

Экспериментальное подтверждение концепции регулируемой магнитожидкостной системы виброзащиты

Герасимчук В.В.^{1*}, Ермаков В.Ю.^{1}, Телепнев П.П.^{1***}, Шаповалов Р.В.^{2****}**

¹*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, ул. Ленинградская, 24,
Химки, Московская область, 141400, Россия*

²*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, ул.
Пионерская, 4, Королёв, Московская область, 141070, Россия*

**e-mail: gerasimchuk@laspacespace.ru*

***e-mail: ermakov@laspacespace.ru*

****e-mail: telepnev@laspacespace.ru*

*****e-mail: shrv1952@yandex.ru*

Статья поступила 02.12.2019

Аннотация

Экспериментально подтверждена концепция снижения до допустимого уровня вибронагруженности элементов конструкции космического комплекса от возмущений устройствами с подвижными массами применением магнитожидкостной системы виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой.

Ключевые слова: виброзащитная система, магнитная жидкость, вибронагруженность, космический комплекс.

Введение

Ужесточение требований по условиям виброн нагруженности научной и прецизионной аппаратуры космических комплексов [1] выявили разрыв между технически реализуемым в настоящее время и допустимым уровнем виброактивности источников внутренних возмущений (рис.1), например, с подвижными массами [2]. Решение данной актуальной научно-технической проблемы [3] снижением интенсивности уровня возмущений требует концептуально-конструктивных изменений применяемых механизмов и оборудования, что зачастую финансово или технически затруднено [4]. Поэтому перспективным направлением может быть выбрана виброизоляция источников возмущений [5].

Особенностью применения виброизолирующих систем для снижения передаваемых силовомоментных воздействий при «развязке» упругими элементами исполнительного устройства с подвижными массами от силовой конструкции космического комплекса является возникновение в низкочастотной области резонансных пиков [6]. Их появление обусловлено неуравновешенностью подрессоренных свободных масс [7]. Обнаруживается сложная картина виброн нагружения [8]: несмотря на низкий уровень внутренних возмущений [9] они обладают достаточно плотным низкочастотным спектром, создающим значительные моменты [10]. Как результат – амплитудные значения силовомоментной характеристики в зоне резонансных пиков существенно превышают допустимые уровни в низкочастотной области, а в средне- и высокочастотной областях

обеспечивают снижение передаваемого вибронгружения до уровня ниже допустимого (рис.2).

