер STM32 для дальнейшей обработки управляющей программой, реализуя алгоритм управления по закону ПИД регулятора для вычисления величины ошибки.

Определена осевая жёсткость МР-эластомерного стакана, состоящего из мембраны и трубчатого элемента, при осевой деформации под действием магнитного поля, что позволило найти передаточную функцию подвижного сердечника САР активного МР-демпфера. Коэффициент жесткости  $k_1$  мембраны из МР-эластомера был определен ранее экспериментально. Коэффициент жесткости  $k_2$  трубчатого элемента согласно формуле Максвелла, зависит от магнитных и механических характеристик МР-эластомера:

$$k_2 = \frac{S}{L} (9,81 \cdot 10^{12} \cdot (B/5000)^2 \varphi_v + E_{МРЭ}^0),$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения трубчатого элемента из МР-эластомера ( $m^2$ );  $L$  – высота трубчатого элемента из МР-эластомера ( $m$ );  $\varphi_v$  – объёмная концентрация частиц дисперсной фазы;  $B$  – магнитная индукция в МР-эластомере ( $Tл$ );  $E_{МРЭ}^0$  – модуль упругости МР-эластомера при отсутствии магнитного поля ( $Па$ ). Магнитная индукция  $B$  в МР-

эластомере зависит от множества факторов: размера и распределения частиц дисперсной фазы в эластомерной матрице, их относительной магнитной проницаемости, нелинейно зависящей от магнитного поля, объёмной концентрации частиц и др. Таким образом, определение коэффициента жёсткости  $k_2$  по формуле Максвелла приводит к большой погрешности, поэтому его целесообразно найти как  $k_2 = \frac{E_{MPЭ}S}{L}$ , где  $E_{MPЭ}$  – модуль упругости МР-эластомера при действии магнитного поля, определенный в данной работе экспериментально. Суммарный коэффициент жёсткости  $k$  МР-эластомерного стакана определяется как коэффициент жесткости последовательно соединенных мембраны и трубчатого элемента при осевой нагрузке. Использование МР-эффекта позволяет регулировать суммарный коэффициент жесткости  $k$  упругого МР-эластомерного стакана за счет изменения величины магнитной индукции  $B$ . При этом можно управлять динамическими и точностными характеристиками активного МР-демпфера, а также повысить устойчивость трубчатого элемента из МР-эластомера. Передаточная функция подвижного сердечника (жесткого центра мембраны) будет иметь вид:

$$W_C(s) = \frac{Y(s)}{F_{Mag}(s)} = \frac{1}{m_{пр} \cdot s^2 + Hs + k} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{m_{пр}}{k} \cdot s^2 + \frac{H}{k} s + 1} = \frac{\frac{1}{k}}{T_{кор}^2 s^2 + T_B s + 1},$$

где  $Y$  – перемещение подвижного сердечника вдоль продольной оси  $Y$ ;  $m_{пр}$  – приведенная масса подвижного сердечника;  $H$  – коэффициент вязкостного трения в МР-эластомере;  $k$  – коэффициент жесткости МР-эластомерного стакана;  $T_{кор}$  – постоянная времени подвижного сердечника при действии инерционных и упругих сил ( $T_{кор} = \left(\frac{m_{пр}}{k}\right)^{1/2}$ );  $T_B$  – постоянная времени подвижного сердечника при действии вязкоупругих сил ( $T_B = H / k$ ).

Было проведено моделирование разработанной САР активного МР-демпфера в программной среде Simulink MATLAB. В процессе моделирования была проанализирована реакция системы при одновременном действии гармонических вибрационных возмущений и ступенчатым управляющим сигналом с пошаговым перемещением МР-демпфера на 5 мкм. Было проведено сравнение моделей поведения работы трехкоординатного и однокоординатного МР-демпферов при осевом перемещении, которое показало сходные динамические характеристики при небольшом уменьшении осевой жёсткости МР-эластомерного стакана. При этом коэффициент передачи амплитуды виброперемещений для обеих моделей не превышает 0,1 в диапазоне частот 0,3-100 Гц. Моделирование позволило также выбрать алгоритмы управления, структуру и состав управляющей системы. Структурная схема САР одного канала управления трехкоординатного МР-демпфера с ПИД регулятором приведена на рис. 3.

