

A photograph of a space station module, likely the International Space Station, in orbit above Earth. The module is covered in silver thermal insulation and has large solar panel arrays extending from it. Two astronauts in white space suits are visible working on the module. The background shows the blue and white clouds of Earth against the blackness of space.

SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens Digital Industries Software

Механические испытания КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Использование решений Simcenter для
безопасных и эффективных квалификационных
испытаний космических систем

Краткий обзор

В данной статье описываются различные технологии космических испытаний: от механических квалификационных испытаний до модального анализа и микровибрационного тестирования. В ней также рассматривается использование комплексного цифрового двойника для снижения рисков и оптимизации испытаний. Simcenter™ — это решение для безопасных и эффективных квалификационных испытаний космических систем. Simcenter является частью Xcelerator, комплексного и интегрированного портфеля программного обеспечения и сервисов Siemens Digital Industries Software.

Содержание

Краткий обзор	1
Введение	3
Космическая отрасль в переходный период	4
Для чего нужны вибрационные и акустические испытания в космической отрасли?	5
Вибрационные испытания	7
Задачи	7
Вибрационные испытания с полной уверенностью	7
Самопроверка для обеспечения согласованности и полноты установки	8
Ограничение по отклику для защиты космических аппаратов в режиме реального времени.	8
Многоканальные динамические измерения без риска для системы управления	9
Мгновенный доступ к результатам испытаний для всех отделов	9
Анализ связанных нагрузок.....	9
Подход на основе виртуального вибрационного стенда	10
Акустические испытания	11
Акустическое возбуждение реверберационного поля:	
традиционный метод	11
Акустический шум в прямом поле: альтернативный метод	13
Виртуальные акустические испытания в прямом поле:	
как цифровой двойник помогает снизить риски при испытаниях	14
Ударные испытания	15
Статистический анализ энергопотребления: прогнозирование ударного отклика полезной нагрузки	16
Модальный анализ	17
Оперативный модальный анализ: получение дополнительной технической информации	18
Микровибрации	19
Нелинейность.....	19
Заключение	21
Ссылки	21

Введение

Мы живем в эпоху беспрецедентной трансформации космической отрасли. Из соревнования между странами (и их космическими агентствами) космическая гонка превращается в соревнование между компаниями. Их бизнес процветает. Будь то кубсаты, размер граней которых составляет всего несколько сантиметров, или спутники для научных миссий длиной в несколько метров, производители конкурируют в области группировки спутников телекоммуникационного назначения, доставки грузов и пилотируемых космических полетов.

Будущие космические полеты ставят перед конструкторами множество задач, которые бросят вызов нынешним процессам разработки. Использование традиционных процессов разработки и проектирования создает значительные риски. Для достижения успеха организации, которые хотят работать в космической сфере, должны быть готовы поставить под сомнение эффективность текущих процессов и инструментов разработки.

В этой статье рассматриваются квалификационные и приемочные испытания, необходимые для любого космического оборудования: от отдельных компонентов до полноценных космических летательных аппаратов в сборе. Такое оборудование должно быть способно выдерживать максимальные расчетные параметры наземных и летных испытаний ракеты-носителя, что подтверждается в ходе механических квалификационных испытаний в соответствии с требованиями для ракеты-носителя.

Для достижения успеха организации, которые хотят работать в космической сфере, должны быть готовы поставить под сомнение эффективность текущих процессов и инструментов разработки.

Изменения в космической отрасли

Появление инновационных технологических и бизнес-моделей вызвало конкуренцию компаний за упрощение и снижение стоимости космических полетов.

Новые игроки открыли новые перспективы для космической отрасли и способствуют ее развитию. Они удешевили запуск ракет и возродили идеи пилотируемых полетов в космос (возвращение на Луну и экспедиции на Марс). Вскоре реальностью может стать даже космический туризм с коротким пребыванием на орбите, будто в гостиничном номере с прекрасным видом. Кроме того, инновационные компании поспособствовали росту наземных прикладных программ, требующих орбитальной системы для расширения возможностей автономного управления.

Будущие космические полеты ставят перед конструкторами множество задач, которые бросают вызов нынешним процессам разработки. Использование традиционных процессов разработки и проектирования создает значительные риски. Сообщество инженеров, работающих в космической отрасли, очень консервативно, когда речь идет о новых методах испытаний, технологиях и продуктах. Например, действующие стандарты испытаний не менялись уже 40 лет!

Для достижения успеха организации, которые хотят работать в космической сфере, должны быть готовы поставить под сомнение эффективность существующих процессов и инструментов разработки. Подход к разработке космического оборудования и верификации конструкции посредством квалификационных испытаний на основе цифрового двойника помогает предприятиям принимать решения на основании точной информации. Он позволяет исследовать физическое поведение космического оборудования систем с помощью автоматизированного инженерного анализа.



Для чего нужны вибрационные и акустические испытания в космической отрасли?

Перед запуском космические системы должны пройти испытания, подтверждающие, что они выдерживают максимальное наземное и летное воздействие различных факторов для проверки работоспособности космических аппаратов во время запуска и на орбите. Фактический запуск предполагает нахождение в чрезвычайно сложных условиях, когда пассажир/спутник подвергается воздействию экстремального уровня вибрации. После старта и до вывода на орбиту наблюдается также ряд мощных воздействий (отделение ступеней, срабатывание пироболтов и в конечном счете выход на орбиту), которые вызывают существенное напряжение конструкции спутника. Условия на орбите значительно стабильнее.

Чтобы убедиться в способности спутника выдержать запуск, органы, разрешающие запуск, устанавливают ряд требований, которые должны быть выполнены и подтверждены в ходе механических испытаний. На рис. 1 показаны профиль полета ракеты-носителя и примеры требований к испытаниям ракеты-носителя «Союз» (руководство пользователя корабля «Союз»).

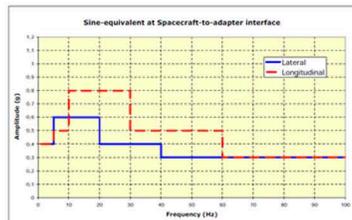
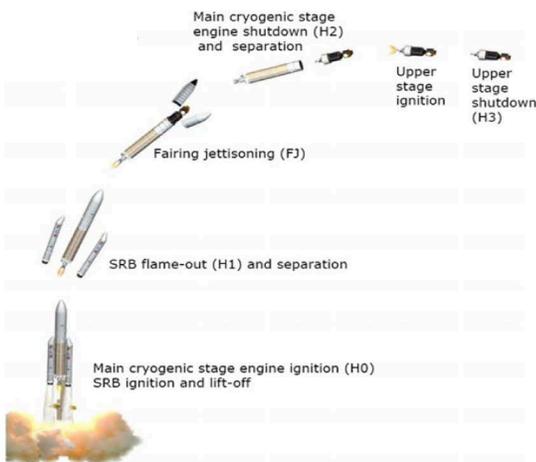


Figure 3.2.4a - Sine-equivalent vibrations at spacecraft-to-adapter interface

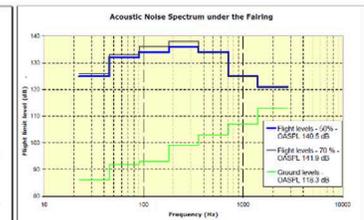


Figure 3.2.6.2a - Acoustic noise spectrum under the Fairing

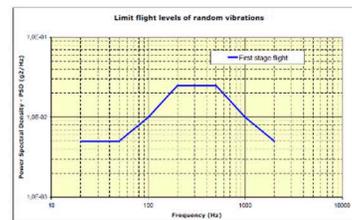


Figure 3.2.5a - Random vibration at spacecraft base (first stage flight)

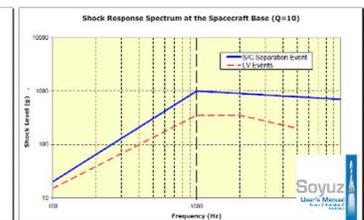


Figure 3.2.7a - Envelope acceleration shock response spectrum (SRS) at the spacecraft base

Рис. 1. Слева: профиль полета ракеты-носителя. Справа: требования к испытаниям ракеты-носителя «Союз».

