

14. Ehlert T C 1970 J. Phys Determination of transmission characteristics in mass filters 3 E3 237
15. Слободенюк Г И 1974 Квадрупольные масс-спектрометры (Москва: Атомиздат) с 272.
16. Huber W K and Rettinghaus G 1979 J. Vac. Sci. and Technol Validity of mass spectrometric measurements at pressures excreding 10^{-4} mbar **16**, №2 681
17. Аверина А П 1962 ПТЭ Омегатрон как измеритель парциальных давлений в высоковакуумных системах №3 123
18. Blanchord W R et al. 1986 J. Vac. Sci. and Technol Long-term chauges in the sen sitivity of quadrupole mass spektrometers A4 **3**, Pt **2** 1715
19. Сысоев А А и Чупахин М С 1977 Введение в масс-спектрометрию (Москва:Атомиздат) 304
20. Бушин С А и Галкин С С 2017 Вакуумная техника и технология Источники погрешностей при измерениях степени негерметичности на установке УФКГ т. **27**, №4 1–5.

АКТИВНАЯ ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ACTIVE VIBRATION ISOLATION OF HIGH VACUUM EQUIPMENT

В.П.Михайлов / mikhailov@bmstu.ru

А.А.Копылов / wertyoz@bk.ru

А.В.Казаков / kazalexander@mail.ru

Д.К.Товмаченко / svarog4@mail.ru

V. P. Mikhailov, A. A. Kopylov, A.V. Kazakov, D. K. Tovmachenko

МГТУ им. Н. Э. Баумана, г.Москва

Дано описание устройства и принципа работы активной виброизолирующей платформы на основе магнитореологического (МР) эластомера для высоковакуумного оборудования. Представлены результаты экспериментальных исследований привода платформы в режиме активной виброизоляции и определен коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

A description of the device and the principle of operation of an active vibration-isolating platform based on magnetorheological (MR) elastomer for high vacuum equipment are given. The results of experimental studies of the platform drive in the active vibration isolation mode are presented and the transmission coefficient of the vibration displacement amplitude is determined.

Ключевые слова: платформа для активной виброизоляции, высокоточный привод, высоковакуумное оборудование, магнитореологический эластомер, замкнутая система управления, коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

Key words: platform for active vibration isolation, high-precision drive, high vacuum equipment, magnetorheological elastomer, closed-loop control system, transmission coefficient of vibration displacement amplitude.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии исследования и производства микро- и наноструктур (наноплёнок, объёмных структур), обладают широким набором методик исследования

локальных свойств поверхности, для чего необходимо проводить работы с прецизионной точностью на атомарном уровне (менее 0,1 нм) [1]. К подобному технологическому оборудованию относятся установки, реализующие обработку поверхности оптическими, ионными, электронными или рентгеновскими пучками (растровые электронные микроскопы, сканирующие зондовые микроскопы, оборудование для микро- и нанолитографии и др.) [2,3]. Примером такого оборудования служит высоковакуумный сканирующий электронный микроскоп. Механическая замкнутая система крепления основных узлов микроскопа, включающая узлы электронно-оптической системы, высоковакуумную камеру, координатный стол, образец для исследования, детектор вторичных электронов, имеет невысокую жесткость и малые резонансные частоты, формируемые этими инерционными элементами. Резонансные явления в СЭМ проявляются в диапазоне от 0,5 до 10 Гц и выше, т.е. в том диапазоне, в котором недостаточно эффективно работают существующие системы пассивной и активной виброизоляции: пневматические, гидравлические, пьезоэлектрические и др. [4-11].

Для защиты высоковакуумного оборудования от внешних вибраций применяются различные типы виброизолирующих систем, которые подразделяются на пассивные и активные. 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТФОРМЫ В РЕЖИМЕ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Платформа для активной виброизоляции представляет собой две плиты, между которыми располагаются четыре узла упругой подвески с массовыми корректорами и четыре привода на основе магнитореологического (МР) эластомера. Общий вид платформы на основе МР эластомера показан на рис. 1 (верхняя плита не показана).