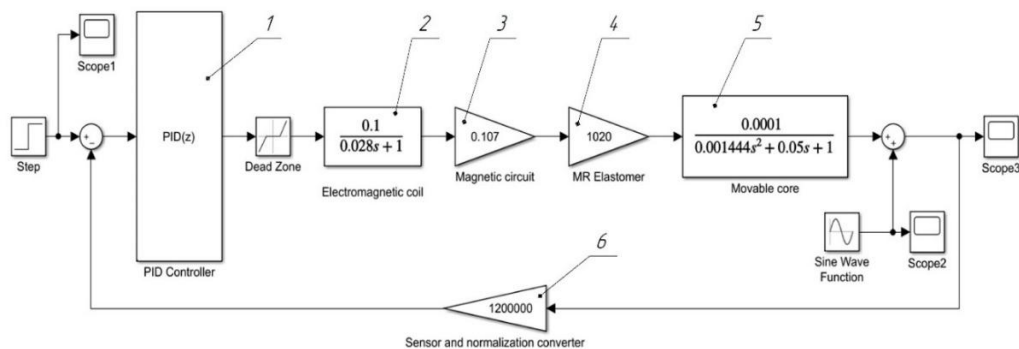


Рис. 3. Структурная схема САУ одного канала управления трёхкоординатного МР-демпфера с ПИД-регулятором

ПИД-регулятор 1 встроен после сумматора сигналов последовательно со звеньями САУ МР-демпфера: электромагнитной катушкой 2, магнитопроводом 3, МР-эластомером 4, подвижным сердечником 5, измерительной системой 6. Переходный процесс САУ трёхкоординатного МР-демпфера при воздействии синусоидального вибрационного воздействия с амплитудой колебаний 5 мкм и частотой 20 Гц, с входным ступенчатым сигналом – 5 мкм показан на рис. 4.

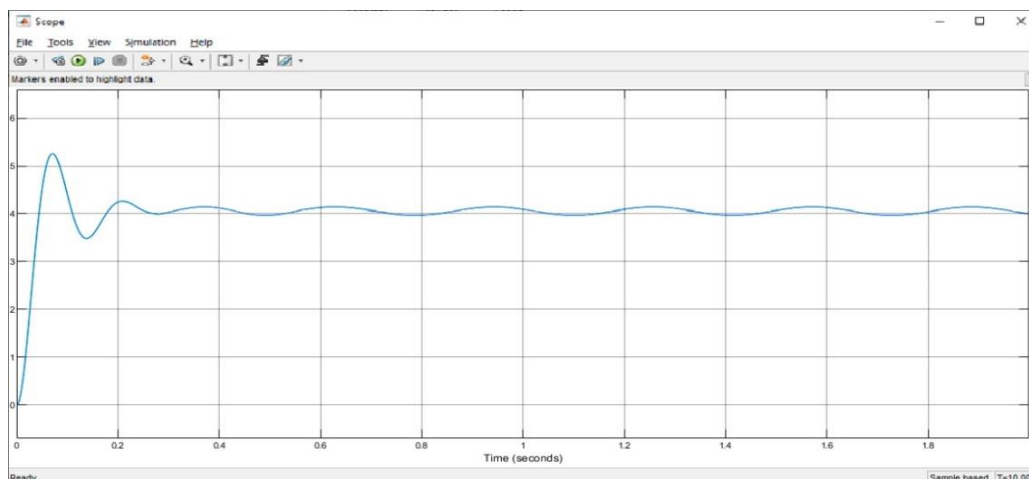


Рис. 4. Переходный процесс САУ трёхкоординатного МР-демпфера

Время переходного процесса составило не более 0,2 с, при этом наблюдаются остаточные вибрации, не компенсируемые ПИД регулятором. Величина коэффициента передачи амплитуды виброперемещений составляет 0,03...0,05.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены эксперименты в диапазоне частот от 0,3 до 100 Гц, при максимальном размахе вибрационных возмущений 600 мкм. На рис. 5 приведён график зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) платформы от частоты внешних возмущений для режима активной виброизоляции металлографического микроскопа ММР-1, показывающий высокую эффективность работы системы, при этом максимальное значение коэффициента передачи амплитуды перемещения во всем исследуемом диапазоне не превышает 0,071.

