

Технология и технологические машины

УДК 543.271; 533.5.08

DOI 10.18698/0536-1044-2016-11-51-57

Характеристики платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров*

В.П. Михайлов¹, Д.К. Товмаченко², А.М. Базиненков¹, Г.В. Степанов³¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² АО «ГЗ «Пульсар», 105187, Москва, Российская Федерация, Окружной пр-д, д. 27³ Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, 111123, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 38

The Characteristics of the Platform for Active Vibration Isolation Based on Magnetorheological Elastomers

V.P. Mikhailov¹, D.K. Tovmachenko², A.M. Bazinenkov¹, G.V. Stepanov³¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² State Plant PULSAR, 105187, Moscow, Russian Federation, Okružnoy proezd, Bldg. 27³ State Research Institute for Chemistry and Technology of Organoelement Compounds, 111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 38

e-mail: mikhailov@bmstu.ru, svarog4@mail.ru, bazinenkov@mail.ru, gstepanov@mail.ru



Приведены описание и результаты теоретических и экспериментальных исследований активного демпфера и платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров. Такой активный демпфер может быть использован в качестве привода микро- или нанопозиционирования для виброизолируемого объекта. Магнитореологические эластомеры обеспечивают перед пьезоэлектрическими преобразователями такие преимущества для активного управления вибрацией, как больший диапазон перемещений и более эффективное поглощение энергии вибрации. Платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров также дают возможность управления амплитудно-частотными характеристиками и позиционированием с миллисекундным быстродействием и нанометровой точностью. Для определения динамических характеристик активного демпфера (стабильности, качества и точности) разработана динамическая модель системы автоматического регулирования. Представлены результаты экспериментальных исследований таких важнейших параметров активного демпфера, как ток трогания, время переходного процесса при пошаговом перемещении и коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

Ключевые слова: магнитореологический эластомер, активный демпфер, виброизоляция, погрешность позиционирования, переходный процесс.

* Работа выполнена в рамках реализации проектной части Государственного задания № 9.462.2014/К Минобрнауки России в сфере научной деятельности.

i The work contains the description and the results of theoretical and experimental research of the active damper and the platform for active vibration isolation based on magnetorheological elastomers. The active damper of this type can be used as a drive of micro- or nanopositioning for a vibroinsulated object. Compared to piezoelectric systems, magnetorheological elastomers give such advantages for active control of vibration as a large range of displacements and more efficient absorption of the vibration energy. The platforms for active vibration isolation based on magnetorheological elastomers also provide the possibility to control amplitude-frequency characteristics and the positioning with millisecond response speed and nanometer running accuracy. A dynamic model of automatic control system has been developed to determine dynamic characteristics of the active damper (stability, quality and accuracy). The article presents the results of experimental studies of the most important active damper parameters. They include the starting current, transient time for stepping and transmission coefficient of the vibration displacement amplitude.

Keywords: magnetorheological elastomer, active damper, vibration isolation, positioning error, transitional process.

При современном развитии нанотехнологий необходима защита нанотехнологического и исследовательского оборудования (установок микро- и нанолитографии, оборудования нано-локальной ионной и электронной обработки, сканирующих электронных и зондовых микроскопов и др.) от различных возникающих в условиях городской среды неблагоприятных воздействий, в том числе вибрационных возмущений [1, 2]. Колебания высокой частоты успешно изолируются с помощью систем пассивной виброзащиты. Гораздо более опасными являются вызванные резонансными явлениями низкочастотные колебания, для устранения которых используются системы активной виброзащиты [3, 4].

За рубежом разработаны системы активной виброизоляции и, в частности, ряд виброзащитных столов на основе пьезоэлектрических преобразователей, которые характеризуются активным диапазоном частот от 5 до 13 Гц [3]. Созданы также вязкоупругие виброизолирующие столы с отрицательной жесткостью [4], которые имеют следующие характеристики: резонансная частота — 0,5 Гц; коэффициент передачи амплитуды виброперемещений — 0,05; рабочий диапазон частот — 4...60 Гц; нагрузка — до 25 кг. Недостатком перечисленных столов является малая эффективность подавления колебаний (коэффициент передачи более 0,1) при частотах менее 4...5 Гц. Таким образом, проблема разработки активной виброизолирующей системы для функционирования в низкочастотном диапазоне 0,5...60 Гц с высокой степенью подавления колебаний для прецизионного оборудования является чрезвычайно актуальной.

