

УДК 30.19.27, 47.13.31

ПЛАТФОРМА ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Алексей Андреевич Копылов⁽¹⁾, Дмитрий Константинович Товмаченко⁽²⁾, Тун Лин Аунг⁽³⁾

Магистрант 5 курса⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾, магистрант 5 курса⁽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»

Применение устройств точного позиционирования и систем активной виброизоляции чрезвычайно важно при работе с прецизионным оборудованием, в том числе и вакуумным, от которого требуется работа в микрометровом и нанометровом диапазонах. Как пример можно привести использование таких систем в производстве интегральных схем на этапе совмещения и экспонирования в процессе микро - и нанолитографии. В литографии чаще всего в настоящее время применяется экспонирование лучами EUV (Extreme Ultra Violet), однако, наиболее перспективным инструментом экспонирования являются рентгеновские лучи ($\lambda=1$ нм), электронные ($\lambda=4 \times 10^{-3}$ нм) и ионные пучки ($\lambda=5 \times 10^{-5}$ нм), что связано с малой длиной волны излучения, следовательно, потенциально большей разрешающей способностью. Применение пучков заряженных частиц требует создания вакуумной технологической среды. Таким образом, устройство позиционирования, осуществляющее совмещение подложки с шаблоном должно работать в условиях вакуума, не ухудшая его. Кроме того, такие системы можно применить в оборудовании адаптивной оптики, где необходимо перемещать инерционные объекты (зеркала) с точностью до 50 нм. В современных сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ) требуется перемещать небольшие объекты с беспрецедентной точностью (до 0,1 нм), однако сама камера СЗМ должна быть защищена от вибраций на частотах 2-200 Гц. В большинстве указанных установок перемещения должны осуществляться по двум и более координатам. Например, для сверхбольшого астрономического телескопа АСТ – 25 с составным главным зеркалом, состоящим из 612 элементарных зеркал шестигранной формы, каждое элементарное зеркало необходимо перемещать по одной линейной и двум угловым координатам. Точность линейного совмещения зеркал должна составлять 50 нм. Постоянная времени системы совмещения должна составлять не более 200 нм. Для обеспечения заданной точности помимо выбора типа привода необходимо обеспечить выбор типа защиты объекта от вибрации фундамента. Как показали ранее проведенные эксперименты, 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. 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.

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 магнитоэластами.

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 жёсткость, ток трогания, объёмный 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. Одним из таких механизмов является разработанная на кафедре МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» платформа для активной виброизоляции.

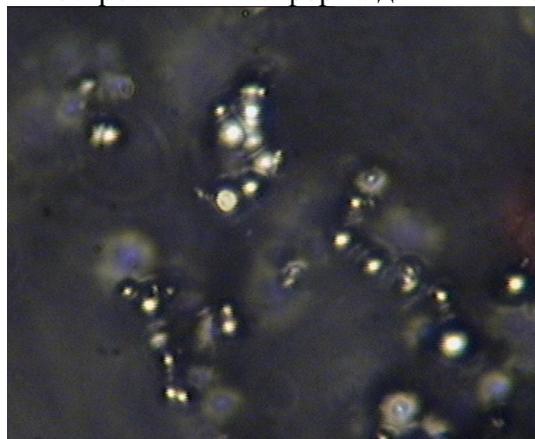


Рис. 1. МР эластомер на основе карбонильного железа

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. Диапазон перемещения платформы составляет 1 мм, точность позиционирования – 0,1 мкм. Нагрузочная способность – 100 Н. Одной из особенностей платформы является то, что она работает в частотном диапазоне 2-200 Гц. В конструкции присутствуют четыре системы квазиуравновешенной жёсткости на основе масс-корректоров, которые увеличивают нагрузочную способность платформы и улучшают её демпфирующие свойства. Платформа может применяться в точных микроскопах, прецизионных станках для механообработки (сверлильных, гравировальных, фрезерных), в установках для микро- и нанолитографии (фотолитографии, электронной литографии, рентгеновской литографии, ионная литографии), в лазерной технике и т.д.

Активным элементом платформы активной виброизоляции является демпфер. Демпфер содержит электромагнитную катушку с магнитопроводом, над которой закреплён эластомер, закрытый металлическим кожухом. (Рис. 2, 3).

