

УДК 629.786.2:621.396.677:534.1

Применение магнитожидкостного эффекта для снижения статического и динамического дисбаланса от подвижных масс приводных устройств

Ермаков В.Ю.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, Москва, 125319, Россия

e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Статья поступила 06.06.2019

Аннотация

В статье описан комплексный прикладной метод снижения статического и динамического дисбаланса от подвижных масс приводных устройств с применением магнитожидкостных виброизоляторов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитожидкостной виброизолятор, электродвигатель-маховик, виброизолятор.

Введение

В процессе работы механических систем (вентиляторов, приводов, электродвигателей-маховиков (ДМ) и других) [1], имеющих вращающиеся или подвижные массы, на конструкцию космического аппарата (КА) передаются вибрации малой амплитуды, лежащие в области частот (5-100 с⁻¹), которые отрицательно влияют как на работу системы управления (СУ), оказывая воздействия

на ее чувствительные элементы, так и на работу прецизионной аппаратуры (ПА), что может привести к ухудшению точности ориентации КА [2, 3].

Одним из путей разрешения противоречия между достигнутым и требуемым уровнем вибронагруженности КА с высокопрецизионным оборудованием может быть применение виброизолирующих устройств. Как правило, КА оснащены телескопами с высоким разрешением, малые колебания элементов оптического тракта (главное зеркало, вторичное зеркало, фотоприемник) от гироскопических источников микровозмущений, могут привести к существенному искажению получаемой информации [5].

Данная проблема решается при условии, если известны места установки прецизионных приборов, а также места установки устройств с подвижными массами. Требуется определить: моменты инерции упругих элементов конструкций КА, при условии выполнения динамических требований в зависимости от вектора угловых скоростей КА; минимизировать микровибрации при функционировании специальной ПА КА; минимизировать функции: статического дисбаланса и динамического дисбаланса.

Решение сформированной научной проблемы требует решения взаимосвязанных частных научных задач, важнейшими из которых являются: анализ требований [6-9], предъявляемых к современным КА, в зависимости от назначения КА и устанавливаемой на них ПА с целью унификации этих требований; классификация и анализ основных источников внутренних возмущений в современных КА с целью выделения наиболее виброактивных из них для

возможного выключения их в режимах сеансов для повышения качества выходного эффекта; разработка экспериментальных методов, алгоритмов и средств определения воздействий [10, 11], создаваемых приводами, исполнительными механизмами, целевой и ПА в их рабочих режимах; разработка математических моделей КА на стадии проектирования и изготовления макетов изделий для анализа динамической точности неуправляемого КА как в низкочастотной, так и в среднечастотной областях спектра воздействий внутренних источников возмущений [12, 13]; разработка математических алгоритмов решения задач динамической точности на базе математических моделей и экспериментально определяемых параметров возмущающих воздействий; разработка частных требований по виброактивности к основным результатам оценки и контроля внутренних возмущений и предъявления этих требований разработчикам приводов, исполнительных механизмов и бортовой аппаратуры на основе комплексного анализа результатов динамических расчетов и общих требований по параметрам точности для всего КА; разработка практических рекомендаций по парированию внутренних возмущающих воздействий в процессе решения целевых задач КА различного назначения в составе орбитальной группировки (космической системы, космического комплекса) [14].

К точности ориентации КА от влияния малых колебаний предъявляются повышенные требования, а в частности, к чувствительным элементам, которые могут привести к искажению измеряемой ими информации и, вследствие этого, ухудшению качества стабилизации объекта. Проведенные работы по определению

амплитуд колебаний элементов оптического тракта и чувствительных элементов СУ, вызванных остаточной несбалансированностью вращающихся роторов ДМ, показали наличие существенной вероятности их отрицательного влияния на качество выполнения поставленной задачи [15]. С целью уменьшения влияния указанного фактора на относительные перемещения оптического тракта разработан 5-ти степенной ВИ [16] ДМ (рис.1) и приведены результаты их динамического моделирования (рис.2).