Цель работы — создание платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров (МРЭ) и обеспечение ее эффективной работы в области низких частот, а также проведение теоретических и экспериментальных исследований основных параметров активного демпфера на основе МРЭ: времени переходного процесса при пошаговом перемещении и коэффициента передачи амплитуды виброперемещений.

Предлагаемая активная виброизолирующая платформа на основе МРЭ позволяет решить указанную проблему [5]. МРЭ — композиты на основе силикона и магнитоактивных частиц микронного размера [6]. Такие материалы при действии магнитного поля могут обратимо деформироваться [7, 8] и менять модуль упругости [9]. Эти свойства позволяют улучшить демпфирование по сравнению с обычными вязкоупругими системами. Кроме того, активный демпфер можно использовать в качестве привода микро- или нанопозиционирования для перемещения и стабилизации положения виброизолируемого объекта [10]. Свойства МРЭ использованы для регулирования параметров точности, динамики и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) активного демпфера. По сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями системы активной виброизоляции на основе МРЭ имеют больший диапазон перемещений (до 1 мм), более эффективное поглощение энергии колебаний и возможность активного управления АЧХ с миллисекундным быстродействием и нанометровой точностью перемещений [5].

Активная виброизолирующая платформа, общий вид которой показан на рис. 1, содержит

нижнюю и верхнюю плиты (последняя на рисунке не показана), четыре активных демпфера и четыре узла упругой подвески с массовым корректором, расположенные по углам платформы.

Активный демпфер, разрез которого показан на рис. 2, а, содержит электромагнитную систему и мембрану из МРЭ с жестким центром, образующим в электромагнитной системе рабочий воздушный зазор. Демпфер 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, значение которой имеет максимум вблизи жесткого центра. Под действием этой магнитной индукции мембрана с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Получение МРЭ заключается в смешении порошка железа с жидким силиконовым каучуком, заливке смеси в заливочные формы и отверждении композиции при 100...150 °С. Для МРЭ характерны эффекты структурирования под действием внешнего магнитного поля. В этих материалах частицы активного наполнителя, расположенные в эластичной матрице, под действием поляризующих сил магнитного поля взаимодействуют друг с другом и способны перемещаться на ограниченные расстояния, образуя цепеподобные структуры. Величина этих перемещений определяется активностью магнитного наполнителя, взаимодействующего с управляющим полем и эластичностью полимерной матрицы: чем выше ее эластичность, тем больше вероятность образования цепеподобных структур в эластомере.

На рис. 2, б представлена фотография, показывающая структурирование внутри образца МРЭ, в результате которого частицы железа

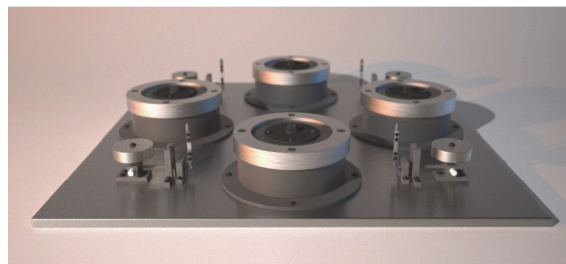
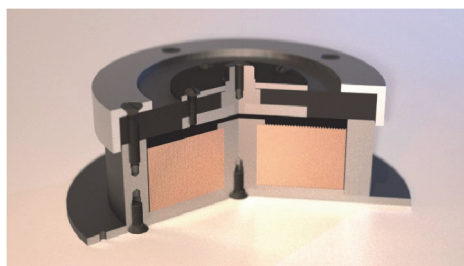


Рис. 1. Общий вид платформы для активной виброизоляции (без верхней плиты)

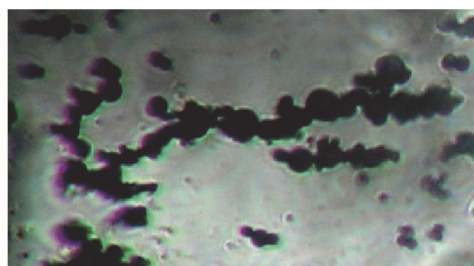
образуют единую цепочку в магнитном поле с индукцией примерно 200 мТл. При уменьшении магнитного поля частицы возвращаются на свои места стационарного равновесного расположения под действием упругих сил полимерной матрицы. Образование подобных сцепленных структур внутри полимерной матрицы приводит к значительному увеличению упругости и вязкости материала. С другой стороны, процессы структурирования внутри материала приводят к деформации. Образец расширяется под действием магнитного поля в направлении последнего. Этот эффект использован в предлагаемом устройстве активной виброизоляции и позиционирования.

