

УДК 30.19.27, 47.13.31

ПЛАТФОРМА АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ДЕМПФЕРОВ С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ ЭЛАСТОМЕРАМИ

Алексей Андреевич Копылов⁽¹⁾, Дмитрий Константинович Товмаченко⁽²⁾, Анна Эрнестовна Янчелик⁽³⁾

Магистр 2 года⁽¹⁾, магистр 1 курса^{(2),(3)}

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.П. Михайлов,

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Современное развитие высокоточных технологических процессов на отечественных предприятиях, изготавливающих уникальные наукоёмкие изделия, требует защиты технологического оборудования от неблагоприятных вибрационных воздействий, которые возникают в условиях городской среды. Высокоточные технологические производства должны обеспечить качественное изготовление таких важных изделий как микропроцессоры, полупроводниковые устройства и изделия на их основе – интегральные схемы, линзы и зеркала телескопов с высочайшей гладкостью поверхности. Учитывая высокую стоимость защищаемого оборудования, а также сложность и важность проводимых на нём фундаментальных исследований или производства высокотехнологических изделий, приводят к необходимости разработки новых конструктивных решений, позволяющих защитить высокоточные технологические процессы и исследовательское оборудование от вибрационного воздействия естественного и техногенного происхождения.

Вибрация – это движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин. [1]

Вибрация присутствует практически в любом месте. Вибрация может быть вызвана следующими причинами:

- микросейсмическая активность;
- движущийся транспорт и поезда метрополитена;
- ветровые колебания, передающиеся к месту размещения от соседних зданий.

Для большинства промышленных зданий, амплитуда колебаний строительных конструкции составляет 2 – 4,7 мкм при частоте 2 – 30 Гц, поэтому необходимо обеспечить коэффициент демпфирования (отношение амплитуд выходных и входных колебаний) в диапазоне 0,1 – 0,05. Для обеспечения защиты от вибраций и для точного позиционирования существует ряд устройств, основанных на различных физических принципах.

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.

Виброзащита - совокупность средств и методов уменьшения вибрации, воспринимаемой защищаемыми объектами. [1]

В настоящее время большой научный и практический интерес представляют магниточувствительные среды и материалы, механические свойства которых могут быстро изменяться в широких диапазонах под действием внешнего магнитного поля. Для обеспечения вибродемпфирования и для точного позиционирования существует ряд устройств, основанных на различных физических принципах. Данная статья посвящена исследованию платформы активной виброизоляции, в которой для защиты от вибраций и для точного позиционирования используются активные демпферы на основе магнитореологических (МР) материалов.

Вибродемпфирование - уменьшение вибраций вследствие рассеяния механической энергии, или перевода вибраций в другие виды энергии, чаще всего в теплоту (применение материалов с большим внутренним трением, например, мягких пластмасс, резины, пенопласта). [1]

МР материалы – это так называемые «умные» материалы, способные быстро и обратимо изменять свои физические свойства под действием внешнего магнитного поля. Наиболее широкое распространение получили МР жидкости и МР эластомеры. [1]. Такие среды и материалы получают путем добавления в них частиц железа или кобальта микронных размеров (2-3 мкм). С ростом напряженности магнитного поля вязкость МР жидкостей резко возрастает вплоть до бесконечности (они практически затвердевают), а жесткость МР эластомеров увеличивается на 40%. [2]

В качестве вязкоупругих сред в МР приводе используются высокомолекулярные вещества (эластомеры, полимеры, композиты и др.). МР эластомер является твердотельным аналогом МР жидкости и получен диспергированием магнитного порошка в жидком силиконовом каучуке с последующей полимеризацией композиции в форме. В качестве магнитных наполнителей используются порошки магнетита с размером от 0,2 до 0,3 мкм и железа от 1 до 10 мкм. 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 новым материалом, то нет еще устоявшейся терминологии. Магнитоэластичный композит, по своим свойствам, является промежуточным материалом между текучими магнитными жидкостями и жесткими магнитоэластиками.

