

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ: ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

С.Н. Панов (ООО "Компания ОКТАВА+")

Представлено ПО LMS Test.Lab – мощная высокоскоростная многоканальная система автоматизации испытаний по параметрам вибрации и шума: модального анализа конструкций, порядкового анализа роторных систем, акустических испытаний и анализа путей передачи и виброиспытаний на внешние воздействия.

Ключевые слова: модальный и порядковый анализ, акустика, вибрация, испытания, синусоидальное возбуждение, резонанс.

Одним из основных требований настоящего времени является ускорение создания новых образцов техники и выхода на рынок с одновременным ростом требований к их эксплуатационным, экологическим и иным параметрам. Последнее требует ускорения и повышения качества разработки и доводки изделий, что достигается за счет применения современных средств виртуального проектирования (Computer Aided Engineering – CAE) и автоматизации испытаний (Computer Aided Testing – CAT) и их интеграции, позволяющих осуществлять разработку нового изделия "с первого раза". Примером является интегрированная среда CAT автоматизации испытаний LMS Test.Lab и инженерных расчетов LMS Virtual.Lab фирмы LMS International (г. Левен, Бельгия), специализирующейся на разработке и внедрении инженерных инноваций в области испытательного оборудования и систем для автомобильной, аэрокосмической и других отраслей промышленности.

### LMS Test.Lab: интегрированная среда для проведения испытаний на шум и вибрацию

Давление со стороны общества на область инженерной деятельности по снижению шума и вибрации огромно. В законодательстве появляются все более жесткие ограничения на уровни шума и вибрации. Специалисты по маркетингу хотят сохранить основные достоинства торговой марки, но с меньшими затратами. Потребители требуют лучшие, более совершенные продукты. В то же время широкое применение цифровых технологий в процессе разработки оз-

начает сокращение числа испытаний прототипов, что требует более тщательного подхода к этим испытаниям. Больше того, все работы должны выполняться за меньшее время и с меньшими затратами ресурсов. Компания LMS предлагает законченное решение для инженерного процесса на основе экспериментальных исследований, сочетающее (рис. 1):

- средства высокоскоростного сбора данных с помощью многоканальной (от 8 и до >1000 каналов) аппаратуры LMS SCADAS (стационарной SCADAS III, мобильной SCADAS Mobile, регистрирующей SCADAS Recorder, SCADAS Durability Recorder);

- комплекс ПО LMS Test.Lab для проведения испытаний на шум и вибрации, включая средства для испытаний вращающихся частей оборудования, структурных и акустических испытаний, виброиспытаний, вибрационного контроля, формирования отчетов и обмена данных.

LMS Test.Lab используется для испытаний существующих прототипов изделий, выработки целевых проектных критериев, получения экспериментальных данных, необходимых для уточнения виртуальных моделей, основанных на результатах испытаний, обеспечивает более быстрое и надежное моделирование.

### LMS Test.Lab Structures:

#### проведение динамических испытаний конструкций

Семейство приложений для поиска и устранения недостатков конструкции, приводящих к повышенной вибрации и появлению трещин, для создания виртуального прототипа. Глубокое понимание структурной динамики базируется на знании отклика конструкции на действие регламентированного силового возбуждения с использованием модального анализа. Подобные модальные модели могут применяться для проверки достоверности и улучшения конечно-элементных моделей или непосредственно в качестве основы для оценки модификаций конструкции. Результаты модальных испытаний могут использоваться для создания гибридной модели изделия, включающей конечно-элементные и модальные модели подузлов. Гибридное проектирование позволяет осуществлять эффективное моделирование новой сборочной компоновки изделия и ее модификаций.

Пакет включает отдельные решения для модального анализа при импульсном и широкополосном возбуждении в лабораторных и рабочих условиях, построения рабочих форм колебаний и анимации во временной области, ММО испытания при синусом



Рис. 1. Система виброиспытаний фирмы LMS на внешние воздействия (>500 каналов) в Европейском космическом агентстве

возбуждении с разверткой и ступенчатым синусом, для нормальных мод, наземных вибрационных испытаний, предсказания модификаций и расчета инерционных свойств объекта как твердого тела.

