

УДК 629.78

МЕЖПЛАНЕТНЫЕ СТАНЦИИ С ПРЕЦИЗИОННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ОРИЕНТАЦИИ: ТРЕБОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КОМПЛЕКСНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ

© 2019 г. В. В. Ефанов^{а, *}, П. П. Телепнев^а, Д. А. Кузнецов^{а, **}

^аНПО им. С.А. Лавочкина, Москва, Россия

^{*}*e-mail:* vladimir_efanov@laspace.ru

^{**}*e-mail:* kuznecov@laspace.ru

Поступила в редакцию 26.03.2019 г.

После доработки 26.03.2019 г.

Принята к публикации 26.03.2019 г.

В статье рассматривается вопрос разработки комплексных программ виброзащиты космических конструкций для последующего внедрения в производственные процессы предприятий ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: вибровозмущения, прецизионная аппаратура, электромаховичные исполнительные органы, остронаправленная антенна

DOI: 10.1134/S0320930X19050037

Внедрение новых разработок, а также методов решения определенных технических задач и проблем является неотъемлемой частью реализации научно-конструкторских идей, что способствует улучшению различного рода характеристик создаваемых изделий. Одним из ярких примеров этого является разработка методов виброзащиты для межпланетных станций, осуществляющих дистанционную съемку поверхностей планет и их спутников. Например, на новом аппарате Луна-Ресурс-1 (орбитальный аппарат) планируется использовать высокоточные стереокамеры, для которых необходимо обеспечить прецизионную угловую стабилизацию КА в пространстве. Со временем требования к научной аппаратуре таких космических аппаратов (КА) возрастают, появляется необходимость в снижении вибрационного фона на борту для более точной ориентации и стабилизации объектов в космическом пространстве. Предлагаемые разработчиками методы и средства виброзащиты требуют последовательного внедрения их в процессы создания космической техники. Комплексная программа виброзащиты является своего рода “дорожной картой” по систематическому внедрению новых методов и средств виброзащиты в производственные процессы на предприятиях космической отрасли. Для составления комплексной программы требуется достаточно широкий кругозор в области решаемых проблем и задач, начиная с теорети-

ческих основ проектирования и заканчивая прикладными техническими особенностями создания межпланетных станций.

Комплексная программа виброзащиты космических конструкций в качестве фундаментальной основы должна иметь определенный алгоритм по реализации. Предлагается использовать следующую блок-схему, представленную на рис. 1.

Исходя из целей и задач для КА, формируются требования в первую очередь для целевой прецизионной аппаратуры. Исходя из требований, собственно, разрабатывается и изготавливается целевая прецизионная аппаратура. На практике целевая прецизионная аппаратура зачастую является уникальной и существует только в одном экземпляре, что нередко приводит к отсутствию исследований в области ее работоспособности в условиях того или иного виброн нагружения (Геча и др., 2015). Другими словами, изготовитель целевой аппаратуры стремится в первую очередь удовлетворить требованиям технического задания, оснастив КА высокоточными приборами с заданными параметрами, но вопрос, в каких условиях будут эксплуатироваться данные приборы, в плане вибрационной обстановки на борту, прорабатывается либо в последнюю очередь, либо вообще не рассматривается в связи с ограниченными сроками поставки прецизионной аппаратуры. Как следствие, часто производители целевой прецизионной аппаратуры не могут точно сказать,



Рис. 1. Блок-схема обеспечения виброзащиты космических конструкций.

при каких уровнях вибраций изготовленная аппаратура начнет давать сбои в виде смаза изображений, электрических помех и других негативных эффектов. Грубые оценки в виде расчетов, которые исходят из величины пикселей матриц, и других математических расчетов могут дать ответ, при каких условиях оборудование точно начнет давать сбои, но определить пороговые уровни критичных вибровозмущений возможно только с помощью глубоких экспериментальных исследований.

Помимо требований к прецизионным устройствам необходимо также предъявлять требования и к источникам вибровозмущений на борту КА, а также требования к виброустойчивости прецизионного оборудования. Каждый специалист, занимающийся разработкой астрофизических КА с целевой прецизионной аппаратурой, должен знать о существовании связей между источниками вибровозмущений и прецизионной аппаратурой и учитывать эти связи на всех этапах проектирования и конструирования, начиная с момента составления технического задания и разработки эскизного проекта.

На рис. 2 представлены основные источники вибровозмущений для новых межпланетных станций с прецизионной аппаратурой в процессе штатной эксплуатации: электромаховичные исполнительные органы (ЭМИО), привода солнечных батарей (СБ) и остроуправленных антенн (ОНА) (Ефанов и др., 2017), низкочастотные осцилляторы и другие источники.