МР эластомер представляет собой резиноподобный материал, представляющий собой полимерную матрицу, внутри которой находится взвесь магнитных частиц. Для производства эластомеров используется ряд полимеров: натуральный каучук, акрилатный каучук и др. В качестве магнитных частиц чаще всего используют Fe, FeNi, Co, Ni, FeNdB, SmCo, Alnico и т.п. В предлагаемой платформе в МР эластомерах в качестве матрицы используется силиконовый каучук, а в качестве наполнителя - магнитные частицы карбонильного железа размером 1-10 мкм (Рис. 1). Нас интересуют такие характеристики МР эластомеров как жесткость, ток трогания, объемный коэффициент, относительная деформация и магнитный гистерезис. При помощи магнитного поля можно управлять деформацией образцов из МР эластомера и использовать этот эффект для создания прецизионных механизмов перемещения и активных демпферов.

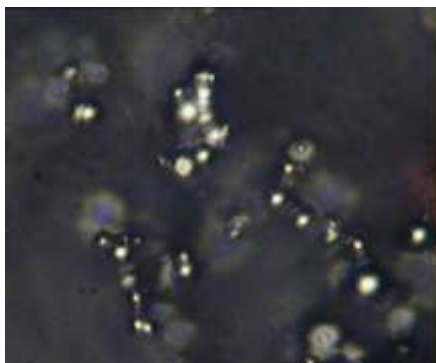


Рис. 1. МР эластомер на основе карбонильного железа

Основные характеристики платформы активной виброизоляции: диапазон перемещения платформы, обусловленный воздушным зазором между катушкой и подвижным сердечником, составляет 1 мм, точность позиционирования – 0,1 мкм. Нагрузочная способность – до 100 Н. В конструкции присутствуют четыре системы квазиу нулевой жесткости на основе масс-корректоров, которые увеличивают нагрузочную способность платформы и улучшают её демпфирующие свойства. Платформа для активной виброизоляции на основе МР демпферов

может быть использована также как привод точного позиционирования. В основе конструкции платформы – четыре демпфера на основе МР эластомеров.

Активным элементом ПАВ (платформа активной виброизоляции), является- демпфер. Демпфер представляет собой катушку, помещённую в металлический корпус, над которой закреплён эластомер, закрытый металлическим кожухом. (Рис. 3)



Рис. 2. Активный демпфер на основе магнитореологического эластомера

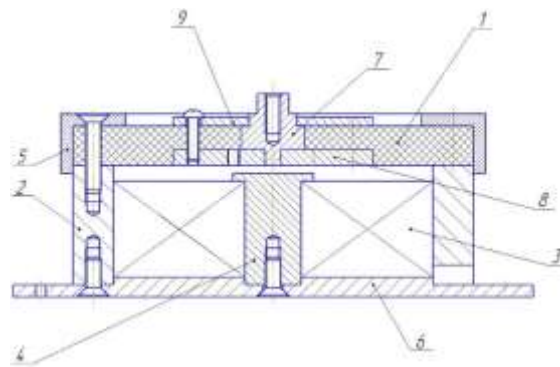


Рис. 3. Разрез демпфера:

1 – эластомер; 2 – корпус; 3 – катушка; 4 – сердечник; 5 – стакан; 6 – фланец; 7 – сердечник малый; 8 – фланец нижний; 9 – фланец верхний.

Экспериментальные данные

1. Эксперименты по измерению тока трогания привода

Сущность процесса:

Ток трогания – минимальное значение управляющего тока в катушке, при котором в эластомере наблюдается заметное перемещение. Знание значения тока трогания важно при настройке платформы для работы в активном режиме виброизоляции. Кроме того, в процессе измерения можно проанализировать как ведёт себя конкретный эластомер при увеличении тока в катушке и, соответственно, магнитного поля, действующего на эластомер. Это важно, поскольку при изготовлении эластомеров есть некоторая погрешность, из-за которой каждый эластомер имеет жёсткость, отличную от предыдущей, и поэтому его поведение в магнитном поле также будет отличаться.