#### **LMS Test.Lab Modal Analysis: модальный анализ**

Приложение автоматизирует модальные испытания для выполнения модального анализа при одноточечном (SIMO) и многоточечном (MIMO) возбуждении, позволяет решать проблемы шума и вибрации, которые вызываются собственной структурной динамикой системы, например, нарастание шума, резонанс лопаток турбины и т.д. ПО использует управляемое динамическое возбуждение конструкции для определения ее собственных динамических свойств, к которым относятся: собственные формы колебаний, частоты и коэффициенты демпфирования на собственных формах. Полученная модальная модель (набор частот, параметры затухания, формы колебаний) применяется для интерпретации природы деформации, вызывающей проблему, для оценки достоверности численных моделей, которые далее используются для исследования вариантов конструкции или для прогнозирования влияния простых изменений конструкции на уровни вибрации.

#### **LMS Test.Lab Operational Deflection Shape Analysis: анализ рабочих форм колебаний**

Приложение используется для визуализации рабочих форм колебаний в процессе эксплуатации. Множество данных для стационарных и разгонных режимов испытаний становятся доступными посредством анимации колебаний объекта сразу после проведения измерений, что позволяет организовать повторное визуальное воспроизведение форм колебаний в реальных условиях работы. Решение поддерживает автоматическое перемещение вдоль оси времени для достижения эффекта замедленной съемки или вдоль осей частоты, порядка или скорости для анализа, подобно стробоскопическому. Через несколько секунд после записи сигналов пользователь может проверить правильность работы всех датчиков, наблюдать, какие формы деформации отвечают за проблему шума на данной частоте вращения ротора и лучше понять вибрационное поведение конструкции.

Приложение обеспечивают интуитивное представление главных виброакустических проблем во время испытания и при последующем анализе конструкции в ходе ее эксплуатации. Просматривая анимацию спектров, частотных срезов, порядковых срезов и временных сигналов сразу после замера и записи их на диск или при просмотре на мониторе в масштабе РВ в ходе сбора данных и их записи, инженеры получают возможность убедиться в достоверности записываемой информации, что позволяет избежать повторных испытаний.

#### **LMS Test.Lab Operational Modal Analysis: модальный анализ в рабочих условиях**

Приложение для диагностики проблемы вибрации и акустики для конструкций, находящихся в эксплуатации (здания, мосты, транспортные средства и



Рис. 2

т.д.), или для конструкций, где реальные рабочие процессы отличаются от условий в испытательной лаборатории. Например, динамические свойства самолета отличаются в воздухе и на земле. Знание резонансной частоты, формы колебаний и параметров демпфирования позволяют инженерам улучшать характеристики долговечности и виброакустики изделия, повысить эффективность процесса разработки путем уточнения по данным испытаний цифровых, например, конечно-элементных моделей.

Решением пользуются: Европейское космическое агентство (ESA-ESTEC), General Dynamics, Soprema, Messier Dowty Ltd., Honda, ОАО "ТАТА", "АВТОВАЗ", "УМПО", "НПО Энергомаш", РКК "Энергия", ЦАГИ, НПО им. С.А. Лавочкина, РФЯЦ ВНИИЭФ и др.

#### **LMS Test.Lab Rotating Machinery – испытание вращающегося оборудования**

Это семейство приложений по сигнатурному анализу, порядковому анализу и слежению, записи временных сигналов и обработке, анализу крутильных колебаний, обработке данных в угловой области, мобильным испытаниям и испытаниям турбин, особенностью которого является возможность параллельного сбора данных и гибкой обработки в масштабе РВ. Пользователь может отслеживать формы колебаний относительно скорости двигателя, регистрировать показания температуры, давления и скоростные характеристики, вычислять порядки, используя высокоскоростные цифровые фильтры, регистрировать исходные временные данные на диске, наблюдать за звуковыми полями с использованием 1/3-октавного анализа в масштабе РВ. Имеется возможность сравнения измерений с эталонной кривой, с осреднением при нескольких разгонах или с ранее собранными результатами. Непосредственно после запуска пользователи могут пролистать серии водопадных диаграмм, переключаться между спектральными, октавными и порядковыми форматами, переключать цветные диаграммы в соответствии с многочисленными пользовательскими стилями отображения, повторно обрабатывать исходные временные данные для измененного шага числа оборотов и др.

**LMS Test.Lab Order Analysis: порядковый анализ**

Решение позволяет определить динамические характеристики изделия в рабочих условиях посредством порядкового и сигнатурного анализа вращающегося и возвратно-поступательно двигающегося оборудования, выявлять неисправности и проверку конструкций на соответствие с заранее установленными техническими условиями. Порядки идентифицируются путем соотнесения измеренных и анализируемых сигналов с гармониками частоты вращения. Порядковый анализ выполняется в автомобилестроении, двигателестроении, судостроении, энергетике и др.