Узел упругой подвески виброизолирующей платформы представляет собой горизонтальный маятник с регулируемой несущей пружиной и массовым корректором. Масса маятника — эквивалент одной четверти массы виброизолируемого объекта. Узлы упругой подвески позволяют настраивать платформу для активной виброизоляции на требуемую массу объекта с помощью регулируемой несущей пружины и резонансную частоту посредством массового корректора [11].

Моделирование работы активного демпфера позволило выполнить анализ и синтез системы автоматического регулирования (САР) и определить параметры качества и точности.



а



б

Рис. 2. Экспериментальный образец активного демпфера на основе МРЭ (а) и структурированные частицы магнитного наполнителя внутри полимерной матрицы МРЭ (б)

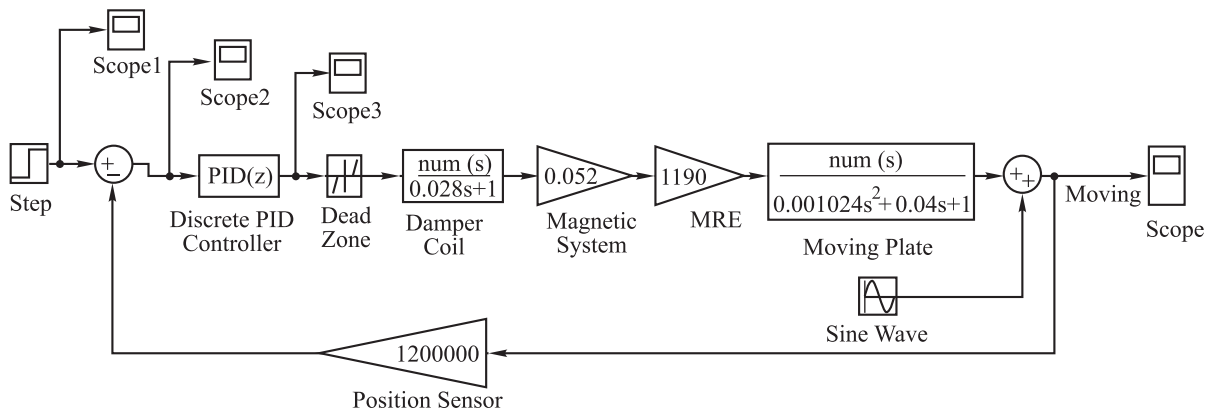


Рис. 3. Структурная схема САУ активного демпфера при синусоидальном вибрационном воздействии и ступенчатом управляющем сигнале

В процессе моделирования в программной среде Simulink MATLAB была проанализирована реакция системы при одновременном воздействии синусоидальных вибраций и ступенчатом управляющем сигнале с пошаговым перемещением демпфера на 5 мкм.

Структурная схема САУ активного демпфера приведена на рис. 3. На ней показаны передаточные функции следующих элементов: электромагнитной катушки (Damper Coil), магнитопровода (Magnetic System), мембраны из МРЭ (MRE), подвижного жесткого центра (Moving Plate) и датчика положения активного демпфера (Position Sensor). В динамической модели также учтена нелинейность зависимости перемещения активного демпфера от управляющего напряжения, которая определяется зоной нечувствительности демпфера (Dead Zone). Эта нелинейность определяется интервалом напряжений ($-U$; $+U$), при котором демпфер остается неподвижным. Структурная схема содержит также элементы для наблюдения сигналов (Scope, Scope1, Scope2, Scope3), задатчик входного управляющего ступенчатого сигнала

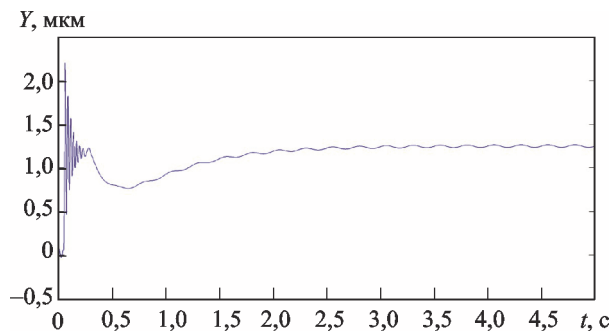


Рис. 4. График переходного процесса САУ активного демпфера при синусоидальном вибрационном воздействии и ступенчатом управляющем сигнале

(Step), задатчик синусоидальных вибраций (Sine Wave) и элементы сравнения сигналов. Параметры воздействия: амплитуда синусоидальных колебаний основания демпфера — 5 мкм, частота колебаний — 4 Гц. В структурной схеме для обеспечения устойчивости и уменьшения времени переходных процессов использован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (Discrete PID Controller).

