

Демпфер на основе магнитореологического эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования

© В.П. Михайлов, И.К. Зобов, А.С. Селиваненко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведена оценка демпфирующих свойств магнитореологических (МР) эластомеров в условиях воздействия на них магнитного поля. Представлены анализ системы полупассивной виброизоляции и возможность регулировки вязко-упругих свойств демпфера. Исследована эффективность поглощения энергии колебаний МР-эластомерами с использованием полученных зависимостей механического гистерезиса. Представлены результаты экспериментальных исследований активного МР-демпера на основе МР-эластомера. Показана возможность регулировки коэффициента передачи и жесткости в полупассивном режиме работы МР-демпера. Получена зависимость индукции от напряженности магнитного поля в рабочем зазоре МР-демпера. Показано использование ПИД регулирования, которое позволяет увеличить точность позиционирования и плавность перемещения, уменьшить время переходного процесса.

Ключевые слова: магнитореологические эластомеры, активное демпфирование, гистерезис, вязкость, упругость, точные виброизолирующие системы.

При реализации прецизионных процессов в нанотехнологическом и исследовательском оборудовании (в установках групповой и нанолокальной обработки полупроводниковых подложек оптическими, ионными, электронными или рентгеновскими пучками, в сканирующих зондовых микроскопах, в оборудовании адаптивной оптики и др.) зачастую требуется изолировать объект от внешних вибраций [1–4]. Вибрации межэтажных перекрытий, на которых устанавливается прецизионное оборудование, имеют, как правило, широкий спектр частот [5]. Наиболее интенсивные колебания перекрытий в цехах машиностроительных предприятий происходят на частотах от 4 до 30 Гц. При этом амплитуда колебаний в вертикальном направлении составляет от 2 до 3 мкм, в горизонтальном — от 1,8 до 2 мкм. Максимальные колебания перекрытий в лабораториях исследовательских корпусов на высоких этажах происходят на частотах от 10 до 20 Гц с амплитудой колебаний в вертикальном направлении от 4 до 4,7 мкм, в горизонтальном — от 3 до 3,5 мкм [5].

В настоящее время применяются различные типы виброизолирующих устройств: пьезоэлектрические, электромагнитные, гидравлические, пневматические и т. д. Кроме того, они могут быть пассивные и

активные, в зависимости от того, подводится к ним дополнительная внешняя энергия для уменьшения амплитуды колебаний или нет. Основным параметром, характеризующим виброизолирующую систему, является коэффициент передачи, равный отношению амплитуд виброперемещений изолируемого оборудования и основания.

Пьезоэлектрические активные демпфирующие устройства (пьезотрубки, пьезостолбцы) обеспечивают точностные и динамические требования, но имеют невысокие нагрузочные характеристики и малый диапазон перемещений [7]. Кроме того, эффективность поглощения энергии колебаний в пьезоэлектрическом материале невысока, поскольку в пьезокристалле преобладают упругие деформации. При этом активная виброизоляция происходит за счет перемещения изолируемого объекта в противофазе внешним колебаниям в режиме стабилизации ускорения или положения.

Электромагнитные виброизолирующие устройства характеризуются, как правило, наличием длинных кинематических цепей, которые ухудшают динамику и точность виброизоляции вследствие малой жесткости и наличия сил трения в передаточных элементах [7].

Гидравлические и пневматические демпферы работают в большинстве случаев в пассивном режиме и не обеспечивают требуемых требований виброизоляции (точности и быстродействия стабилизации изолируемого объекта, степени подавления вибраций) [7]. Это обусловлено наличием сил трения в гидро- и пневмоцилиндрах и управляющих элементах (золотниковых и мембранных регуляторах), сжимаемостью рабочей среды. Кроме того, вязко-упругие системы пассивной виброизоляции эффективно подавляют вибрации, как правило, при частотах более 200 Гц [7]. В низкочастотной области такие системы малоэффективны, так как при наличии возбуждающих воздействий возникают интенсивные резонансные колебания, что является главным и трудно устранимым недостатком пассивной вязко-упругой подвески. Для решения задачи снижения вибраций во всем диапазоне рабочих частот необходимо использовать комбинированные системы демпфирования: пассивные при высоких частотах и активные при частотах от 0,5 до 200 Гц.