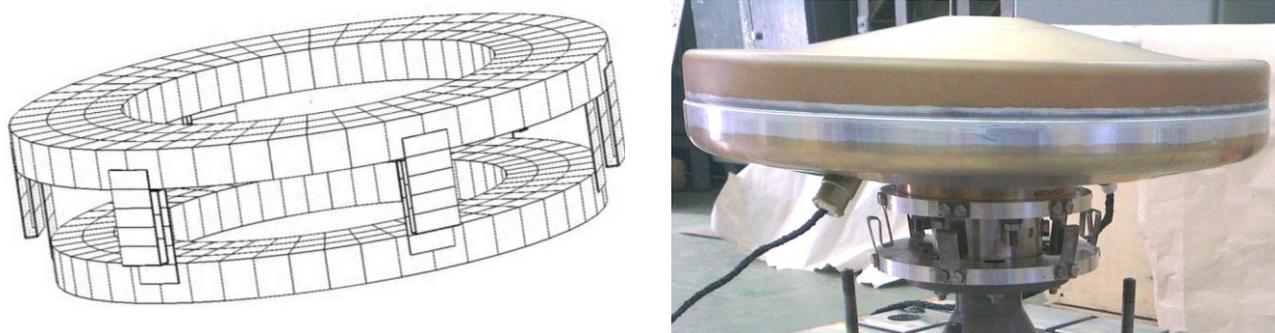
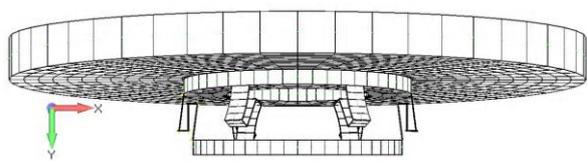


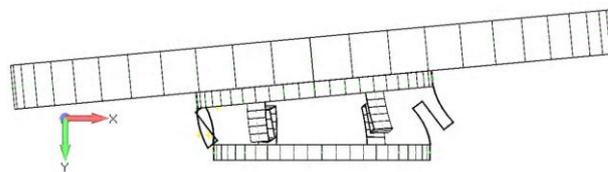
Рисунок 1. Физическая модель виброизолятора и опытный образец виброизолятора с двигателем маховиком

ВИ содержит корпус, состоящий из смонтированных соосно, подвижной части и неподвижной части, выполненных в виде полых цилиндров. Подвижная часть корпуса выполнена с глухим торцом и буртиком на внешней поверхности со стороны указанного торца. Неподвижная часть корпуса также выполнена с глухим торцом и буртиком с внешней стороны открытого торца. Неподвижная часть корпуса смонтирована с заходом глухим торцом в полость подвижной части, с образованием зазора между стенками подвижной и неподвижной частей корпуса. В вышеуказанном зазоре, на внешней поверхности неподвижной части корпуса равномерно по окружности закреплены, как минимум в два ряда постоянные

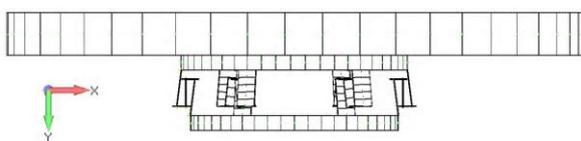
магниты, которые обращены одинаковыми полюсами в сторону внутренней поверхности подвижной части корпуса для создания однородного магнитного поля по окружности.



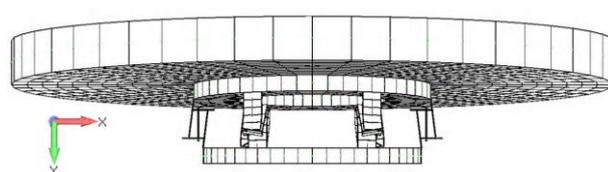
1-й тон (7.65 Гц)



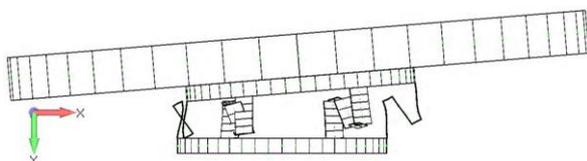
2-й тон (7.65 Гц)



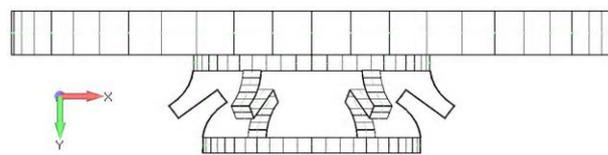
3-й тон (7.68 Гц)