Стоит отметить, что вибрационные воздействия, исходящие от источников, проходят сначала по корпусу КА, имеющему свои собственные динамические характеристики, и только после этого попадают в несколько измененном виде на прецизионную аппаратуру, что может привести к ее ненадлежащей работе. Помимо смаза изображений возможно возникновение “микрофонного эффекта”, когда в процессе вибрации в электрических цепях возникают помехи, что также снижает качественные характеристики прецизионной аппаратуры КА.

Варьируя параметрами источников вибровозмущений, можно значительно изменять условия для эксплуатации прецизионной аппаратуры. Согласно представленной блок-схеме в первую очередь предлагается использовать имен-

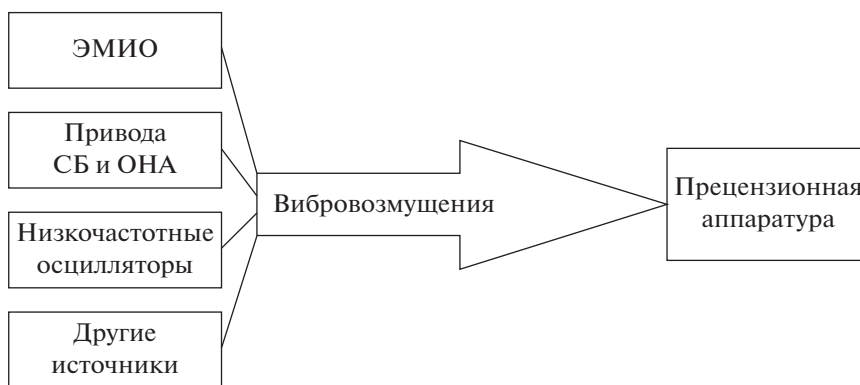


Рис. 2. Основные источники вибровозмущений.

но корреляционные методы обеспечения виброзащиты в виде изменения алгоритмов и режимов работы как для источников вибровозмущений, так и самой прецизионной аппаратуры, а также внесение конструктивных доработок с целью изменения собственных динамических характеристик элементов КА.

Изменение алгоритмов и режимов работы оборудования позволяет устранить нежелательные вибрационные явления даже в процессе штатной эксплуатации изделий в космическом пространстве, когда возникают сообщения о неисправности. Например, при появлении смаза изображений можно дать рекомендацию по ограничению скоростей вращения электромаховичных исполнительных органов (Кузнецов и др., 2016) или смене режима работы привода остронаправленной антенны (Telepnev и др., 2015).

Частным случаем данного метода является использование специальных алгоритмов для обработки нечетких изображений, полученных с помощью прецизионного оборудования. Методы изменения алгоритмов и режимов работы оборудования стоит рассматривать в первую очередь, так как они являются самыми оперативными, требует низких ресурсных затрат и дающими возможность решать возникающие проблемы, не изменяя конструктивно-компоновочной схемы КА.

Во вторую очередь, следует провести оценку возможности конструктивных доработок упругих элементов КА. Часто критические вибровозмущения возникают из-за резонансных эффектов, вследствие чего, стоит немного изменить частотные или диссипативные характеристики упругих элементов конструкции КА и возмущения перестают достигать критических значений. Данные методы эффективны на ранних этапах проектирования конструкции КА или для решения локальных ситуаций, когда требуется развести частотные составляющие, чтобы не возникало резо-

нансных возмущений, а также когда необходимо сократить время затухания того или иного переходного процесса (Ефанов и др., 2018).

Возникают ситуации, когда корреляционные методы виброзащиты не могут в достаточной мере обеспечить выполнение КА поставленной миссии. В данном случае прецизионная аппаратура оказывается настолько чувствительной, что необходимо уже кардинальным образом изменять вибрационную обстановку на борту КА. Часто требуется снижать уровни бортовых возмущений на целом диапазоне частот или повышать декременты колебаний для отдельных элементов конструкции КА. Для решения таких ситуаций используются средства виброзащиты в виде виброизоляторов, виброгасителей или комбинированных средств виброзащиты (Ермаков и др., 2013). Средства виброзащиты можно устанавливать как под источники вибровозмущений, так и непосредственно под прецизионные устройства (Ефанов, Кузнецов, 2017). При колебательном процессе в основном учитываются две главные составляющие – частота и декремент колебаний.

