электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

УДК 543.271; 533.5.08

Система активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомерных демпферов для нанотехнологического оборудования

Селиваненко А. С.,
Шаков К. Г.
Научный руководитель: В.П. Михайлов, д.т.н., профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Производство микроэлектронной продукции связано с множеством проблем, одной из которых является воздействие вибраций на технологическое оборудование. При изготовлении микроэлектронных компонентов, размеры которых не превышают нескольких микрометров малейшие вибрации приводят к браку, поэтому необходима виброзащита платформ, на которых установлено оборудование [1,2].

Колебания высокой частоты успешно изолируются при помощи систем пассивной виброзащиты. Гораздо более опасными являются колебания с низкими частотами, для устранения которых и используются системы активной виброизоляции.

На кафедре «Электронные технологии в машиностроении» была разработана конструкция экспериментального стенда (рис. 2) с целью проведения испытаний демпфера (рис. 1) для активной виброзащиты.

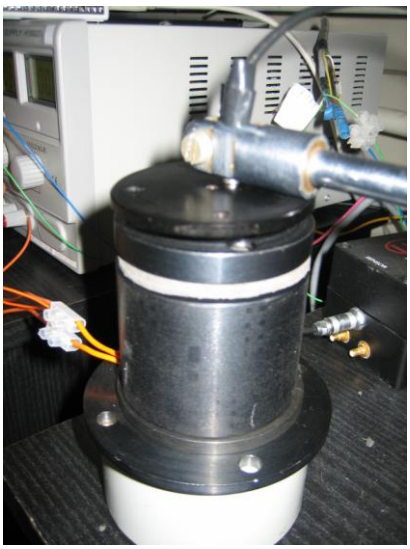

Рис. 1. – Активный демпфер на основе магнитореологического эластомера

1. Демпфер на основе МР-эластомера

МР-эластомер, используемый в активном демпфере получен путем диспергирования магнитного порошка в жидком силиконовом каучуке с последующей

полимеризацией композиции в форме. В качестве магнитного наполнителя используется порошок железа с размером от 2 до 5мкм (рис.2).

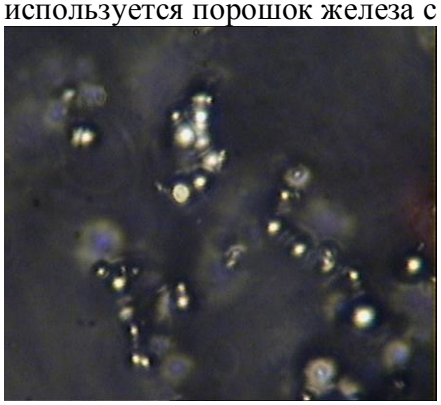

Рис. 2. - МЭ-эластомер на основе карбонильного железа

По совокупности свойств и в зависимости от того, какое свойство изучается, композит называют по-разному – магнитоэластичный композит или магнитоэластик, магнитореологический эластомер, магнитный гель, эластомер-ферромагнитный композит, эластичный магнит, ферроэласт, магнитострикционный гель. Поскольку композит является принципиально новым, то нет еще устоявшейся терминологии.

При помощи магнитного поля можно управлять удлинением образцов из МЭ-эластомера и использовать этот эффект для создания прецизионных механизмов перемещения и активных демпферов.

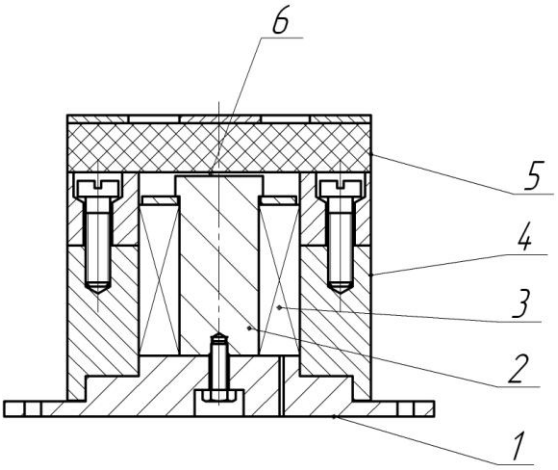

Рис. 3. – Схема активного демпфера на основе МР-эластомера

Активный демпфер – главный элемент виброизолирующей платформы (рис. 3), состоит из: неподвижной опоры – 1; сердечника из магнитомягкого материала – 2; электромагнитной катушки – 3; корпуса – 4; мембраны из МР-эластомера с жестким центром – 5, которая установлена с зазором 6 для обеспечения возможности перемещения мембрны вертикально под действием магнитного поля.