Переходный процесс САУ активного демпфера показан на рис. 4, где Y — перемещение активного демпфера. Время переходного процесса для погрешности позиционирования 0,25 мкм составляет 0,6 с. Коэффициент передачи амплитуды колебаний активного демпфера равен 0,02.

Экспериментальные исследования активного демпфера и виброизолирующей платформы на основе МРЭ позволили определить их параметры: ток трогания, время переходного процесса и коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

Ток трогания, как было отмечено ранее, определяет зону нечувствительности, а следовательно, погрешность позиционирования активного демпфера. Зависимость перемещения активного демпфера от управляющего тока представлена на рис. 5, где сплошная кривая соответствует экспериментальным данным, вертикальные отрезки — доверительным интервалам, а пунктирная кривая — аппроксимации. Ток трогания составляет около 0,05 А, что для заданной замкнутой САУ (см. рис. 3) соответствует погрешности позиционирования ~0,25 мкм.

Время переходного процесса при перемещении активного демпфера из одного положения в другое определяет максимальное значение

рабочей частоты демпфера при активном подавлении колебаний. Динамические характеристики активного демпфера, который работает как привод микро- и нанопозиционирования, определяются временем переходных процессов при его перемещении в разных режимах: пошаговом, непрерывном следящем или в режиме стабилизации положения. Исследования значений постоянной времени при пошаговом перемещении демпфера из одной точки в другую выполнены для управляющего ступенчатого сигнала в диапазоне 0,2...0,8 А с шагом 0,2 А. Графики переходных процессов при пошаговом перемещении активного демпфера показаны на рис. 6. Повышение быстродействия возможно за счет использования системы обратной связи в активном режиме работы демпфера.

Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений является основным параметром активного демпфера и определяется отношением амплитуд колебаний положения виброизолируемого объекта и основания. Экспериментальная оснастка для определения коэффициента передачи амплитуды виброперемещений, схема которой приведена на рис. 7, содержит генератор сигналов, емкостные датчики пере-

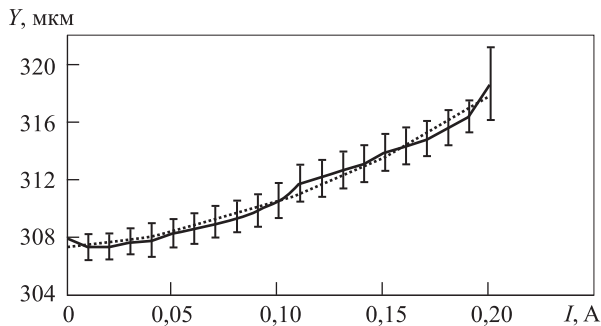


Рис. 5. Зависимость перемещения Y активного демпфера от управляющего тока I

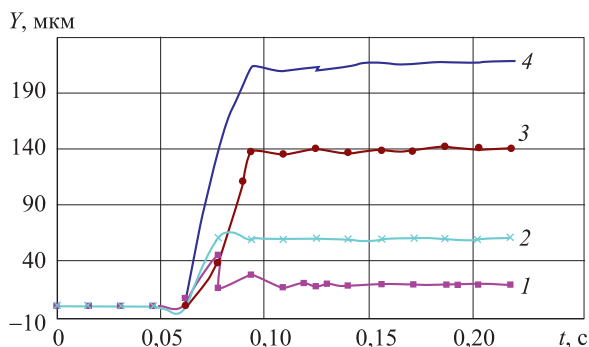


Рис. 6. Графики переходных процессов при пошаговом перемещении активного демпфера: 1 — $I = 0,2$ А; 2 — $I = 0,4$ А; 3 — $I = 0,6$ А; 4 — $I = 0,8$ А

