

## ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР-УФ»

В.Ю. Ермаков, Д.А. Кузнецов,  
П.П. Телепнёв, А.Н. Сова  
(ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»)

*Рассматриваются основные этапы создания виброизолятора для прецизионной оптико-электронной аппаратуры от работы электромаховичных исполнительных органов на борту космического аппарата «Спектр-УФ». Приведены расчёты кинематических параметров прецизионных устройств, которые подтверждают целесообразность разработки виброизолятора. Создана физическая модель виброизолятора, на основе которой разработан опытный образец. Приводится подтверждение расчётных значений виброизоляции результатами испытаний электромаховичных исполнительных органов на силоизмерительном стенде.*

**Ключевые слова:** виброизолятор, магнитная жидкость, двигатель-маховик, оптико-электронная аппаратура.

В последнее время учёные и конструкторы при создании космической техники уделяют большое внимание динамическим задачам, связанным с вибровозмущениями на борту космических аппаратов (КА). В первую очередь это обусловлено общим стремлением к детальному изучению объектов космического пространства, которому в свою очередь препятствуют возмущения, создаваемые внешними и внутренними источниками вибраций, оказывая негативное влияние на работу целевой прецизионной оптико-электронной аппаратуры. Несмотря на то, что амплитуды колебаний оптико-электронной аппаратуры достаточно малы и имеют микронные величины, для измерений удалённых объектов они играют существенную роль.

При непосредственном выполнении целевых задач возмущения, создаваемые внутренними источниками вибраций, являются определяющим фактором для надлежащей работы прецизионной аппаратуры. Внутренние источники располагаются непосредственно на борту КА, к ним относятся приводы солнечных батарей и антенн, сканирующие устройства, гиродины, двигатели-маховики и другие устройства. Постоянное усложнение задач, выполняемых КА, ведёт к постоянному повышению технических требований к целевой прецизионной аппаратуре. Вследствие этого возникает проблема виброзащиты прецизионной оптико-электронной аппаратуры КА.

Существуют два основных способа парирования вибровозмущений: первый способ основан на снижении интенсивности работы внутренних источников вибраций, что ведёт к уменьшению полезной работы исполнительных устройств; второй способ

более рациональный и основан на введении в конструкцию КА виброзащитных устройств.

Исследованиями в данной области занимаются различные организации как в России, так и за рубежом, среди них можно выделить: ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», ФГУП ЦНИИмаш, ФГУП «ЦЭНКИ», МАДИ, Военная академия РВСН имени Петра Великого, Белорусский государственный политехнический университет, Томский политехнический университет и ряд других организаций.

Для корректировки положения КА с прецизионной аппаратурой в пространстве часто устанавливаются электромаховичные исполнительные органы, представляющие собой двигатели-маховики (ДМ). В качестве примера рассмотрим КА «Спектр-УФ», на котором помимо ДМ располагаются следующие прецизионные устройства: гироскопический интегратор вектора угловых скоростей, астродатчики, датчики гида, главное и вторичное зеркала телескопа Т-170М.

При расчёте кинематических параметров для прецизионной оптико-электронной аппаратуры было выявлено существенное превышение требований технического задания для КА «Спектр-УФ» [1]. К примеру, требования по угловым перемещениям телескопа Т-170М составляют  $0,03''$ , а полученные значения достигают  $0,225''$ . В связи с этим было решено заняться разработкой виброзащитного устройства, которое позволило снизить данные значения до  $0,017''$  и выполнить установленные требования технического задания для КА «Спектр-УФ».

При работе двигатель-маховик создаёт момент относительно оси вращения ротора и передаёт его