Этот параметр важен для оценки эффективности работы активного демпфера и платформы в целом, т.е. для оценки её виброизолирующих свойств:  $K_{ПАВ} = \frac{A_1}{A_0}$ , где  $A_1$  –

амплитуда виброперемещений жесткого центра мембраны из МР-эластомера,  $A_0$  – амплитуда виброперемещений основания демпфера и платформы.

В результате проведенных исследований была доказана высокая эффективность разработанной системы автоматического управления платформой активной виброизоляции на основе МР-демпферов в области экстремально низких частот, при которых возникают опасные резонансные колебания прецизионного оборудования.

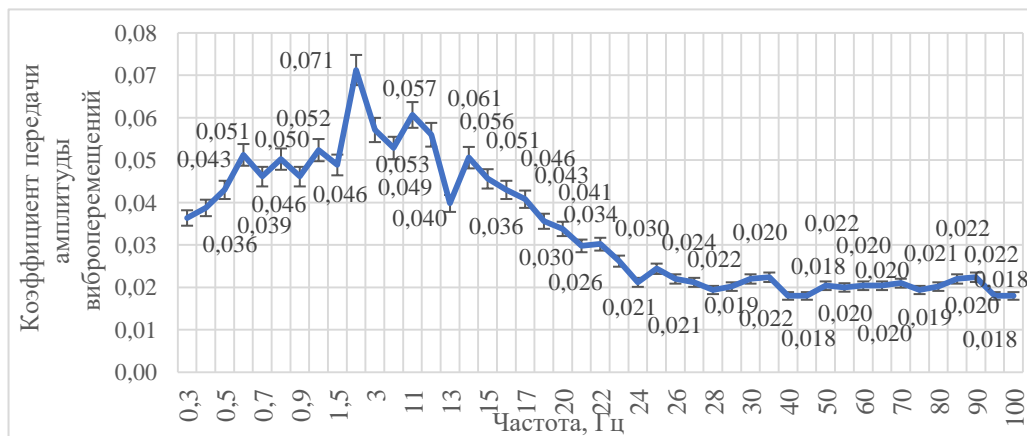


Рис. 5. График зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений платформы от частоты внешних возмущений для режима активной виброизоляции микроскопа ММР-1

На рис. 6 показаны сравнительные графики зависимости КПАВ от частоты внешних возмущений для предлагаемой платформы и перечисленных ранее систем.