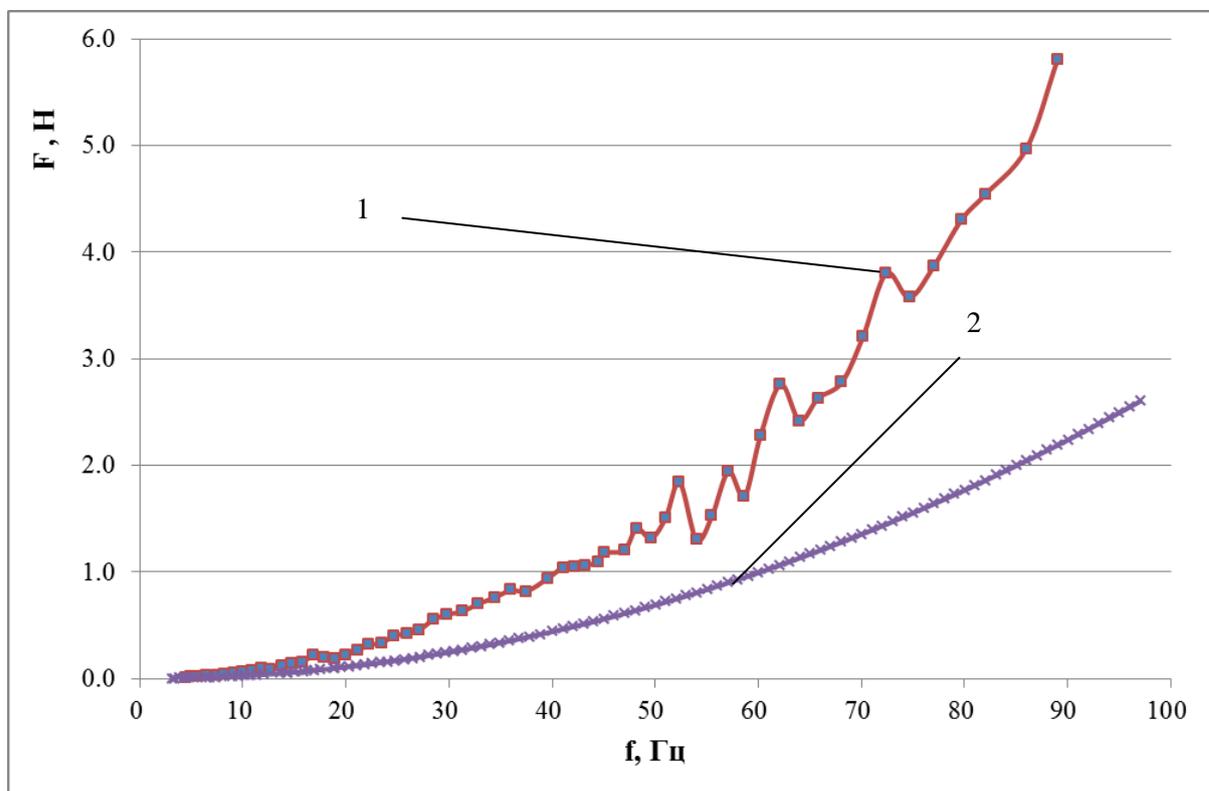


Рисунок 1. Уровни возмущений устройства с подвижными массами в сравнении с допустимым уровнем вибронгруженности:

1 – устройство с подвижными массами; 2 – допустимый уровень вибронгруженности

Для случаев вибрации источников возмущений в широком частотном диапазоне интерес может представлять применение магнитожидкостных систем виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой [11], позволяющих напрямую электрически состыковывать каналы электронной системы управления с исполнительными органами системы виброзащиты [11], тем самым обеспечивая мгновенное быстроедействие и существенно упрощая общую структуру

и конструкцию системы виброзащиты [13]. Вместе с этим, практически отсутствуют технические реализации таких перспективных конструкций [14].

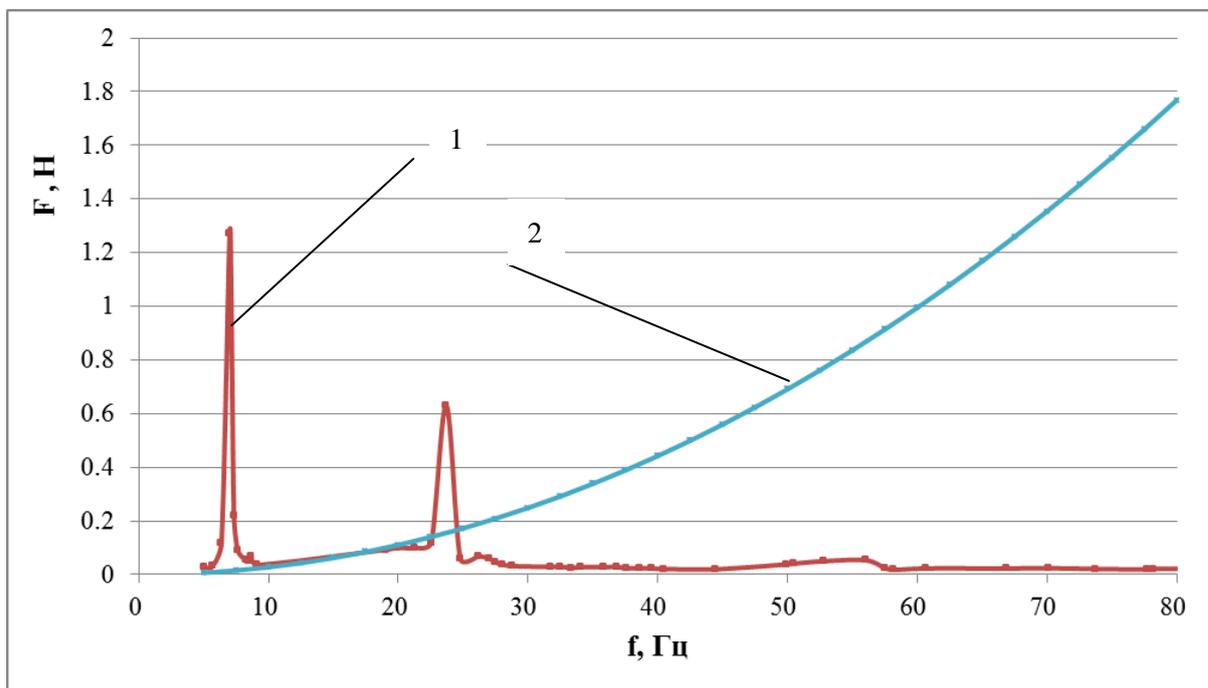


Рисунок 2. Силовая характеристика устройства с подвижными массами на пружинном виброизоляторе (1) в сравнении с допустимым уровнем вибронагруженности (2)