За рубежом разработан ряд виброзащитных платформ (например, фирмы Assurion), которые характеризуются активным диапазоном частот от 5 до 13 Гц [8]. Разработаны также вязко-упругие виброизолирующие платформы с отрицательной жесткостью (фирмы Minus K® Technology, Inc.), которые имеют следующие характеристики: резонансная частота — 0,5 Гц; коэффициент передачи — 0,05; диапазон частот — 4...60 Гц; нагрузка — до 25 кг [9]. Недостатком перечисленных платформ является малая эффективность подавления колебаний (коэффициент передачи более 0,1) при частотах менее 4...5 Гц.

Таким образом, проблема создания систем активной виброизоляции в низкочастотном диапазоне от 0,5 до 200 Гц с высокой степенью подавления колебаний для прецизионного оборудования является чрезвычайно актуальной.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны новые прецизионные активные демпферы на основе магнитореологических (МР) эластомеров и упругая подвеска с отрицательной жесткостью [6, 7, 10, 11]. Преимуществами таких демпферов являются больший диапазон перемещений (до 1 мм) и более эффективное поглощение энергии колебаний по сравнению с пьезоэлектрическими демпферами в низкочастотном диапазоне от 0,5 до 200 Гц, возможность активного управления амплитудно-частотными характеристиками с миллисекундным быстродействием и субмикронной точностью перемещений. Упругая подвеска с отрицательной жесткостью позволяет обеспечивать высокую несущую способность виброизолирующей системы при малой жесткости и, соответственно, при малой собственной резонансной частоте.

Целью работы является оценка демпфирующих свойств МР-эластомера и экспериментальные исследования основных рабочих характеристик активного демпфера на основе МР-эластомера: коэффициента передачи, быстродействия, точности позиционирования, гистерезиса и др.

Научная новизна исследований заключается в разработке методов регулирования коэффициента передачи, жесткости, эффективности поглощения энергии колебаний активным МР-демпфером за счет выбора уровня управляющих сигналов и объемной концентрации магнитных частиц в эластомере.

Оценка демпфирующих свойств МР-эластомера. Для оценки эффективности поглощения энергии колебаний МР-эластомера необходимо рассмотреть процесс деформации с молекулярной точки зрения. При рассмотрении деформации МР-эластомера можно выделить три механизма. Это изменение межатомных расстояний в цепочках макромолекул под действием внешней нагрузки, что характерно, в основном, для кристаллических материалов. При таком механизме происходит практически мгновенное деформирование (со скоростью звука), при этом характерны большие значения модуля упругости, а величина обратимых деформаций не превышает доли процента. Это перемещение целых макромолекул относительно друг друга, при котором в образце наблюдается вязкое течение. При этом деформация является необратимой. И, наконец, при действии нагрузки макромолекулы могут менять свою форму: из свернутых становится более вытянутыми.

Только последний механизм может обеспечить возникновение высокой эластичности МР-эластомера. После снятия нагрузки тепловое движение возвращает макромолекулы из вытянутой формы в прежнюю равновесную, свернутую. Только такой механизм может объяснить по-

стоянство объема при деформации, малое значение модуля упругости, большую величину и обратимость деформации. При деформации свернутой макромолекулы меняется взаимное расположение ее сегментов. Это приводит к изменению упорядоченности в системе, которое может быть охарактеризовано изменением энтропии.

При деформировании на dl МР-эластомера длиной l_0 и объемом V работа деформации равна $f dl$, где f — деформирующая сила. Из термодинамики известно, что для равновесного процесса деформирования ($T = \text{const}$, $V = \text{const}$) изменение внутренней энергии эластомера равно:

$$dU = dA + TdS, \quad (1)$$

где dA — работа деформации эластомера ($dA = f dl$); T — абсолютная температура эластомера; dS — изменение энтропии эластомера.