4-й тон (13.27 Гц)



5-й тон (13.27 Гц)



6-й тон (15.0 Гц)

Рисунок 2. Шесть тонов колебаний конструкции виброизолятора с двигателем маховиком

На магниты нанесена магнитная жидкость (МЖ) в количестве, обеспечивающем принятие формы замкнутых силовых линий. Зазор с МЖ и магнитами загерметизирован посредством мембраны, смонтированной между двумя частями корпуса. Подвижная часть корпуса соединена с неподвижной частью вертикально закрепленными на их буртиках, равномерно по окружностям, упругими элементами в виде пластинчатых опор. Каждая из опор изогнута под прямыми углами с образованием зигзагообразной формы. Такая форма опор позволяет

разместить ВИ в ограниченном пространстве КА и повысить демпфирующие характеристики самих опор. При этом подвижная часть выполняет роль опоры для ДМ, корректирующих положение КА с ПА в пространстве [17, 18].

Рассмотрим более подробно систему постоянный магнит (ПМ), обволоченный МЖ, который, является инерционной массой и присущи все особенности динамического гасителя колебаний. В этом случае ПМ, особенно в резонансных режимах, колеблется с определённой частотой внутри МЖ [19]. Когда движение наиболее интенсивно, эта система будет осуществлять наибольший съём энергии механических колебаний конструкции.

Для определения зависимости упругой силы F от величины зазора h_z между поверхностью ПМ с МЖ и поверхностью корпуса необходимо, изучение зависимости функции $N(h_z)$. Исследования показали, что величина напряженности магнитного поля, создаваемого ПМ, уменьшается по экспоненциальному закону по мере удаления от его поверхности: $N=N_0 \exp(-\beta h_z)$, где N_0 магнитное поле на поверхности ПМ. Поэтому справедливым было предположение об экспоненциальном характере зависимости выталкивающей силы, действующей на ПМ в корпусе, от величины зазора. Но увеличение выталкивающей силы не может идти до бесконечности ПМ может подняться только на определенную высоту, т.к. выталкивающие силы не могут превысить силу тяжести действующую на ПМ, что и подтверждается экспериментальной зависимостью настройки гасителя (его настроечную частоту) от магнитной индукции ПМ имеющих одинаковую конфигурацию и массу. Действительно, статические силовые характеристики

системы «ПМ – МЖ», полученные при помощи катетометра КМ-8 при различных заправках МЖ, хорошо интерполируются формулой $F = F_0 \exp(-\beta h_z)$, где $h_z = z|_{F=\infty} - z$. При этом в качестве рабочего параметра было выбрано отношение объёма МЖ к собственному объёму ПМ, который она покрывает ($\beta = V_{\text{МЖ}}/V_{\text{магн}}$) [20].

Для подтверждения правильности теоретических предпосылок надо провести исследования, позволяющие определить область силовой динамики, в которой эта система ПМ с МЖ эффективна, подобрать магнит и МЖ, материал для изготовления корпуса, определить влияние магнитной проницаемости μ составных элементов входящих в конструкцию системы ПМ, МЖ и корпус на его динамические параметры, а также других свойств МЖ, связанных с потерями энергии, например, на гистерезисное перемагничивание, вихревые токи, магнитострикцию и прочее, то есть исследовать те процессы, для которых теоретических исследований и экспериментальных данных, приемлемых для практического использования в космической технике, не существовало.

В корпусе системы при приближении ПМ к дну силовые линии магнитного поля сгущаются под ним, "не желая" выходить в среду с меньшей магнитной проницаемостью. Это сгущение приводит к увеличению давления под ПМ, создавая выталкивающую силу, которая может компенсировать силу тяжести. Эти же причины препятствуют приближению ПМ с жидкостью к боковым стенкам корпуса [2]. Простейшее проявление эффекта левитации выглядит как "нарушение" закона Архимеда: монолитный металлический или керамический ПМ имеет плотность ($\rho \approx 5 \div 8 \times 10^3$ кг/м³) при погружении в сосуд с МЖ ($\rho \approx 10^3$ кг/м³) не опускается на