Для повышения эффективности виброизоляции и обеспечения требуемого уровня вибронагруженности элементов конструкции космических комплексов при работе устройств с подвижными массами во всем диапазоне их скоростей раскрутки [15], предлагается в низкочастотной области «блокировать» работу виброизолятора («исключая» создаваемое им вредное проявление резонансных пиков из динамической системы), «включая» виброизоляционный эффект устройства в среднечастотной и высокочастотной областях [16].

В работе продемонстрирована техническая реализуемость концепции снижения уровня передаваемых возмущений от устройства с подвижными массами

до уровней ниже допустимых путем применения магнитожидкостной системы виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой.

Постановка задачи исследований

Задачей экспериментальных исследований являлась проверка справедливости рабочей гипотезы о технической реализуемости снижения уровня передаваемого воздействия на оборудование космических комплексов от источников внутренних возмущений – устройств с подвижными массами – во всём диапазоне их скоростей вращения путём применения магнитожидкостной системы виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой [17].

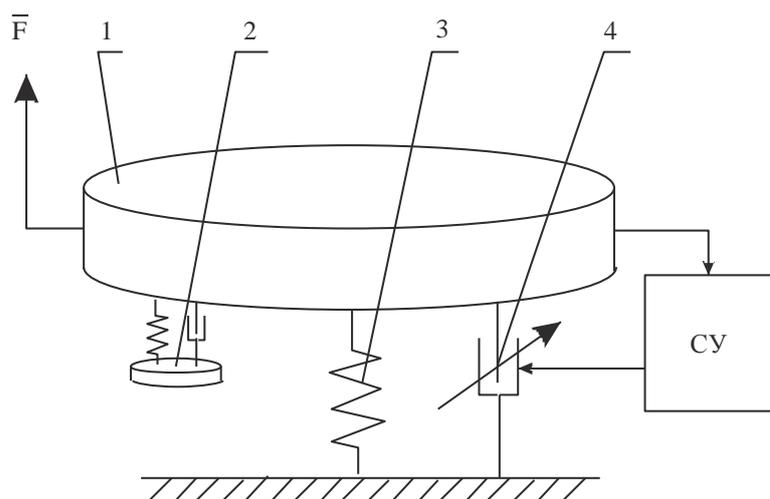


Рисунок 3. Принципиальная схема системы виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой:

1 – источник возмущений с подвижными массами; 2 – магнитожидкостный ГК;
3 – ВИ с УЭ; 4 – ДК с МРС; F – возмущающая сила

В эксперименте испытывалась система виброзащиты (рис.3) в составе виброизолятора (ВИ) с упругими элементами (УЭ), гасителя колебаний (ГК) с магнитной жидкостью (настраиваемого на частоту первого резонансного пика) и демпфера колебаний (ДК) с магнитореологической суспензией (МРС). При

магнитном насыщении МРС достигается состояние «затвердевания», способное обеспечивать статическую «фиксацию» подвижной части корпуса источника возмущений относительно конструкции космического аппарата. Упругая характеристика ВИ станет жёсткой, «срезая» резонансные пики низкочастотной области. Поступающая в систему управления (СУ) информация о скорости раскрутки подвижных масс исполнительного устройства (уровня виброактивности источника возмущений) определяла момент подачи тока на электромагнитную катушку, создающую электромагнитное поле, в котором изменялась намагниченность МРС, а, следовательно, и её «эффективная» вязкость.

