

УДК 531.3:534.1:629.7

© 1994 г. Ф. К. КАЛАШНИКОВ, В. Л. ЛЕВТОВ, Л. В. ЛЕСКОВ,
В. В. РОМАНОВ

СИСТЕМА ВИБРОЗАЩИТЫ БОРТОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

В статье анализируются различные способы виброзащиты бортовой технологической аппаратуры и результаты эксперимента «Вибрация», проводившегося на борту орбитальной пилотируемой станции «Мир».

1. Влияние микроускорений на технологические процессы. Анализ результатов технологических экспериментов, проводившихся на борту пилотируемых орбитальных станций (ОС) и автоматических космических аппаратов (КА), показал, что одним из главных факторов, которые не позволяют полностью реализовать потенциальные преимущества производства материалов в условиях невесомости, являются квазипостоянные и переменные микроускорения [1]. В случае производства в космосе полупроводниковых материалов эти преимущества состоят в следующем: более высокая степень структурного совершенства монокристаллов, близкий к стехиометрическому составу, более высокая степень чистоты, более высокая однородность электрофизических параметров. В случае получения сверхчистых биологических препаратов методом электрофореза это более высокая разрешающая способность и соответственно степень очистки, а также повышение производительности процесса. Сходные потенциальные преимущества имеются и в случае материалов других типов.

Реальная динамическая обстановка, существующая на КА и в особенности на борту орбитальных станций, позволяет реализовать эти преимущества лишь в малой степени. При выращивании на ОС «Мир», например, образцов арсенида галлия и кремния в некоторых случаях наблюдался отрыв расплава от растущего кристалла. По оценкам, величина микроускорения составляла $6 \cdot 10^{-2} g_0$ ($g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$). Чтобы обеспечить качественный рост монокристаллов диаметром 20—50 мм, величина микроускорений не должна превышать $10^{-5} g_0$. Это требование относится как к квазипостоянной компоненте, так и к виброускорениям в наиболее опасном частотном диапазоне 0—100 Гц.

Оценка квазипостоянной составляющей микроускорений, обусловленной работой систем управления, дает в случае ОС «Мир» величину 10^{-2} — $10^{-4} g_0$, а при выполнении маневров по коррекции траектории и ориентации станции — до $0,1 g_0$. Измерения вибрационного фона в диапазоне частот 20—50 Гц дают величину микроускорений $3 \cdot 10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-2} g_0$, а в отдельных режимах до $0,1 g_0$. Это означает, что если не принимать специальных мер по виброзащите технологического оборудования, то на борту ОС целесообразно только проведение отдельных технологических экспериментов принципиального характера, а полноразмерная отработка производственных технологических процессов и тем более организация производства полупроводниковых материалов невозможны.

Применительно к задачам космической биотехнологии аналогичные количественные оценки допустимого уровня микроускорений пока не выполнены. Известно, однако, что при использовании, например, процессов электрофореза

выделение джоулева тепла приводит к значительному повышению температуры биопрепаратов [2]. Поскольку критерии Рэлея и Грасгофа, характеризующие интенсивность гравитационно индуцированных конвективных течений в жидкости, пропорциональны третьей степени линейного размера зоны течения, есть все основания ожидать, что и в этом случае микроускорения поведут к негативным эффектам.

Сказанное означает, что одна из центральных задач на пути к реализации потенциальных преимуществ космического производства материалов состоит в разработке специальных систем виброзащиты технологического оборудования на борту КА.

2. Способы виброзащиты. После проведения первых экспериментов, которые позволили продемонстрировать эффективность защиты аппаратуры от динамических нагрузок, возникла необходимость систематического исследования различных вариантов решения этой задачи. Рассмотрим, какие способы можно использовать для этой цели и в чем состоят их сравнительные преимущества и недостатки.

Известны различные устройства (виброизоляторы), устанавливаемые между источником вибрации и изолируемым объектом. Роль виброизолятора могут выполнять различные упругие элементы: пружина, трос, резина и т. д. Если реакцию упругих элементов снять статически, то получим статическую силовую характеристику $F = cx$, в зависимости от вида которой виброизоляторы делятся на линейные и нелинейные.