Механические испытания космического оборудования охватывают широкий диапазон частот и включают множество испытаний, например, виброиспытание с синусоидальным возбуждением, виброиспытание на воздействие ШСВ, акустические и ударные испытания, кроме того, существуют различные виды инфраструктуры для испытаний (рис. 2). В частности, применяются вибрационные стенды, столы скольжения, реверберационные камеры, акустические системы и пиродарные испытательные стенды, но это далеко не весь список. Характер этих испытаний различается довольно сильно. С одной стороны, это представляет сложность для команды, проводящей испытания, так как она, как правило, должна решать одновременно как можно больше задач. С другой стороны, перед организациями, проводящими тестирования, стоит задача по контролю инвестиций в оборудование и программное обеспечение, так как каждая установка имеет собственный набор требований к сбору и анализу данных.

Помимо механических квалификационных испытаний, перед космическими полетами также проводят модальный анализ и микровибрационные испытания. Модальный анализ позволяет проводить валидацию КЭ-моделей спутников или пусковых установок. Микровибрации (вызванные маховиками и пр.) могут влиять на работу чрезвычайно чувствительного оборудования, такого как оптические или лазерные приборы. На рисунке 3 показаны различные испытания, применяемые при разработке космического оборудования. Более подробно они рассматриваются в следующих главах.

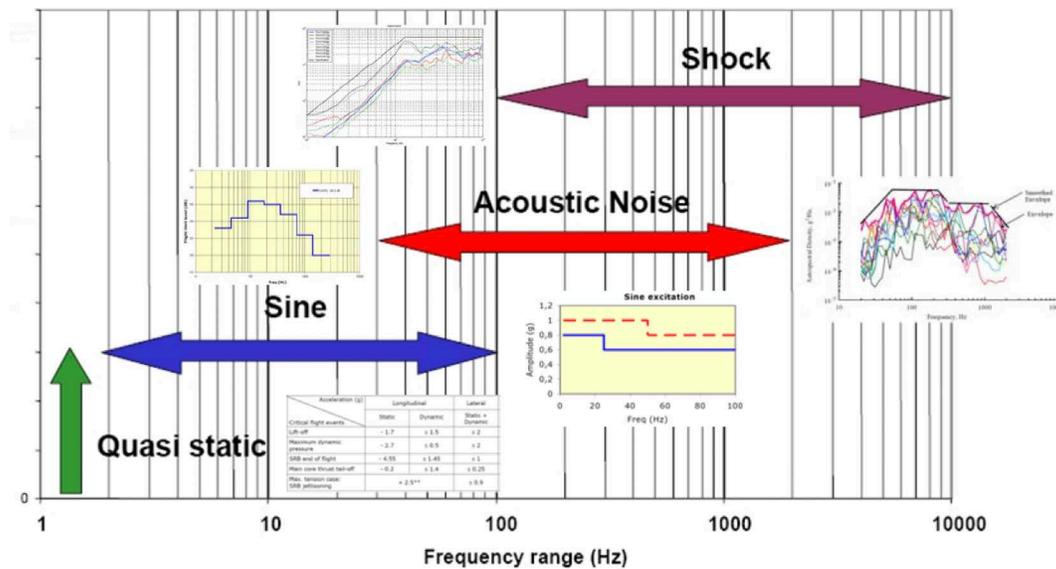


Рис. 2. Условия воздействия вибраций и соответствующие диапазоны частот.



Рис. 3. Валидация космического оборудования включает различные виды испытаний: механические квалификационные испытания, модальный анализ и микровибрационные испытания.

Вибрационные испытания

Система измерений для механических квалификационных испытаний должна отвечать самым строгим и в то же время гибким требованиям, предъявляемым к испытательным лабораториям в космической отрасли. С одной стороны, в ходе вибрационных и акустических испытаний управления должна свести к минимуму риск возникновения инцидентов. С другой стороны, для возврата инвестиций лабораториям необходимо максимально активно использовать оборудование для измерения сигналов от различных датчиков и параллельного сбора данных в небольших системах, но при этом быть готовыми решать сложные задачи, для которых необходимо получать данные по сотням каналов одновременно.

Задачи

Механические квалификационные испытания проводятся на дорогостоящих макетах/прототипах или на реальных космических аппаратах, что создает значительный риск повреждения аппаратуры. Целостность немногочисленных, дорогостоящих конструкторских моделей для квалификационных испытаний или моделей для реальных полетов никогда не должна нарушаться. Любое повреждение во время испытаний может привести к невозможности запуска в стартовое окно, что в итоге станет причиной огромных расходов и штрафов.

Кроме того, наблюдается тенденция к созданию все более крупных и сложных космических аппаратов, требующих систем с большим числом каналов для дополнительной защиты чувствительных приборов и лучшего понимания динамики корабля. Испытания на столь больших установках все равно должны проводиться с максимальным контролем безопасности без ущерба для системы управления.

Для безопасных и эффективных квалификационных испытаний также важно уверенно следить за ходом тестирования

для обеспечения точности управления, дистанционного завершения испытаний и быстрого предоставления результатов квалификационных испытаний команде расчетчиков для валидации и обработки данных.

В следующем разделе будут рассмотрены технологии и инструменты для выполнения этих задач и создания эффективного, безопасного, гибкого передового решения для квалификационных испытаний в аэрокосмической отрасли.

Надежные вибрационные испытания

Вибрационные испытания спутника (синусоидальные и случайные вибрации) состоят в воспроизведении уровней вибрации, описанных в руководстве по эксплуатации ракеты-носителя, на вибрационной установке. Система управления контролирует эту установку, учитывая уровни в точках сопряжения (каналы управления) и замыкая контур в режиме реального времени. Одновременно уровни отклика (каналы с ограничением по отклику) отслеживаются и сопоставляются с промежуточными уровнями, превышение которых не допускается. Если этот отклик превышает предписанный уровень, то для защиты приборов система управления снижает уровень возбуждения. На рис. 4 показана типичная установка для испытаний на контроль вибрации.

Современные системы управления включают широкий диапазон параметров безопасности для защиты образцов. К ним относятся такие функции, как самопроверка, ограничение по отклику и предельное значение прерывания. Далее рассматриваются основные меры по обеспечению безопасности, реализованные в решении Simcenter для валидации космического оборудования.

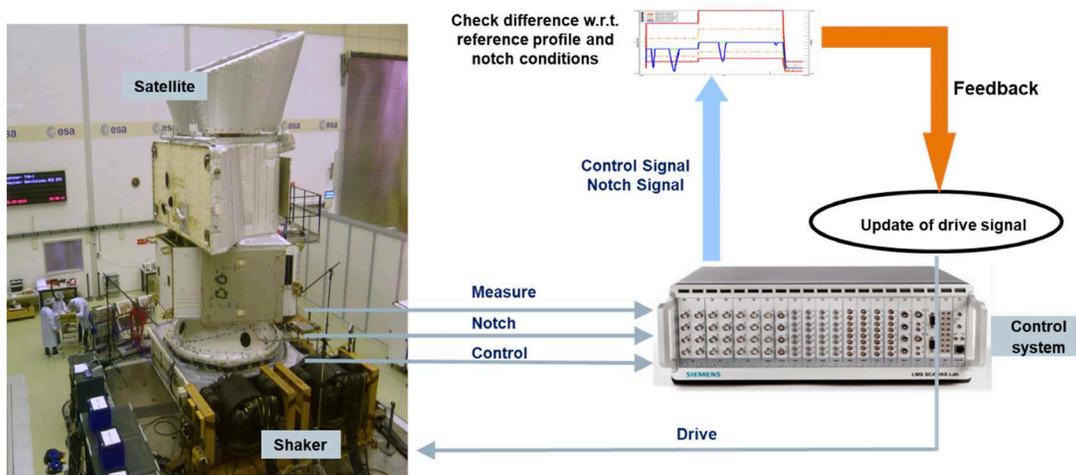


Рис. 4: подготовка VeriColombo к вибрационным испытаниям для сохранения работоспособности космического аппарата при жестком запуске на ракете-носителе Ariane 5 (предоставлено Европейским космическим агентством — ЕКА).