Устройство работает следующим образом: при подаче управляющего тока в электромагнитную катушку 3 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране 5 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, величина которой имеет максимум вблизи сердечника 2. Под действием этой магнитной индукции мембрана с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Пример влияния магнитного поля на МРЭ представлен на рис. 4, 5.

То есть в данном случае эластомер приклеен у основания к столику. В верхний столик встроен электромагнит, при включении которого частицы МРЭ притягиваются к нему, вызывая тем самым деформации МРЭ. При выключении электромагнита силы упругости возвращают эластомер в исходное состояние.

2. Физическая модель поведения МРЭ

Рассмотрим модель поведения МРЭ при сдвиговой деформации. Предположим, что на эластомер действует внешнее магнитное поле с индукцией B (рис. 4). МРЭ в данной установке является мембраной активного демпфера. Найдем коэффициент жесткости этой мембраны. Предположим, что под действием внешней силы F нижняя стенка зазора смещается относительно верхней на величину X, при этом сдвиг равен $\gamma=X/h$.

Сила магнитного сцепления F_N между соседними слоями частиц дисперсной фазы определяется по формуле Максвелла как $F_N=9{,}81\cdot10^{12}\cdot(B/5000)^2\cdot S_{сл}\cdot\varphi_v$ (1) или как $F_N=K\cdot B^2\cdot S_{сл}\cdot\varphi_v$ (2), где $\boldsymbol{\varphi_v}$ – коэффициент объемной концентрации частиц; $\boldsymbol{S_{сл}}$ - площадь сечения рабочего зазора, перпендикулярная магнитному потоку.

При сдвиге слоев МРЭ возникает касательная сила сопротивления $F_{\tau1}$, обусловленная магнитным сцеплением между соседними слоями и равная $F_{\tau1}=F_N\cdot tg\alpha=K\cdot B^2\cdot S_{сл}\cdot\varphi_v\cdot X/h$ (3). Кроме того, возникает упругая касательная сила $F_{\tau\ 2}=G\cdot S_{сл}\cdot X/h$ (4), где $\boldsymbol{G}$ – модуль сдвига эластомера. Эта сила характеризует упругие свойства МРЭ, представляющего собой высокоэластичную полимерную матрицу, в которой распределены частицы карбонильного железа круглой формы.

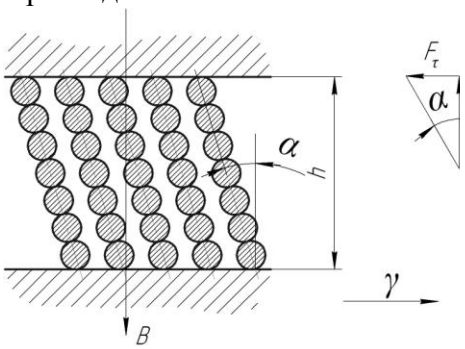

Рис. 4. - Схема сдвиговой деформации мембраны из МРЭ

Таким образом, коэффициент жесткости упругой мембраны МРЭ равен:

$$k=\frac{S_{сл}}{h}(KB^2\varphi_v+G)=\frac{S_{сл}}{h}(9{,}81\cdot10^{12}(B/5000)^2\varphi_v+G), \qquad (5)$$

Использование МР эффекта позволяет регулировать коэффициент жесткости k упругой мембраны за счет изменения величины магнитной индукции B, и, соответственно, частотные и точностные характеристики устройств активного демпфирования и микропозиционирования.

3. Платформа «НАНОФАБ-100»

НАНОФАБ 100 — модульная технологическая платформа [6] для формирования нанотехнологических комплексов (НТК) с кластерной компоновкой, включающих технологические установки с возможностями групповых и нанолокальных методов обработки подложек диаметром до 100 мм [5].

Области применения НТК НАНОФАБ 100 [5,6] покрывают практически все поле нанотехнологических исследований и разработок, связанных с твердотельными наноматериалами, наноструктарами и наноустройствами. Спектр возможностей НАНОФАБ 100 простирается от проведения фундаментальных исследований до отработки отдельных технологических приемов и моделирования наноэлектронных устройств.