Виброизоляция, как средство виброзащиты, основана на ослаблении голономных и неголономных связей между источником вибраций и объектом виброзащиты путем изменения собственной частоты колебаний связующей конструкции. Как правило, частота подвеса в связующей конструкции должна быть существенно ниже частоты источника вибровозмущений, например, источник выдает возмущения с частотой колебаний 30 Гц, а виброизолятор имеет собственную частоту колебаний в 10 Гц, что позволяет эффективно снижать вибрации, приходящие к изолируемому объекту (рис. 3). Конечно же, в виброизоляции также большую роль играет демпфирование, и в реальных системах оно всегда присутствует, но основной принцип работы заключается



Рис. 3. Схема работы виброизолятора.

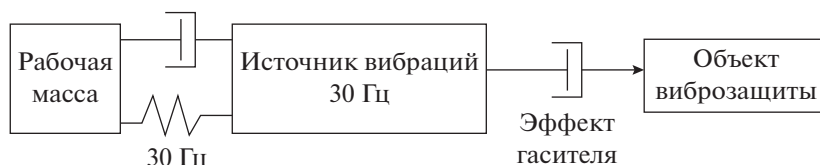


Рис. 4. Схема работы гасителя колебаний.

именно в ослаблении упругих связей между источником и объектом изоляции (Ефанов и др., 2014).

Принцип действия гасителя колебаний как средства виброзащиты основан на повышении диссипативных характеристик связей между источником вибраций и объектом виброзащиты, что позволяет либо снизить уровни возмущений на определенной резонансной частоте, либо сократить время колебательных процессов. В упрощенном варианте (рис. 4) принцип работы гасителя можно рассматривать как работу демпфирующего устройства (эффект гасителя), но на деле процесс гашения колебаний часто реализуется через рассеивание энергии путем колебаний присоединенной рабочей массы в упруго-вязкой среде с частотой, настроенной на частоту источника вибраций.

Для снижения вибровозмущений от ЭМИО целесообразно использовать виброизоляцию, также можно ограничивать скорости работы ЭМИО, но данный метод не является универсальным и не

дает возможности использовать весь конструктивный потенциал устройств. Актуально применять для ЭМИО комбинированные средства виброзащиты (КСВЗ), включающие в свой состав элементы виброизоляции и гасителей колебаний (Кузнецов, 2015).

Для приводов СБ и ОНА дает положительный эффект правильный выбор алгоритмов управления (Телепнев и др., 2014), но в некоторых случаях возможно использование гасителей колебаний, если необходимо при переориентации СБ и ОНА быстро остановить колебательный процесс.

Что же касается осцилляторов, то здесь чаще всего может возникать необходимость быстрой остановки колебаний осцилляторов после поворота КА в пространстве, что реализуется при помощи гасителей колебаний.

Прецизионную аппаратуру при необходимости можно также оснастить виброизоляцией либо КСВЗ. На рис. 5 представлены основные места

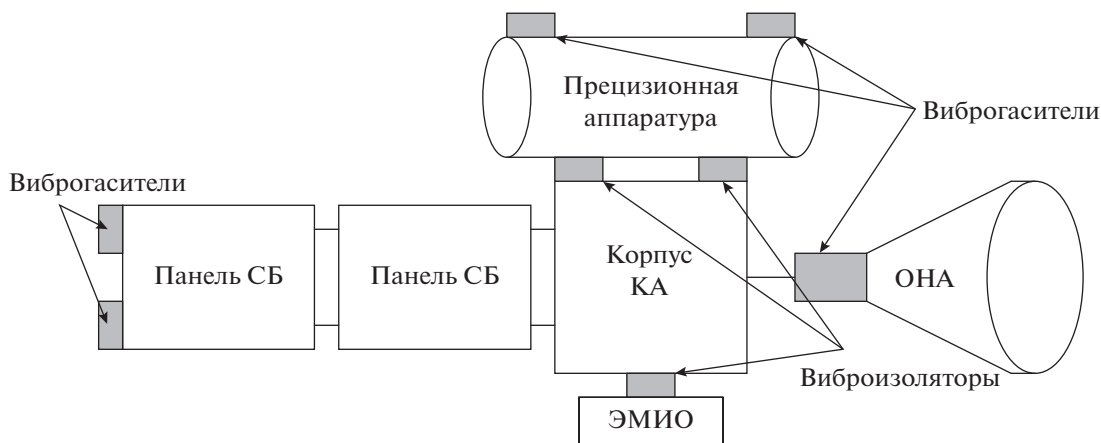


Рис. 5. Места установки средств виброзащиты на КА.