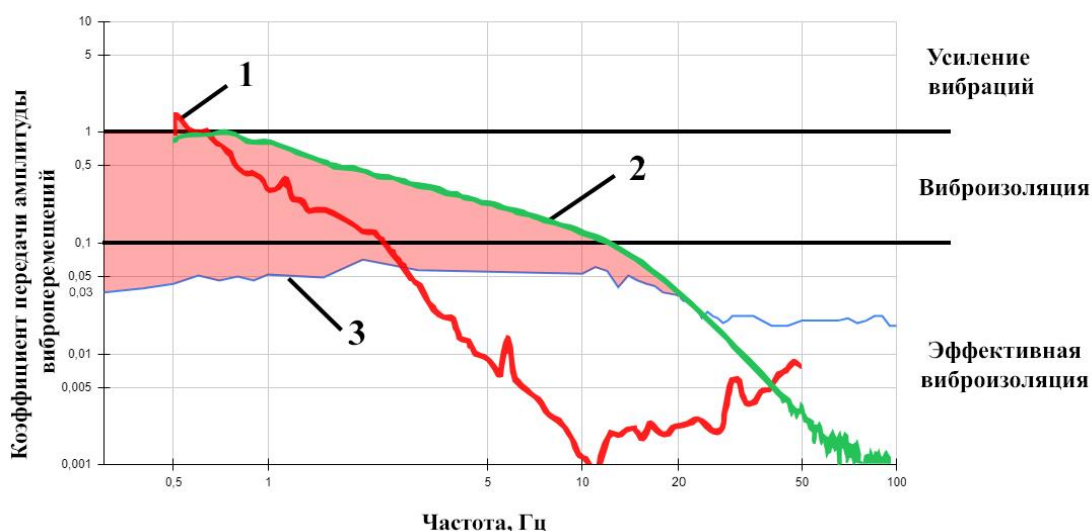


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений от частоты внешних возмущений для: 1 - активной пьезоэлектрической системы STACIS; 2 - платформы с электромагнитным силовым приводом DVIA-MB; 3 – платформы на основе МР-эластомеров

Платформа на основе МР-демпферов (график 3) демонстрирует более высокую эффективность виброизоляции в диапазоне частот 0,3-3 Гц по сравнению с пьезоэлектрической системой STACIS (график 1) и в диапазоне частот 0,3-30 Гц по сравнению с платформой на основе электромагнитного силового привода DVIA-MB (график 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитический обзор современного прецизионного оборудования, средств защиты от вибрационных воздействий и методов их автоматизации позволил сформулировать комплекс требований к системам активной виброизоляции, в том числе требование обеспечения коэффициента передачи амплитуды виброперемещений не более 0,1 на низких частотах.

Разработанная математическая модель системы автоматического регулирования активного МР-демпфера дала возможность определить алгоритмы управления, структуру и состав управляющей системы для обеспечения требуемых параметров активной виброизоляции на низких частотах. Моделирование системы автоматического регулирования активного МР-демпфера в программной среде Simulink MATLAB позволило определить переходный процесс перемещения демпфера при воздействии гармонических вибрационных воздействий, выбрать тип регулятора и рассчитать его настроечные параметры, повысить устойчивость, быстродействие и точность системы.

Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика автоматически управляемой при помощи микроконтроллера STM32 платформы на основе активных МР-демпферов и упругой подвески с квазиулевым жесткостью показала высокую эффективность виброизоляции при частотах 0,3-100 Гц с коэффициентом передачи амплитуды виброперемещений не более 0,075 и подтвердила адекватность разработанной математической модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 1. W. Wigglesworth, S. Jordan. *Semicond. Int.*, 2009, 32, 10, pp 4–26
2. 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. 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. 4. Active Vibration Isolation. Accurion. <http://www.accurion.com>.
5. 5. Ovchinnikov I., Brancevich P. 2017 *Procedia Engineering*. 176, pp 610-617 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.304
6. 6. Krestnikovskiy K.V., Panovko G.Ya., Shokhin A.E. 2016 *Vibroengineering Procedia*. 8, pp 208-212
7. 7. Panovko G., Shokhin A., Eremeykin S. 2016 *Vibroengineering Procedia*. 8, pp 174-178 (in Russian)
8. 8. Chernikov, S.A. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. (2015) 44: 439. <https://doi.org/10.3103/S1052618815050052>
9. 9. Micro-Epsilon capaNCDT 6200 // URL: <https://www.microepsilon.com/download/manuals/man--capaNCDT-6200--en.pdf> (дата обращения: 16.05.2019)
10. 10. Borin D.Y., Bergmann C., Odenbach S. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Т. 497. P. 165959
11. 11. Zubarev A., Chirikov D., Borin D. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Т. 498. P. 166129
12. 12. Zubarev A., Chirikov D., Stepanov G., Borin D., Lopez-Lopez M.T. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2018. Т. 498. pp 86-95

13. 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. 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. 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**

Михайлов Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор (ORCID: 0000-0003-3638-7932). Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, e-mail: [mikhailov@bmstu.ru](mailto:mikhailov@bmstu.ru)

Копылов Алексей Андреевич – аспирант (ORCID: 0000-0001-5528-6518). Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, e-mail: [wertyoz@bk.ru](mailto:wertyoz@bk.ru)