Привод (рис. 2) позиционирующего стола содержит мембрану 1 из МР эластомера с подвижным жестким центром 2, корпус 3, электромагнитную катушку 4, сердечник 5, основание 6. Сердечник образует с жестким центром воздушный зазор. Привод работает следующим образом: при подаче управляющего тока в электромагнитную катушку в электромагнитной системе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране формируется радиальное магнитное поле с индукцией, которая имеет максимум вблизи жесткого центра. Под действием магнитной индукции мембрана 1 с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора. МР эластомер представляет собой матрицу из силиконового каучука, в которой распределены частицы карбонильного железа сферической формы с размерами частиц от 1 до 10 мкм [12]. МР эластомеры при действии магнитного поля могут обратимо деформироваться и менять вязкоупругие свойства. Эта способность МР эластомеров позволяет улучшить демпфирование и повысить точность стабилизации платформы в активном режиме.



Рис. 1. Общий вид платформы на основе МР эластомера.
(верхняя плита не показана)

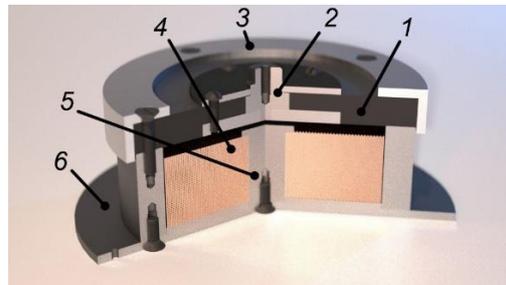


Рис. 2. Привод платформы на основе МР эластомера

Целью экспериментов являлось исследование эффективности подавления внешних вибраций платформой с замкнутой системой управления. Для управления приводом использовался персональный компьютер с программой в среде LabView, блок АЦП/ЦАП National Instruments USB-6009, емкостной датчик перемещения с контроллером датчиков DT6220 (Micro-Epsilon, Германия) с погрешностью измерения – 0,04 мкм [12].

Для исследования активного режима виброизоляции с замкнутой системой управления был разработан экспериментальный стенд, схема которого показана на рис. 3. Привод I состоит из жёсткого центра 1; мембраны из эластомера 2; корпуса 3; катушки 4; сердечника 5. Стенд содержит также основание привода 6; направляющую толкателя 7; толкатель 8; подшипники 9; вал эксцентрика 10; эксцентрик 11; муфту 12; мотор-редуктор 13 с червячным редуктором и регулятором частоты; основание стенда 14; блок усилителей 15; датчики емкостные 16, 17; персональный компьютер 18; цифро-аналоговый преобразователь 19; аналогово-цифровые преобразователи 20, 21. Внешний вид стенда показан на рис. 4.

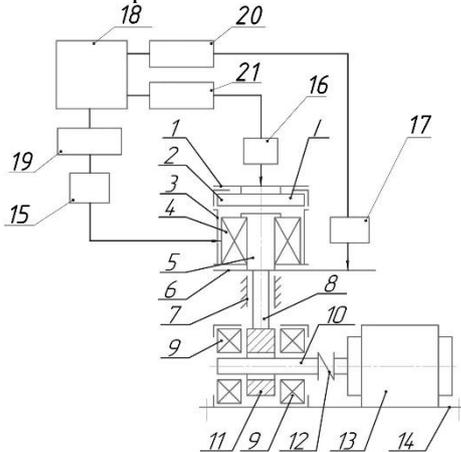


Рис. 3. Схема лабораторного стенда для измерения КПАВ

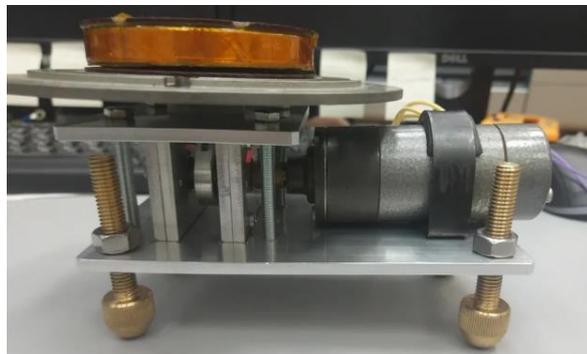


Рис. 4. Внешний вид стенда

Стенд работает следующим образом. На основание привода 6 воздействует синусоидальное периодическое колебание с заданными характеристиками, генерируемое эксцентриком 11. При этом основание привода 6 совершает вертикальное возвратно-поступательное перемещение в пределах требуемого диапазона. Величина совершаемых перемещений обусловлена размерами эксцентрика 11, который жёстко соединён с основанием демпфера 6 через толкатель 8. Эксцентрик 11 установлен на вал эксцентрика 10 через подшипник скольжения, при этом вал 8 фиксируется в корпусе стенда на двух шариковых подшипниках 9. Скорость вращения вала эксцентрика 8 задаётся червячным мотор-редуктором 13, соединённом через муфту 12. Регулирование скорости вращения червячного мотор-редуктора 13, осуществляют лабораторным источником постоянного тока.