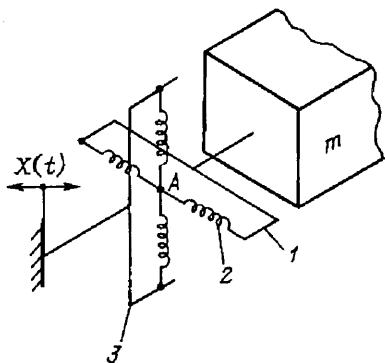
Следует отметить, что при установке упругого элемента с минимальной жесткостью возрастают габаритные размеры виброизолятора, которые ограничены эксплуатационными условиями защищаемого объекта. Отмеченные недостатки наряду с другими, присущими линейным упругим элементам, вынуждают переходить к применению нелинейных систем виброизоляции.

Указанный способ виброзащиты относится к пассивным системам. Для защиты от низкочастотных вибраций и переменных вибрационных спектров создают активные виброзащитные системы. Активной виброзащитной системе свойственно наличие дополнительного источника энергии и управляющих устройств. Основным преимуществом активных виброзащитных систем является высокая несущая способность при малой динамической жесткости. Однако это достигается путем существенного усложнения конструкции виброзащитной системы. Отметим, что заданную несущую способность при малой жесткости можно обеспечить более простым способом — комбинацией упругих элементов, связанных определенным образом. Этот класс виброзащитных систем, так называемые виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью, будет описан ниже.

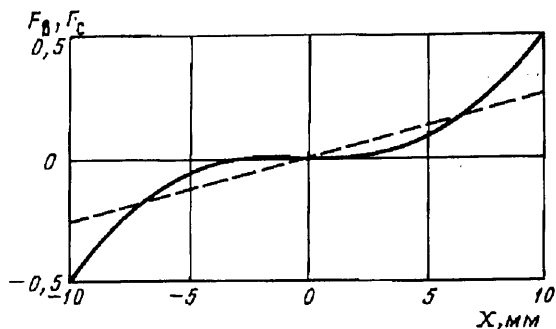
Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью обеспечивают несущую способность при сколь угодно малой жесткости системы. Их несущая способность зависит только от жесткости основной пружины и ее предварительной деформации. При этом конструктивно система проста и имеет существенно меньшие габариты, чем линейные системы. Таким образом принципиально устраняется основной недостаток линейных виброзащитных систем — большие габариты и масса.

3. Пассивные виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью. Одним из способов получения на рабочей характеристике виброзащитной системы участка квазинулевой жесткости является параллельное присоединение к линейному виброзащитному элементу корректора жесткости, т. е. устройства, имеющего в своей силовой характеристике участок «отрицательной жесткости». Им может, например, поджатый с торцов до потери устойчивости синусоидально изогнутый стержень, который при приложении к нему поперечной силы «прощелкивает» в направлении действия силы, т. е. имеет «отрицательную» жесткость.

Фундаментальное свойство систем с квазинулевой жесткостью заключается в том, что они, будучи настроенными на нулевую несущую способность (а это и есть основное условие невесомости), имеют ту же самую силовую характеристику,



Фиг. 1



Фиг. 2

что и в наземных условиях. Разница лишь в том, что теперь рабочий участок квазиулевой жесткости на силовой характеристике либо пересекает ось абсцисс под небольшим углом, либо лежит на ней. Это свидетельствует о возможности высококачественной виброзащиты по одному или нескольким направлениям пространства. Таким образом, если к упругому элементу подсоединить корректор жесткости, то и в невесомости такая система обеспечит высококачественную низкочастотную виброзащиту объекта. Совершенно не важно, как именно будет исполнен линейный элемент (цилиндрические, тарельчатые, спиральные и т. д. пружины), корректор в силу своих фундаментальных свойств скорректирует их жесткость вплоть до нуля и обеспечит низкочастотную защиту в невесомости. Даже если несущая пружина будет нелинейной, коррекция (несколько худшего качества) будет иметь место.