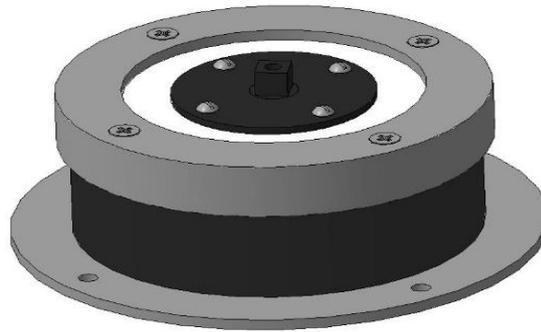


Рис. 2. Активный демпфер на основе МР эластомера

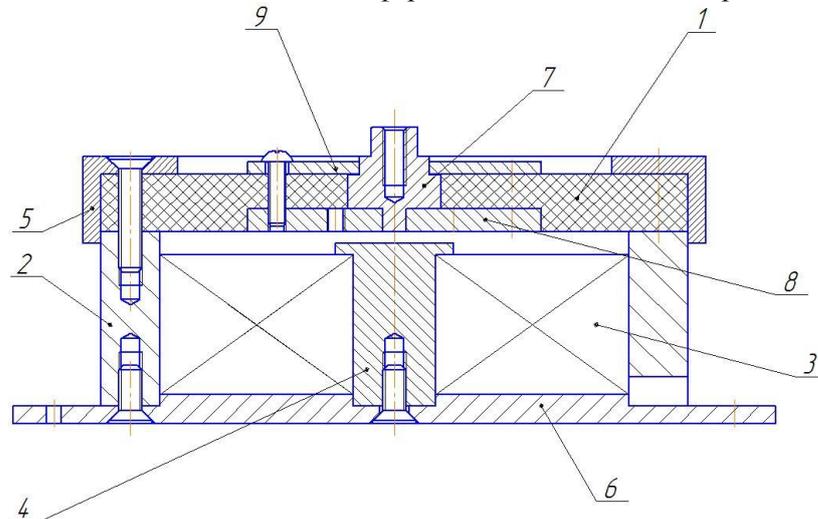


Рис. 3. Разрез активного демпфера на основе МР эластомера:

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

Предварительно был проведён статистический анализ эластомера в среде SolidWorks. Для этого была построена 3-D модель основной части демпфера, соответствующая ранее изготовленным чертежам. На модели было указано необходимое закрепление и приложена сила к вершине малого сердечника, равная 50 Н, что соответствует ожидаемой нагрузке на эластомер. (Рис. 4)

В результате статического анализа была получена модель линейного перемещения демпфирующего элемента (Рис. 5), и выявлено максимальное перемещение фланца, закреплённого на эластомере, составляющее величину чуть более 1 мм, что является допустимым для анализируемого типа демпфера.