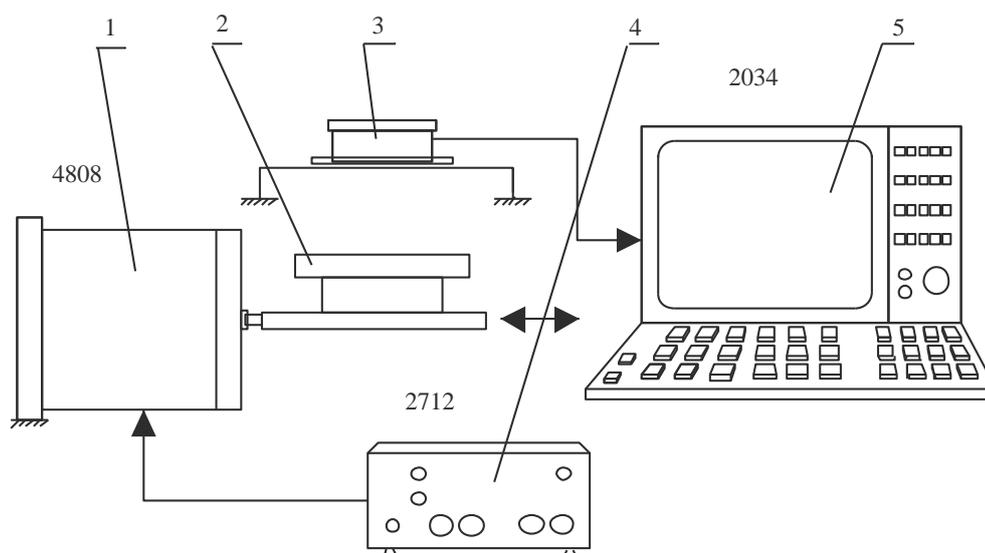


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки:

1 – силовозбудитель; 2 – магнитожидкостный ГК; 3 – датчик индукционный; 4 – усилитель мощности вибрационного возбудителя; 5 – двухканальный анализатор

Настройка магнитожидкостного ГК осуществлялась на экспериментальной установке (рис.4) в составе компактного электродинамического силовозбудителя 1 с постоянным магнитом (типа 4808) для возбуждения механических колебаний, магнитожидкостного гасителя 2 в составе подвижного корпуса, крышки с

помещенными внутрь магнитом и магнитной жидкостью и комплекта измерительной аппаратуры 3,4,5.

Варьируя объемами магнитной жидкости и полости камеры стакана подвижного корпуса проводилась «настройка» требуемого коэффициента затухания в ГК (рис.5) в необходимой ширине полосе частот возмущения многочастотных колебаний на соответствие известной аппроксимационной формуле [18]:

$$\xi = \frac{\nu(4\Delta - \Delta^2)}{8\sqrt{1-\nu^2}};$$

где ξ - относительный коэффициент демпфирования;

$\Delta = 2\Delta\bar{\omega} / \omega_2$ - относительная ширина рабочей зоны частот возмущения (настройка ГК);

ν - допускаемый коэффициент снижения эффективности ГК за счет затухания;

$\Delta\bar{\omega}$ - максимальная величина расстройки частоты возмущения.

Механические воздействия сил и моментов (вибронагруженность) измерялись на силоизмерительном стенде (СИС) механических воздействий сил и моментов при работе устройства с подвижными массами (рис.6). В состав СИС входили: многокомпонентная силоизмерительная платформа Z12865, 12-канальный блок электроники Z13166, ПЭВМ, оснащенная платой многоканального АЦП E14-440. Управление работой ВЗС в процессе испытаний осуществлялось контрольно-проверочной аппаратурой.

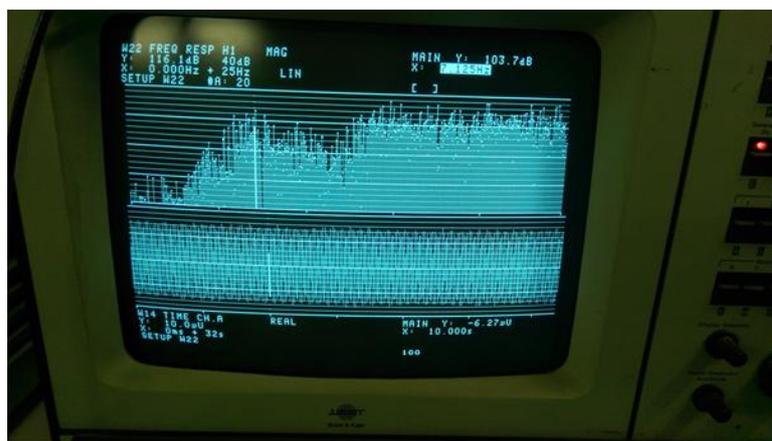


Рисунок 5. Экран двухканального анализатора при настройке ГК на частоту первого тона колебаний системы виброзащиты