дно, а устойчиво "парит" на определённой высоте, располагаясь вблизи вертикальной оси сосуда. Объяснение заключается в следующем: МЖ (коллоидный раствор ферромагнитных частиц, покрытых поверхностно-активным веществом, в воде, керосине, масле и прочих жидких составляющих) обладает заметной магнитной проницаемостью ($\mu \approx 5 \dots 10$). Обволакивая ПМ, МЖ играет роль магнитопровода, концентрирующего внутри себя силовые линии поля; тем самым понижается магнитостатическая энергия системы. Контакт со стенкой или дном сосуда уменьшает "магнитную экранировку" соприкасающейся грани ПМ (μ немагнитной среды равна 1), повышает магнитостатическую энергию и, следовательно, вызывает появление возвращающей силы, стремящейся установить ПМ в геометрический центр объёма, занятого МЖ. Описанное явление не связано с гравитацией, поэтому самолевитация одинаково проявляется как в невесомости, так и в земных условиях, с той только разницей, что в присутствии силы тяжести несколько уменьшается высота плавания ПМ над дном сосуда.

Были проведены испытания по исследованию влияния высоты полости между ПМ и корпусом (рисунок 3), а также материала ПМ и корпуса на динамические характеристики системы; влияния площади основания ПМ на эффективность работы системы. Испытаниям подвергались модели системы ПМ с МЖ в герметичном корпусе при нормальных климатических условиях (температура воздуха $T = 20 \pm 5^\circ \text{C}$; атмосферное давление 740-760 мм рт. столба). Выталкивающая сила (упругая),

действующая на ПМ, определялась выражением: $F = \oint_S \sigma_{ik} n_k dS = \oint_S (-pn_i + \sigma_{ik}^e n_k) dS$, где

σ_{ik}^e - тензор напряжений Максвелла; n_k - внешний вектор нормали направленный к

поверхности ПМ; S - поверхность ПМ; p - давление.