Энтропия S характеризует степень упорядоченности микроэлементов в системе, степень устойчивости данного состояния. При приложении силы к образцу эластомера и его деформировании энтропия уменьшается, при снятии нагрузки и возвращении МР-эластомера в исходное состояние энтропия снова увеличивается. Разупорядочивание элементов в МР-эластомере связано в основном с перемещением макромолекул относительно друг друга и изменением формы макромолекул из свернутых в более вытянутые.

Продифференцировав левую и правую части уравнения (1) по dl , найдем выражение для деформирующей силы f :

$$f = \frac{dU}{dl} - T \frac{dS}{dl}. \quad (2)$$

Уравнение (2) дает общую картину изменения энергетического состояния МР-эластомера при его деформировании: меняется как его внутренняя энергия, так и энтропия. В определенных условиях, максимально приближенных к равновесным ($T = \text{const}$, $V = \text{const}$), изменение внутренней энергии может быть незначительно и им можно пренебречь:

$$\frac{dU}{dl} = 0. \quad (3)$$

В этом случае говорят, что эластомер ведет себя как идеальный. Для идеального эластомера напряжение, возникающее при деформации, обусловлено изменением энтропии:

$$f = -T \frac{dS}{dl}. \quad (4)$$

Выражение (4) имеет огромное значение для построения физической модели поведения эластомера под действием нагрузки: оно пока-

зывает, что изменение порядка в расположении элементов системы способно создать действующее напряжение.

Очень важно также, что изменение термодинамических параметров при деформации идеального эластомера качественно такое же, как и в идеальном газе. Действительно, для идеального газа при изотермическом сжатии давление увеличивается исключительно благодаря уменьшению энтропии, как и при изотермическом растяжении эластомера:

$$p = T \frac{dS}{dV}. \quad (5)$$

По аналогии с идеальным газом уравнение (4) называют уравнением состояния идеального эластомера. Если в идеальном газе или идеальном эластомере упругость обусловлена только изменением энтропии (порядка в расположении элементов системы), то в идеальном кристалле упругость определяется только изменением расстояний между узлами кристаллической решетки, что сопровождается для равновесного процесса деформирования ($T = \text{const}$, $V = \text{const}$) соответствующим изменением внутренней энергии $f = \frac{\partial U}{\partial l}$ при сохранении порядка в расположении элементов системы.

Проанализируем на разных частотах режимы работы системы полуактивной виброизоляции [6], схема которой приведена на рис. 1. Система полуактивной виброизоляции позволяет настраивать вязкоупругие свойства подвески объекта на требуемый частотный диапазон при воздействии внешних возмущающих сил для наиболее эффективного демпфирования колебаний. Такая система не может регулировать положение виброизолируемого объекта, так как в ней нет исполнительных механизмов для перемещения.

Здесь объект массой m соединен с основанием упругой связью с коэффициентом жесткости $C_{\text{изм}}$ и демпфирующим элементом с коэффициентом вязкостного трения $K_{\text{изм}}$, величина которых может регулироваться за счет подачи управляющего сигнала в МР-демпфер.

Уравнение движения объекта описывается уравнением:

$$m\ddot{x} + K_{\text{изм}}(\dot{x} - \dot{\xi}) + C_{\text{изм}}(x - \xi) = 0, \quad (6)$$

где x — смещение объекта; ξ — смещение основания.

При гармоническом возбуждении смещение основания определяется формулой

$$\xi = A \cos \varphi t,$$

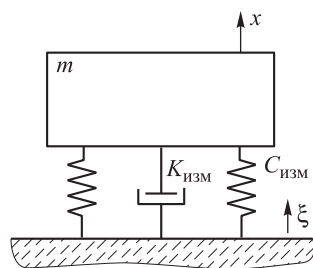


Рис. 1. Схема системы полуактивной виброизоляции

а смещение объекта —

$$x = a \cos(\omega t - \varphi),$$

где A, a — амплитуды виброперемещений основания и объекта; φ — разность фаз между виброперемещениями основания и объекта.