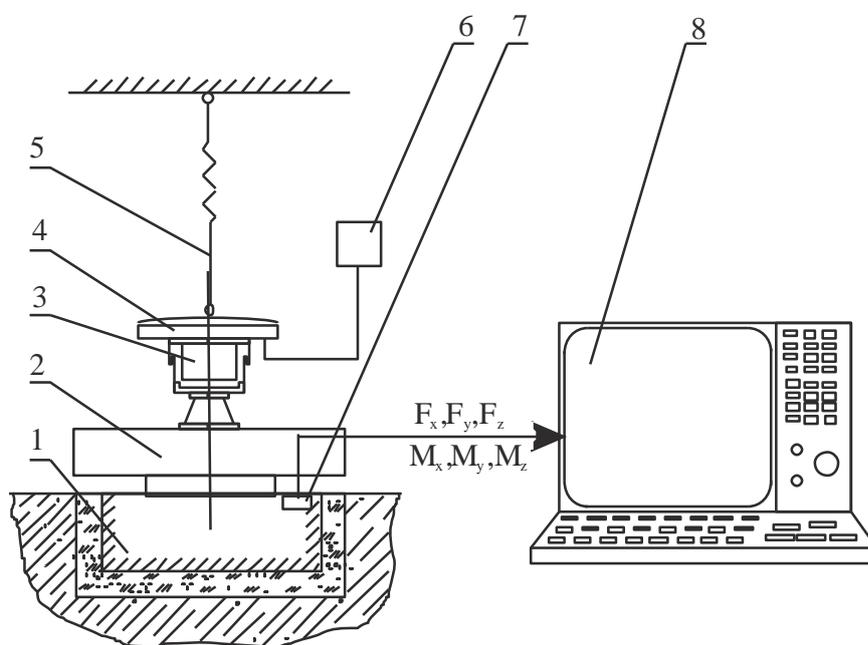


Рисунок 6. Блок-схема испытательного стенда:

- 1 – сейсморазвязанный фундамент; 2 – силоизмерительная платформа; 3 – ВЗС;
 4 – устройство с подвижными массами; 5 – система обезвешивания; 6 – контрольно-проверочная аппаратура; 7 – датчики силомоментные; 8 – система приема, регистрации и обработки информации

Результаты исследований

Реализуя управление упруго-демпфирующей характеристикой регулируемой магнитожидкостной системы виброзащиты в соответствии с предложенным

алгоритмом (в низкочастотной области «блокируя» работу виброизолятора, тем самым исключая создаваемое им вредное проявление резонансных пиков на динамическую систему, и «включая» виброизоляционный эффект устройства в среднечастотной и высокочастотной областях) в вертикальной плоскости (рис.7) достигнуты амплитудные силомоментные значения вибронагруженности ниже допустимого уровня в области второго тона колебаний, т.е. второй пик полностью «срезан». А настройкой гасителя колебаний на частоту первого резонансного пика изгибно-крутильного тона колебаний обеспечено снижение на 40 % динамической реакции ВЗС (рис. 8).

Для обеспечения плавности протекания переходных процессов при регулировании упруго-демпфирующей характеристикой важно учитывать реологические особенности МРС – наличие времени релаксации и его влияние при изменении намагниченности магнитного поля на скорость изменения намагниченности МРС.

Установлено, что резкое изменение характеристик МРС способно привести к скачкообразному изменению фазовых характеристик, которые могут повлиять на эффективность виброизоляции [19]. Для выбора рабочего тела системы виброзащиты были проведены статические испытания с четырьмя образцами МРС, изготовленными СКПТБ «Полнос», по результатам которых в качестве основной была выбрана магнитореологическая суспензия МРС 11/92МС с намагниченностью насыщения $M_s=650$ кА/м.