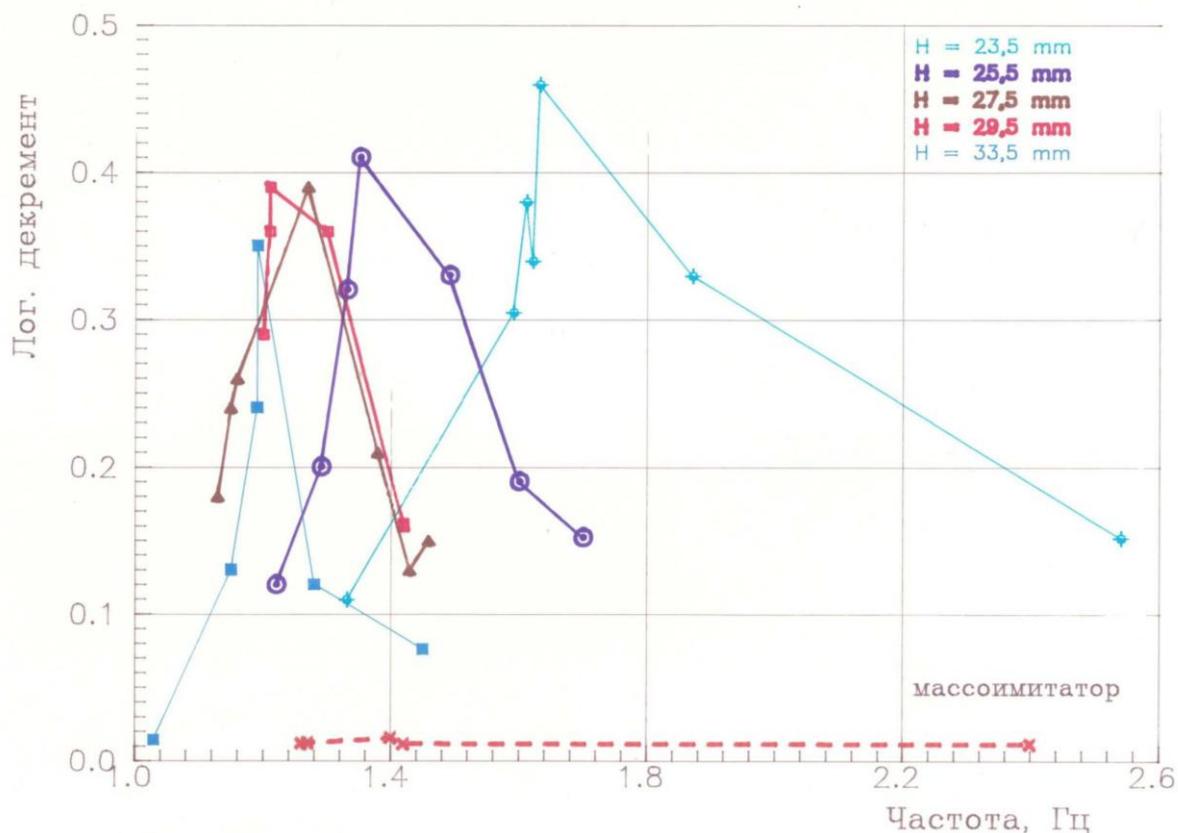


Рисунок 3. Зависимость частоты настройки системы корпуса с постоянным магнитом и магнитной жидкостью от высоты полости корпуса.

Построение математической модели рассматриваемой системы является сложной задачей с различными ограничениями и перекрещивающимися факторами такими, как нахождение ПМ покрытого МЖ в стесненном пространстве корпуса; неоднородность магнитного поля ПМ; вихревые токи действующие на корпус, имеющего сложную конфигурацию и другие. На первой стадии удобно решать задачу аналитически, что позволяет создавать линейную модель и выявить основные характеристики данной колебательной системы. Основываясь на экспериментальных исследованиях динамики образцов системы, разрабатывается упрощённая математическая модель системы, включающая основные элементы,

которая позволяет анализировать эффективность устройства [3].

Если объём МЖ достаточно велик, то на его поверхности напряжённость магнитного поля близка к нулю. В этом случае выталкивающая сила F пропорциональна магнитоэстатическому давлению $\mu_0 M H$ и площади сечения ПМ S в плоскости, перпендикулярной направлению выталкивающей силы: $F = \mu_0 M H S$, где M - намагниченность МЖ; H – напряженность магнитного поля на поверхности ПМ.

ПМ с осевой намагниченностью, изготовленный из материала марки М 22 РА 220-1 по техническим условиям ПЯ 0 707 432. Замеряемая остаточная индукция замерялась в центрах торцов магнита, зависимости логарифмического коэффициента затухания колебаний δ от частоты от различной площади основания магнитов, рисунок 4.