Погрешность позиционирования следящего привода можно свести практически к одной составляющей, которая определяется зоной нечувствительности при трогании следящей системы:

$$\delta_c = 2\delta_{тр} = \frac{2I_{тр}}{k_d k_y},$$

где $I_{тр}$ - ток трогания системы; k_d - коэффициент передачи датчика положения; k_y - коэффициент усиления измерительной системы.

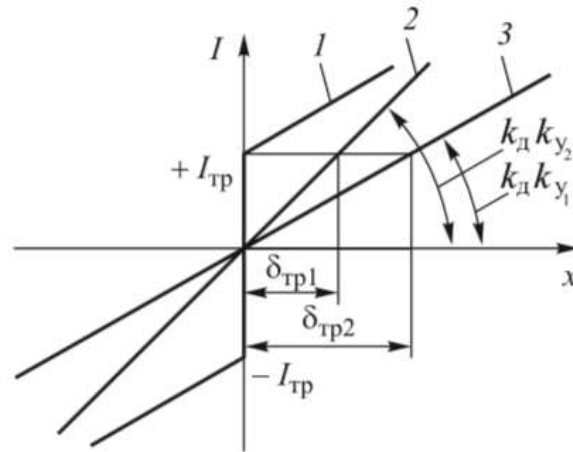


Рис. 4. Схема образования зоны нечувствительности следящей системы:

1 - реальная характеристика управления системы; 2, 3 - идеальные характеристики управления с коэффициентами усиления измерительной системы и соответственно.

Для нормального распределения ток трогания в каждой i -й точке позиционирования с вероятностью $P = 0,95$ будет определяться как

$$I_{\text{тp}i} - \bar{I}_{\text{тp}i} \pm 2\sigma(I_{\text{тp}i}),$$

где $\bar{I}_{\text{тp}i}$ - математическое ожидание тока трогания в i -й точке; $\sigma(I_{\text{тp}i})$ - среднеквадратическое отклонение тока трогания. Величины в формуле рассчитываются следующим образом:

$$\bar{I}_{\text{тp}i} = \frac{\sum_{j=1}^n I_{\text{тp}j}}{n},$$

где $I_{\text{тp}j}$ - ток трогания для i -й точки позиционирования при j -м измерении; n - количество измерений тока трогания.

$$\sigma(I_{\text{тp}i}) = \sqrt{\sigma^2(I_{\text{тp}i})},$$

где $\sigma(I_{\text{тp}i})$ - дисперсия измеренных значений тока трогания в i -й точке.

Дисперсия экспериментальных значений $I_{\text{тp}i}$

$$\sigma^2(I_{\text{тp}i}) = \frac{\sum_{j=1}^n (I_{\text{тp}j} - \bar{I}_{\text{тp}i})^2}{n-1}.$$

Для проведения исследований по измерению тока трогания на кафедре в лаборатории Михайлова В.П. был собран экспериментальный стенд, схема которого представлена на рисунке 5.