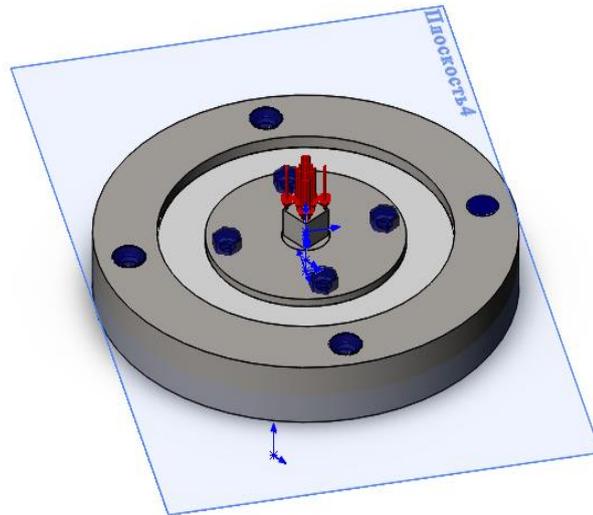


Рис. 4. 3-D модель рабочей части МР демпфера с нагрузкой

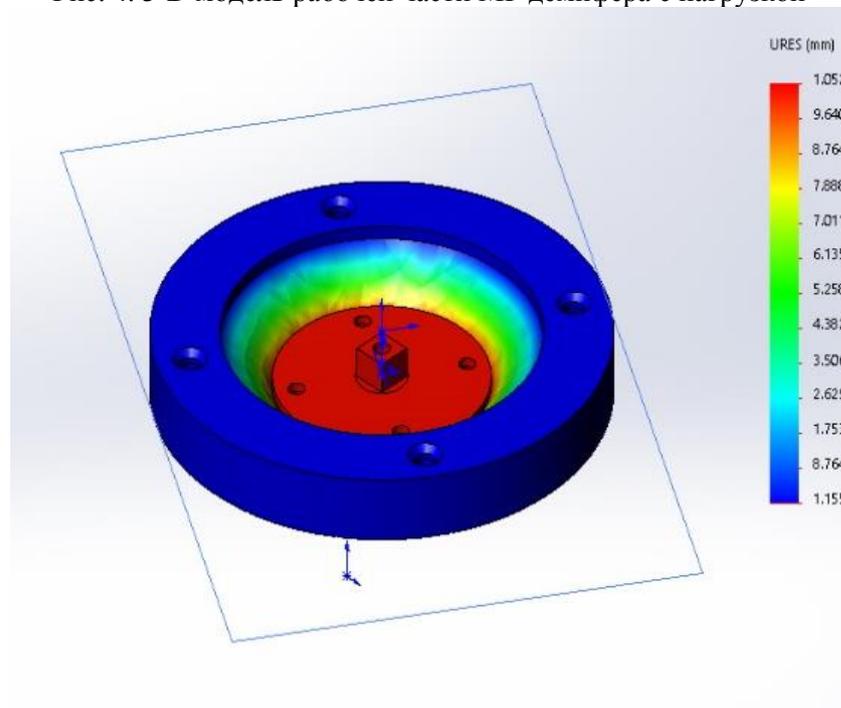


Рис. 5. Статический анализ перемещения

Экспериментальные данные

1. Эксперименты по измерению тока трогания

Схема установки:

Экспериментальная платформа на основе МР демпферов представлена на рис. 6. Платформа состоит из: демпфера – I на основе МР – эластомера и генератора управляющего тока.

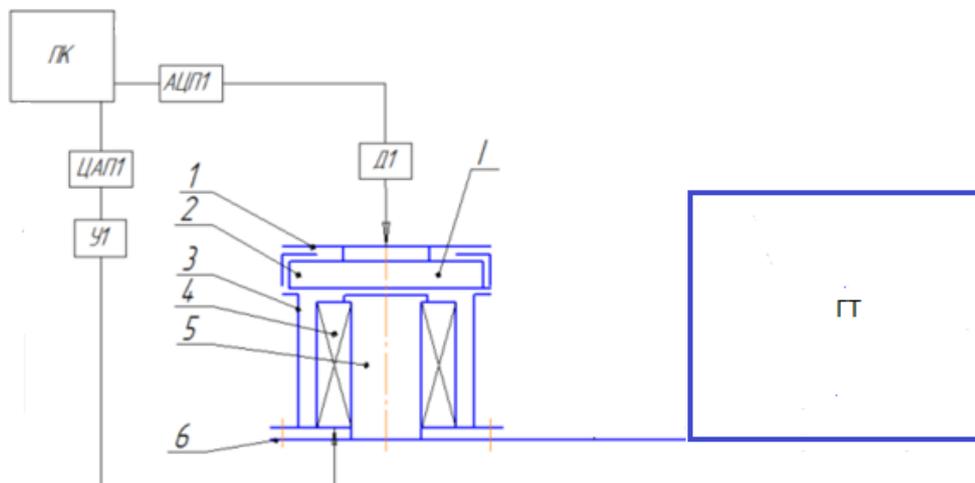


Рис. 6. Схема экспериментального стенда

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.

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.

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

Для оценки значения тока трогания используется критерий Фишера, или F-критерий:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i$$

$$f = n - 1$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{f}$$

$$D = \sqrt{S^2}$$

где D – разброс значений, f – количество степеней свободы соответствующей выборки, S^2 – дисперсии соответствующей выборки, n – количество элементов выборки, x_i – элемент выборки, \bar{x} – среднее значение элементов выборки.

Оценка разброса значений при фоне позволяет определить начальную точку измерений, а также фоновый шум, обуславливающий разброс значений. Если разность среднего значения, измеренного при заданном токе, и среднего значения фона больше разброса при фоне, то это означает, что эластомер деформировался и начал перемещаться, следовательно, при это значение соответствует току трогания.

Обработка результатов (в программной среде Microsoft Excel 2013) (Рис. 7-14).