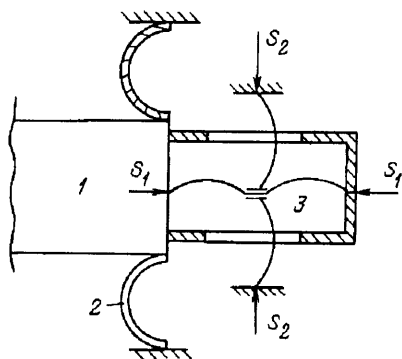
В конструкции виброзащитной подвески, выполненной по схеме «пружинный крест», отсутствуют корректоры как отдельные элементы, а силовая характеристика с участком квазиулевой жесткости достигается подбором соотношения линейных упругих элементов (обычно стандартных цилиндрических пружин). Преимуществом данного способа подвески является простота и технологичность.

На фиг. 1 представлен один из трех амортизаторов данной подвески. Он выполнен в виде двух вилок 1 и 3, скрещенных под углом 90° . Каждую вилку замыкает пара последовательно соединенных пружин 2. Все четыре пружины амортизатора спаяны в общей точке А. Вилка 1 крепится к защищаемому объекту, а вилка 3 — к основанию. Установка объекта на этих амортизаторах обеспечивает ему качественную виброзащиту в невесомости.

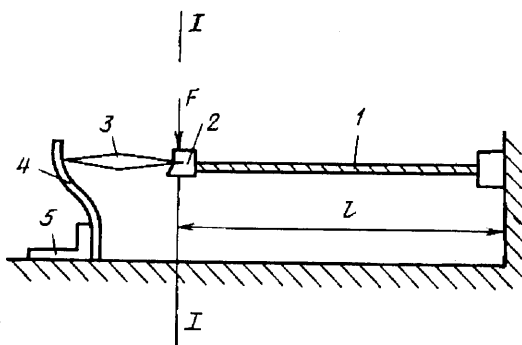
Силовая характеристика системы показана на фиг. 2 для жесткости вертикальных пружин 10 г/см и при максимальном отклонении системы от положения равновесия $X_0 = 10$ мм. Для сравнения штриховой линией проведена линейная характеристика стандартной пружины жесткостью 0,25 г/см, т. е. при использовании в этой схеме пружины в 40 раз большей жесткости получена меньшая жесткость подвески. Это обстоятельство положительно влияет на ослабление высших резонансов пружин путем повышения их частоты. Из графика видно, что подвеска обладает нелинейностью и в своей силовой характеристике имеет участок квазиулевой жесткости. Такую подвеску можно применять как для малых (~ 1 кг), так и для больших масс.

Эта подвеска не требует настройки и юстировки корректора, что является «узким местом» в других схемах того же класса, проста и технологична, не требует токоподвода и системы управления, взрывопожаробезопасна, не выделяет токсичных веществ, не создает электрических и магнитных полей. Эта подвеска позволяет легко решить вопросы токоподвода на установку, путем использования в качестве проводника пружин амортизатора, предварительно их изолировав и покрыв медью.

Существует возможность использования ныне существующих на установке



Фиг. 3



Фиг. 4

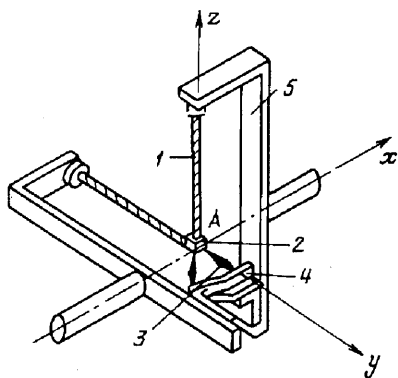
кабелей (возможно, после некоторого их видоизменения) в качестве основных упругих или демпфирующих элементов конструкции без существенного снижения, а может быть, и с улучшением качества виброзащиты.

На фиг. 3 представлен другой тип виброзащитной подвески с упругими элементами в виде тросовых арок 2, с помощью которых защищаемый объект 1 крепится к борту. Для снижения собственной частоты она снабжена пространственным корректором 3, конструктивно выполненным в виде поджатых с торцов до потери устойчивости пластин или стержней. Корректор позволяет снизить жесткость конструкции. В итоге эта конструкция обладает рядом достоинств: малая жесткость, прекрасное демпфирование как основного, так и высших резонансов, применимость как для малых (~ 1 кг), так и для больших масс.