Подставляя эти значения в дифференциальное уравнение, получим

$$a = A \sqrt{\frac{C_{\text{изм}}^2 + K_{\text{изм}}^2 p^2}{(C_{\text{изм}} - mp^2)^2 + K_{\text{изм}}^2 p^2}}. \quad (7)$$

Определим коэффициент передачи k , определяемый отношением амплитуд виброперемещений объекта и основания:

$$k = \frac{a}{A} = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + 4\beta^2\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad (8)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_{\text{изм}}}{m}}$ — собственная частота системы виброизоляции; ω — частота возмущающей силы; $\beta = \frac{K_{\text{изм}}}{2m}$ — коэффициент затухания колебаний, определяемый коэффициентом вязкостного трения демпфера и массой объекта.

На низких частотах ($\omega \ll \omega_0$) амплитуда колебаний объекта практически совпадает с амплитудой колебаний платформы. При увеличении частоты возбуждающих колебаний достигается резонансная частота системы. При этом наблюдается увеличение амплитуды колебаний. И, наконец, на частотах выше резонансной ($\omega \gg \omega_0$) получаем значительное снижение амплитуды колебаний объекта по отношению к амплитуде колебаний основания. Видно, что система виброизоляции эффективна, когда $\omega > \sqrt{2}\omega_0$, так как коэффициент виброизоляции k оказывается меньшим единицы [6].

Таким образом, необходимо обеспечивать минимально возможную резонансную частоту системы, так как возмущающие колебания происходят преимущественно на низких частотах (0,5...50 Гц). Для обеспечения низкой собственной частоты колебаний изолируемого объекта необходимо сделать систему виброизоляции достаточно податливой, т. е. упругие элементы должны быть очень мягкими. Кроме того, при малых частотах $\omega > \sqrt{2}\omega_0$, целесообразно увеличение демпфирования, т.е. повышение коэффициента вязкостного трения $K_{\text{изм}}$. Однако при этом возникает опасность излишней подвижности объекта при действии медленно изменяющихся нагрузок. В этом случае необходимо приме-

нять системы полуактивной и активной виброизоляции, в которых можно управлять такими параметрами, как коэффициент жесткости $C_{изм}$ и коэффициент вязкостного трения $K_{изм}$. Повышенные демпфирующие свойства играют отрицательную роль при больших частотах $\omega > \sqrt{2}\omega_0$, так как демпфирование увеличивает воздействие источника вибрации на виброизолируемый объект и полезно лишь вблизи резонанса [6].

Экспериментальные исследования активного демпфера на основе МР-эластомера. Для исследований демпфера был разработан экспериментальный стенд, схема которого показана на рис. 2. Стенд содержит демпфер I на основе МР-эластомера и задатчик вибраций II — специальное устройство, позволяющее задавать гармонические колебания платформы с заданной частотой и амплитудой.

Демпфер содержит неподвижную опору 6, сердечник из магнитного материала 5, электромагнитную катушку 4, корпус 3, мембрану из магнитоэологического (МР) эластомера 2 с жестким центром 1, которая образует с сердечником 5 воздушный зазор. Устройство работает следующим образом: при подаче управляющего тока в электромагнитную катушку 4 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране 2 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, величина которой имеет максимум вблизи сердечника 1. Под действием этой магнитной индукции мембрана с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Принцип работы задатчика аналогичен работе демпфера: 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

