

Продолжаем публикацию серии статей об основных направлениях работ корпорации *LMS International*, начатую в #2/2011.

Современные решения компании *LMS* для наземных частотных испытаний больших самолетов

Bart Peeters (LMS International, Бельгия), Hector Climent (EADS CASA, Испания)

Завершающим этапом разработки самолета являются наземные частотные испытания (*Ground Vibration Testing – GVT*). Их задача – получить экспериментальные данные по вибрации для всех его конструкций, что необходимо для улучшения и валидации динамических моделей. Эти модели используются для прогнозирования поведения летательного аппарата в случае возникновения флаттера и для планирования критичных для безопасности летных испытаний.

Последние технологические достижения позволили сократить сроки испытаний и анализа данных без ущерба для точности результатов. Высокая эффективность испытаний достигается за счет интеграции взаимодополняющих методов возбуждения вибраций в единую программную среду. Встроенные средства модального анализа обеспечивают возможность валидации данных испытания практически в режиме реального времени.

Кроме того, планирование наземных частотных испытаний (**НЧИ**) может осуществляться с помощью виртуального прототипа. Интегрированное использование физических моделей для испытаний и компьютерных конечно-элементных (**КЭ**) моделей обеспечивает возможности оптимального планирования НЧИ и генерации обновленных КЭ-моделей сразу после проведения испытания.

В этой статье мы расскажем об успешном применении новой 700-канальной системы НЧИ компании *LMS International* во время демонстрационных испытаний телескопической заправочной системы и сертификационного испытания самолета *A330 MRTT*.

Компания *EADS CASA*

Испанская компания *EADS CASA (Construcciones Aeronauticas SA)* входит в консорциум *EADS (European Aeronautical Defense and Space Organization)*, который занимается созданием авиационной и космической техники. Её подразделение военно-транспортной авиации (*Military Transport Aircraft Division – MTAD*) имеет большой опыт проектирования и изготовления передовых аэроконструкций, оно может строить полностью готовые самолеты и сертифицировать их.

В настоящее время здесь производятся агрегаты планера самолета для многих авиационных

программ: горизонтальные стабилизаторы (*A400M, Falcon 7X*); рулевые поверхности (*B-777, B-737, Falcon 7X, A400M, Eurofighter*); гондолы двигателей; кожухи вентилятора, изготавливаемые из композитных материалов (*A340-500/600, A380, A318*), металлоконструкции (*A380 – обтекатель центроплана фюзеляжа, A318 – кожухи вентилятора, A320 – секция 18, A330/340 – центральный отсек*); носовая часть для *Airbus. MTAD* предлагает кастомизированные решения на основе двух платформ: *A310-300* и *A330-200*.

Сертификацию самолетов *A330 MRTT* и *A400M* подразделение *MTAD* проводило в сотрудничестве с компаниями *Alava Ingenieros* и *LMS International*, что было необходимо для обновления измерительной системы для частотных испытаний.

Целью программы летных испытаний *EADS CASA* стала проверка эффективности новой телескопической дозаправочной штанги, установленной на *Airbus*. Программа включала в себя такие действия, как подготовка и отработка стыковки с истребителем *F-16* – всухую и с топливом. Результаты предварительного испытания показали, что платформа самолета и конструкция штанги не подвержены вибрациям типа флаттера. Установленная штанга минимально влияет на управляемость самолета и совершенно не влияет на приток воздуха во вспомогательную силовую установку (*Auxiliary Power Unit – APU*).

Многоцелевой транспортный самолет-заправщик *A330 MRTT (Multi Role Transport Tanker)* может нести запас топлива объемом 140 000 литров, сохраняя при этом возможность перевозки пассажиров и грузов.

Новая система дозаправки включает: усовершенствованную телескопическую штангу *ARBS (Aerial Refuelling Boom System)*, установленную в хвосте самолета; систему “шланг-конус”, установленную в двух подкрыльевых контейнерах производства британской компании *Cobham*; цифровую систему *FRU (Fuselage Refuelling Unit)*, которая также представляет собой “шланг-конус”, но располагается в фюзеляже; универсальный воздушный приемник топлива *UARRSI (Universal Aerial Refuelling Receptacle Slipway Installation)*, используемый для приема топлива на топливозаправщик от других танкеров.

История, проблемы и тенденции НЧИ

Основная цель НЧИ – экспериментальное определение низкочастотных мод колебаний конструкции планера самолета для валидации и уточнения его динамической модели, что является частью процесса устранения флаттера. Усложнение конструкций самолетов выдвинуло дополнительные требования по испытанию, связанные с ростом применения композиционных материалов, активных систем (управления, шумоподавления и др.) и необходимостью количественной оценки нелинейного поведения конструкции.