Основным параметром, характеризующим виброизолирующую систему, является коэффициент передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ), равный отношению амплитуд виброперемещений изолируемого жесткого центра 1 и основания привода 6 (см. рис. 3). Система автоматического управления с помощью АЦП1 и АЦП2 получает показания вибраций с датчиков перемещения Д1 и Д2. После обработки полученных данных генерируется соответствующий управляющий сигнал, передающийся через ЦАП в блок усилителей, откуда сигнал поступает на катушку привода, создавая необходимое перемещение, противоположное возмущению.

Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений показывает, какая часть колебаний передаётся при вибрациях с основания привода 6 на жесткий центр 1. Этот

параметр важен для оценки эффективности работы привода, т.е. для оценки его демпфирующих свойств:

$$\text{КПАВ} = \frac{A_1}{A_0},$$

где A_1 – амплитуда колебаний жесткого центра 1; A_0 – амплитуда колебаний основания привода 6.

КПАВ должен стремиться к наименьшему возможному значению. Для систем активной виброизоляции хорошим показателем считается КПАВ ниже 0,1.

В этой зоне найти максимальное и минимальное значения перемещения, и по ним вычислить амплитуду колебаний по формуле:

$$A = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{2},$$

где A – амплитуда колебаний; δ_{\max} – максимальное значение координаты; δ_{\min} – минимальное значение координаты.

В ходе исследований был проведён эксперимент, на основе полученных данных с датчиков 16 и 17, построен график зависимости перемещения от времени, график представлен на рис. 5.

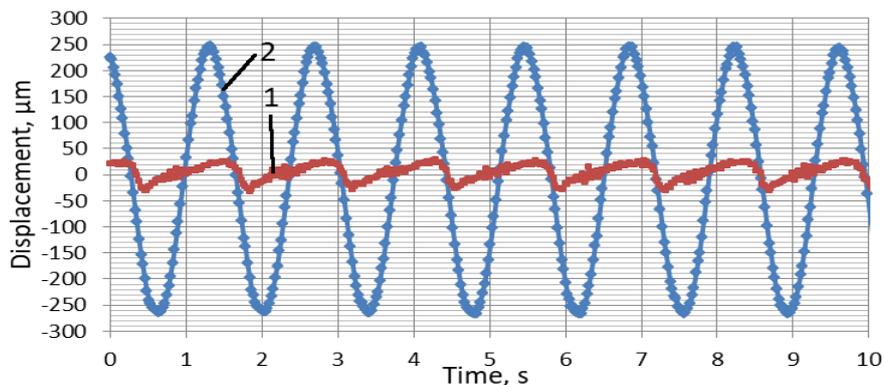


Рис. 5. Графики зависимости перемещения привода от времени: 1 – с активной виброизоляцией; 2 – без активной виброизоляции.

По результатам эксперимента определен коэффициент передачи амплитуды виброперемещений, который составляет около 0,05...0,10. Полученные результаты показывают, что предлагаемый привод эффективно уменьшает амплитуду виброперемещений при частоте около 1 Гц.

ВЫВОДЫ

1. Для активной защиты высоковакуумного оборудования от внешних вибраций необходимо использование высокоточных быстродействующих исполнительных механизмов с хорошими демпфирующими свойствами.
2. МР эластомеры являются перспективными материалами для использования в качестве элементов высокоточного привода для активных виброизолирующих систем.
3. Высокоточный привод на основе МР эластомера обеспечивает коэффициент передачи амплитуды виброперемещений в диапазоне 0,05...0,10, что показывает высокую эффективность работы замкнутой системы управления при низких частотах колебаний (около 1 Гц). При этом амплитуды вибрации снизились с 250 мкм до 10...20 мкм.

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. Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. - Vol. 431. - pp 266 – 268 DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.10.007.
10. V.P. Mikhailov, A.M. Bazinenkov, P. A. Dolinin and G. V. Stepanov. Instruments and Experimental Techniques, 2018, Vol. 61, No. 3, pp 427–432
11. V.P. Mikhailov, A.M. Bazinenkov, P. A. Dolinin and G. V. Stepanov. Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 6, pp 434–437 DOI: 10.3103/S1068798X18060138.
12. Micro-Epsilon capaNCDT 6200 // URL: <https://www.microepsilon.com/download/manuals/man--capaNCDT-6200--en.pdf> (дата обращения: 16.05.2019)