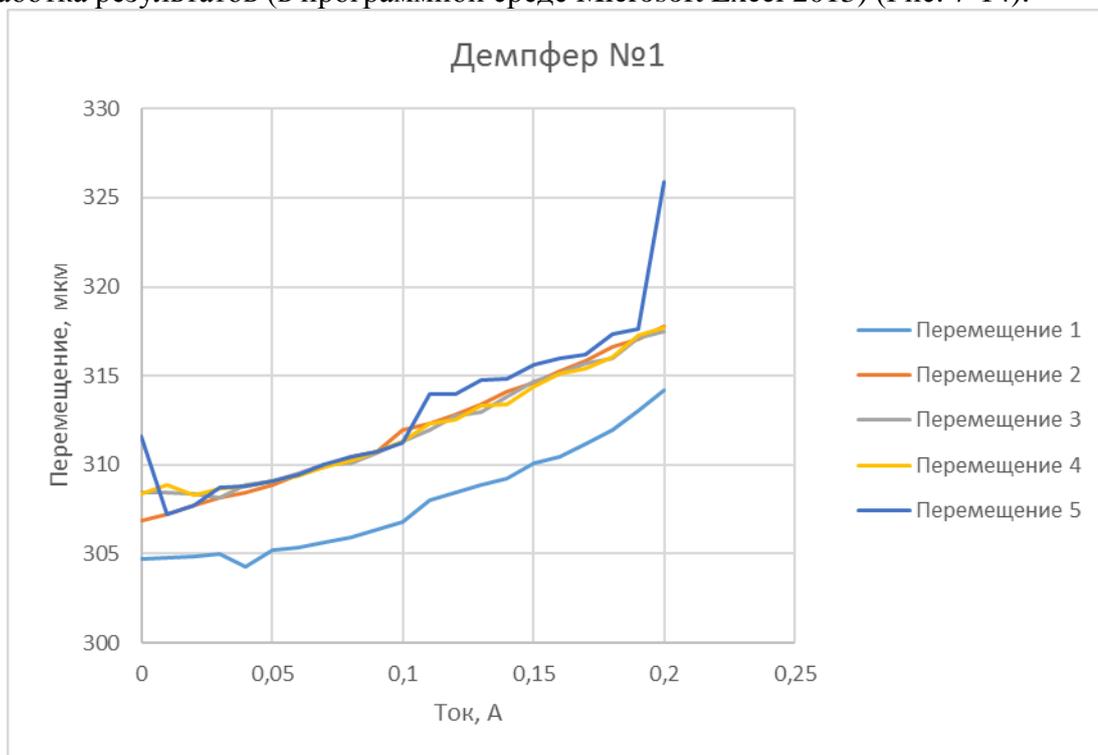


Рис. 7. Графическое представление результатов Демпфера №1

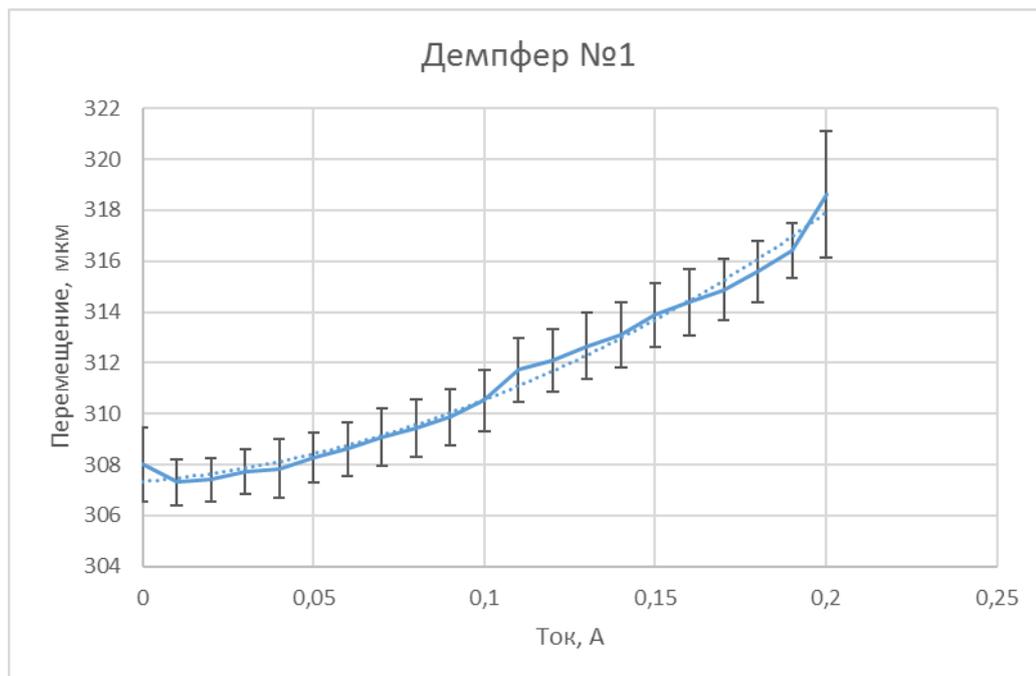


Рис. 8. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №1

Вывод: ток трогания равен 0,2 А, т.к. наклон кривой резко меняется.

Демпфер №2.