Координатно-связанная система позиционирования подложек позволяет создавать сложные многокомпонентные 3D наноустройства путем проведения в различных модулях последовательных нанотехнологических операций с нанометровым разрешением.

Особенно важной является область применения НТК НАНОФАБ 100 для технологических разработок в области современной кремниевой электроники, давно уже вступившей в область реальной наноэлектроники.

Главное требование, предъявляемое к устройствам активной виброзащиты – способность устранять колебания частотой не ниже 1 Гц.

4. Экспериментальная платформа активной виброизоляции на основе МР-демпферов

Экспериментальная платформа на основе МР демпферов представлена на рис. 5. Платформа состоит из: демпфера – I на основе МР – эластомера и задатчика вибраций II.

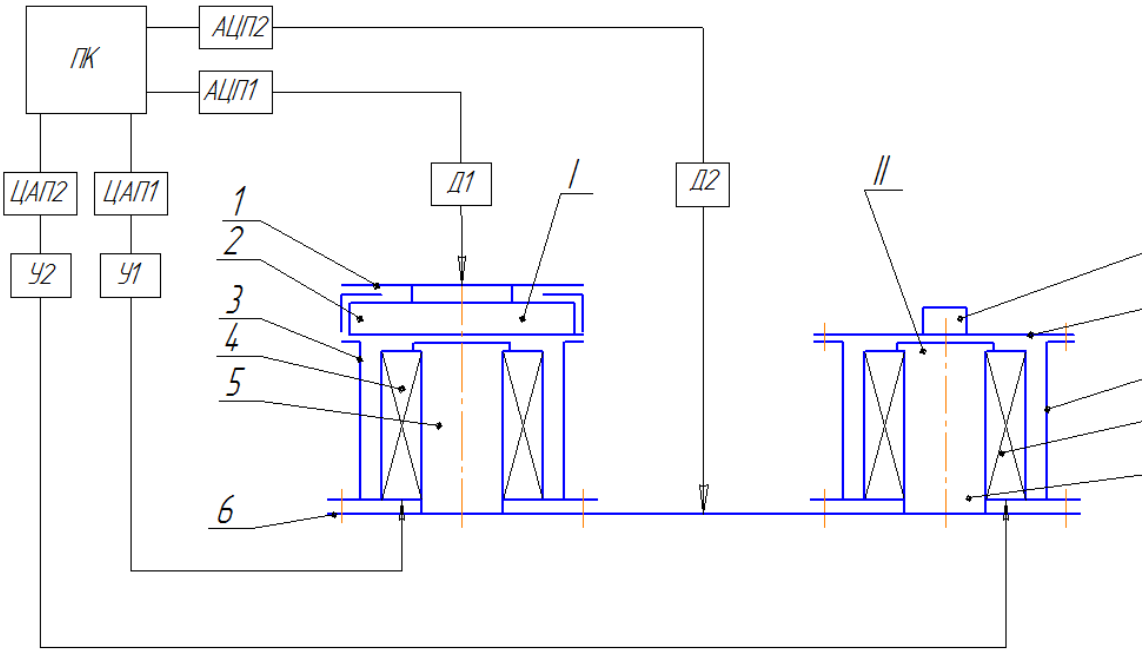

Рис. 5. Схема платформы для исследования активного МР-демпфера

Принцип работы задатчика (рис. 5, поз. II) аналогичен работе демпфера (п. 1): при подаче управляющего переменного тока в электромагнитную катушку 10 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В грузе 7 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, величина которой имеет максимум вблизи сердечника 11. Под действием этой магнитной индукции груз перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Датчики Д1 и Д2 предназначены для измерения амплитуды вибраций. При измерении вибраций сигнал с датчиков поступает через АЦП-ЦАП в ПК и обрабатывается программой LabView (одновременно создается файл записи измерений).

Кроме того, через датчик Д1 можно организовать обратную связь, которая необходима для автоматического управления установкой активной виброизоляции.

5. Разработка системы управления МР- демпфером в среде LabVIEW

Активная виброизоляция осуществляется с помощью управляющей программы, разработанной в среде LabView. Данная программа в совокупности со специальным емкостным датчиком перемещений (Д1), установленным согласно схеме на рис. 5, позволяет отслеживать перемещения подвижной платформы демпфера (рис. 5, поз. 1) и подавать на его электромагнитную катушку (рис. 5, поз. 4) управляющий сигнал.