Самопроверка правильности и полноты установки

Важнейшей составляющей прохождения испытаний на контроль вибрации является процедура самопроверки реальной установки для измерения вибрации. Ее необходимо успешно выполнить до проведения испытаний. Во время такой самопроверки на вибрационный стенд подается слабое возбуждение. При таком возбуждении система измеряет функции амплитудно-частотной характеристики на всех каналах и проверяет правильность подключения и работы всех приборов. Она также экстраполирует слабое возбуждение на натурное испытание, чтобы провести симуляцию испытания и убедиться, что все сигналы находятся в допустимых диапазонах. На рис. 5 представлен этот процесс, реализованный в программном обеспечении Simcenter Testlab™.

Ограничение по отклику для защиты космических аппаратов в режиме реального времени

Во время испытаний на управление синусоидальным или случайным сигналом на вибрационной установке резонанс

конструкции может привести к тому, что уровень вибрации в определенных местах станет слишком высоким. Это может вызвать повреждение чувствительных или дорогостоящих приборов на спутнике. Ограничение по отклику помогает защитить объекты испытаний, ограничивая уровень вибрации в определенных зонах объекта испытаний или вибрационной установки за счет уменьшения сигнала возбуждения на частотах, вызывающих проблемы, как показано на рис. 6.

Ограничение по отклику не обязательно должно быть выражено в ускорении; оно также может быть определено как значение силы, момента или любой другой величины, измеряемой в ходе испытаний. Ограничение силы и момента очень важно, так как оно позволяет избежать опрокидывания спутника, когда центр тяжести объекта испытаний выровнен относительно поверхности опоры вибрационного стенда недостаточно точно. Оно также очень полезно для выполнения объема испытаний, предписанного разрешающими запуск органами. Динамометры обычно используются для непосредственного измерения сил и моментов.

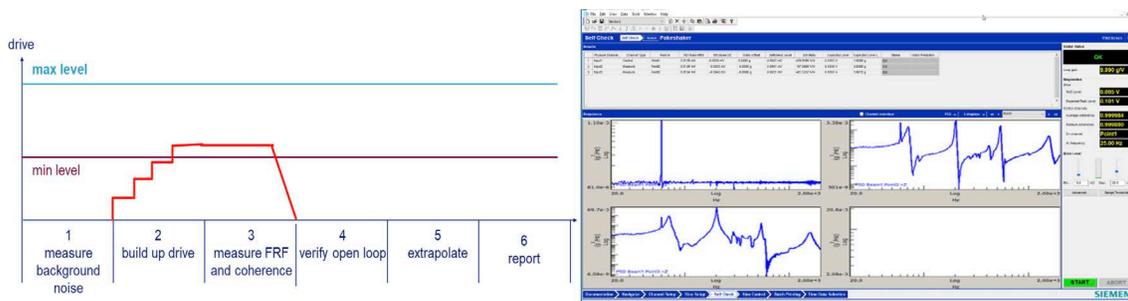


Рис. 5. Слева: процедура самопроверки. Справа: выполнение самопроверки с помощью Simcenter Testlab.

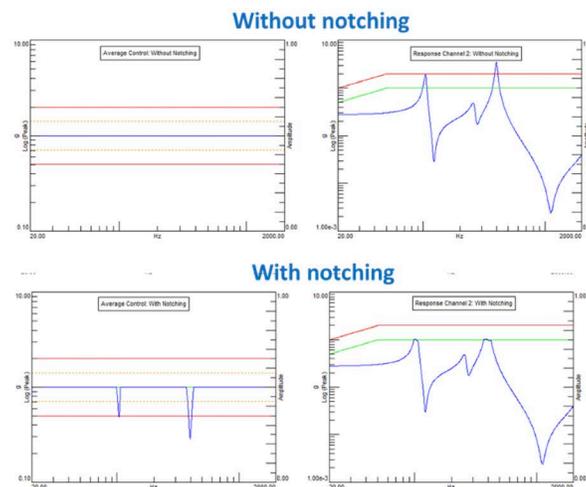


Рис. 6. Измерение без ограничения по отклику (вверху) и с ограничением по отклику (внизу).

Многоканальные динамические измерения без риска для системы управления

Космические корабли становятся более масштабными и сложными. Это создает необходимость в системах с большим числом каналов для дополнительной защиты и лучшего понимания динамики космического корабля. Однако такие многоканальные системы не должны влиять на работу системы управления и на эффективность обработки и представления данных после испытаний.

Чтобы использовать масштабные конфигурации без перегрузки системы управления, были разработаны системы сжатия данных. Они представляют собой дополнения к системе управления, полностью синхронизированные с ней. Они собирают и сохраняют необработанные временные данные, параллельно преобразовывая их в функции спектральных и частотных характеристик в реальном времени. Схематичное представление измерительной установки с использованием систем управления оборудованием и сжатия Simcenter SCADAS™ представлено на рис. 7.

Управление такой обработкой осуществляется с помощью каналов синхронизации, созданных системой управления. Эта установка позволяет системе управления сконцентрироваться на задачах управления и ограничения по отклику, имеющих критическое значение для безопасности, в то время как система сжатия параллельно измеряет и обрабатывает каналы отклика. Это дает системе управления возможность отправлять результаты анализа сразу после выключения вибрационной установки, чтобы испытательная группа могла немедленно начать подготовку следующего испытания, пока команда расчетчиков изучает данные. Такой подход повышает эффективность тестирования и сокращает продолжительность этапа испытаний.

Мгновенный доступ к результатам испытаний для всех отделов

После завершения испытаний процесс квалификации не заканчивается. Важность быстрого и эффективного создания отчетов иногда недооценивается, но она играет важную роль в успешном прохождении испытаний. Быстрое предоставление результатов квалификационного испытания позволяет конструкторам немедленно оценить статус испытаний и дает команде расчетчиков возможность провести валидацию изделия и понять физические процессы, стоящие за результатами испытаний.

Анализ связанных нагрузок

Анализ связанных нагрузок (ACH) проводится для понимания того, каким образом полезная нагрузка, например, спутник или космический корабль, динамически взаимодействует с ракетой-носителем во время запуска и вывода на орбиту. Нагрузки и отклики, полученные в результате этого анализа, используются для квалификации полезной нагрузки в целях запуска на конкретной платформе. Лабораторные вибрационные испытания конструкций (крупногабаритных космических аппаратов) в основном преследуют две цели: квалификацию конструкции путем воздействия на нее вибраций, типичных для условий эксплуатации; валидацию КЭ-модели для достоверной симуляции соединения конструкции с пусковой установкой.

Программное обеспечение для динамического анализа Simcenter NASTRAN®, отвечающее отраслевым стандартам, применяется многими компаниями аэрокосмической и оборонной промышленности для проведения анализа связанных нагрузок. Оно позволяет изучать динамический отклик при различных условиях эксплуатации сборок, например, анализировать динамическое поведение спутника и панелей солнечных батарей во время запуска и вывода на орбиту. Уникальной функцией Simcenter NASTRAN является возможность создания внешних суперэлементов с режимом ускорения, выходными матрицами преобразования, необходимыми для анализа связанных нагрузок.

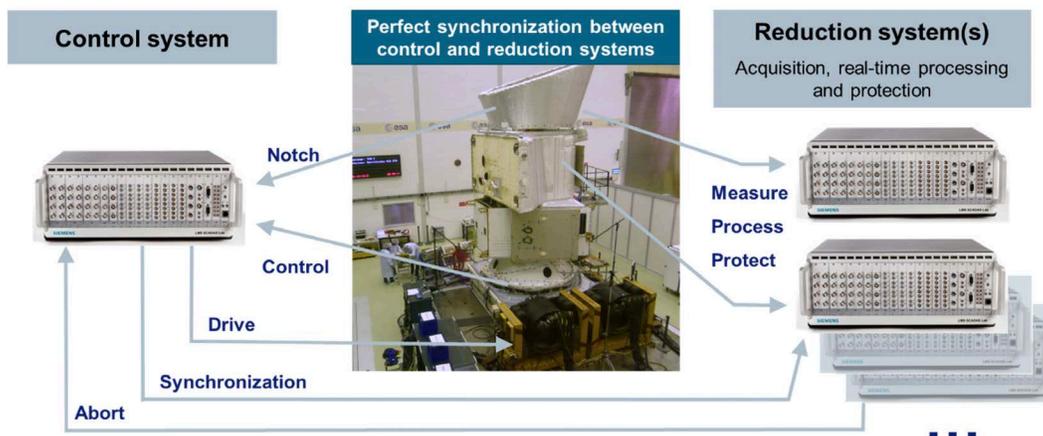


Рис. 7. Установка с системой управления и сжатия.