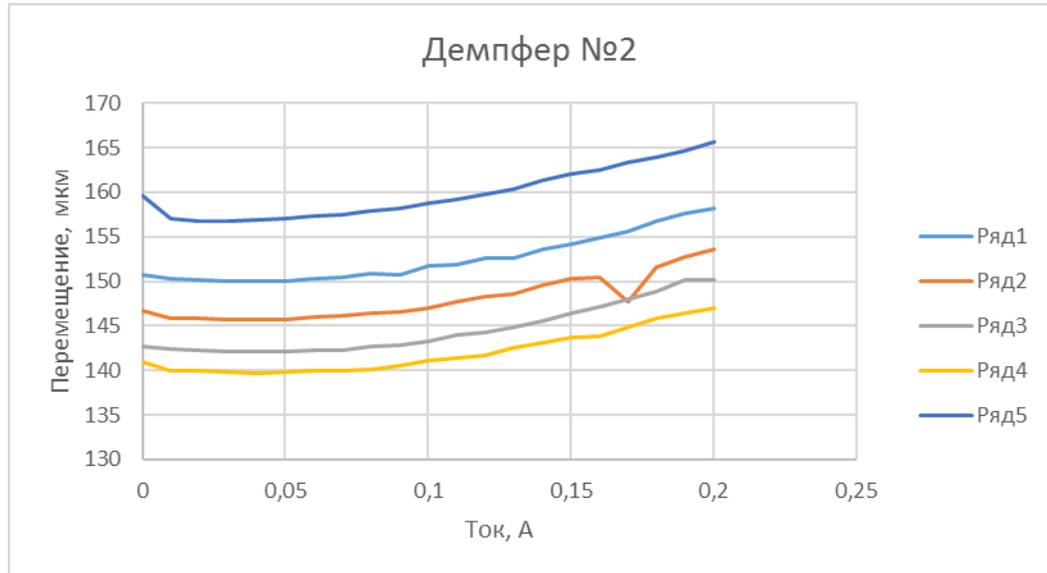


Рис. 9. Графическое представление результатов Демпфера №2

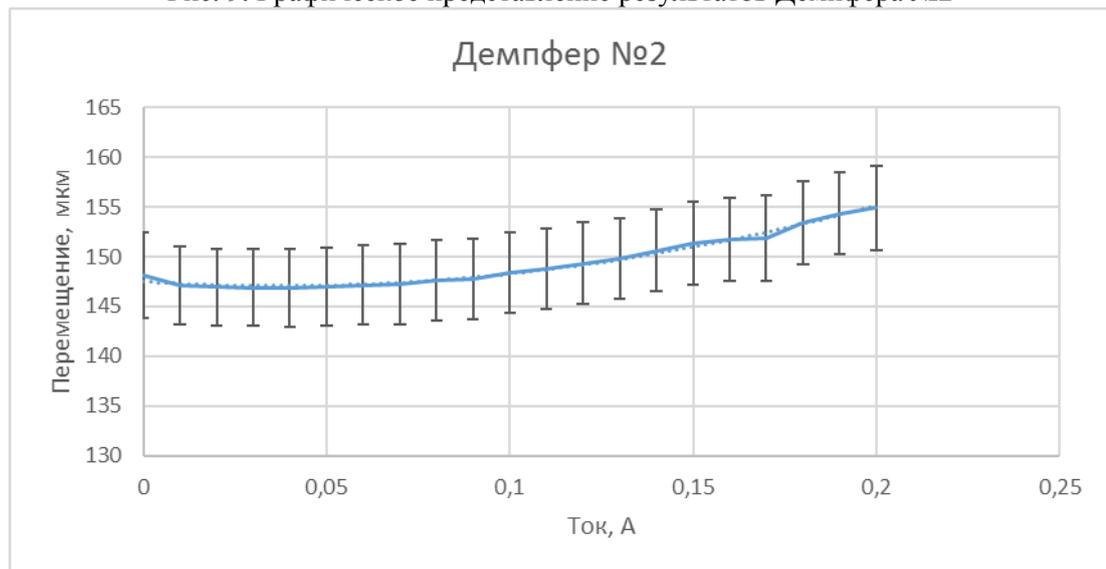


Рис. 10. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №2

Вывод: заметного перемещения не наблюдается, поэтому для оценки тока трогания следует провести измерения до 0,4 А.

Демпфер №3.