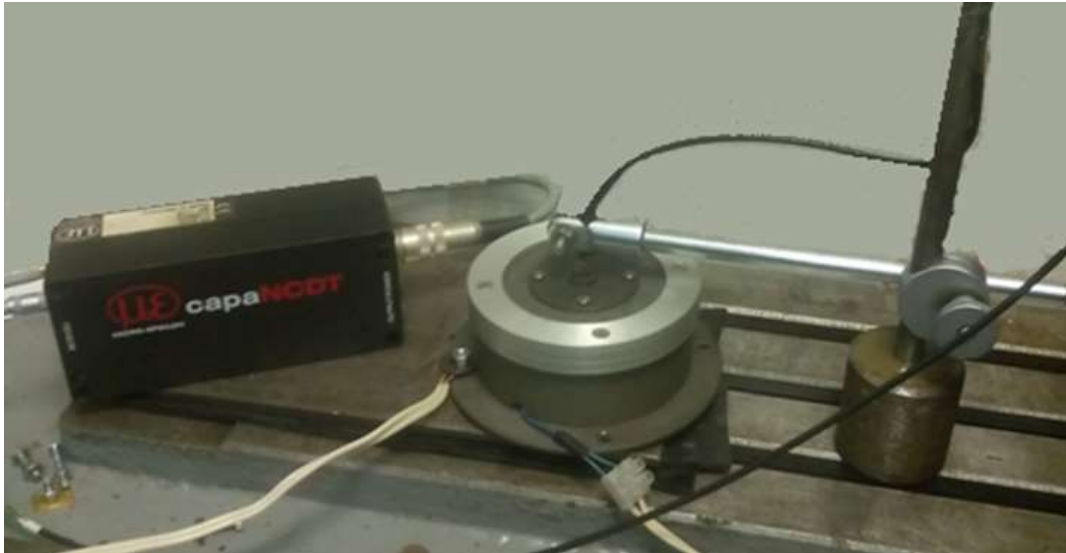


Рис. 5. Внешний вид стенда

Схема установки:

Экспериментальная платформа на основе МР демпферов представлена на рис. 68. Платформа состоит из: демпфера – I на основе МР – эластомера и генератора управляющего тока.

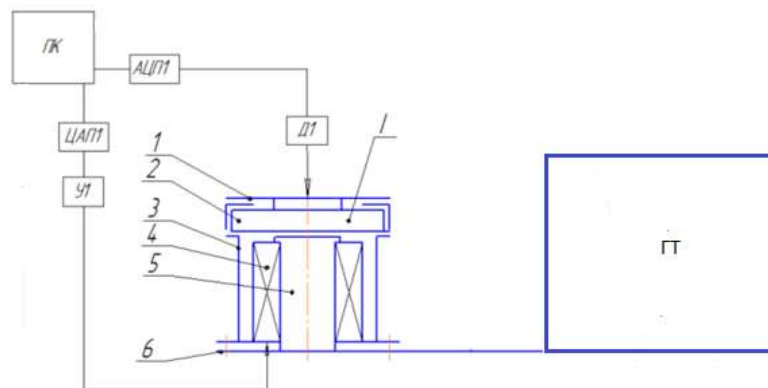


Рис. 6. Схема экспериментального стенда

Используемое оборудование:

- 1) Датчик перемещения емкостной;
- 2) Блок питания;
- 3) NI 6008 – АЦП-ЦАП;
- 4) ПК.

Этапы процесса:

- 1) Установка демпфера на стенд.
- 2) Установка датчика Д1 в рабочее положение.
- 3) Подача управляющего тока в катушку демпфера.
- 4) Выставление значения тока.
- 5) Снятие показаний.

Принцип работы демпфера (поз. I): при подаче управляющего переменного тока в электромагнитную катушку 4 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В сердечнике 5 формируется радиальное магнитное поле с индукцией. Под действием этой магнитной индукции эластомер 2 начинает деформироваться в направлении воздушного зазора и перемещать мембрану 1. Однако для достижения нужной индукции нужно подать в катушку ток определённого значения, при котором начнётся деформация. Поиск этого значения

проводиться варьированием тока в катушке от 0,01 А и сравнением его с первоначально измеренным фоном (ток равен 0).

Методика проведения эксперимента

1. Подготовить экспериментальный стенд к работе:

- ознакомиться с инструкцией по технике безопасности при работе на экспериментальных стендах;
- проверить подключение датчика положения к блоку АЦП/ЦАП;
- подвести датчик перемещения к жёсткому центру;
- установить датчик в нулевое положение;
- установить нулевое значение управляющего напряжения, подаваемого на соответствующие выбранному направлению перемещения

2. Измерение управляющего тока, соответствующего моменту начала деформации эластомера или перемещения объекта:

- постепенно увеличивать напряжение на катушке;
- постоянно регистрировать на ЭВМ напряжение питания, подаваемое на катушки, и выходное напряжение с датчика перемещения, соответствующего положению объекта (эластомера);