Подход на основе виртуального вибрационного стенда

В области вибрационных испытаний взаимодействие между испытуемым космическим аппаратом и вибрационным стендом, используемым для проведения испытания, критически важно, так как динамика вибрационного стенда (для испытаний) часто комбинируется с динамикой объекта испытаний в рассматриваемом частотном диапазоне, что делает его поведение во время натурных испытаний непредсказуемым. Это особенно актуально, когда вес испытываемого изделия равен весу вибрационного стенда, в таких ситуациях образуется новая сопряженная система с неизвестными динамическими свойствами. При этом возникает повышенный риск превышения необходимого объема испытаний, которое может привести к повреждению спутника или установленных на нем дорогостоящих приборов¹⁰.

Для предотвращения таких трудностей и принятия контрмер перед запуском реальной программы разрабатываются такие методы моделирования, как испытания с использованием виртуальной вибрационной установки. Использование виртуальной вибрационной установки требует интеграции трех блоков симуляции (рис. 8):

- Модель системы управления вибрацией (A)
- Модель испытательного стенда и вибрационной платформы (B)
- Структурная модель испытываемого устройства (C)

Выполняя испытания с использованием виртуального вибрационного стенда, инженер-испытатель может оценить результаты испытаний упомянутой системы до ее реального ввода в эксплуатацию. Это помогает правильно определить все параметры, задействованные в эксперименте (расположение датчиков управления, измерительных датчиков и датчиков ограничения по отклику, настройки контроллера, такие как скорость развертки, количество периодов и коэффициент компрессии), и обеспечивает беспрепятственное проведение испытаний. Кроме того, можно провести анализ чувствительности для количественной оценки важности взаимодействия вибрационной установки с конструкцией и его влияния на контроллер. Наконец, этот процесс может привести к соотнесению математических моделей с результатами испытаний для более глубокого понимания физических процессов во всей системе.

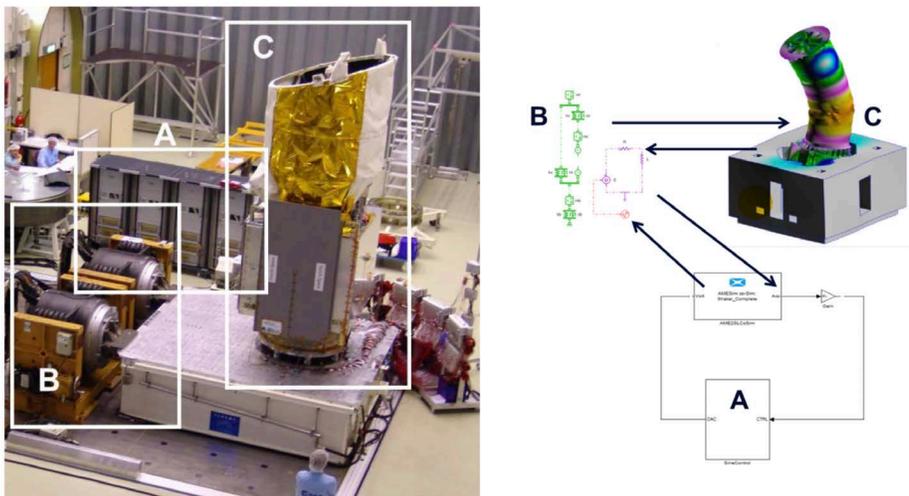


Рис. 8. Физическое (слева) и виртуальное (справа) представление вибростенда. Также выделены различные блоки: (A) контроллер вибрации с замкнутым контуром; (B) возбудители вибраций; (C) испытываемое устройство.

Акустические испытания

Уровень шума, генерируемого при запуске, может достигать 146 децибел (дБ) (а внутри обтекателя — еще выше) и вызывать структурные повреждения, а также ставить под угрозу функциональность приборов и подсистем. Поэтому разрешающие запуск органы также требуют квалификации космических аппаратов с точки зрения акустической нагрузки. Таким образом, перед запуском космического аппарата как сам аппарат, так и основные подсистемы, такие как солнечные батареи, антенны и отражатели, проходят испытания и подвергаются воздействию акустического давления, ожидаемого во время старта и на последующих этапах полета.

Акустические испытания спутников традиционно проводятся в акустических реверберационных камерах, но они требуют больших затрат и занимают много времени. Поэтому были разработаны новые альтернативные, более экономичные и гибкие методы испытаний. Далее мы подробно рассмотрим как традиционные, так и новые методы испытаний.

Акустическое возбуждение реверберационного поля: традиционный метод

Акустические испытания спутников традиционно проводятся в акустических реверберационных камерах, обеспечивающих равномерное звуковое поле вокруг объекта испытаний. В большинстве случаев эти крупные установки заполнены газообразным азотом, тогда как в некоторых из них также используется сухой кислород. Цель состоит в поддержании максимальной чистоты воздуха и сведении звукопоглощения к минимуму. Шум генерируется набором акустических модуляторов, подключенных к рупорам, которые вместе могут производить шума свыше 150 дБ.

Схематическое представление системы управления акустическим нагружением на основе оборудования Simcenter SCADAS и программного обеспечения Simcenter Testlab показано на рис. 10. Сначала определяется профиль целевого уровня звукового давления (соответствующий пусковой установке). Модель камеры, характеризующаяся временем реверберации на треть диапазона октавы (Т60), является важным параметром для управления, который также необходимо определить. После запуска испытания



Рис. 9. Испытание методом акустического возбуждения реверберационного поля в Европейском космическом агентстве (ЕКА).

алгоритм управления генерирует сигнал возбуждения. Этот сигнал может разделяться кроссоверами и передаваться через необходимое количество выходов цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) на фронтальной стороне для подачи на несколько источников модулятора/рупора и/или усилителя/громкоговорителя, которые будут создавать диффузное звуковое поле в камере.

Несколько микрофонов, подвешенных в камере, используются для контроля и мониторинга звукового поля. Алгоритм управления вычисляет сигнал управления со всех микрофонов (пространственное усреднение) для приведения сигнала возбуждения в соответствие с заданным целевым значением. Можно настроить дополнительные каналы распространения вибрации для мониторинга уровней спектральной плотности мощности (PSD) на конструкции объекта испытаний с возможностью инициировать прерывания.

Для подготовки и оптимизации реверберационных акустических испытаний в аэрокосмической промышленности также используются инструменты численного моделирования, позволяющие избежать превышения необходимого объема испытаний космического аппарата. Программное обеспечение Simcenter 3D позволяет создавать диффузные поля в виде комбинации случайных плоских волн и использовать это возбуждение для расчета нагрузки от давления на космический аппарат.

Несмотря на то что акустическое возбуждение реверберационного поля (RFAX) является общепризнанным методом, общая сложность его применения и эксплуатационные расходы на реверберационные камеры в сочетании с географическим разбросом объектов существенно усложняют для владельцев космических аппаратов задачу по проведению испытаний изделий.

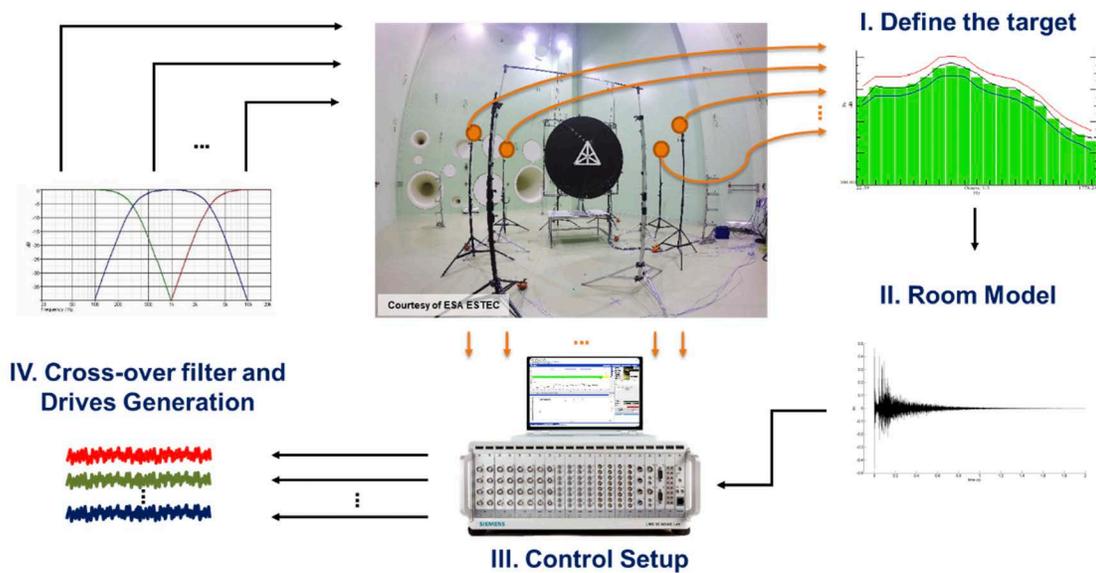


Рис. 10. Схематическое представление системы управления акустическим нагружением.