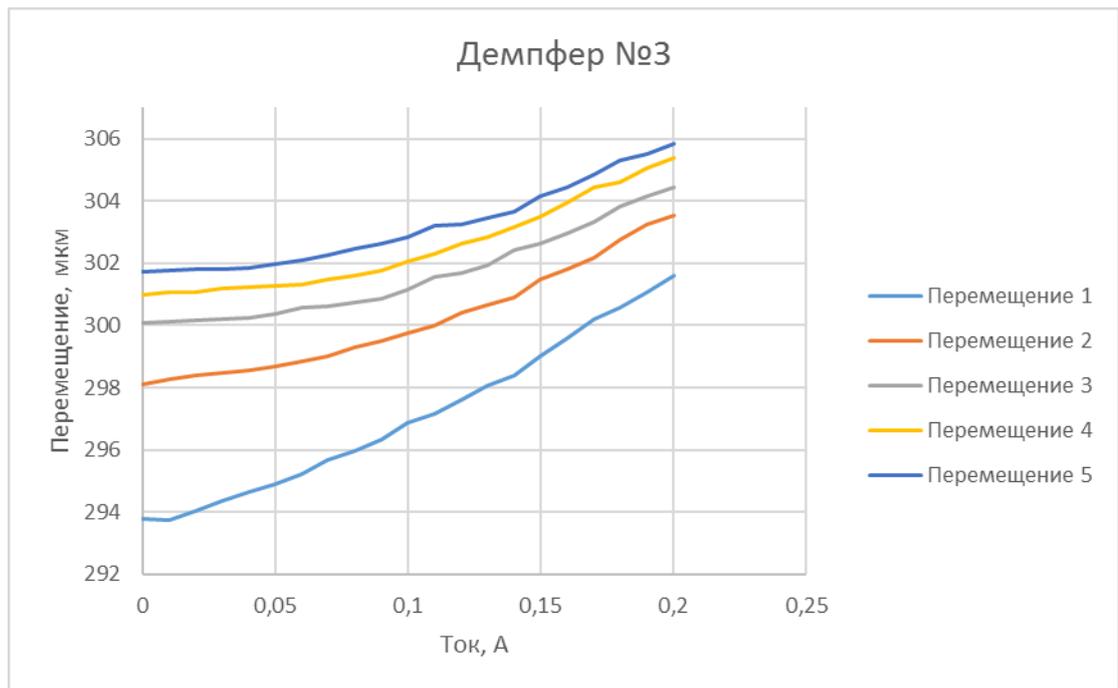


Рис. 11. Графическое представление результатов Демпфера №3

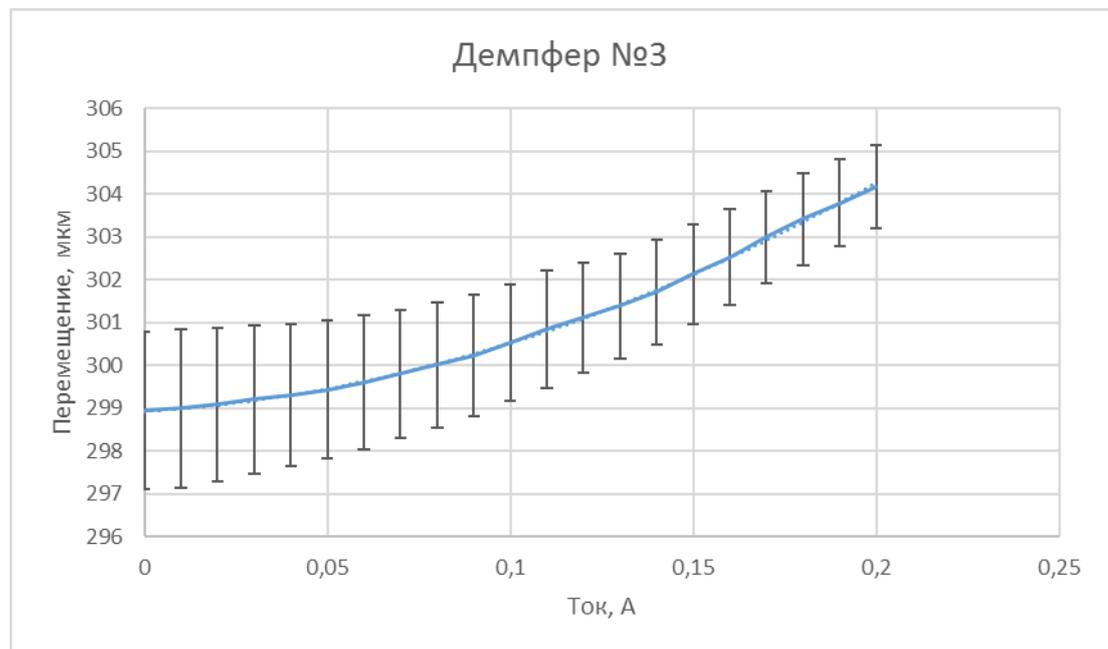


Рис. 12. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №3

Вывод: учитывая характер кривой (довольно крутое восхождение) и доверительные интервалы, ток может находиться в интервале 0,16 – 0,2 А.

Демпфер №4.