С учетом сложности испытаний, необходимость увязать требования к точности их результатов с требованиями по сокращению затрат и сроков НЧИ, стимулирует инженеров к дальнейшим поискам. Одним из направлений является объединение натурных испытаний с методами САЕ.

Более трех десятилетий при НЧИ больших самолетов применяется метод фазового резонанса, или метод нормальных мод (мода – набор характерных для колебательной системы типов гармонических колебаний), поскольку он хорошо подходит для разделения близко расположенных мод колебаний. Суть метода заключается в том, что к конструкции прикладывается синусоидальное возбуждающее воздействие, соответствующее собственным частотам колебаний. Путем точного выбора мест расположения вибраторов и подбора фазового сдвига синусоид, самолет нагружается как система с одной степенью свободы, и его вибрационный отклик содержит только вклад от этой интересующей моды.

Главным недостатком метода является то, что эта процедура очень затратна по времени выполнения испытаний. Поэтому метод фазовых резонансов или метод идентификации мод колебаний дополняется методом разделения фаз или методом выделения мод колебаний по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) конструкции. Большая часть мод выделяется на основе быстрого метода разделения фазовых резонансов, но “критические” моды идентифицируются с помощью испытаний по методу нормальных мод. “Критическими” моды считаются в тех случаях, когда они значительно отличаются от прогнозируемых, демонстрируют нелинейное поведение, либо когда они важны для расчета флаттера.

Начиная с 1980-х годов, компания EADS CASA продвигает метод “случайного возбуждения” при испытаниях больших и среднеразмерных самолетов. Этот подход успешно применялся при проведении НЧИ для учебного самолета модели C-101, к нему же компания прибегла в 1990-х годах для частотных испытаний прототипа истребителя Eurofighter DA6.

Для экспериментального определения широкополосной АЧХ самолета могут использоваться несколько типов возбуждающих сигналов, создаваемых вибратором. Это могут быть гармонические сигналы – такие, как пошаговый синус, периодические сигналы – набор синусоид или перебор синусоид, а также импульсные сигналы, (пакетные) случайные сигналы и развертка по синусу. Они отличаются как по спектральному распределению энергии, так и по продолжительности проведения испытаний. Возбуждение с использованием развертки по синусу модулированной синусоидой переменной частоты представляет собой компромисс между требуемым уровнем магнитуды возбуждения и временем проведения испытаний.

Наземные частотные испытания в EADS CASA

Испытательное оборудование

При проведении частотных испытаний инженеры EADS CASA и Alava Ingenieros сотрудничали со специалистами компаний LMS International.

Управление вибрационным оборудованием и запись сигналов с датчиков осуществлялись с помощью 700-канальной системы сбора данных компании LMS (рис. 1). Эта система состоит из четырех фронтальных стоек SCADAS III, соединенных в режиме ведущий/ведомый с 8-ю генераторами сигналов возбуждения и 700-ми измерительными каналами. LMS SCADAS III – полностью цифровая стойка, имеющая один аналого-цифровой преобразователь с сигма-дельта модуляцией на каждый канал и 24-битный канал передачи данных с ультранизким уровнем шума.

Модули V12 обеспечивают питание и согласование сигналов стандарта ICP (Integrated Circuit Piezoelectronic) и TEDS (Transducer Electronic Data Sheet – память для хранения информации с сенсоров). Коммутация датчиков в стойке осуществляется в двух выдвижных полках с распределительными панелями.

Помимо ПК, который обрабатывает и хранит данные, имеются две станции, выполняющие модальный анализ на месте, что обеспечивает оптимальное использование времени и технических ресурсов. Компьютеры оснащены программным обеспечением LMS Test.Lab для сбора и анализа данных. Это ПО позволяет, работая с одной и той же базой данных, комбинировать в единой пользовательской среде все тестовые режимы НЧИ: случайный MIMO (Multi Input Multi Output), с разверткой по синусу, с пошаговым синусом и



Рис. 1. 700-канальная система компании LMS для сбора данных при наземных частотных испытаниях

нормальных мод (для систем со многими входами и выходами).

Неразрывная интеграция процессов проведения испытаний и анализа его результатов реализуется за счет того, что возможности для анализа предлагаются как встроенные функции оборудования *LMS*, позволяющие оценить собственные частоты почти в режиме реального времени, что является продвинутым способом обеспечения качества измерений и надежности данных.