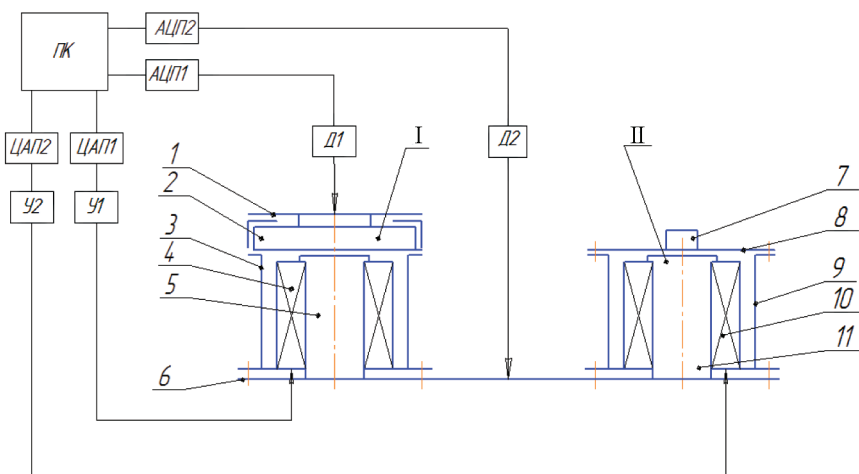


Рис. 2. Схема стенда для исследования активного МР-демпера

индукции груз перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Были получены экспериментальные данные по исследованию гистерезиса для трех образцов мембран МР-демпфера, различающихся объемной концентрацией магнитных частиц карбонильного железа (образец № 2 — $\varphi_V = 0,24$; образец № 3 — $\varphi_V = 0,33$; образец № 5 — $\varphi_V = 0,40$, где φ_V — объемная концентрация магнитных частиц).

На электромагнитную катушку МР-демпфера подавался управляющий ток, который сначала увеличивался от нулевого значения до максимального тока насыщения, а затем уменьшался до нуля. Диаметр сферических частиц карбонильного железа в МР-эластомере — от 1 до 10 мкм. Определены такие характеристики гистерезиса, как ток трогания МР-демпфера $I_{тр}$, ток насыщения $I_{нас}$, остаточная деформация $X_{ост}$, деформация насыщения $X_{нас}$. Эти характеристики определяют такие важнейшие параметры МР-демпфера, как зону нечувствительности, погрешность позиционирования, диапазон перемещения, эффективность поглощения энергии колебаний. Полученные зависимости представлены на рис. 3. Ток трогания МР-демпфера $I_{тр}$ для исследованных образцов 2, 3 и 5 составил, соответственно, величины 1,0, 0,9 и 0,5 А. Таким образом, с увеличением концентрации магнитных частиц зона нечувствительности и погрешность позиционирования уменьшаются. Ток насыщения $I_{нас}$ для всех образцов равен 2 А, деформация насыщения $X_{нас}$ для указанных образцов составила значения 116, 160 и 169 мкм. Остаточная деформация $X_{ост}$, определяющая ширину петли гистерезиса, имеет величину 25, 21 и 80 мкм.

Энергия, поглощаемая при деформации МР-эластомера за один цикл колебаний, определяется площадью петли гистерезиса S (рис. 3). Она может быть определена как:

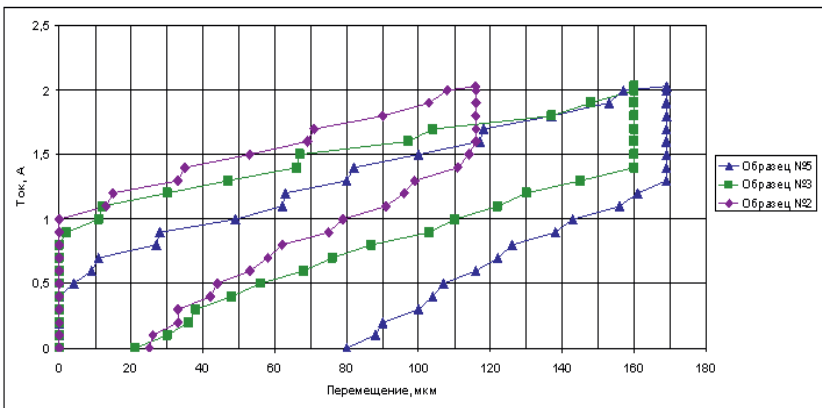


Рис. 3. Графики зависимости перемещений от управляющего тока для МР-демпфера

$$S = \int_0^{X_{\text{нас}}} f(I) dx + \int_{X_{\text{нас}}}^{X_{\text{ост}}} f(I) dx, \quad (9)$$

где $f(I)$ — деформирующая сила, действующая на мембрану и однозначно определяющая управляющий ток (на рис. 3 приведен график зависимости перемещений от этого управляющего тока).