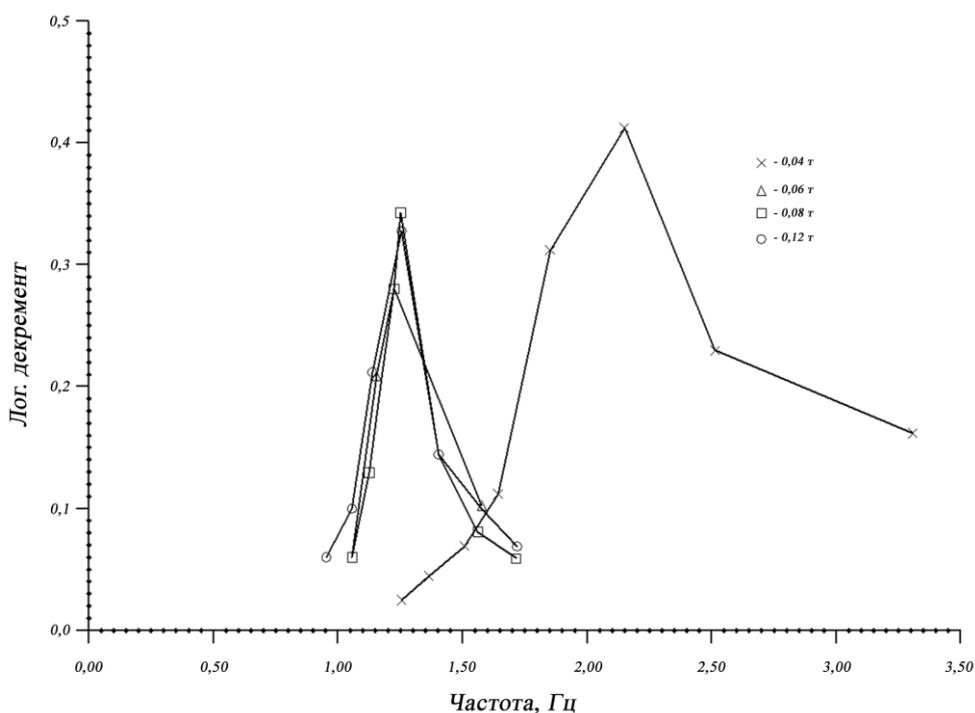


Рисунок 4. Зависимость частоты настройки исследуемого устройства от магнитной индукции постоянного магнита

Система в корпусе которого расположен ПМ обволоченный МЖ, ведет себя как гаситель колебания. Из этого можно сделать вывод, что в устройстве находится элемент, который имеет резко выраженную настроечную частоту колебательной системы. В данном случаи, этим элементом является ПМ, обволоченный МЖ. С помощью дополнительных исследований, заключающихся в том, что ПМ закреплялся неподвижно относительно перемещающегося корпуса, было выявлено, что этим элементом является ПМ.

Получены зависимости системы в корпусе которого расположен ПМ обволоченный МЖ от магнитной индукции постоянного магнита и различной площади основания магнитов, рисунок 5.