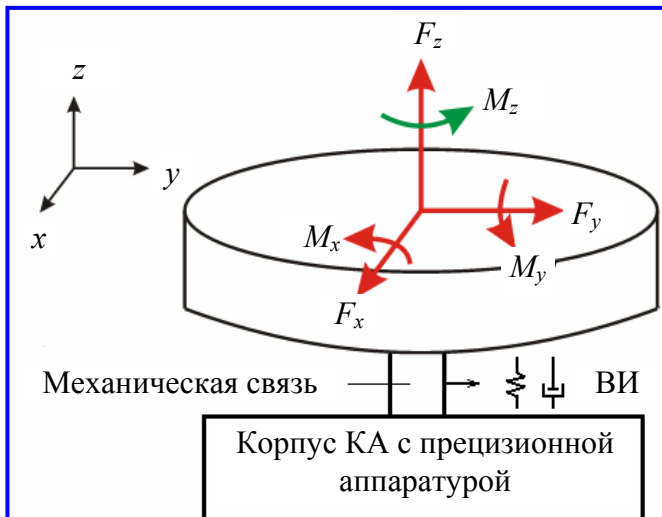


Рис. 1. Воздействия, создаваемые работой ДМ

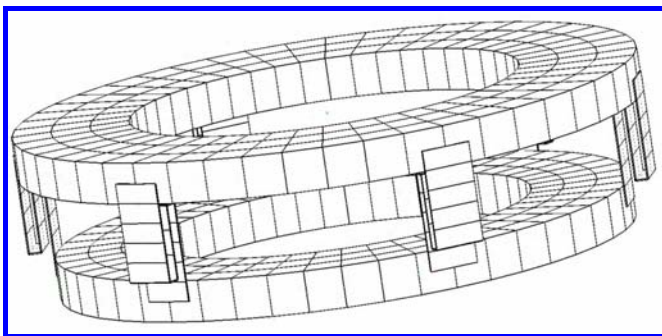


Рис. 2. Физическая модель ВИ

по механической связи на корпус аппарата с прецизионной аппаратурой, что позволяет корректировать положение КА в пространстве (на рис. 1 обозначен как  $M_z$ ). Наряду с этим, вследствие дисбаланса ДМ, возникают дополнительные силы и моменты, оказывающие негативные воздействия на работу прецизионной аппаратуры КА (на рис. 1:  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y$ ).

Разрабатывать виброзащиту под каждое прецизионное устройство нецелесообразно, поэтому было решено устанавливать виброизоляцию непосредственно под ДМ. Среди существующих виброизоляторов (ВИ) большая часть работает только в одном направлении. Те же, которые работают в нескольких направлениях, по ряду своих технологических особенностей не подходят для установки под ДМ.

Введение ВИ с упругими и вязкими элементами способствует ослаблению механической связи ДМ с корпусом КА. Упрощённую математическую модель работы ВИ можно представить в матричном виде:

$$[M]\ddot{\bar{q}} + [K]\dot{\bar{q}} + [C]\bar{q} = \bar{G}, \quad (1)$$

где  $\bar{q}$  – вектор линейных и угловых перемещений;  $\bar{G}$  – вектор сил и моментов, создаваемых работой

ДМ;  $[M], [K], [C]$  – матрицы масс, демпфирования и жёсткости.

Для создания ВИ необходимо сначала разобраться в том, какая частотная область подвержена наибольшим возмущающим факторам. При проведении оценки амплитудно-частотных характеристик, полученных при расчёте кинематических параметров, выяснилось, что наибольшим возмущениям подвержена среднечастотная область от 20 до 90 Гц, поэтому её необходимо изолировать от вибраций. Также очень важно учесть, что управление КА происходит в низкочастотной области от 0 до 5 Гц, в которую нежелательно вносить какие-либо изменения. Исходя из этого, можно сформировать определённый критерий для собственных частот ВИ при разработке физической модели. Для надлежащей виброизоляции необходимо, чтобы первые собственные частоты ВИ располагались как можно ближе друг к другу в частотной области от 5 до 20 Гц.

При разработке физической модели ВИ использовались такие материалы, как сталь 65Г и алюминиевый сплав АМГ-6, которые имеют невысокую стоимость и хорошо поддаются математическому анализу. На рис. 2 представлена схема физической модели ВИ, которая состоит из двух колец креплений и шести упругих стоек. Длина стоек подбиралась, исходя из конструктивных соображений, чтобы при установке ВИ на борт не мешать другим элементам конструкции КА. Ширина и толщина стоек подбирались, исходя из критерия для первых собственных частот ВИ.

Подбор рационального демпфирования в стойках производился, исходя из возможности снижения возмущений на прецизионной аппаратуре, т. е. варьируя демпфированием в материале стоек, определяли наименьшее значение кинематических параметров прецизионной аппаратуры. Наиболее рациональное демпфирование соответствует декременту колебаний в стойках равному 1, что составляет 16% от критического значения.

При включении физической модели ВИ в конечно-элементную (КЭ) модель КА «Спектр-УФ» удаётся снизить на порядок критические микровозмущения, приходящие от ДМ, что позволяет удовлетворить требованиям технического задания, снизив амплитуду углового перемещения телескопа Т-170М с 0,225" до 0,017" (рис. 3).