Система функционирует следующим образом: датчик перемещений, находясь непосредственно над мембраной (рис. 5, Д1) посылает сигнал через АЦП-ЦАП на ПК. Далее сигнал обрабатывается программой (рис. 6), которая корректирует управляющий сигнал по заданному алгоритму и посылает его через усилитель тока на катушку демпфера (рис. 5, поз. 4).

Усилитель (рис. 5) в данной схеме служит для усиления тока перед подачей на демпфер, т.к. сила тока, необходимая для управления варьируется от 0 до 2 А, т.к. максимальная сила тока на выходе АЦП-ЦАП до 0,2 А.

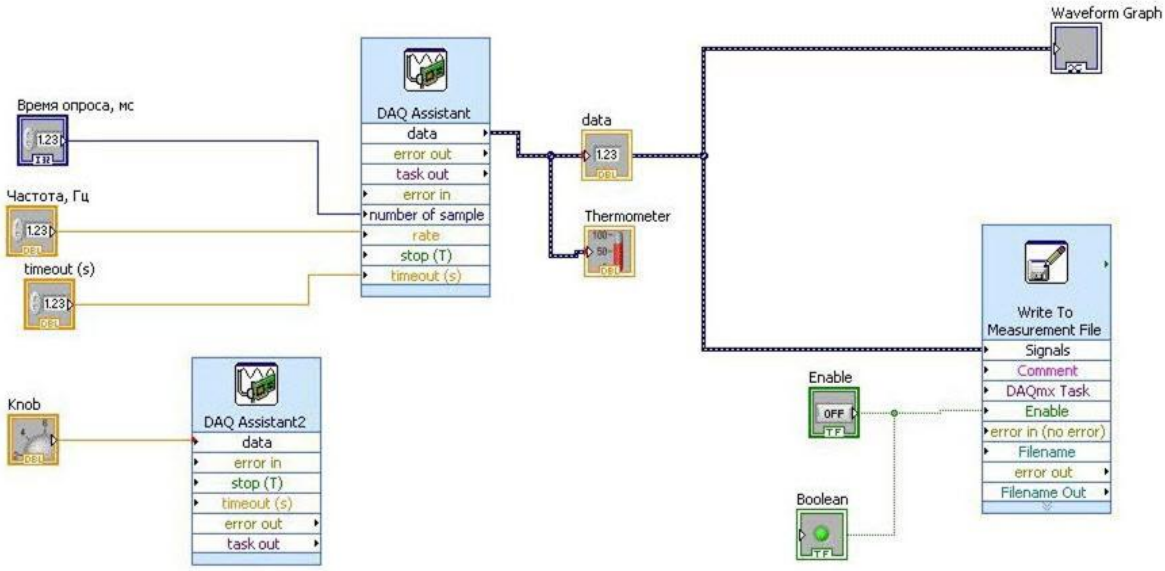

Рис. 6. – управляющая программа в среде LabView

6. Измерение характеристик динамических процессов в экспериментальных образцах МР-эластомера демпфера

При проведении исследований переходных процессов при перемещении МЭ-демпфера для нагрузок 0Н; 11Н; 22Н и для входного ступенчатого управляющего сигнала 2 А были получены следующие значения времени переходного процесса: 1мс, 60мс и 200 мс соответственно. Перемещения МЭ-демпфера измерялись емкостным датчиком при помощи системы управления на основе персонального компьютера (ПК). Сигнал от емкостного датчика перемещения поступал через АЦП в компьютер, сохранялся и отображался на экране монитора.

Быстродействие демпфера [4] определяется временем переходных процессов в МР-эластомере. Время структурирования реологической среды $t_{стр}$ и релаксации $t_р$ сдвиговых напряжений определяется отношением:

$$\mu_{экв}(H)/E, \quad (6)$$

где $\mu_{экв}(H)$ - динамическая эквивалентная вязкость МР-эластомера;

E – модуль упругости МР-эластомера.

Эти параметры, а также значения времени переходных процессов могут регулироваться за счет изменения уровня напряженности магнитного поля путем изменения силы тока в катушке [4].