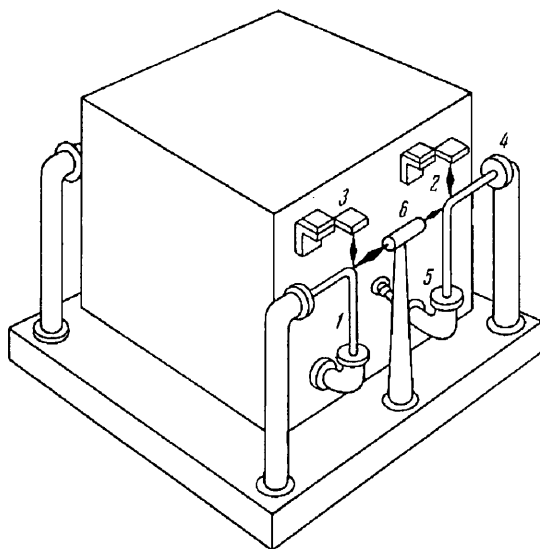
Другим примером нелинейной тросовой подвески является подвеска с игольчатым корректором жесткости. Несущий упругий элемент выполнен в виде консоли из стального жгута или троса 1 (фиг. 4). Подвеска имеет линейную силовую характеристику, а следовательно, обладает всеми достоинствами и недостатками линейных виброзащитных систем. Чтобы снизить собственную частоту, подвеска снабжена корректором жесткости посредством установки в распор между рубиновой призмой 2, жестко закрепленной на свободном конце консоли 1, и рессорой 4 иглы 3. Поджимая рессорой иглу, можно добиться неустойчивого положения системы игла — трос, и система приобретет свойство «прощелкивания», т. е. отрицательную жесткость. Регулировкой поджатия рессоры 5 можно добиться желаемой силовой характеристики с участком квазиулевого жесткости. Восстанавливающая сила показанной на фиг. 4 подвески лежит в плоскости I—I. Соединив между собой два модуля в виде двух скрещенных под углом 90° вилок (как и в схеме «пружинный крест»), получим пространственный амортизатор квазиулевого жесткости, принцип работы которого аналогичен «пружинному кресту» (фиг. 5).

Эта подвеска обладает рядом преимуществ. Во-первых, применение в качестве упругого элемента троса, свитого из тонких стальных проволок, позволило за счет внутреннего трения в этих проволоках практически избавиться от высших резонансов (этому способствует и простая форма упругого элемента — консольная балка), а также ослабить коэффициент усиления на основном резонансе (для тросовых подвесок он составляет 2—3). Во-вторых, есть возможность использовать упругий элемент или жилы троса как проводники, омеднив и изолировав их. И в-третьих, использование игольчатого корректора, упирающегося заточенным концом в рубиновую призму, позволяет значительно снизить силы сухого трения и повысить чувствительность системы, т. е. сделать подвеску эффективной для защиты оборудования малых масс ~ 1 кг, где особенно необходима высокая чувствительность.

Для виброзащиты установок массы ~ 1000 кг, когда требуется подвод жидкости, можно применять аналогичную конструкцию, используя в качестве упругого элемента сам трубопровод 1, согнутый в виде буквы Г (фиг. 6), один конец которого закреплен на фланце основания 4, а другой на фланце



Фиг. 5



Фиг. 6

оборудования 5. В месте изгиба трубы установлены два игольчатых корректора 2, позволяющих снизить жесткость несущих труб. Корректоры поджимаются соответственно вертикальной рессорой 3 и горизонтальной пружиной 6, которая залита демпфирующим материалом для снижения собственных резонансов. Высшие резонансы самого упругого элемента демпфируются жидкостью, находящейся в трубопроводе, а основной резонанс упругого элемента можно демпфировать, разместив на трубе закрепленные хомутами электрические кабели.