Переходим к созданию опытного образца ВИ на основе физической модели. Для этого рассмотрим существующие перспективные материалы, обладающие высокими демпфирующими свойствами [2]. К ним можно отнести волоконноусиленные композитные материалы, запоминающие свою форму сплавы,

пьезоэлектrokerамические элементы, сплавы высокого демпфирования (СВД), магнитные жидкости (МЖ) и некоторые другие. Эти материалы при определённых условиях способны поглощать достаточно большое количество энергии. Если рассматривать конструкционные материалы по уровню относительного рассеивания энергии, то их можно разделить на три класса: в первом уровень рассеивания энергии менее 1%, во втором – от 1 до 10 % и в третьем – более 10%.

Волоконноусиленные композитные материалы обладают относительно слабой демпфирующей способностью, а сплавы, запоминая свою форму, наоборот, имеют демпфирование близкое к критическому. Для применения пьезокерамических элементов необходима подача дополнительной энергии, а также ввод в конструкцию специальной системы управления, регулирующей их работу, что проблематично в условиях энергетического и массового ограничений для КА.

Рассмотрим более подробно сплавы с высокой демпфирующей способностью. Самые известные их представители это магнитные сплавы с цирконием, кремнием и марганцем, серый чугун и сплавы с кобальт-никелевой и никелево-титановой основами. Значительное демпфирование в СВД достигается в основном за счёт нестабильности их структур. Здесь имеют место дефектность, неоднородность и наличие легкоподвижных элементов. При прохождении упругих волн дефекты кристаллической решётки в сплаве создают сопротивления, которые способствуют диссипации энергии.

На параметры рассеивания энергии колебаний значительное влияние оказывают условия, при которых получают СВД и последующие режимы их термообработки. Например для сплавов системы цинк – алюминий, в зависимости от химического состава и термообработки, уровень диссипации энергии может изменяться в пределах от 1,3 до 15 %.

СВД с уровнем относительного рассеивания энергии от 20% имеют ряд частных недостатков для использования в космической технике. Сплавы на основе магния не применяются под действием больших нагрузок в силу того, что имеют низкую плотность ( $1800 \div 1900 \text{ кг/м}^3$ ) и невысокий предел текучести ( $50 \div 70 \text{ МПа}$ ). СВД с марганцево-медной основой имеют короткий срок хранения в связи с токсичностью марганца и быстрой потерей демпфирующей способности материала. Сплавы титан – ниобий – тантал, титан – никель – тантал несмотря на то, что имеют



Рис. 3. Угловые перемещения телескопа Т-170М

значения параметров рассеивания энергии колебаний более 30%, дают малый эффект демпфирования в области малых амплитуд деформаций при температуре ниже  $-40^\circ\text{C}$ . Хорошей демпфирующей способностью в области температур от  $-100$  до  $+100^\circ\text{C}$  обладает никель – титан, но при нагреве он быстро окисляется и теряет положительные свойства, а также плохо поддается механической обработке и имеет высокую стоимость.

МЖ [3] представляет собой искусственно синтезируемую дисперсную намагничивающуюся среду. В немагнитную жидкость-носитель вводят некоторое количество ферромагнитных частиц нанометровых размеров, покрытых поверхностно-активным веществом, предотвращающим их слипание между собой. В магнитном поле частицы стремятся выстроиться вдоль вектора напряжённости магнитного поля, обеспечивая определённую вязкость МЖ.

Так как достаточно сложно подобрать такой конструкционный материал, у которого упругие и демпфирующие свойства были бы слабо зависимы от температурного и радиационного воздействий, то в качестве упругого элемента ВИ была выбрана сталь 65Г, соответствующая материалу в физической модели, а в качестве демпфирующего элемента – магнитная жидкость МК-41, которая показывает высокую устойчивость к продолжительным температурным и радиационным воздействиям.

Для этого в конструкцию ВИ были дополнительно введены два цилиндра разных диаметров. На стенку одного из цилиндров устанавливались магниты из сплава неодим – железо – бор таким образом, чтобы зазор между магнитами и стенкой второго цилиндра был приблизительно равен 1 мм. Пространство между двумя цилиндрами заполнялось магнитной жидкостью.