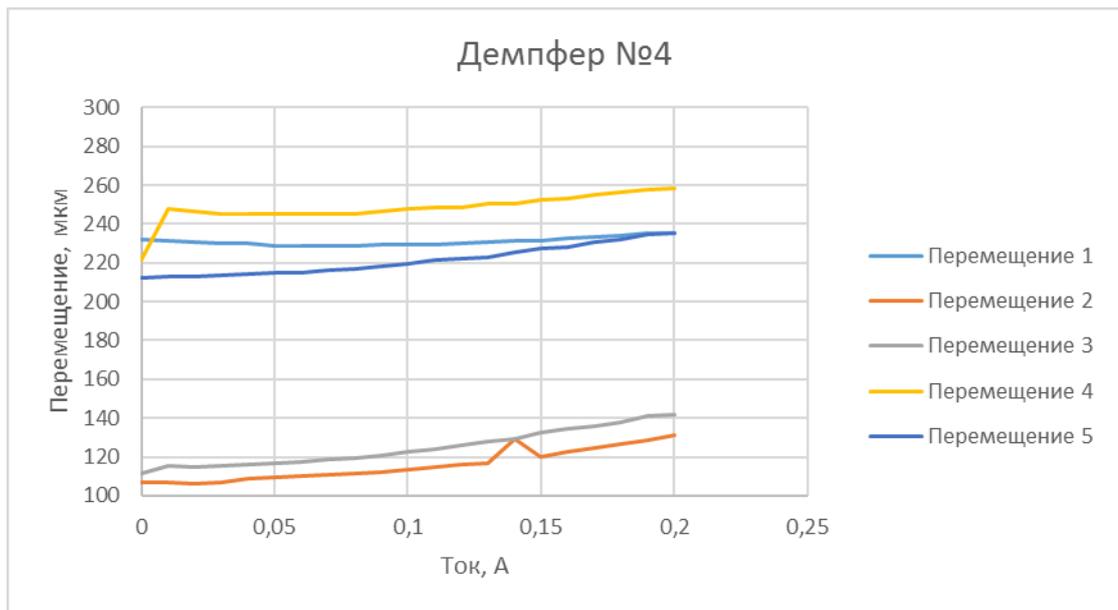


Рис. 13. Графическое представление результатов Демпфера №4

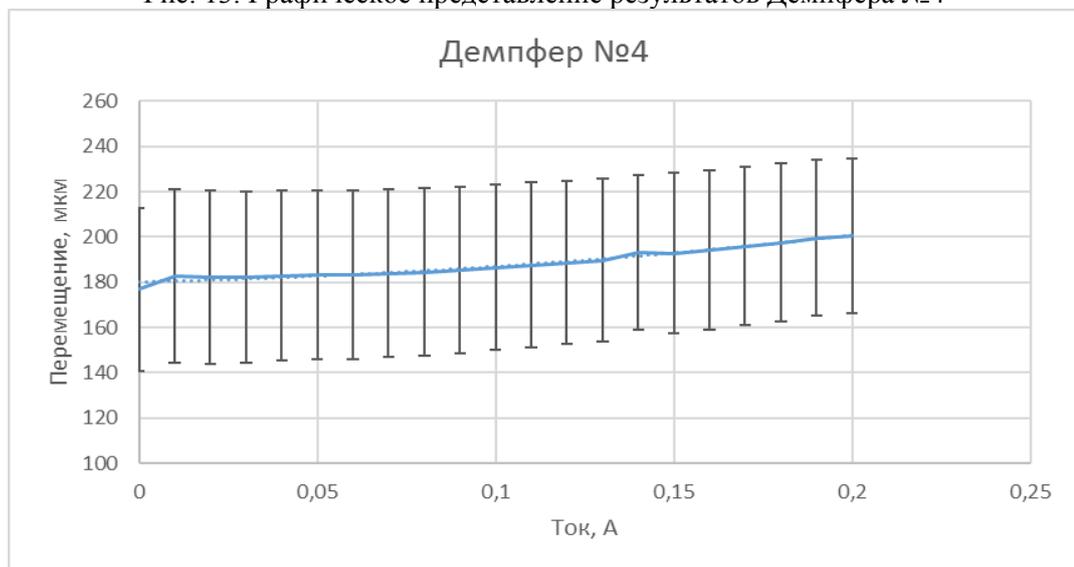


Рис. 14. Обработка результатов эксперимента для Демпфера №4

Вывод: анализируя таблицы и характер кривой (почти линейная зависимость, практически нет наклона) можно сделать вывод, что ток трогания находится за пределами проведённых измерений, и следует провести измерения до 0,4-0,5 А.

2. Эксперименты по измерению коэффициента передачи амплитуды колебаний

Схема установки:

Экспериментальная платформа на основе МР демпферов представлена на рис. 15. Платформа состоит из: демпфера – I на основе МР – эластомера и датчика вибраций II.