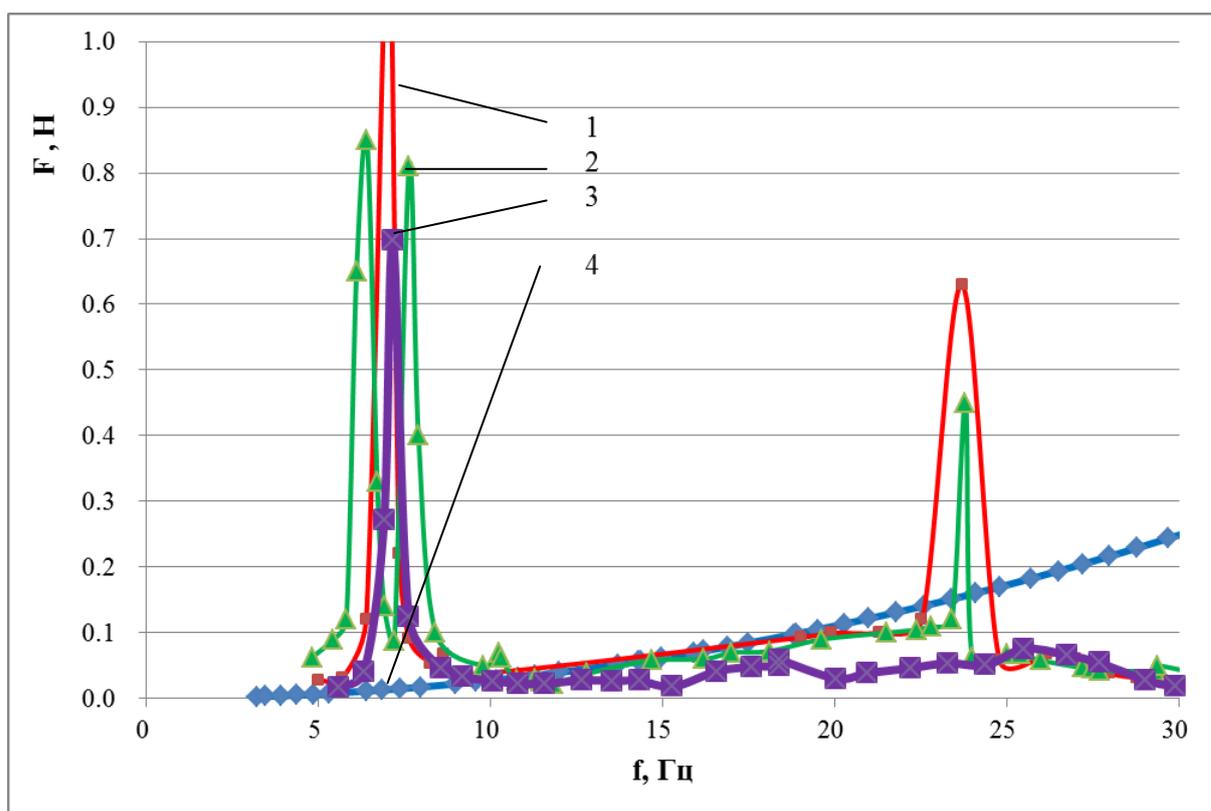
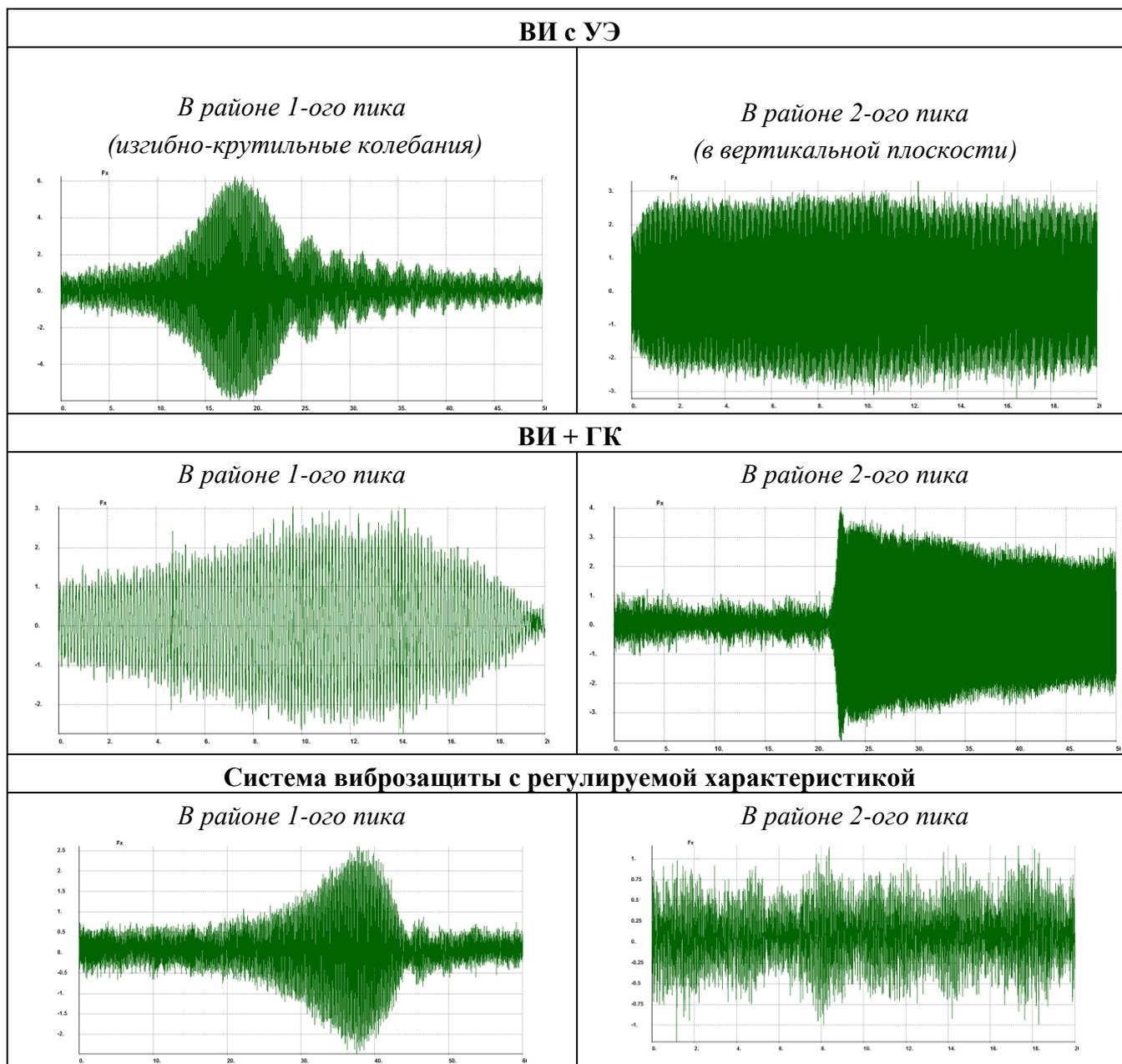