Акустические испытания в прямом поле: альтернативный метод

Производители спутников проявляют все больший интерес к поиску методов испытаний, представляющих собой альтернативу стандартным акустическим испытаниям в реверберационных камерах и отличающимся большей экономичностью и гибкостью для проведения испытаний вне труднодоступных и дорогостоящих сооружений. Акустические испытания в прямом поле (DFAN) являются альтернативным методом, который в последние годы привлекает большое внимание.

Технология DFAN позволяет воспроизводить акустические нагрузки без специальной реверберационной камеры; их можно реализовать с использованием громкоговорителей и усилителей коммерческого назначения в обычных с точки зрения акустики помещениях. Образец для испытаний помещается в центр круга громкоговорителя, после чего вызывается возбуждение с помощью прямого акустического поля. Алгоритм управления случайным сигналом MIMO с замкнутым контуром используется для достижения правильной среды с точки зрения единообразия данных и требований к диффузному полю.

На рис. 11 показан испытательный комплект на корпусе отражателя подсистемы антенны компании Thales Alenia Space. Установка включает в себя 96 громкоговорителей,

установленных в 12 колонок и надлежащим образом размещенных по кругу, а также 96 усилителей, которые обеспечивают необходимую мощность для генерации звукового поля в 147 дБ. В установке используется оборудование Simcenter SCADAS, оснащенное контроллером MIMO в комбинации с Simcenter Testlab. 16 микрофонов вокруг образца для испытаний измеряют звуковое поле и генерируют скорректированные значения возбуждения для создания однородного акустического поля⁴.

Для улучшения управления испытаниями и однородности акустического поля были исследованы различные стратегии управления MIMO с замкнутым контуром. Программное обеспечение Simcenter Testlab для акустического контроля MIMO использует алгоритмы проекции и оптимизации для правильного определения ссылочных значений испытаний для процесса управления случайным сигналом MIMO и оптимального выбора датчиков управления для равномерности акустического поля. Более подробную информацию об этой уникальной технологии можно найти в справочных материалах⁵.

Космические агентства и производители ракет-носителей также разрабатывают необходимые отраслевые рекомендации по правильному проведению испытаний DFAN. В настоящее время НАСА является единственной организацией, разработавшей соответствующее техническое руководство (NASA-HDBK-7010).

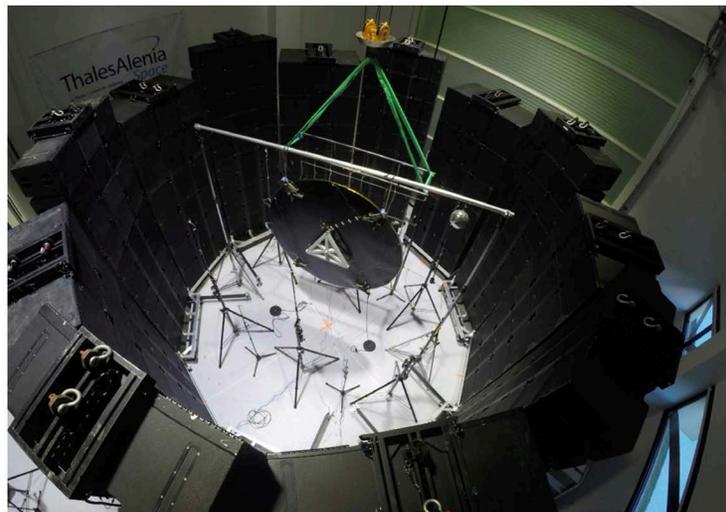


Рис. 11. Акустические испытания в прямом поле (DFAN) на отражателе Thales Alenia Space.

Виртуальные акустические испытания в прямом поле: цифровой двойник для снижения рисков при испытаниях

При подготовке к DFAN можно использовать комплексный цифровой двойник для проектирования и оптимизации установки с целью повышения эффективности испытаний. Такой цифровой двойник может помочь определить количество и тип динамиков, с помощью которых можно обеспечить необходимую акустическую энергию для достижения желаемого уровня громкости. Его можно использовать для определения положения динамиков, а также количества и положения управляющих микрофонов с целью улучшения равномерности акустического поля. Во избежание превышения необходимого объема испытаний можно провести численное моделирование испытания, чтобы рассчитать структурный отклик на самом объекте испытаний. Таким образом, допустимые уровни не будут превышены, и можно будет спрогнозировать ограничение отклика.

Пример предварительного численного моделирования с использованием универсального цифрового двойника для испытаний DFAN на отражателе антенны показан на рис. 12. При подготовке к этому испытанию в Simcenter 3D была спроектирована установка с определением расположения динамиков и микрофонов, а также объекта испытаний. Затем были спрогнозированы рабочие характеристики, в том числе результаты проверки равномерности акустического поля. Наконец, была выполнена симуляция испытания вплоть до расчета акустически индуцированных нагрузок непосредственно на объект испытаний.

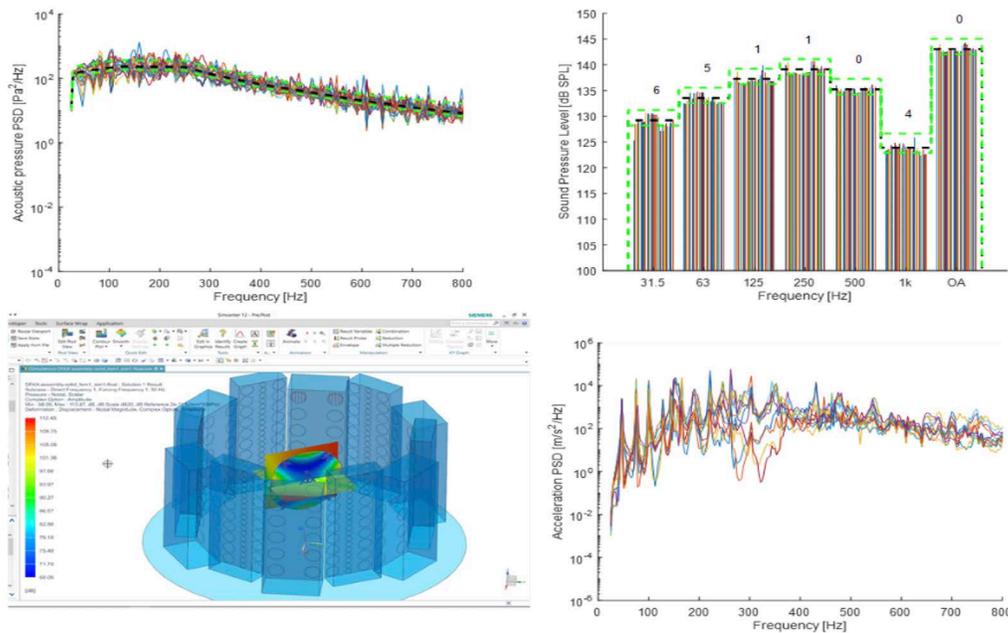


Рис. 12: Симуляция в Simcenter 3D для проектирования и оптимизации испытательной установки для DFAN-испытаний. Слева сверху: проверка однородности акустического поля в узком диапазоне. Справа сверху: проверка однородности акустического поля в октавном диапазоне. Слева внизу: прогнозируемые акустически индуцированные нагрузки. Справа сверху: прогнозируемая реакция образца на вибрационное воздействие.