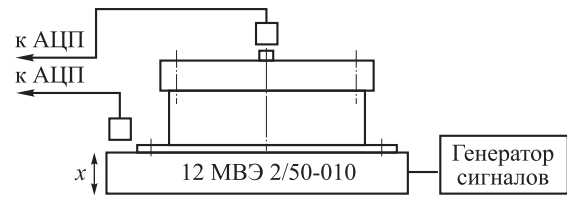


Рис. 7. Схема подключения к активному демпферу экспериментальной оснастки

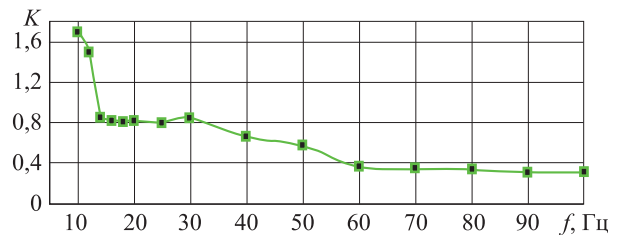


Рис. 8. АЧХ активного демпфера

мещений, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), датчик гармонических колебаний — вибратор напольный 12МВЭ 2/50-010. Частота и амплитуда вибраций основания задавались с помощью генератора сигналов. Частота вибраций изменялась в диапазоне 10...100 Гц, амплитуда виброперемещений составляла 300 мкм. Сигналы перемещений активного демпфера и основания определялись с помощью двух датчиков, подавались на АЦП и управляющий компьютер. Измерения проводились при нулевом управляющем токе.

Зависимость коэффициента передачи K от частоты колебаний f (АЧХ) активного демпфера приведена на рис. 8. Анализ АЧХ демпфера показал, что в пассивном режиме работы в диапазоне частот 10...60 Гц проявляются резонансные явления и коэффициент передачи демпфера имеет высокие значения (до 1,7). При частоте больше 60 Гц демпфер работает достаточно хорошо и коэффициент передачи находится на уровне 0,3.

Выводы

1. Предлагаемая активная виброизолирующая платформа на основе МРЭ позволяет за счет использования свойств этих материалов регулировать параметры точности, динамики и АЧХ активных демпферов. При моделировании работы САР активного демпфера при одновременном воздействии синусоидальных вибраций и ступенчатым управляющим сигналом с пошаговым перемещением время переходного процесса для погрешности позиционирования 0,25 мкм со-

ставляет 0,6 с. Коэффициент передачи амплитуды колебаний активного демпфера равен 0,02.

2. Ток трогания, определяющий зону нечувствительности и погрешность позиционирования активного демпфера, составляет около 0,05 А, что для заданной замкнутой САР соответствует погрешности позиционирования ~0,25 мкм.

3. Динамические характеристики активного демпфера, работающего в качестве привода,

определяются временем переходного процесса при его перемещении в пошаговом режиме, которое для разомкнутой системы управления составляет около 30 мс.

4. В пассивном режиме работы демпфер эффективно функционирует при частоте колебаний, превышающей 60 Гц, при этом коэффициент передачи амплитуды виброперемещений находится на уровне 0,3.

Литература

- [1] Быков В.А. Инструменты нанотехнологий сегодня и завтра. *Наноиндустрия*, 2010, Спецвыпуск, с. 10–14.
- [2] Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А. *Наноэлектроника*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 223 с.
- [3] *Active Vibration Isolation. Accurion*. URL: <http://www.accurion.com> (дата обращения 15 мая 2016).
- [4] *Vibration Isolation Products. Minus K® Technology, Inc.* URL: <http://www.minusk.com> (дата обращения 15 мая 2016).
- [5] Михайлов В.П., Селиваненко А.С., Базиненков А.М. Платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров. *Вестник машиностроения*, 2015, № 4, с. 28–31.
- [6] Горбунов А.И., Михайлов В.П., Степанов Г.В., Борин Д.Ю., Андриянов А.А., Темнов Д.В., Семеренко Д.А. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, № 1(70), с. 90–107.
- [7] Nikitin L.V., Mironova L.S., Stepanov G.V., Samus A.N. The Influence of a Magnetic Field on the Elastic and Viscous Properties of Magnetoelastics. *Polymer Science Series A*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 443–450.
- [8] Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S., Gorbunov A.I. Magnetodeformational effect and effect of shape memory in magnetoelastics. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2004, no. 272–276, pp. 2072–2073.
- [9] Stepanov G.V., Abramchuk S.S., Grishin D.A., Nikitin L.V., Kramarenko E.Yu., Khokhlov A.R. Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Viscoelastic Behavior of Magnetic Elastomers. *Polymer*, 2007, vol. 48, pp. 488–495.
- [10] Borin D., Stepanov G., Mikhailov V., Gorbunov A. The damping device based on magnetoactive elastomer. *Magnetohydrodynamic*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 437–444.
- [11] Рагульскис К.М., ред. *Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью*. Ленинград, Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 96 с.