Рисунок 7. Силовая характеристика систем виброзащиты от возмущающих воздействий устройства с подвижными массами:

- 1 – ВИ; 2 – УЭ+ГК; 3 – система виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой; 4 - допустимый уровень вибронагруженности

Изменяя напряженность внешнего магнитного поля [20], представляется возможным варьировать параметрами демпфирования. Так, при намагниченности насыщения МРС $M_0=M_s$ время затухания колебаний может снижаться до 6 раз от $t=1,4$ с при $\eta_{min}=10$ Па·с до $t=0,25$ с при $\eta_{max}=210$ Па·с. Таким образом, по критерию минимума передаваемых СКЗ ускорений, эффективность виброзащиты с регулируемым демпфированием на 15...25% выше, чем при нерегулируемом.

Рисунок 8. Вибрационная характеристика $F(t)$

В ходе эксперимента выявлено, что в случае немагнитопроводящего поршня величина логарифмического декремента δ практически не зависит от силы тока в соленоиде. Причём, если у образца с магнитопроводящим поршнем с ростом силы тока в соленоиде наблюдается плавное монотонное увеличение резонансной частоты системы, то у модели с немагнитопроводящим поршнем эта зависимость носит выпуклый характер. Данный результат позволяет предположить о

возможности регулирования упругой характеристикой системы с немагнитопроводящим поршнем при стабильном и, одновременно, высоком логарифмическом декременте δ . Линейный характер зависимостей объясняется, по-видимому, и тем, что кривая намагниченности данной МРС в диапазоне изменения напряженности магнитного поля (50 кА/м) линейна ($H_{s_{max}}=650$ кА/м). Магнитное насыщение МРС, при котором эффективная вязкость и уровень диссипации механической энергии не зависят от напряженности магнитного поля, наступает при значениях напряженности порядка нескольких сотен кА/м, что открывает широкие возможности по управлению АЧХ системы виброзащиты с МРС путём выбора типа МРС и электромагнитных систем управления [21].