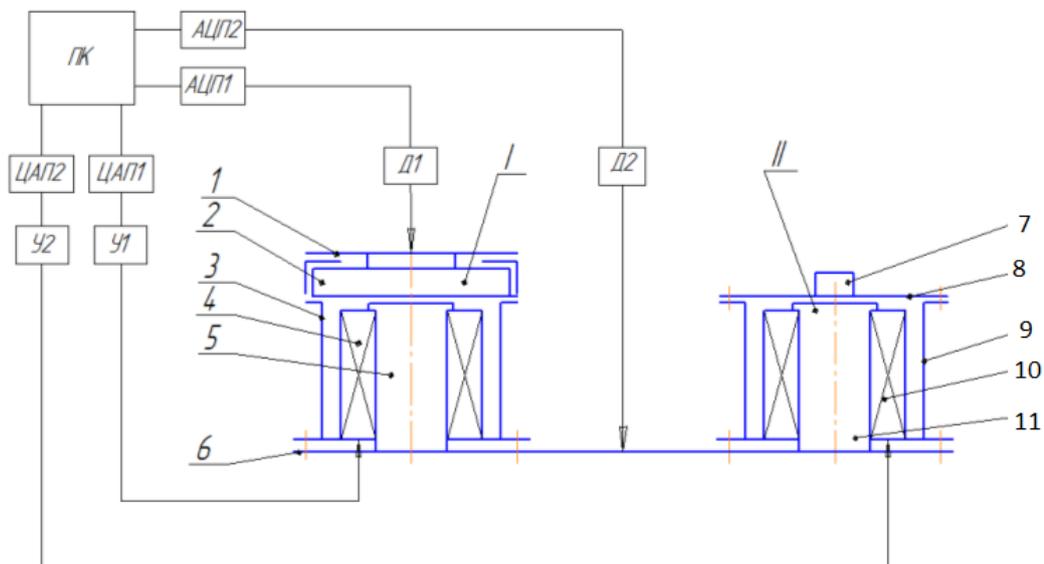


Рис. 15. Схема экспериментального стенда

Этапы процесса:

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

Сущность процесса:

Коэффициент передачи амплитуды колебаний (КПАК) показывает какой процент колебаний передаётся при вибрациях с основания демпфера 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. 16).

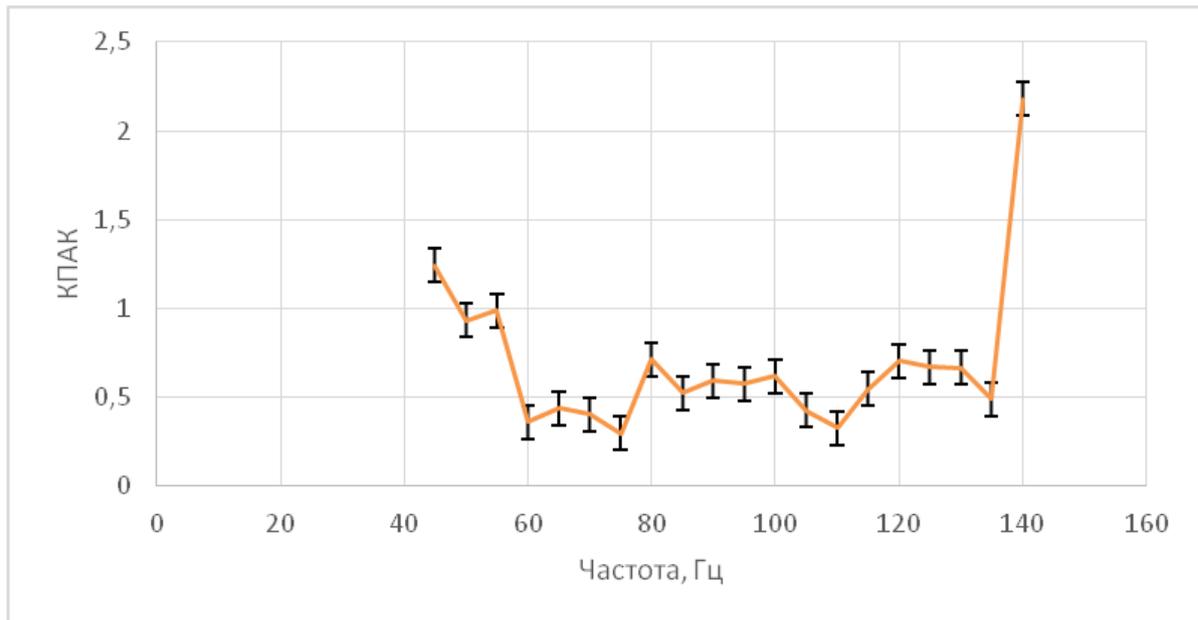


Рис. 16. Графическое представление результатов по КПАК

Вывод: для диапазона частот 60-140 Гц КПАК Демпфера №1 находится в диапазоне 0,2-0,5. В диапазоне 40-60 Гц КПАК больше, что характерно для более низких частот. В диапазоне 75-80 Гц наблюдается небольшой скачок – возможно в этом диапазоне находится резонансная частота устройства, имеет смысл более тщательно с небольшим шагом изучить эту область. При 140 Гц наблюдается резкий скачок, после чего КПАК устойчиво остаётся больше единицы вплоть до 200 Гц.

Литература

1. *J. D. Carlson и M. R. Jolly*, «MR Fluid, foam and elastomer devices,» *Mechatronics*, 2000, № 10, pp. 555-569.
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. *Борин Д.Ю.* Магнитореологический механизм для позиционирования зеркал сверхбольших астрономических телескопов с нанометровой точностью // Федеральная научно-техническая конференция творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам: Материалы конференции. М.: МИЭМ, 2003. С. 115-117.