Ударные испытания

В процессе запуска и развертывания космический аппарат подвергается нескольким высокоинтенсивным ударным воздействиям, вызываемым пиротехническими устройствами: отделение ступеней ракеты-носителя, сброс обтекателя, отделение спутника от ракеты-носителя (например, высвобождение замковой ленты) и развертывание внешних элементов, например панелей солнечных батарей, антенн или приборов для исследований, на развертываемых штангах.

Эти удары распространяются по всему космическому аппарату и могут повредить электронику полезного груза и нарушить функциональность механических деталей. Из-за высокого ускорения и частотного спектра многие аппаратные элементы и малые компоненты подвержены отказам после пироударов, несмотря на их устойчивость к самым разным низкочастотным средам, в том числе к случайным вибрациям.

Для успеха миссии очень важно убедиться с помощью испытаний, что аппаратура для космических полетов способна выдержать ожидаемое ударное воздействие. Ударные испытания могут проводиться с использованием пиротехнического устройства, механического ударного устройства или вибрационного стенда. Применение пиротехнических устройств обеспечивает наиболее точную симуляцию. Однако по экономическим причинам или из-за ранних прототипных испытаний потенциально восприимчивого оборудования альтернативные методы испытаний могут быть более привлекательными. На рис. 13 показаны некоторые установки для тестирования с помощью пироударов.

Для изучения воздействия ударов на приборы на борту космического аппарата измеряются сотни откликов на вибрацию и деформации при динамической нагрузке. Типичным результатом анализа является спектр ударного отклика (SRS) для каждой точки измерения. Максимальный SRS наиболее часто используется для пироударных испытаний, так как наибольший интерес представляет абсолютное максимальное значение вне зависимости от того, было ли оно зафиксировано в первичном (во время возбуждения) или остаточном мгновенном (после возбуждения) отклике.

Simcenter SCADAS и Simcenter Testlab позволяют конструкторам быстро получать реакцию образца для анализа влияния пироударных событий на космическую систему. Эти инструменты также дают возможность безопасно воспроизводить широкий спектр ударных испытаний (например, с полусинусоидальными или синтезированными ударами) на вибрационных стендах и предоставляют все необходимые возможности обработки, например онлайн-расчет синтеза ударного спектра (SRS) и ограничение ударного спектра для защиты образца.

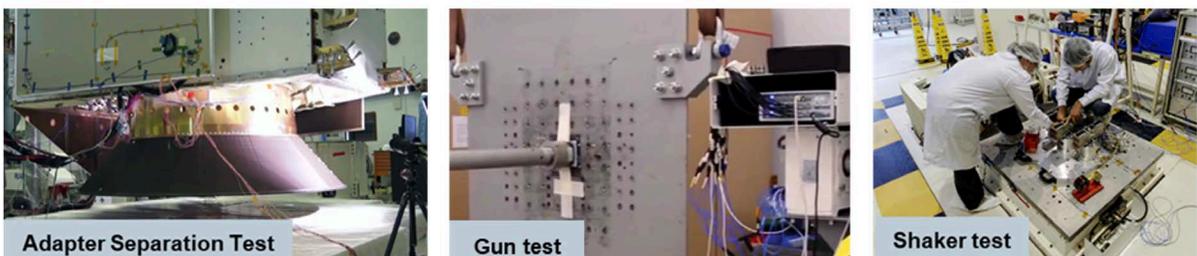


Рис. 13. Испытание на отделение космического аппарата с использованием пироустройств (слева), ударное испытание с использованием механических устройств (в центре) и ударное испытание с использованием электродинамического вибрационного стенда (справа).

Статистический анализ энергии: прогнозирование ударного отклика полезной нагрузки

Поскольку условия испытаний отличаются от условий реального полета, для валидации условий проведения испытаний с целью обеспечения надлежащей квалификации полезной нагрузки используется симуляция. С помощью методов статистического анализа энергии (SEA) можно прогнозировать характеристики ударного спектра для ударных квалификационных испытаний. Simcenter 3D SEA позволяет проводить симуляцию отделения космического аппарата, чтобы корректно прогнозировать квалификационный синтез ударного отклика, представляющий собой зону полезной нагрузки для различных ударных воздействий.

На рис. 14 представлены результаты аттестационных испытаний, проведенных для ЕКА, в рамках которых SEA-удар, специальный метод статистического анализа энергии (SEA) для предсказания синтеза ударного спектра (SRS), применялся для испытания отделения обтекателя верхней части VEGA¹¹.

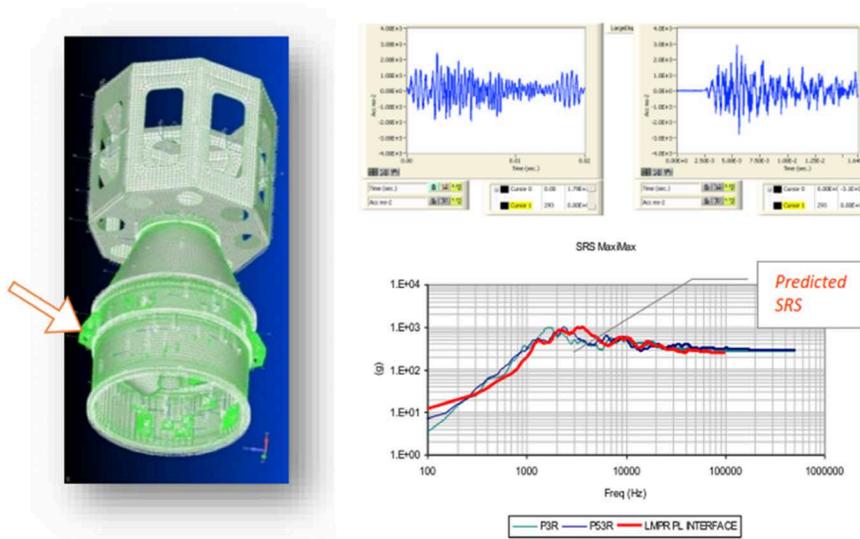


Рис. 14. Прогнозирование методом статистического анализа энергии (SEA) для верхней части ракеты-носителя VEGA. Слева сверху: прогнозируемая и измеренная временная зависимость ускорения. Внизу: прогнозируемый и измеренный синтез ударного спектра.

Модальный анализ

Чтобы по-настоящему понять динамику конструкции космического аппарата, иногда требуется провести модальный анализ. Целью такого тестирования является валидация КЭ-модели динамики конструкции. Эта модель необходима для анализа связанных нагрузок пусковой установки, который оценивает риск повреждения от стартовой нагрузки. Эту же модель можно использовать для снижения рисков при проведении квалификационных испытаний и прогнозирования реакции космического аппарата на нагрузки, создаваемые в ходе испытания, как описано выше в разделе о подходе на основе виртуальной вибрационной установки.

Модальный анализ предполагает применение сил с использованием электродинамических вибрационных установок на нескольких тщательно выбранных входах. Обычно используется взрывное случайное возбуждение из-за его скорости и эффективности. При необходимости более высокого уровня возбуждения или оценки нелинейных характеристик используются методы ступенчатого синусоидального сигнала. Во время испытания измеряются силы, а также ответное ускорение во множестве точек по всей конструкции. В ходе этого испытания спутник устанавливается в хорошо известных граничных условиях, с прижимом или свободно (либо с использованием комбинации этих двух способов). Во время возбуждения измеряются АЧХ.

После испытания применяется технология аппроксимации кривых для получения информации о формах колебаний: резонансных частот, значений демпфирования и непосредственно форм колебаний. Результаты испытаний используются для валидации всей КЭМ и корреляции частот, форм колебаний и предполагаемого демпфирования. Существенными формами и частотами колебаний являются те, которые вносят основной вклад в нагрузку на линию раздела ракеты-носителя и космического аппарата¹³.

Примером программы, в которой было рекомендован модальный анализ, является проект Канадского космического агентства Radarsat (рис. 15). Анализ связанных нагрузок (расчет вынужденного отклика стартовых нагрузок на комбинированной динамической модели космического аппарата и ракеты-носителя) для этой конкретной программы показал, что при запуске на панелях РЛС с синтезированной апертурой могут возникнуть повреждения. Эти четыре панели имеют почти идентичную геометрию и размещены рядом друг с другом в стартовой конфигурации.