Площадь петли гистерезиса определяется разностью между работой, затраченной при нагружении мембраны, и работой, полученной при ее разгрузке. Работа разгрузки отрицательна, так как она не затрачивается, а выделяется. Таким образом, площадь петли гистерезиса определяет эффективность поглощения энергии колебаний МР-демпфером. Эта энергия колебаний расходуется в МР-эластомере на изменение энтропии при необратимой вязкой деформации, на повышение температуры, на активацию химических процессов. Для исследованных образцов МР-демпфера площадь петли гистерезиса, определяемая управляющим током и деформацией, равна $F_2 = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}$; $F_3 = 1,29 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}$; $F_5 = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}$. Таким образом, с ростом объемной концентрации магнитных частиц в МР-эластомере возрастает эффективность поглощения энергии колебаний демпфером.

Были также получены экспериментальные данные по исследованию гистерезиса при перемещении МР-демпфера под действием нагрузки для фиксированных значений управляющего тока в диапазоне от 0 до 2,0 А с шагом 0,5 А (рис. 4). Эти графики показывают возможность регулировки жесткости демпфера при помощи управляющего тока, а также

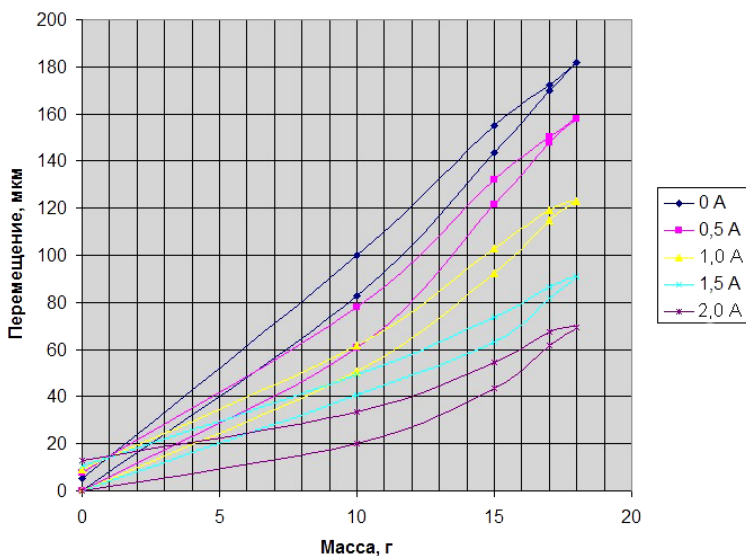


Рис. 4. Графики зависимости перемещений от нагрузки для МР-демпфера при фиксированных значениях управляющего тока

характеризуют степень поглощения энергии колебаний демпфером, которая определяется площадью петли гистерезиса.

На экспериментальной платформе были также проведены исследования зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений от управляющего тока для фиксированной частоты задатчика вибраций 100 Гц (рис. 5). Использование МР-эффекта позволяет регулировать коэффициент жесткости упругой мембраны за счет изменения величины магнитной индукции и, соответственно, частотные и точностные характеристики активного демпфера.

В полуактивном режиме работы МР-демпфера при подаче тока 0,2 А наблюдается резонанс системы. При этом коэффициент передачи виброперемещений имеет максимальное значение около 0,95, и амплитуда колебаний возрастает. При токе от 1,7 до 2,0 А коэффициент передачи виброперемещений минимален (около 0,1), т.е. наблюдается эффективное гашение колебаний.

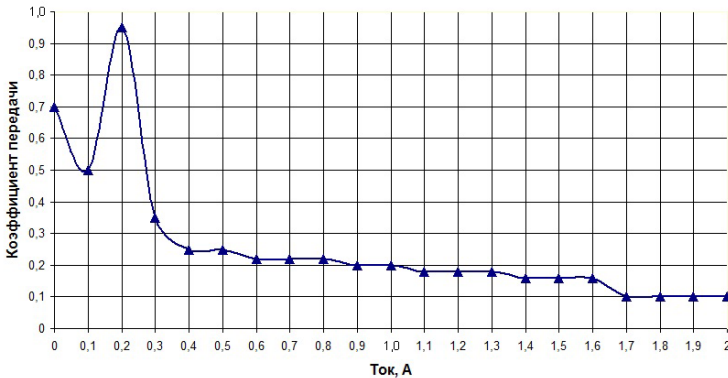


Рис. 5. График зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений МР-демпфера от управляющего тока