4. Магнитные системы виброзащиты. Действие систем виброзащиты этого типа основано на свойстве магнитных жидкостей притягиваться к магниту. Сила притяжения, действующая со стороны магнита на единичный объем магнитной жидкости, равна произведению ее намагниченности на градиент магнитного поля и направлена вдоль оси этого градиента.

На 1 см^3 стандартной магнитной жидкости на основе магнетита с $C = 0,2$ (C — концентрация магнетита в коллоиде) в поле напряженностью 3 кЭ при $\text{grad } H = 1 \text{ кЭ/см}$ действует сила $0,5 \text{ Н}$, что в 50 раз больше веса 2 см^3 жидкости. Поэтому немагнитные тела легко всплывают в магнитной жидкости, помещенной в продольное магнитное поле, с градиентом, направленным вдоль действующего ускорения. Такое поле можно создать с помощью либо постоянных магнитов, либо электромагнитного соленоида.

Если на борту КА имеется прибор массой 100 кг , который необходимо защитить от вибраций с амплитудой порядка $5 \cdot 10^{-4} g_0$, то соответствующее усиление, развиваемое системой демпфирования, должно составлять около $0,5 \text{ Н}$. При $g = 10^{-3}$ и $f = 1-1000 \text{ Гц}$ глубина смещения составляет $0,5-10^{-4} \text{ см}$.

Отсюда следует, что если в области высоких частот магнитные системы виброзащиты могут быть весьма эффективны, то для частот порядка 1 Гц и ниже их использование связано с немалыми трудностями. Скорее всего потребуется использовать не постоянные магниты, а соленоидальные катушки, сквозь обмотки которых для обеспечения магнитных характеристик, указанные выше, придется пропускать ток величиной $300-1000 \text{ А}$.

5. Выбор базового варианта подвески. Подводя итоги сравнительному анализу различных систем виброзащиты, сформулируем основные требования, которым должен удовлетворять базовый вариант подвески, предназначенной для испытаний на ОС «Мир»: 1) собственная частота не более $0,2-0,3 \text{ Гц}$; 2) минимальные габариты и масса; 3) простота и надежность конструкции; 4) действенность по трем осям станции; 5) отсутствие автономной системы управления; 6) возможность

подвода электроэнергии и измерительной проводки к аппаратуре без существенного ухудшения качества виброзащиты; 7) отсутствие потребления энергии или его минимальный уровень; 8) пожаровзрывобезопасность, отсутствие токсичных выделений, а также значительных электрических и магнитных помех.

Требованиям простоты и надежности наиболее соответствуют системы с линейными упругими элементами. Однако при попытке выполнить с их помощью требования по малой собственной частоте существенно возрастают габаритные размеры и, как следствие, масса подвески. Поэтому от применения линейных виброзащитных систем придется отказаться.

Активные виброзащитные системы обладают большой эффективностью, практически нулевой жесткостью, полным отсутствием резонансов, однако требуют большого токопотребления, прецизионной радиотехнической аппаратуры, сложны в настройке, изготовлении, эксплуатации, поэтому ныне действующей орбитальной станции они неприменимы.

Наиболее удовлетворяют всей совокупности требований к базовому варианту подвески нелинейные виброзащитные системы квазиулевого жесткости. Они незначительно проигрывают линейным подвескам в простоте, но значительно выигрывают у них по удовлетворению требования малой собственной частоты при незначительных габаритах и массе. Кроме того, они обладают устойчивостью к основному резонансу и за счет применения значительно более жестких основных упругих элементов обладают более высокой механической прочностью. Эти системы не требуют токопотребления и управляющей аппаратуры.

Таким образом, для низкочастотной пространственной виброзащиты технологической аппаратуры, работающей на борту орбитальной станции «Мир», предлагается нелинейная виброзащитная система квазиулевого жесткости.

Из приведенных в настоящей статье конструктивных схем нелинейных виброзащитных подвесок с квазиулевого жесткостью наиболее полно удовлетворяют всей совокупности требований к базовому варианту описанная выше виброзащитная система «пружинный крест».