Проводились измерения перемещения МР-демпфера без нагрузки и со статической нагрузкой. На платформе (рис. 5, поз. 1) демпфера устанавливался груз массой 6Н и подавалось фиксированное значение тока от 0,2 до 1,5А – в виде ступенчатого сигнала.

Процесс позиционирования демпфера носит классический вид апериодического переходного процесса (рис. 7).

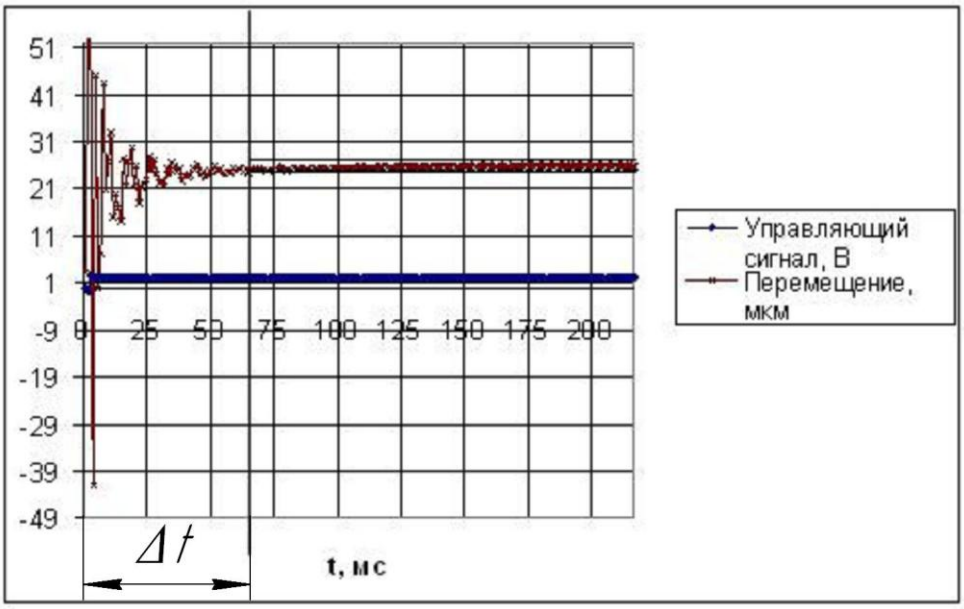

Рис. 7. – График переходного процесса при нагрузке 11Н

Исходя из проведенных экспериментов видно, что скорость реакции демпфера на изменение магнитного поля достаточно мала. Колебания при переходе с одного уровня на другой (рис. 7) вызваны наличием упругих сил в мембране, то есть система при приложении магнитного поля стремится занять равновесное положение.

7. Проведение эксперимента по определению передачи колебаний демпфера в пассивном режиме работы

Цель эксперимента – проверка работоспособности стенда (рис. 5) перед проведением дальнейших исследований характеристик самого демпфера.

Эксперимент проводился при установке платформы непосредственно на станину и на резиновый коврик, который служит для пассивной виброизоляции экспериментальной платформы, а также для того, чтобы выбрать неровности платформы при установке ее на станину.

Полученные в процессе проведения эксперимента результаты представлены на рис. 8.