Заключение

В работе экспериментально подтверждена представленная концепция снижения до допустимого уровня вибронагруженности элементов конструкции космического комплекса от возмущений устройств с подвижными массами во всем диапазоне их скоростей раскрутки применением магнитожидкостной системы виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой. Эффективность виброизоляции с одновременным достижением требуемого уровня вибронагруженности обеспечена за счет «блокировки» работы виброизолятора в низкочастотной области и исключением создаваемого вредного проявление резонансных пиков виброизоляции, и «включением» виброизоляционного эффекта системы виброзащиты в среднечастотной и высокочастотной областях. За счёт магнитного насыщения МРС возможно достижение состояния «затвердевания» суспензии, способного статически зафиксировать подвижную часть корпуса

источника возмущений относительно конструкции космического аппарата, тем самым возросшая жёсткость упругой характеристики ВЗС «срезает» резонансные пики в низкочастотной области. Несомненным достоинством магнитожидкостных систем виброзащиты с регулируемой упруго-демпфирующей характеристикой выступает их способность напрямую электрически состыковывать каналы электронной системы управления с исполнительными органами виброзащитной системы, тем самым обеспечивая мгновенное быстроедействие и существенно упрощая общую структуру конструкции.

Библиографический список

1. Воронцов В.А., Карчаев Х.Ж., Мартынов М.Б., Примаков П.В. Программа исследования Венеры и международное сотрудничество // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=65702&eng=N>
2. Ледков А.С., Соболев Р.Г. Стабилизация электродинамической тросовой системы на круговой орбите // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107856>
3. Герасимчук В.В., Ефанов В.В., Ермаков В.Ю., Лоханов И.В. и др. Решение задачи обеспечения допустимых уровней вибронагруженности исполнительных органов системы ориентации космического аппарата // Полёт. 2018. № 8. С. 33 - 38.
4. Михалёв С.М. Адаптация аэрокосмической системы к выведению спутников на высокоэнергетические орбиты // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105690>

5. Фирсанов В.В., Фам В.Т. Напряженно-деформированное состояние сферической оболочки на основе уточненной теории // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104174>
6. Фролов К.В. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. Защита от вибраций и ударов. – М.: Машиностроение, 1985. Т. 6. – 456 с.
7. Амирьянц Г.А., Малютин В.А. Об экспериментальном определении жесткостных характеристик авиационных конструкций // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100600>
8. Герасимчук В.В. Построение динамической модели конструкции пространственного многосвязного механизма // Двойные технологии. 2019. № 2 (87). С. 44 - 48.
9. Герасимчук В.В. Моделирование динамики движения двухзвенного механизма посадочной платформы десантного модуля // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107904>
10. Poduraev Yu. Mechatronics: fundamentals, methods and applications: proc. Manual for University students, Moscow: Mechanical Engineering, 2007, 256 p.
11. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. - М.: Мир, 1989. – 624 с.
12. Рулев С.В., Самсонов В.Н., Савостьянов А.М., Шмырин Г.К. Управляемые магнитожидкостные виброизоляторы. - М.: МО СССР, 1988. С. 45 - 47.
13. Топчий В.Д., Рулёв С.В., Савостьянов А.М., Герасимчук В.В. Амортизационное устройство. Патент РФ № 2066005 С1, 27.08.96.

14. Архангелов А.Г., Рулёв С.В., Ермаков В.Ю., Герасимчук В.В. Программа управления магнитожидкостной системой виброзащиты. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616337, 2018.
15. Герасимчук В.В., Ермаков В.В. Совершенствование системы виброзащиты, функционирующей на основе магнитореологического эффекта // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований: сборник трудов. – Химки, МО, НПО им. С.А. Лавочкина, 2017. С 358 - 364.
16. Ермаков В.Ю. Применение магнитожидкостного эффекта для снижения статического и динамического дисбаланса от подвижных масс приводных устройств // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105679>
17. Rappel S.S. Low viscosity magnetic fluid of tained by the colloidal suspension of magnetic particles. US Patent 3215572, 1965.
18. Благодарёва О.В. Задача об аэроупругих колебаниях крылатой ракеты на основе метода Ритца. // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93332>
19. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. - М.: Мир, 1989. – 357 с.
20. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. - М.: Мир, 1993. – 272 с.
21. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. - 240 с.