Уместно также отметить, что известные в настоящее время разработки за рубежом или находятся на уровне теоретического анализа, или воплощены в лабораторных макетах и ни одна из этих разработок пока не доведена до стадии натуральных испытаний. Кроме того, судя по имеющимся публикациям, они будут очень дорогими по причине того, что принципы, заложенные в их конструкцию, требуют использования высокоточной технологии и микропроцессорной техники.

6. Результаты эксперимента «Вибрация». Один из экспериментов проводился 06.03.91 г. (виток 910) на борту орбитальной станции «Мир» с целью измерения основных характеристик виброзащитной подвески модуля «Вибрация», которая являлась массогабаритной моделью подвески, планируемой к использованию для крепления технологических установок на борту КА различных классов, и была выполнена по схеме «пружинный крест» (масса защищаемого объекта 1,5 кг).

Модуль «Вибрация» крепился на потолке над центральным постом станции эластичными ремнями внатяг. На виброзащищенную платформу модуля устанавливались датчики прибора «измеритель виброускорений ИВ-1». Оператор с помощью механических арретиров осуществлял либо жесткую механическую связь платформы с бортом, либо «включал» виброизоляторы и платформа воспринимала виброфон станции, редуцированный последними.

Требовалось зарегистрировать степени ослабления виброускорений на платформе на различных частотах, а также время возврата платформы в положение равновесия после привнесенного оператором вручную кратковременного возмущения. В таблице приведены результаты измерения виброускорений для случая жесткого соединения платформы и основания и для случая, когда между защищаемым объектом и основанием располагается виброзащитная подвеска. Масштаб виброускорений, приведенных в таблице, составляет $10^{-6} g_0$ (где $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли).

Как видно из таблицы, до включения виброизоляции вибрационный фон на

Вибро- изоляция	Вид вибра- ций	Ускорения вдоль осей станции ($10^{-6} g_0$)					
		X		Y		Z	
		ускорение	частота, Гц	ускорение	частота, Гц	ускорение	частота, Гц

Диапазон частот $1 < f \leq 40$ Гц

Нет	Фон	~ 20	—	~ 20	—	~ 50	—
	Пики	80	11	80	4	—	—
Есть	Фон	~ 1	—	~ 1	—	~ 1	—
	Пики	—	—	—	—	—	—

Диапазон частот $40 < f \leq 67$ Гц

Нет	Фон	~ 40	—	~ 20	—	~ 50	—
	Пики	260	43	180	43	250	43
Есть	Фон	~ 1	—	~ 1	—	~ 1	—
	Пики	160	49	110	58	120	53

зищищаемом объекте составлял $(2-5) \cdot 10^{-5} g_0$, причем в диапазоне частот от 40 до 60 Гц имелись пики до $2,6 \cdot 10^{-4} g_0$.

Результаты измерения виброускорений после применения виброизоляторов показывают, что удалось существенно снизить уровень вибраций по всем осям для частот свыше 1 Гц, в том числе «срезать все пики, имевшие место в исходном спектре, и понизить фоновый уровень в 20—50 раз, т. е. до величины $10^{-6} g_0$.

Виброизоляторы модуля «Вибрация» имеют собственную частоту на уровне 0,5 Гц, следовательно, должны обеспечить снижение уровня виброускорений на порядок, начиная с 1,5 Гц, что и подтвердил эксперимент.

Разработки авторов позволяют создать виброизоляторы с собственными частотами 0,05—0,08 Гц и соответственно нижней границей эффективной работы на уровне 0,2—0,3 Гц, а верхняя граница эффективной работы таких виброизоляторов теоретически отсутствует. Разумеется, на практике встречаются случаи, когда в зарезонансной области появляются неосновные (дополнительные) резонансы, обусловленные собственными частотами конструктивных элементов подвески. Но ожидаемые частоты дополнительных резонансов достаточно велики и борьба с этими явлениями не представляет особых трудностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manufacturing in space: processing problems and advances/Ed. Avduevsky V. S. M.: Mir, 1985. 247 с.
2. Гришин С. Д., Лесков Л. В. Индустриализация космоса: проблемы и перспективы. М.: Наука, 1987. 352 с.

Москва

Поступила в редакцию
25.1.1994