Таблица 1. Примерная комплексная программа виброзащиты космических конструкций

Этапы разработки	Виды работ
Формирование технического задания. Определение требований к исполнительным органам (Герасимчук и др., 2018), прецизионной аппаратуре и осцилляторам КА	Моделирование и расчеты переходных динамических процессов
Проведение исследований характеристик исполнительных органов, регистрирующей прецизионной аппаратуры с учетом осцилляторов совместно с разработчиками данных конструкций и устройств	Лабораторные исследования исполнительных органов, прецизионной аппаратуры, осцилляторов
Разработка, исследование и внедрение методов и средств виброзащиты	Полный комплекс работ по разработке, внедрению и отработке новых методов и средств виброзащиты
Проработка вопросов обеспечения точности КА при использовании предлагаемых методов виброзащиты со смежными подразделениями и организациями	Теоретические и практические исследования влияния методов и средств виброзащиты на функциональность КА
Курирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по созданию новых модификаций исполнительных органов и средств виброзащиты космических конструкций	Постановка задач, внесение предложений, контроль за исполнением и защита НИОКР

установки средств виброзащиты на прецизионные межпланетные станции.

Имея достаточно полное представление о решении проблемы виброзащиты КА (Телепнев, Кузнецов, 2019), можно переходить к составлению комплексной программы виброзащиты космических конструкций с последующим внедрением в производственные процессы конкретного предприятия ракетно-космической отрасли, учитывая специфику его деятельности.

Для примера приведем некоторые пункты, которые может содержать комплексная программа виброзащиты космических конструкций (табл. 1).

Стоит отметить, что именно комплексный подход позволяет изначально снять ряд вопросов и противоречий при проектировании астрофизических КА и дает возможность разработчикам космических систем и комплексов двигаться согласованно в одном направлении, что существенно повышает качество и точностные характеристики прецизионных изделий, а также экономит общее время на их создание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимчук В.В., Ефанов В.В., Ермаков В.Ю., Кузнецов Д.А., Лоханов И.В., Телепнев П.П., Цыплаков А.Е. Решение задачи обеспечения допустимых уровней вибронегативности исполнительных органов системы ориентации космического аппарата // Полет. Общероссийский научно-технический журн. 2018. № 8. С. 33–38.
- Геча В.Я., Ефанов В.В., Клишев О.П., Кузнецов Д.А., Москатиньев И.В., Телепнев П.П. Влияние вибрации на целевую прецизионную аппаратуру космических аппаратов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2015. № 3. С. 20–24.
- Ермаков В.Ю., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П., Сова А.Н. Предложение по решению проблемы виброзащиты прецизионной оптико-электронной аппаратуры космического аппарата “Спектр-УФ” // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2013. Т. 135. № 4. С. 17–20.
- Ефанов В.В., Герасимчук В.В., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П. К вопросу о повышении диссипативных характеристик конструкции космического аппарата // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3(102). С. 103–110.

- Ефанов В.В., Герасимчук В.В., Кузнецов Д.А., Митькин А.С., Телепнев П.П., Цыплаков А.Е. Моделирование механических возмущений привода остро-направленной антенны межпланетных станций // Полет. Общероссийский научно-технический журн. 2017. № 8. С. 19–25.
- Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Цыплаков А.Е., Телепнев П.П., Ермаков В.Ю., Клишев О.П. Новый способ снижения вибровозмущений целевой аппаратуры на борту прецизионных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 6(79). С. 80–85.
- Ефанов В.В., Кузнецов Д.А. Методический аппарат обеспечения виброзащиты космических конструкций // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований (выпуск 2) / Сост. Ефанов В.В. Химки: Изд. АО “НПО Лавочкина”, 2017. С. 279–284.
- Кузнецов Д.А. К вопросу лабораторных исследований по созданию системы виброизоляции бортовых гироскопических устройств // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / Сост. Ефанов В.В. Химки: Изд. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”, 2015. С. 200–203.
- Кузнецов Д.А., Телепнев П.П., Ермаков В.Ю. Подход к решению вопроса по прогнозу уровней возмущений для электромаховичных исполнительных органов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3(33). С. 116–119.
- Телепнев П.П., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Ермаков В.Ю. Анализ режимов работы космического аппарата “Спектр-Р” для различных алгоритмов управления приводом остронаправленной антенны // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 100–103.
- Телепнев П.П., Кузнецов Д.А. Основы проектирования виброзащиты космических аппаратов: учебное пособие / Ред. Ефанов В.В. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. Т. 102. № 4.
- Telepnev P.P., Efanov V.V., Kuznetsov D.A., Ermakov V.Y. Analysis of Spektr-R spacecraft operating modes for various algorithms of high gain antenna drive control // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. № 7. P. 610–613.