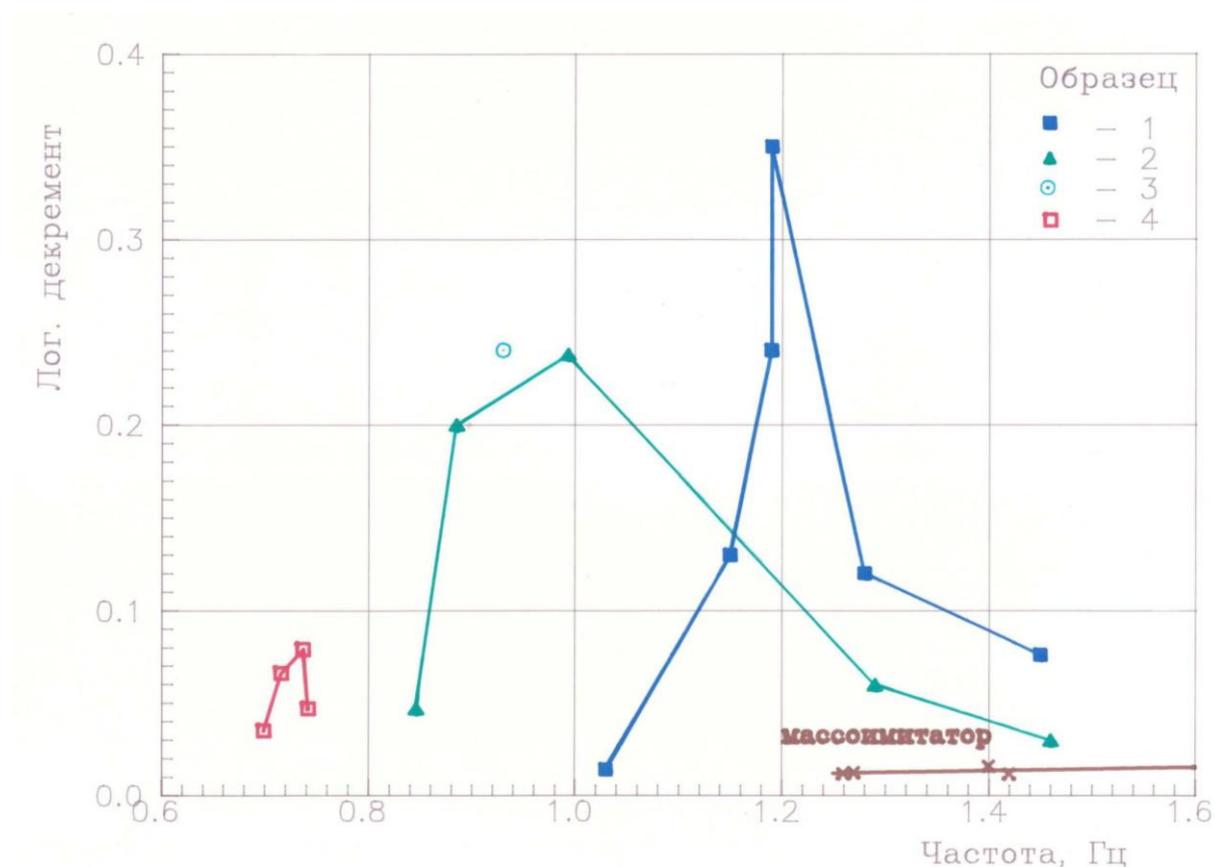


Рисунок 5. Зависимость логарифмических декрементов затухания корпуса с постоянным магнитом и магнитной жидкостью от различной площади основания

магнитов.

Подбор оптимальных параметров демпфирования осуществлялся путём сравнения результатов моделирования реакции конструкции КА на заданное воздействие при различных уровнях диссипации энергии в упругих элементах (стойках) ВИ [4]. Сравнительный анализ совокупности полученных результатов показал, что оптимальным для рассматриваемой схемы виброизоляции является значение коэффициента демпфирования равное 0.32, которое и принято для дальнейшего расчёта конструкции.

По результатам экспериментальных исследований колебательной системы с ВИ установлено, что абсолютные линейные перемещения снизились в 5-10 раз, абсолютные угловые перемещения – в 7-10 раз, абсолютные угловые скорости – в 10-20 раз в диапазоне от 0 до 55 с⁻¹, и в 1,5 раза в диапазоне от 55 до 90 с⁻¹, относительные линейные и угловые перемещения – в 5-10 раз, рисунок 6.

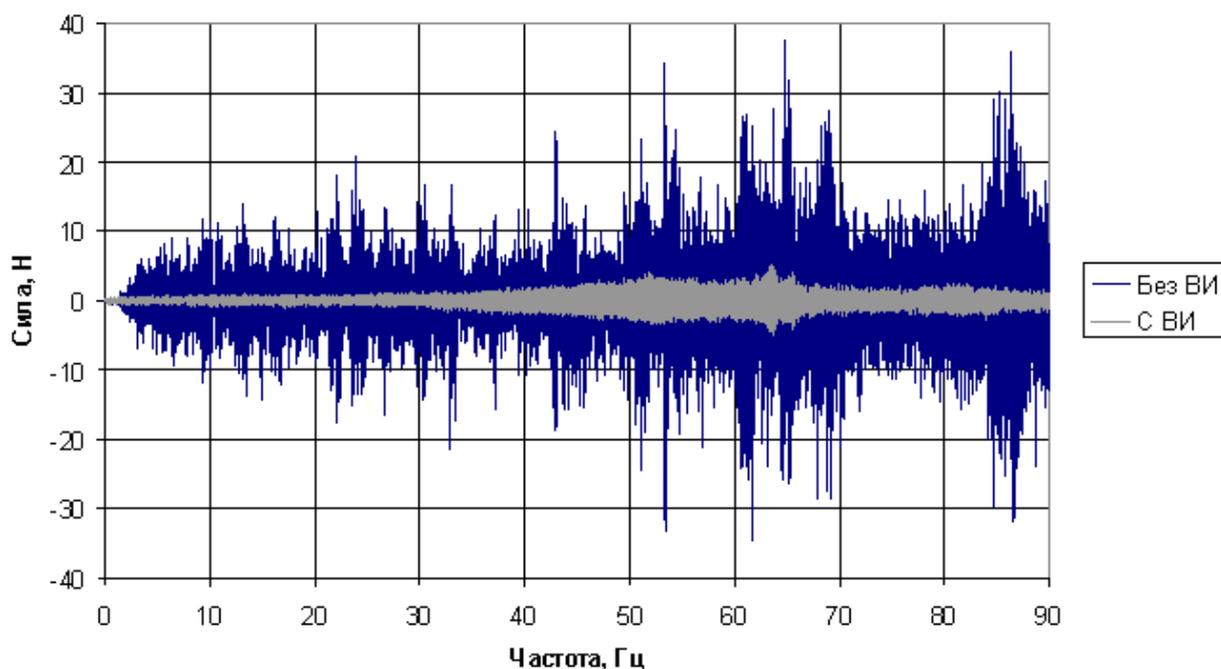


Рисунок 6. Обобщенные силы при работе двигателя маховика

Выводы

Анализ проведенных экспериментально-теоретических исследований показывает эффективность разработанной системы виброизолятора с использованием магнитожидкостного эффекта, а также обоснованность ее применения на КА типа «Спектр-УФ», как средства для устранения нежелательных микровозмущений, создаваемых двигателями-маховиками [5].