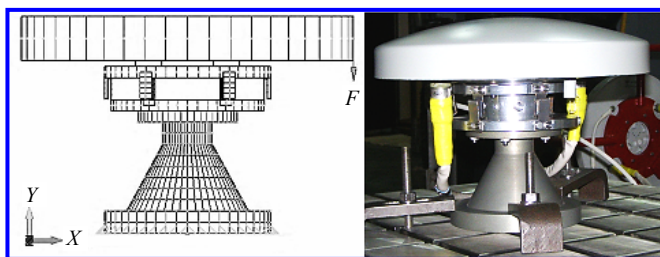


Рис. 4. КЭ модель и опытный образец ВИ с ДМ на кронштейне

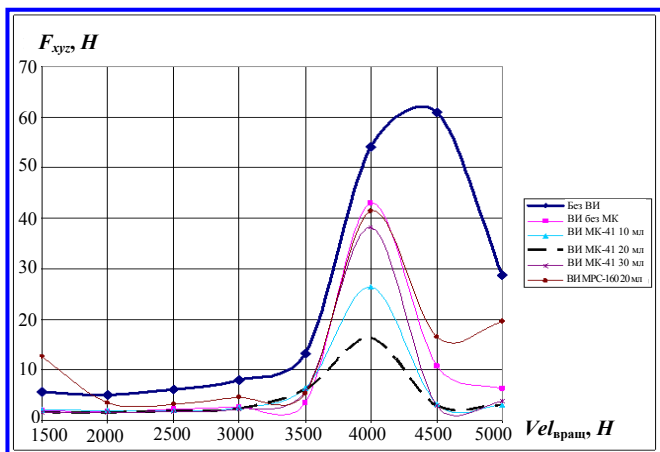


Рис. 5. Зависимость обобщённой силы ( $F_{ху2}$ , Н) от скорости вращения ротора ДМ ( $Vel_{вращ}$ , об/мин)

Для обеспечения рационального демпфирования в конструкции ВИ была создана КЭ модель ВИ с ДМ на кронштейне близкая по динамическим характеристикам к натуральному изделию (рис. 4).

Варьируя параметрами конструкционного демпфирования в стойках КЭ модели, определяли зависимость декремента колебаний ВИ с ДМ от декремента колебаний в материале стоек на первой собственной частоте ВИ. После чего подбирался

необходимый объем магнитной жидкости в опытном образце ВИ до совпадения демпфирующих характеристик с КЭ моделью на первой собственной частоте. Испытания проводились с ДМ без ВИ, с ВИ без МЖ, с ВИ с МЖ МК-41 объемами 10, 20 и 30 мл и с магнитно-реологической суспензией МРС-160 объемом 20 мл.

На силоизмерительном стенде было зафиксировано снижение силомоментных воздействий более чем в 5 раз при использовании опытного образца ВИ с МЖ МК-41 объемом 20 мл по отношению к результатам испытаний без ВИ при различных скоростях вращения ротора ДМ (рис. 5).

Разработана физическая модель и экспериментальный образец магнитожидкостного ВИ, который позволяет более чем в 5 раз уменьшить микровозмущения на борту КА от вращения роторов ДМ. Это способствует улучшению ориентации и стабилизации аппарата в космическом пространстве за счёт обеспечения необходимых рабочих условий для навигационного оборудования, а также увеличению чёткости изображений, получаемых целевой прецизионной аппаратурой КА.

#### Литература

1. Шимкович Д. Г. Расчёт конструкций в MSC.visualNastran for Windows / Д. Г. Шимкович. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 704 с. : ил. – (Проектирование).
2. Фавстов Ю. К. Демпфирующие сплавы. Итоги науки и техники / Ю. К. Фавстов. – М. : ВИНТИ, 1984. – Т. 18. – С. 98 – 154. – (Металловедение и термическая обработка).
3. Такетоми С., Тикадзуки С. Магнитные жидкости. Перевод с японск. / С. Такетоми, С. Тикадзуки. – М. : Мир, 1993. – 272 с.

Поступила в редакцию 24.09.2013

*Владимир Юрьевич Ермаков, канд. техн. наук, зам. начальника отдела.  
Дмитрий Александрович Кузнецов, инженер-конструктор 2-й категории.  
Пётр Павлович Теленёв, начальник отдела.  
Т. (495) 575-54-24.  
Александр Николаевич Сова, д-р техн. наук, профессор.*