Были также проведены исследования перемещения активного МР-демпфера в следящем режиме с замкнутой системой управления с использованием программного обеспечения в среде LabView. При проведении экспериментов осуществлялось перемещение демпфера из одной точки в другую при подаче входного управляющего сигнала на электромагнитную катушку 4 (см. рис. 2). На рис. 6, 7 приведены, соответственно, графики перемещения МР-демпфера без ПИД регулирования и с ПИД регулированием. Использование ПИД регулирования позволяет увеличить точность позиционирования и плавность перемещения, уменьшить время переходного процесса. Такое перемещение активного МР-демпфера можно использовать для работы в режиме стабилизации положения и установки виброизолирующей платформы на заданном уровне.

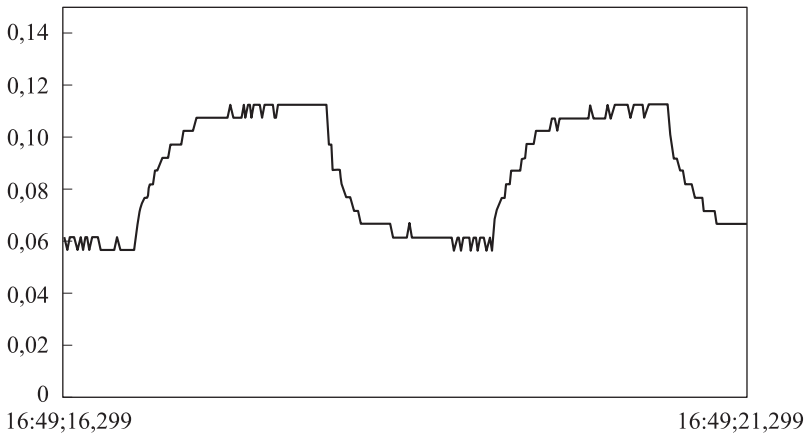


Рис. 6. Переходный процесс при позиционировании МР-демпфера без ПИД регулирования

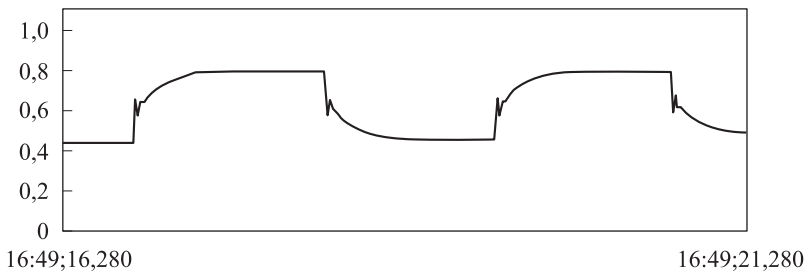


Рис. 7. Переходный процесс при позиционировании МР-демпфера с ПИД регулированием

Была получена зависимость индукции B от напряженности H магнитного поля в рабочем зазоре МР-демпфера (рис. 8), которая позволяет легко пересчитывать величину управляющего тока в электромагнитной катушке демпфера в индукцию магнитного поля. Для получения

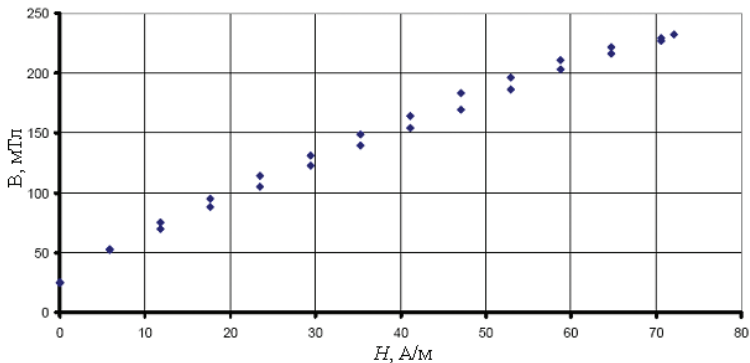


Рис. 8. Зависимость индукции B от напряженности H магнитного поля в рабочем зазоре МР-демпфера

этой зависимости был использован миллитесламетр ТПУ2-2У со специальным щупом, размещенным в рабочем зазоре демпфера.