Для калибровки КЭ-моделей требовалось глубокое и точное определение резонансных частот. Из-за высокой плотности форм колебаний для проведения испытания потребовалось использовать 5 вибрационных установок одновременно и в общей сложности 240 откликов. Для точной изоляции форм колебаний с близкими частотами между 49 Гц и 61 Гц применялась функция анализа форм колебаний Simcenter Testlab.

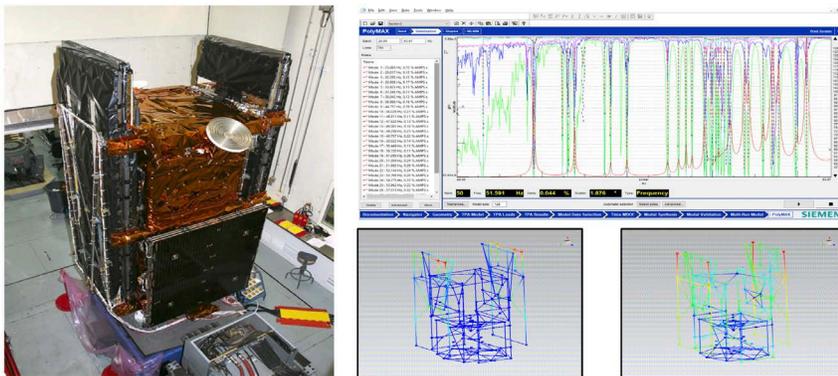


Рис. 15. Исследование форм колебаний, проведенное в рамках проекта Канадского космического агентства Radarsat (слева). Результаты форм колебаний после применения алгоритма аппроксимации модальных кривых Simcenter Testlab Polymax (справа).

Оперативный анализ форм колебаний: получение дополнительной технической информации

Во время квалификационных испытаний целых космических аппаратов и их узлов или крупных деталей приборы обычно включают, помимо каналов управления и ограничения, большое количество датчиков (например, акселерометров и тензометров) для измерения структурного отклика. Традиционно для получения представления об индуцированных нагрузках эти сигналы акселерометров и тензометров обрабатываются в направлении PSD. Однако передовые методы, такие как оперативный модальный анализ, могут обеспечить еще более глубокое понимание динамики конструкции на основе этих данных.

На рис. 16 показано применение оперативного анализа форм колебаний для определения структурной динамики антенного отражателя (предоставлен Thales Alenia Space Toulouse) во время акустических испытаний в прямом поле. Помимо микрофонов, используемых для управления обратной связью, с помощью акселерометров контролировались структурные вибрации образца. Путем анализа данных на различных уровнях звукового давления можно даже понять нелинейное поведение. Данные были получены с помощью Simcenter SCADAS и программного обеспечения случайного управления MIMO Simcenter Testlab. Анализ проводился с использованием функции оперативного модального анализа Simcenter Testlab®.



Table 1. Eigenfrequency and damping ratio estimates for the 9 disk structural deformation modes.

Mode #	Impact PolyMAX		Closed-loop (12) 110dB Op. PolyMAX		Open-loop (12) 0.45V Op. PolyMAX	
	f [Hz]	xi [%]	f [Hz]	xi [%]	f [Hz]	xi [%]
1	127.9	1.7%	130.9	0.7%	128.7	0.8%
2	140.4	2.6%	141.0	0.5%	138.6	1.0%
3	279.8	1.0%	283.0	0.4%	279.4	0.6%
4	319.1	2.1%	324.2	0.7%	317.8	1.4%
5	478.5	1.8%	478.7	0.7%	480.2	1.9%
6	525.1	2.0%	525.8	0.5%	523.9	0.8%
7	687.4	1.7%	682.2	0.9%	689.5	1.4%
8	707.6	1.8%	710.4	1.1%	718.0	1.3%
9	773.7	3.3%	775.9	1.4%	773.4	1.9%

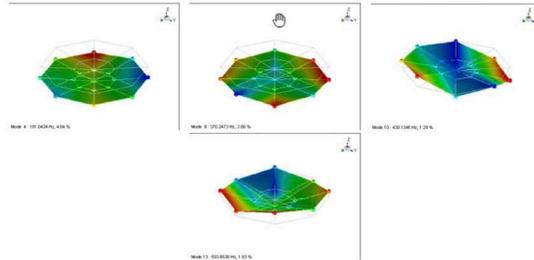
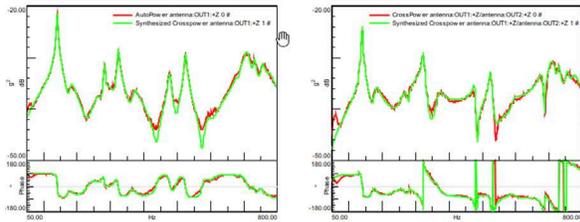


Рис. 16. Слева сверху: Испытательная установка для акустических испытаний в прямом поле с антенным отражателем, окруженная громкоговорителями. Справа сверху: сравнение выявленных собственных частот и значений демпфирования с методами ударного воздействия и ОМА. Слева внизу: проверка качества подбора кривых: измеренные спектры в сравнении с синтезированными спектрами. Справа внизу: некоторые формы колебаний, выявленные с помощью ОМА.

Микровибрации

Высококачественные оптические датчики изображения и лазеры все чаще используются в спутниках. Для получения высококачественных изображений к стабильности этих датчиков предъявляются высокие требования. Однако механические устройства на космическом аппарате, такие как реактивные колеса для управления ориентацией, могут вызывать микровибрации (порядка микро-г), что приводит к размытости изображений (рис. 17). Поэтому для научных миссий и полетов в целях наблюдения Земли применяются строгие требования в отношении микровибраций на борту космического аппарата.

В целях экспериментальной верификации соответствия таким требованиям создаются специальные контрольно-испытательные стенды для определения характеристик микровибраций. Установка, построенная Европейским космическим агентством и Европейским центром космических исследований и технологий, представлена на рис. 18. С учетом низкого уровня измерений (до 10 мН силы и 2 мНм момента в диапазоне частот от 5 Гц до 1 кГц) контрольно-испытательный стенд изолирован от колебаний грунта окружающей среды с помощью большого сейсмического блока из мрамора, который поддерживается пневматическими изоляторами⁹.

Simcenter SCADAS дополняется SCL-VCF4, специальным входным модулем со входом заряда со сверхнизким уровнем шума, очень хорошо подходящим для точного измерения чрезвычайно низких уровней силы, с которыми приходится сталкиваться при проведении микровибрационных испытаний.

Полученные в ходе испытаний данные могут использоваться для детального изучения вклада динамического поведения оборудования в работу подсистемы или системы, а также для определения ключевых источников микровибраций внутри колес.

Для более эффективной интерпретации результатов важно знать резонансную частоту комбинированной установки контрольно-испытательного стенда и образца, чтобы отличить отклики реактивного колеса от комбинированной установки. На рис. 18 показана конфигурация, в которой для определения резонансной частоты комбинированной установки используется вибрационный стенд Simcenter QSources™.

Модель «источник-передатчик-приемник», очень популярная в автомобилестроении для понимания путей передачи колебаний, также может использоваться в этом контексте для понимания того, как энергия от вибрирующего источника передается на высокотехнологичное оборудование, и для оптимизации его расположения и системы крепления. Необходимые структурные данные АЧХ для такого анализа можно получить с помощью ударного молотка или вибрационной установки, например, Simcenter QSources.

Платформа Simcenter предлагает полное решение для анализа пути передачи колебаний, которое реализует процесс, описанный в главе 13 руководства ECSS-E-HB-32-26A. Исследования микровибраций могут проводиться с использованием CAE-моделей, а валидация осуществляется путем испытаний. Уникальная функция «гибридного анализа пути передачи колебаний» в Simcenter даже позволяет объединять оба подхода путем передачи данных испытаний в модели симуляции или создания сборок испытательных моделей с исключительно числовыми моделями.



Рис. 17. Слева: искажение изображения, вызванное микровибрациями¹². Справа: реактивные колеса для управления положением.

Нелинейность

Для подавления микровибраций производители спутников часто используют системы крепления с мягким стыком между фиксированными и подвижными деталями, такими как эластомерные втулки. Эластомерная система крепления колеса WEMS (система виброизоляции космического аппарата SmallSat, разработанная компанией EADS-Astrium), является таким механическим устройством, предназначенным для снижения вибраций на орбите и защиты реактивного колеса во время старта. Втулки остаются мягкими при низком уровне вибрации, но становятся жесткими при превышении определенного уровня для реализации механических упоров и феномена нелинейной динамики.