Приложение позволяет идентифицировать шумы, вызванные вибрациями вращающихся частей, и локализовать их источники. Критические рабочие условия конструкции могут определяться посредством разделения шумов и вибраций от вращающихся элементов и от самих конструкций идентификацией критических скоростей и структурных резонансов. Исследуется нестабильность вращающегося оборудования, изучая проблемы точности изготовления и целостности конструкции, задаются функции онлайн-обработки, например, порядковых сечений, частотных сечений, а также многие дополнительные функции, отображаемых как производные каналы. Данные визуализируются во время измерений с использованием нескольких дисплеев.

**LMS Test.Lab Time Data Acquisition & Processing: сбор и обработка временных данных**

Приложение для виброакустических оценочных испытаний в рабочих условиях, а также для психоакустических измерений и диагностики в автомобильной, авиационной и других отраслях машиностроения (например, для крупной бытовой техники, садового инвентаря и т.д.). Позволяет проводить множество измерений параллельно: отслеживать формы колебаний относительно числа оборотов двигателя, записывать температуру, давление и другие скоростные характеристики, одновременно вычисляя порядки с помощью высокоскоростных цифровых фильтров, сохраняя исходные временные параметры на диске и обеспечивая возможность контролировать звуковые поля, используя в РВ 1/3-октавный анализ. Учитываются и анализируются все собранные параметры.

На on-line-дисплеях информация о процессе измерения отображается в масштабе РВ. Другие дисплеи, например, карты спектров, водопадные диаграммы, цветные карты, октавные диаграммы, порядковые сечения и множество индикаторов статуса процесса измерения дают оценку качества испытания, а также поведения испытываемой конструкции. Результаты измерения можно расширять с помощью виртуальных временных реализаций посредством комбинирования каналов физических измерения, используя базовые и продвинутое математические операции.

**LMS Test.Lab Torsional Vibration Analysis: анализ крутильных колебаний**

Пакет определяет, какие шумы вызываются крутильными колебаниями, например, коленчатого вала. Вибрации при крутильных колебаниях вызывают скручивание валов и сочленений вращающегося оборудования. Эти флуктуации накладываются на равномерную эксплуатационную скорость вращения. В результате из-за них возникает целый спектр проблем, которые влияют на характеристики долговечности, виброакустический комфорт. Например, во время пуска-останова двигателя они могут вызывать подергивание педали сцепления, низкочастотную вибрацию (5...20 Гц) в процессе включения сцепления. Пользователи LMS Test.Lab Rotating Machinery: INTA (National Institute for Aerospace Technology, Испания), General Electric (США), Audi, Ford, Opel, НПО «Сатурн», ЦИАМ, ОАО «АВТОВАЗ» и др.

**LMS Test.Lab Acoustics : акустические испытания**

Семейство приложений для решения задач акустики: измерение звукового давления и интенсивности, звуковой мощности, испытание акустических материалов, проездные испытания на внешний и внутренний шум транспортных средств, качество звука, декомпозиции шума с использованием виртуальных моделей, локализация источников внешнего и внутреннего шума с использованием микрофонных решеток методами акустической голографии, фокализации и формирования луча и др.

ПО включают все необходимые функции для сбора и анализа данных по многим каналам 1/1-октавных или 1/3-октавных (соответствующих ANSI стандарту), включают линейные и экспоненциальные методы усреднения для накопления октавных данных в стационарных или переходных рабочих режимах в зависимости от времени или скоростей вращения и для мониторинга динамических, статических и рабочих параметров.

**LMS Transfer Path Analyses – анализ направления передачи**

Семейство приложений направлено на идентификацию структурного и воздушного шума и снижение их виброакустической активности. Имеются прикладные решения для анализа направления передачи шума от одиночных и множественных источников, при работе на разгоне и выбеге и др. ПО реализует различные алгоритмы многоканального сбора и обработки данных, возбуждение звука с помощью объемных источников звука и вибраторов. Решение широко применяется для виброакустической доводки автомобилей.