Выводы. Эффективность поглощения энергии колебаний МР-демпфером определяется работой, затрачиваемой на изменение энтропии при необратимой вязкой деформации эластомера, на повышение его температуры, на активацию химических процессов.

Энергия, поглощаемая МР-эластомером за один цикл колебаний, может быть определена площадью петли механического гистерезиса при деформации мембраны демпфера.

Эффективность демпфирования, характеризующаяся способностью поглощать энергию колебаний, возрастает с увеличением объемной концентрации магнитных частиц в МР-эластомере. Это объясняется увеличением сил магнитного сцепления между слоями эластомера при необратимой вязкой сдвиговой деформации и подтверждается увеличением площади петли гистерезиса.

Коэффициент жесткости упругой мембраны из МР-эластомера может регулироваться за счет изменения величины магнитной индукции, обеспечивая тем самым регулировку коэффициента передачи, частотных и точностных характеристик в полуактивном режиме работы МР-демпфера.

Использование ПИД регулирования позволяет увеличить точность позиционирования и плавность перемещения, уменьшить время переходного процесса. Такое перемещение активного МР-демпфера можно использовать для работы в режиме стабилизации положения и установки виброизолирующей платформы на заданном уровне.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Михайлов В.П., Зобов И.К., Селиваненко А.С. Демпфер на основе магнитореологического эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/813.html>

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Быков В.А. Инструменты нанотехнологий сегодня и завтра. *Наноиндустрия, Спецвыпуск*, 2010, с. 10–14.
- [2] Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А. *Нанoeлектроника*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009, 223 с.
- [3] Попов В.В., Салеский А.М. Наномеханообработка. Возможности и перспективы. *Российские нанотехнологии*, 2008, № 9–10, с. 32–35.
- [4] Сычев В.В. *Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении*. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2005, 464 с.
- [5] Камышный Н.И., Курчанова М.В., Логинов П.В. Система виброизоляции прецизионного технологического оборудования. *Изв. вузов. Машиностроение*, 1988, № 10, с. 150–155.

- [6] Алабужев П.М., Гритчин А.А., Ким Л.И. *Виброзащитные системы с квази-нулевой жесткостью*. Рагульскис К.М., ред. Ленинград, Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1986, 96 с.
- [7] Михайлов В.П., Базиненков А.М., Зобов И.К., Шаков К.Г., Хвостов А.А. Системы точного позиционирования и активной виброизоляции для нанотехнологического оборудования. *Наноинженерия*, 2011, № 3, с. 47–57.
- [8] *Active Vibration Isolation. Accurion*. [Электрон. ресурс] URL: <http://www.accurion.com>.
- [9] *Vibration Isolation Products. Minus K® Technology, Inc.* [Электрон. ресурс] URL: <http://www.minusk.com>.
- [10] Михайлов В.П., Базиненков А.М., Зобов И.К. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для прецизионного вакуумного оборудования. *Вакуумная техника и технология*, 2011, т. 21, № 3, с. 165–169.
- [11] Горбунов А.И., Михайлов В.П., Степанов Г.В. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2008, № 1(70), с. 90–107.

Михайлов Валерий Павлович родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 94 работ. Область научных интересов: электронное машиностроение, вакуумные технологии, наноинженерия, системы микро- и нанопозиционирования и активной виброизоляции. e-mail: mikhailov@bmstu.ru

Зобов Иван Константинович родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 работ. Область научных интересов: электронное машиностроение, системы микро- и нанопозиционирования и активной виброизоляции. e-mail: java208@rambler.ru

Селиваненко Александр Сергеевич родился в 1990 г., студент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 работ. Область научных интересов: электронное машиностроение, системы микро- и нанопозиционирования и активной виброизоляции. e-mail: selivanenko_a@mail.ru