- напряжение увеличивать от 0 до 0,2 А с шагом 0,01 А;

- сохранять файлы данных на жестком диске ЭВМ;

- эксперимент провести 5 раз;

3. Обработка результатов измерений:

Вычисление зависимости перемещения от тока для демпфера №3, без нагрузки

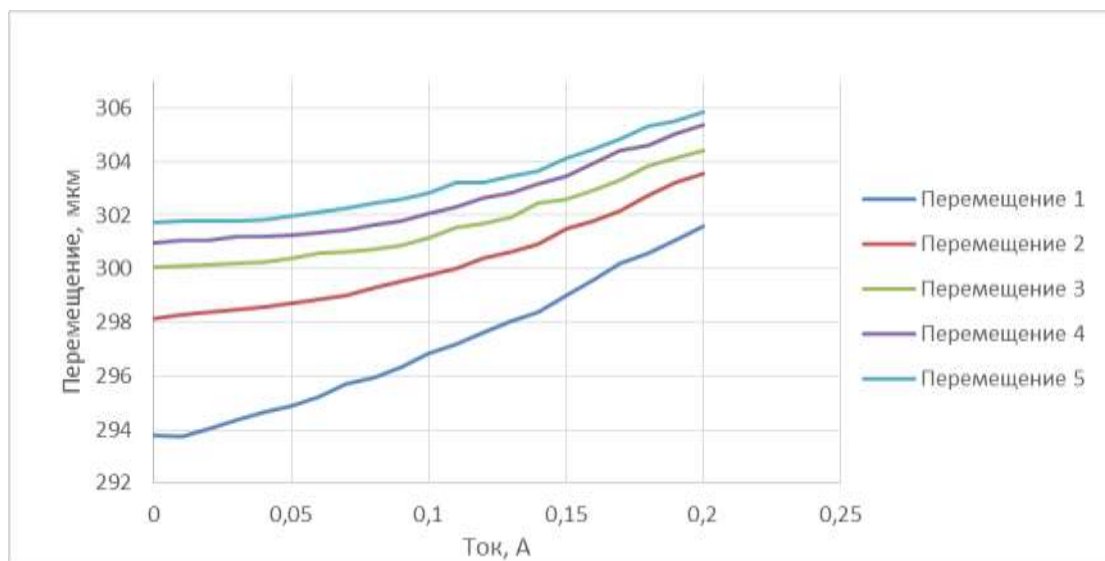


Рис. 10. Графики зависимости перемещения от тока для демпфера №3, без нагрузки

По результатам обработки полученных данных, получаем значение тока трогания для демпфера №3:

$$I_{\text{тр}3} = 0,01 \text{ А.}$$

Эксперименты по измерению тока трогания привода под нагрузкой 4,5 Н.

Результаты измерений по демпферу №3:

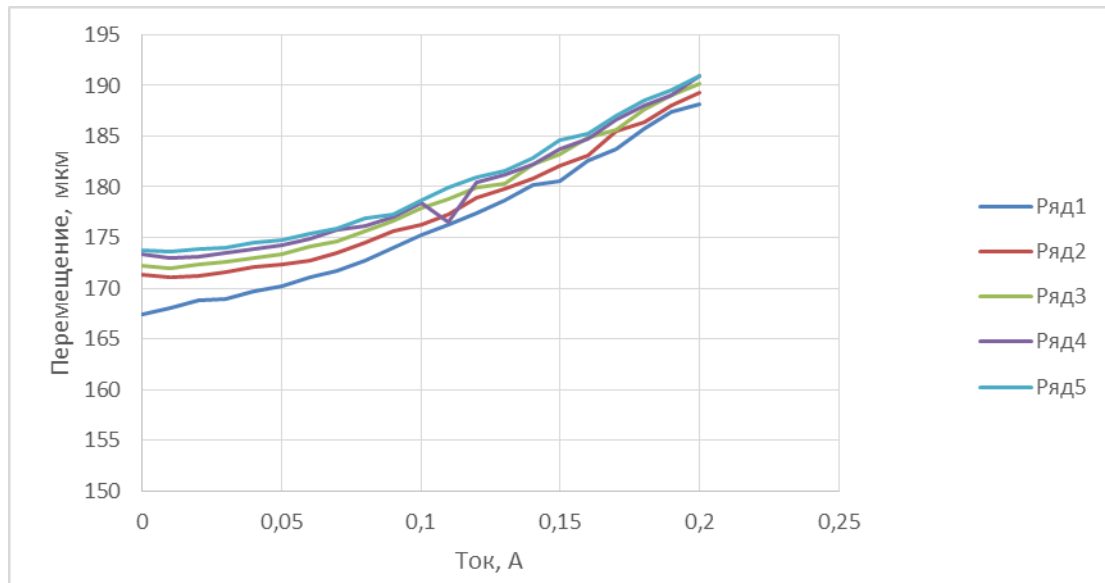


Рис. 9. Графики зависимости перемещения от тока для демпфера №3

По результатам обработки полученных данных, получаем значение тока трогания для демпфера №3:

$$I_{\text{тр3}} = 0,06 \text{ А.}$$

Вывод: Проанализировав и сравнив полученные данные из экспериментов, можно сделать вывод, что при нагружении демпфера, в эластомере возникают упругие деформации, которые противодействуют поляризации частиц, что в свою очередь увеличивает величину тока трогания привода.

1. Эксперименты по измерению коэффициента передачи амплитуды колебаний

Схема установки:

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

Этапы процесса:

- 1) Установка платформы на стенд.
- 2) Установка датчиков Д1 и Д2 в рабочее положение.
- 3) Подача управляющего тока в катушку датчика.
- 4) Выставление значения частоты и амплитуды.
- 5) Снятие показаний.

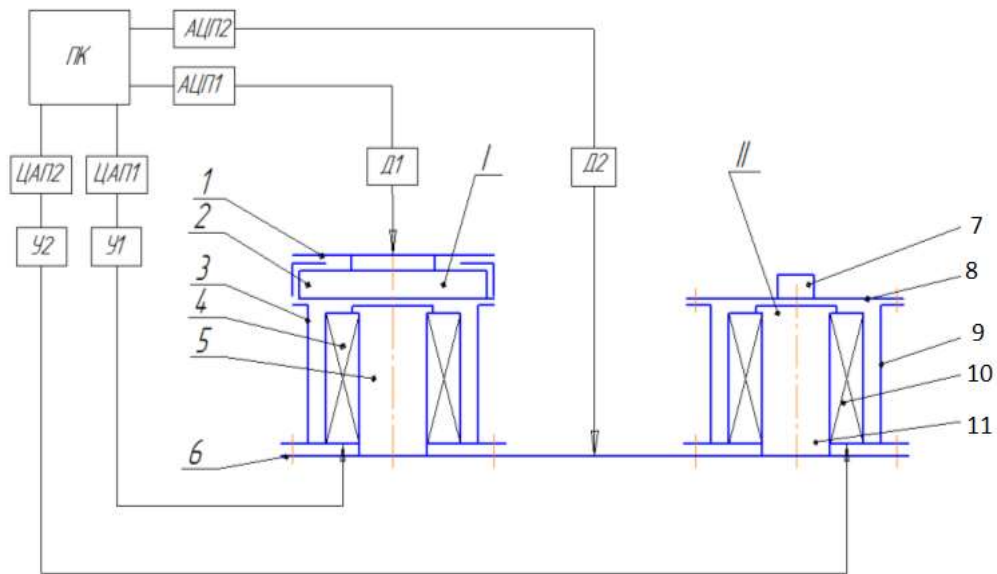


Рисунок 11 – Схема экспериментального стенда

Сущность процесса:

Коэффициент передачи амплитуды колебаний (КПАК) показывает какой процент колебаний передаётся при вибрациях с основания демфера на верхний фланец. Этот параметр важен для оценки эффективности работы платформы, т.е. для оценки её демпфирующих свойств:

$$\text{КПАК} = \frac{A_1}{A_0},$$

где A_1 – амплитуда на верхнем фланце, A_0 – амплитуда на основании.