Традиционная спектральная интерпретация результатов квалификационных испытаний этого типа нелинейных структур является предметом длительных дискуссий, так как уровни отклика отличаются для каждой развертки и сильно

искажаются на развертках с высоким входным уровнем. Для получения более глубоких знаний о нелинейных структурах Европейское космическое агентство (ЕКА) спонсировало исследовательский проект по изучению нелинейного отклика устанавливаемых на космических аппаратах систем во время квалификационных испытаний. В результате этой работы было обновлено руководство ЕКА по анализу механических нагрузок космических аппаратов ECSS-E-HB-32-26A, в которое была добавлена глава о нелинейных структурах¹².

В ходе этого проекта использовались SCADAS и Simcenter Testlab для проведения квалификационной кампании на структурной модели спутника (SmallSat) с фиктивным реактивным колесом, установленным на WEMS. Для исследования нелинейности были проведены квалификационные испытания гармоническим воздействием переменной частоты от 5 до 80 Гц для различных целевых уровней контроля⁷. Испытательная установка и некоторые результаты представлены на рис. 19.

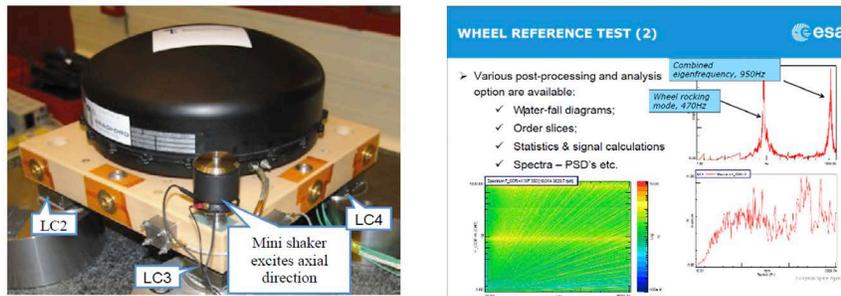


Рис. 18. Слева: контрольно-испытательная установка Европейского космического агентства и Европейского центра космических исследований и технологий для определения характеристик микровибраций с реактивным колесом в сборе и вибраторной установке Simcenter Qsources. Справа: некоторые результаты анализа Simcenter Testlab с каскадной диаграммой, диаграммой спектра удержания пиковых значений и графиком спектра усилий при определенных скоростях вращения (отчет ЕКА).

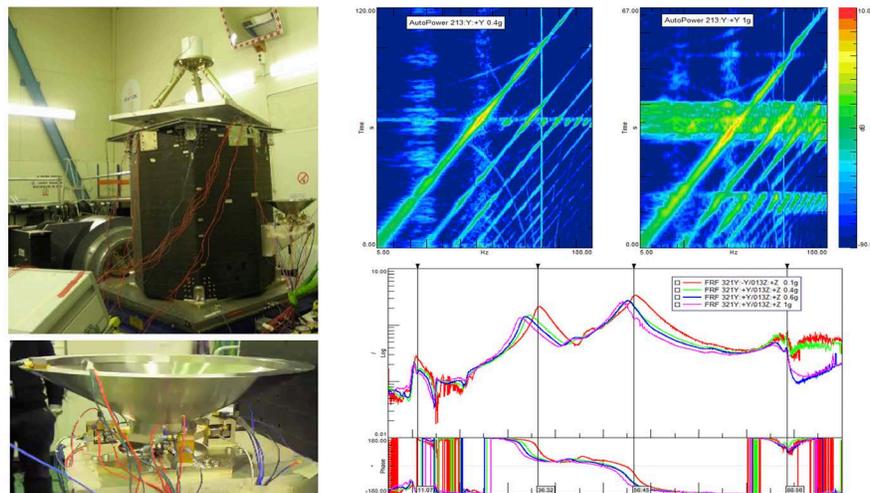


Рис. 19. Слева сверху: испытательная установка космического аппарата SmallSat. Слева внизу: эластомерные системы крепления колеса WEMS с фиктивной конструкцией сверху. Справа сверху: на цветной карте Simcenter Testlab представлено сравнение разверток 0,4 г и 1 г. На обоих можно наблюдать нелинейные искажения (гармоники). На развертке 1 г также присутствует искажение широкополосного спектра из-за механических упоров. Справа внизу: диаграмма Боде в Simcenter Testlab показывает сдвиг резонансных частот в условиях увеличения нагрузки.

Заключение

Основной целью различных типов динамических испытаний (акустических, вибрационных, ударных) является помещение космического оборудования в среду динамического пуска, чтобы убедиться в его надлежащем функционировании после воздействия неблагоприятной среды. Важнейшие задачи — защита конструкции и аппаратуры космического аппарата от превышения расчетной прочности и безопасное проведение испытаний.

С другой стороны, к вибрационным квалификационным испытаниям сегодня предъявляются более строгие требования. Испытательные лаборатории по всему миру вынуждены сокращать расходы, а испытательные группы должны тратить как можно меньше времени на испытания.

В данной статье были рассмотрены возможности применения Simcenter для решения этих проблем. В ней поясняются различные механические квалификационные испытания, а также модальный анализ и микровибрационные испытания. Также было рассмотрено использование комплексного цифрового двойника для снижения рисков и оптимизации испытаний.

Ссылки

1. Руководство пользователя корабля «Союз», Arianespace, 2018.
2. Airbus Defence and Space successfully tests and validates multimillion-dollar satellites and payloads with advanced Simcenter testing solutions.
3. NASA Handbook 7010: "Direct Field Acoustic Testing," Ali R. Kolaini.
4. Christophe Fabries, Bertrand Brevart, Alex Carrella, Mariano Alvarez Blanco, Didier Dal Fitto, Steffen Scharfenberg, "Experimental validation of Direct Field Acoustic Testing."
5. M. Alvarez Blanco, K. Janssens, F. Bianciardi, "Experimental verification of projection algorithms and optimization routines for acoustic field uniformity enhancement in MIMO direct field acoustic control," ISMA 2016.
6. Thales Alenia Space utilizes Simcenter Testlab and Simcenter SCADAS for pyroshock testing.
7. Simone Manzato, Bart Peeters, Raphaël Van der Vorst, and Jan Debille, "Environmental testing and operational data analysis for non-linear spacecraft structures," IOMAC 2011.
8. B. Peeters, M. Alvarez Blanco, U. Musella, S. Waimer, E. Di Lorenzo and A. Carrella, "Identifying the structural behavior of a specimen during spacecraft acoustic testing by operational modal analysis," IOMAC 2017.
9. Mark Wagner, Stephen Airey, Gaetan Piret, Phuoc Le. European Space Agency-ESA, "New reaction wheel characterization test facility (RCF)."
10. S. Manzato, F. Bucciarelli, M. Arras, G. Coppotelli, B. Peeters, A. Carrella, "Validation of a Virtual Shaker Testing approach for improving environmental testing performance," ISMA 2014.
11. G. Borello, J. Primus, R. Nguyen Van Lan and S. Kiryenko, "Prediction of Payload Shock Response in the Mid and High Frequency Range," ECSSMMT, 2009.
12. ECSS-EHB-32-26A: spacecraft mechanical loads analysis handbook (February 19, 2013).
13. ECSS-E-ST-32-11C – Modal survey assessment (July 31, 2008).

Siemens Digital Industries Software

Штаб-квартира

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

Северная и Южная Америка

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

Европа

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

Азиатско-Тихоокеанский регион

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 3333

О компании Siemens Digital Industries Software

Siemens Digital Industries Software помогает создать цифровое предприятие и шагнуть в будущее разработки, производства и проектирования электронных систем. Портфолио решений Xcelerator помогает компаниям самого разного размера создавать цифровые двойники, которые открывают новые возможности, позволяют получать ценные знания, переходить на новые уровни автоматизации и успешно внедрять инновации. Дополнительная информация по продуктам и услугам компании Siemens Digital Industries Software представлена на сайте [siemens.com/software](https://www.siemens.com/software), а также в социальных сетях [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) и [Instagram](#).
Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow!

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2020 Siemens. Список товарных знаков Siemens представлен [по ссылке](#). Все прочие товарные знаки являются собственностью их владельцев.

82700-83142-C4-RU 12/20 LOC