References

- [1] Bykov V.A. Instrumenty nanotekhnologii segodnia i zavtra [Tools of nanotechnology today and tomorrow]. *Nanoindustriia* [Nanoindustry]. 2010, special issue, pp. 10–14.
- [2] Borisenko V.E., Vorob'eva A.I., Utkina E.A. *Nanoelektronika* [Nanoelectronics]. Moscow, BINOM. Laboratoriia znanii publ., 2009. 223 p.
- [3] *Active Vibration Isolation. Accurion*. Available at: <http://www.accurion.com> (accessed 15 May 2016).
- [4] *Vibration Isolation Products. Minus K® Technology, Inc.* Available at: <http://www.minusk.com> (accessed 15 May 2016).
- [5] Mikhailov V.P., Selivanenko A.S., Bazinenkov A.M. Platformy dlia aktivnoi vibroizoliatsii na osnove magnitoreologicheskikh elastomerov [Platforms for active vibration isolation on the base of magnetorheologic elastomers]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 4, pp. 28–31.

- [6] Gorbunov A.I., Mikhailov V.P., Stepanov G.V., Borin D.Iu., Andriianov A.A., Temnov D.V., Semerenko D.A. Issledovanie svoistv i novoe primeneniye magnitnykh silikonovykh kompozitov [Investigation of Properties and New Application of Magnetic Silicon Composites]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2008, no. 1 (70), pp. 90–107.
- [7] Nikitin L.V., Mironova L.S., Stepanov G.V., Samus A.N. The Influence of a Magnetic Field on the Elastic and Viscous Properties of Magnetoelastics. *Polymer Science Series A*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 443–450.
- [8] Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S., Gorbunov A.I. Magnetodeformational effect and effect of shape memory in magnetoelastics. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2004, no. 272–276, pp. 2072–2073.
- [9] Stepanov G.V., Abramchuk S.S., Grishin D.A., Nikitin L.V., Kramarenko E.Yu., Khokhlov A.R. Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Viscoelastic Behavior of Magnetic Elastomers. *Polymer*, 2007, vol. 48, pp. 488–495.
- [10] Borin D., Stepanov G., Mikhailov V., Gorbunov A. The damping device based on magnetoactive elastomer. *Magnetogidrodynemic*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 437–444.
- [11] *Vibrozhchitnye sistemy s kvazinulevoi zhestkost'iu* [Vibration system with quasi-zero stiffness]. Ed. Ragul'skis K.M. Leningrad, Mashinostroenie, Leningr. otd-nie publ., 1986. 96 p.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016

Информация об авторах

МИХАЙЛОВ Валерий Павлович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mikhailov@bmstu.ru).

ТОВМАЧЕНКО Дмитрий Константинович (Москва) — инженер 3-й категории производственного комплекса АО «ГЗ «Пульсар» (105187, Москва, Российская Федерация, Окружной пр-д, д. 27, e-mail: svarog4@mail.ru).

БАЗИНЕНКОВ Алексей Михайлович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: bazinenkov@mail.ru).

СТЕПАНОВ Геннадий Владимирович (Москва) — начальник лаборатории. Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (111123, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 38, e-mail: gstepanov@mail.ru).

Information about the authors

MIKHAILOV Valeriy Pavlovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mikhailov@bmstu.ru).

TOVMACHENKO Dmitriy Konstantinovich (Moscow) — Engineer of 3rd Category. State Plant PULSAR (105187, Moscow, Russian Federation, Okruzhnoy proezd, Bldg. 27, e-mail: svarog4@mail.ru).

BAZINENKOV Aleksey Mikhailovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: bazinenkov@mail.ru).

STEPANOV Gennadiy Vladimirovich (Moscow) — Head of Laboratory. State Research Institute for Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 38, e-mail: gstepanov@mail.ru).