**LMS Test.Lab Environmental: многоканальный вибрационный контроль и сжатие данных**

Семейство приложений для плановых испытаний в режимах случайных, ударных, синусоидальных и комбинированных возбуждений выполняет функции контроля и всесторонний анализ данных; обеспечивает высокопроизводительное интерактивное сжатие случайных данных, синусоидальных, кратковременных и акустических сигналов. Позволяет произвольно выбирать

физические входы для определения каналов управления, измерения и мониторинга; повторно вызывать калибровочные параметры из БД; осуществлять мониторинг всех параметров в любой момент испытания, а по окончании теста — определить и распечатать результаты с помощью функции пакетного вывода; анимировать геометрию для проверки результатов. Имеются решения для испытаний космических аппаратов, для ММО широкополосного управления, а также лимитированное по числу каналов решение для виброиспытаний LMS Test.Lab Vibration Control.

Пользователи решения: ESA, Alcatel Alenia Space Italia, KARI, ЦАГИ, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, НПО им. С.А. Лавочкина, РКЦ "ЦСКБ-Прогресс", ЦНИИМАШ, ЦНИИ "Комета" и др.

#### **LMS Test.Lab Qualification Testing: квалификационные испытания**

Приложение для испытаний объекта в условиях нормальной и максимальной нагрузки, а также измерений его эксплуатационных характеристик в течение ожидаемого срока службы с помощью системы управления вибрационными испытаниями с обратной связью. Квалификационные виброиспытания обычно проводятся в соответствии с комплексом стандартов для испытаний, и пакет включает все функции, предусматриваемые стандартами MIL STD 810 (США) или GAM EG-13 (Франция). Примеры типичных испытаний: в режимах ударного (классического и с заданием ударного спектра), синусоидаль-

ного, случайного и комбинированного возбуждения, а также испытания при реальном эксплуатационном возбуждении. Приложение обеспечивает высокую степень гибкости при задании настроек для работы с нестандартными техническими характеристиками, что позволяет проводить испытания с более сложными режимами возбуждения, получаемыми из данных полевых испытаний путем подгонки.

#### **LMS Test.Lab Validation Testing для приемочных испытаний**

Средства управления вибрационными испытаниями с обратной связью, включенные в данное приложение, реализуют безопасный, быстрый, точный и надежный алгоритм для испытаний космических аппаратов. Если для испытаний необходимо большее число каналов, система управления виброиспытаниями может быть дополнена системой предварительной обработки данных в РВ. Для повышения сохранности данных предусмотрена дополнительная функция "записи на магнитофон", позволяющая записывать необработанные временные реализации сигналов на протяжении всего процесса испытаний с частотой дискретизации, задаваемой пользователем, не снижая при этом производительность системы предварительной обработки данных в РВ. Собранные данные сразу могут подвергнуться анализу, начиная с трехмерной анимации, модального анализа в рабочих условиях и заканчивая корреляцией с конечно-элементной моделью.

*Панов Сергей Николаевич — канд. техн. наук, специалист ООО "Компания ОКТАВА+".*

*Контактный телефон (495) 799-90-92. [Http:// www.octava-lms.ru](http://www.octava-lms.ru)*

## **НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**С.Н. Зайченко (Холдинг "Информтест")**

*Проанализирована ситуация, сложившаяся в России в области ракетно-космической техники (РКТ) и ее наземных испытаний. Сформулированы основные направления развития современной испытательной базы РКТ в мире. Показано, что основой современной наземной испытательной базы РКТ может стать новое поколение измерителей из класса Synthetic Instruments, в том числе производства холдинга "Информтест" (Москва).*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, испытательная база, импортозамещение, открытые стандарты, модульность, измерительные системы.*

Создание нового поколения ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов различного назначения является одной из приоритетных задач в конкурентной борьбе на рынке космических услуг. Данный рынок имеет свою специфику, при которой важнейшими игроками являются государственные предприятия, а потребителями значительной части продукции этого рынка — частные предприятия, например, операторы связи и пр. Другой важнейшей особенностью рассматриваемого сектора рынка является то, что ракетно-космическая отрасль развивается в основном за счет государства. Получается, что государство развивает принадлежащую ему космическую отрасль (более чем на 90%) в основном старыми затратами советскими методами. Советский подход

хотя и позволил СССР на время вырваться вперед в космической отрасли, но оказался чрезвычайно затратным и экономически неэффективным. В настоящее время мы осознаем, что пока живем в основном за счет советского наследия, а новые разработки оборачиваются для нас огромными затратами. Если проанализировать проводимые современные опытно-конструкторские работы и работы по подготовке производства, становится ясно, что без изменения старого советского подхода к созданию новых образцов в стране на эти разработки никаких средств не хватит. Кроме того, в период 2009...2020 г. основная масса наземной космической инфраструктуры, средств испытаний и другого технологического оборудования, созданные в советский период, из-за ста-