Наиболее желательное значение КПАК должно стремиться к 0,05.

Принцип работы задатчика (поз. II): 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.

Платформа активной виброизоляции в пассивном режиме гасит вибрации за счёт систем квазиулевого жёсткости – масс-корректоров, а также за счёт жёсткости эластомеров (Рис. 11).

Результаты измерений по демпферу №2.

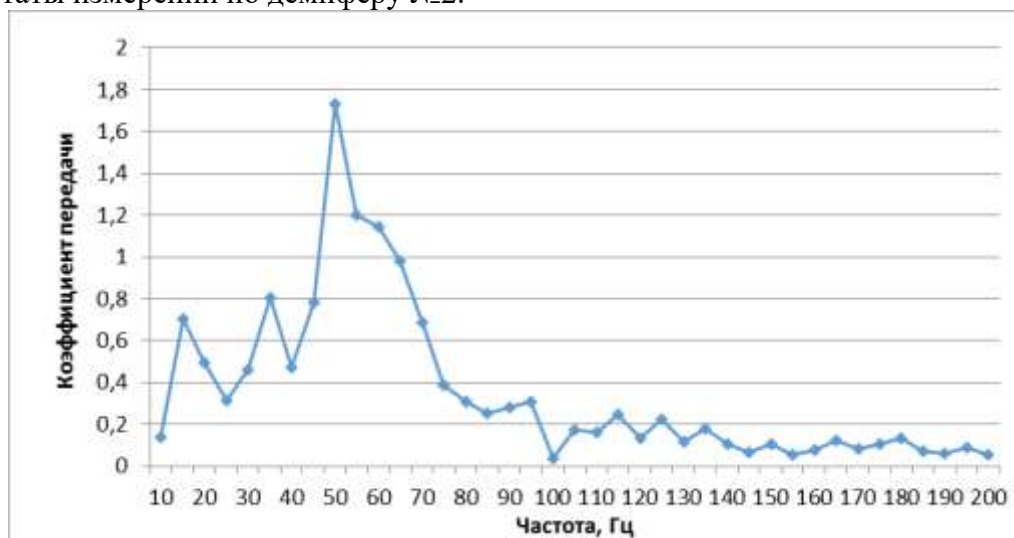


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений от частоты вибраций для демпфера №2

Вывод: в зоне от 10 до 20 Гц КПАВ скачкообразно возрастает до 0,8 при амплитуде 45 Гц. Далее в области 45-70 Гц наблюдается резонанс с пиком при частоте 50 Гц. В области 70-100 Гц наблюдается уменьшение КПАВ до значения 0,1. В области 100-200 Гц наблюдается стабильно низкий КПАВ, что означает очень хорошее виброгашение в этой зоне.

Литература

1. Вибрация. Термины и определения. ГОСТ 24346-80. Издательство стандартов № 1980, 2-3 с.
2. *Kordonsky W.* Magnetorheological effects as a base of new devices and technologies. J. of Magnetism and Magnetic Materials. 1993, Vol. 122, pp. 395-398.
3. ПЛАТФОРМА ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ / *А. А. Копылов, Д. К. Товмаченко, Тун Лин Аунг.* Всероссийская научно-техническая конференция студентов «Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии», 2015.
4. *J. D. Carlson и M. R. Jolly,* «MR Fluid, foam and elastomer devices,» *Mechatronics*, № 10, pp. 555-569, 2000.
5. МАГНИТНЫЕ ЭЛАСТОМЕРЫ / *Л.В. Никитин, А.С. Семисалова, А.А. Гладков, Н.С. Перов, Е.Ю. Крамаренко,* МОСКВА, -2011,. 5 с.
6. 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.;