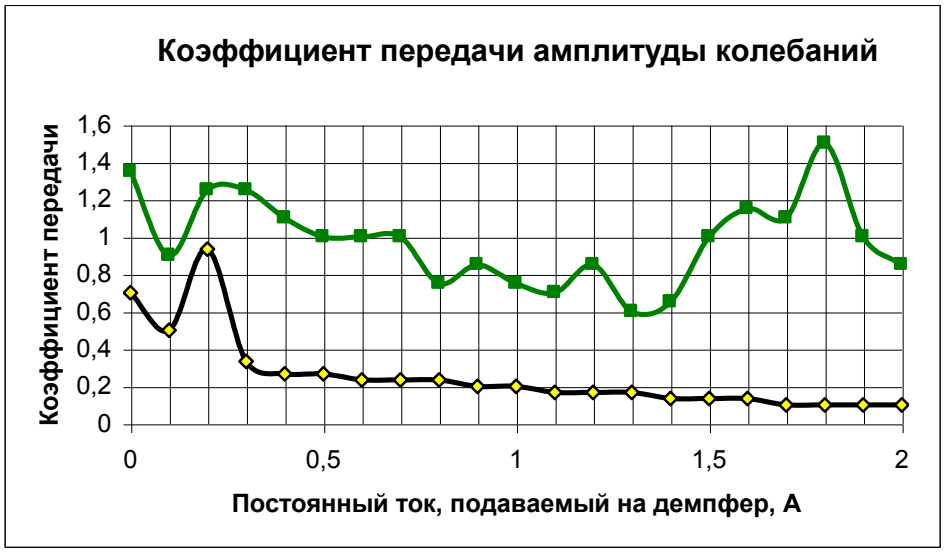

Рис. 8. – Коэффициент передачи амплитуды колебаний

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при использовании резинового коврика для пассивной виброизоляции, видимо, существуют некоторые неровности и зазоры, которые вносят дополнительное возмущение в процессе проведения эксперимента.

8. Проведение экспериментов по определению гистерезиса перемещений

В эксперименте использовался демпфер, блок питания, датчик перемещений Д1 (рис. 5, поз. I).

Полученная зависимость перемещений мембраны демпфера под воздействием магнитного поля от силы тока, подаваемого на электромагнитную катушку представлена на рис. 9.

В ходе эксперимента были исследована зона нечувствительности и остаточная деформация МР-демпфера. Эксперимент проводился при токах I = 0..2 А.

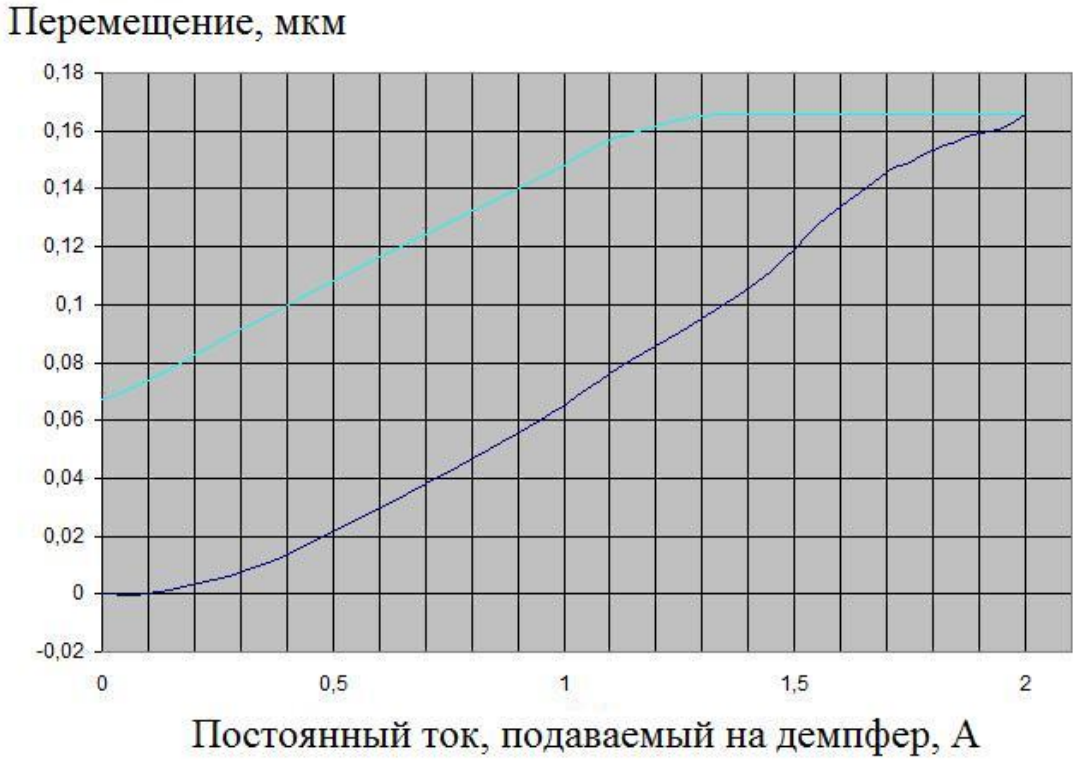

Рис. 9. Гистерезис МР-демпфера

Таким образом, эксперимент выявил наличие двух зон нечувствительности:

- при повышении силы тока от 0 до 0,1 А не наблюдается изменений в поведении эластомера;
- при достижении силы тока в 2 А и последующем его уменьшении до значения 1,3 А также не наблюдается деформации эластомера.