Библиографический список

1. Ермаков В.Ю., Телепнев П.П. Проектирование устройств гашения колебаний конструкции космических аппаратов // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2013. С. 398 - 429.
2. Ибрагимов Д.Н. Аппроксимация множества допустимых управлений в задаче быстрогодействия линейной дискретной системы // Труды МАИ. 2015. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69797>
3. Урюпин И.В. Синтез оптимальных кусочно-гладких аппроксимаций траекторий движения летательных аппаратов // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93440>
4. Ермаков В.Ю., Савостьянов А.М., Пронин М.А. Наведение электрического тока в индукторе магнитожидкостного виброизолятора при механических воздействиях // Магнитная гидродинамика. 1991. № 1. С. 107 - 113.

5. Ламзин В.А. Методические основы прогнозных исследований модификаций космических аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66060>
6. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30798>
7. Крикунов М.М. Исследование динамики пространственного движения тел переменного состава // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23801>
8. Дарнопых В.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26960>
9. Joshi S.M., Groom N.J. Modal Damping Enhancement in Large Space Structures Using AMCD's // Journal of Guidance and Control, 1980, vol. 3, no. 5, pp. 477 - 479.
10. Nikitin S.A., Polezhaev V.I. Fediushkin A.I. Mathematical simulation of impurity distribution in space processing experiments with semiconductors // Advances in Space Research, 1981, vol. 1, pp. 37 – 40.
11. Fedyushkin A., Borago N., Polezhayev V., Zharikov Ye. The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth // Journal of Crystal Growth, 2005, vol. 275, pp. 1557 – 1563.
12. Lin G.F., Lan C.E., Brandon J.A. Generalized Dynamic Aerodynamic Coefficient

Model for Flight Dynamics Application // 22nd Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, AIAA-1997-3643, New Orleans, 1997.

13. Anton V. Doroshin. Analysis of attitude motion evolutions of variable mass gyrostats and coaxial rigid bodies system // Int. Journal of Non-Linear Mechanics, 2010, no. 45, pp. 193 – 205.

14. Or A.C. Dynamics of an Asymmetric Gyrostat // Journal of Guidance, Control Dynamics, 1998, vol. 21, no. 3, pp. 416 – 420.

15. Hyde T.T., Crawley E.F. H2 Synthesis for Active Vibration Isolation // in Proceedings of the American Controls Conference, June 1995, Seattle, Washington, pp. 3835 - 3839.

16. Ермаков В.Ю., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Москатиньев И.В., Скуридина О.Е., Телепнев П.П. Патент на полезную модель РФ 166328 F16F 6/00; F16F 9/56, 20.11.2016.

17. Ermakov V.Yu., Savostianov A.M., Arinchev S.V., Gribkov V.A. Dynamical Characteristics of Magnetic Fluid Vibration Insulator with Defomable Shell Elements // Sixth International Conference on Magnetic Fluids, July 20-24, Paris, 1992, pp.538 - 539.

18. Агеев Р.В., Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Движение вязкой жидкости в плоском канале, образованном вибрирующим штампом и шарнирно опертой пластиной // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53466>

19. Березко М.Э., Никитченко Ю.А., Тихоновец А.В. Сшивание кинетической и гидродинамической моделей на примере течения Куэтта // Труды МАИ. 2017. №

94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80922>

20. Ermakov V.Yu., Savostianov A.M., Yemetz V.V. Investigation of fragments of a ferrofluid hermetic - vibration protection device for large-sized constructions // Journal Sciences of Space and Technology, 1996, no. 2 (1), pp. 99 - 107.