Полученные данные можно объяснить следующим образом.

В первом случае, силы тока величиной до 0,1 А недостаточно для преодоления сил статического трения между магнитомягкими частицами, распределенными в МР-эластомере, из которого сделана мембрана.

Во втором случае – при уменьшении силы тока от 2 до 1,3 А эластомер практически не изменяет своего положения также вследствие наличия статического трения между магнитомягкими частицами. Кроме того, оказывает некоторое влияние остаточная намагниченность магнитопровода и магнитных частиц МР-эластомера.

При уменьшении силы тока до нулевого значения в мембране наблюдается остаточная деформация около 70 мкм. Эта деформация объясняется, в основном,

наличием в МР-эластомере вязкого трения, которое появляется при смещении макромолекул эластомера относительно друг друга.

Эти два параметра – зона нечувствительности и остаточная деформация – оказывают существенное влияние на точностные и динамические характеристики демпфера, а также на эффективность поглощения энергии колебаний МР-эластомером.

Заключение

1. В полуактивном режиме работы демпфера на основе МР-эластомера при подаче тока 0,3 А наблюдается резонанс системы. При этом коэффициент передачи вибраций имеет максимальное значение около 1,5, т.е. амплитуда колебаний возрастает.
2. При токе 1 А коэффициент передачи вибраций минимален (около 0,25), т.е. наблюдается эффективное гашение колебаний.
3. При дальнейшем возрастании тока (более 1 А) происходит увеличение коэффициента передачи вибраций вследствие повышения жесткости мембраны.
4. При токах от 0 до 0,1 А и от 2 до 1,3 А наблюдается зона нечувствительности, обусловленная наличием статического трения между магнитомягкими частицами, распределенными в МР-эластомере, из которого сделана мембрана. Кроме того, оказывает влияние остаточная намагниченность магнитопровода и магнитных частиц МР-эластомера.
5. МР-демпфер имеет остаточную деформацию около 70 мкм, которая объясняется, в основном, наличием в МР-эластомере вязкого трения, которое появляется при смещении макромолекул эластомера относительно друг друга.
6. Для осуществления эффективной активной виброизоляции необходимо располагать демпфер исключительно на твердых поверхностях. Какие-либо дополнительные элементы для пассивной виброизоляции перед установкой под платформу должны тестироваться на экспериментальной установке.

Литература

1. Управление активной виброизоляцией и позиционированием магнитореологических устройств / В.П. Михайлов, Г.В. Степанов, А.М. Базиненков, И.К. Зобов, К.Г. Шаков. «Нано- и микросистемная техника», - 2011, №7, - С. 5 – 9 с.;
2. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms: FMIA Volume 91/ E.A. Deulin, V.P. Mikhailov, Y.V. Panfilov, R.A. Nevshupa / Series Editor R. Moreau, Springer, 2010. – 234 p;
3. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для прецизионного вакуумного оборудования / Шаков К.Г., Михайлов В.П., Базиненков А.М. «Вакуумная техника и технология», 2011, Т.21, № 3, С. 165-169;
4. Моделирование и исследование систем активной виброизоляции на основе магнитореологических материалов / Шаков К.Г., Михайлов В.П., Базиненков А.М. Высокие технологии в промышленности России: Материалы шестнадцатой международной научно-технич. конференции.– М., 2010.–С. 283-289;
5. Система активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомерных демпферов для нанотехнологического оборудования / Селиваненко А.С., Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии. Материалы научно-технической конференции.-М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 268 с.;
6. Нанотехнологические комплексы на базе платформы НАНОФАБ 100, [электронный ресурс], режим доступа:

http://www.ntmdt.ru/data/media/images/products/nanofab/nanofab_100_october_09.pdf ;

7. Пат. 2404381 Российская Федерация, МПК F 16 F 9/53, F 16 F 15/03. Активная опора / В.П. Михайлов, Г.В. Степанов, Д.Ю. Борин, И.К. Зобов, Е.Ю. Крамаренко; заявитель и патентообладатель Москва. ФГУП Государственный ордена Трудового Красного Знамени науч.-исслед. ин.-т химии и технологии элементоорганических соединений. - № 2009136160/11 ; заявл. 30.09.2009 ; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. - 9 с.