Рис. 2. Многоцелевой транспортный самолет-заправщик A330 Multi Role Transport Tanker компании EADS

Условия испытаний

В ходе испытаний самолет должен находиться в состоянии “готов к полету”, и его конфигурация должна максимально соответствовать условиям летных испытаний. Системы органов управления полетом должны быть в рабочем состоянии и установлены в положение 0°. Системы управления закрылками и предкрылками должны находиться в рабочем состоянии, закрылки должны быть убраны и заблокированы. Системы управления стабилизатора – в рабочем состоянии, горизонтальное хвостовое оперение установлено в положение 0°. Гидравлические системы включены. Заправочная штанговая система – опустошена и убрана. Шасси выпущены, давление в шинах отрегулировано, чтобы воспроизвести граничные условия, соответствующие незакрепленному свободному поведению конструкции.

Испытания методом разделения фаз при случайном воздействии

Первым стало испытание, проводимое путем подачи на конструкцию случайных возбуждений от шести вибраторов, размещенных на крыльях и горизонтальном хвостовом стабилизаторе. Такое испытание дает предварительную информацию о расположении резонансов. При этих испытаниях

на низких частотах конструкция возбуждается сигналом с низким уровнем энергии. Иногда при этом наблюдается некорректное поведение точек возбуждения и, как результат, получение плохих параметров обратимости. В этом случае необходимо добавить массу к вибратору, так чтобы ограничивающим фактором возбуждения становился уровень сил, а не ход штока вибратора.

Для выделения мод к АЧХ, полученным за один проход

при случайном возбуждении, был применен метод *LMS PolyMAX* (рис. 3). С его помощью в ходе одной сессии анализируется широкая полоса частот, содержащая большое количество мод. Индикатором качества измерений является функция когерентности, которая объединяет влияние рассеяния, шума и нелинейных эффектов на АЧХ для каждой степени свободы. Из-за большого количества каналов, просмотр всех когерентных функций является занятием обременительным. Здесь может помочь усреднение функций когерентности для заданного диапазона частот и отображение средних значений для каждого положения датчика. Функции когерентности для близко расположенных и конструктивно связанных датчиков не должны сильно отличаться. Качество АЧХ для крыльев – относительно хорошее, в то время как для фюзеляжа и хвостового оперения значение функции когерентности было меньше.

Испытания методом разделения фаз при возбуждении синусоидальным сигналом переменной частоты

Следующим испытанием стало *MIMO*-возбуждение синусоидальным сигналом переменной частоты с помощью двух вибраторов,

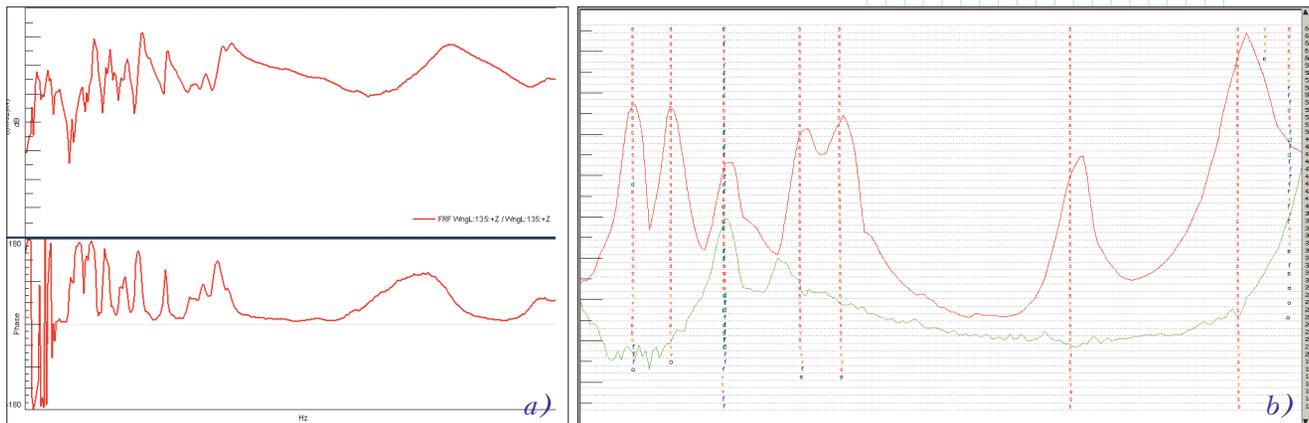


Рис. 3: а – точка возбуждения АЧХ при испытании методом случайных возбуждений; б – диаграмма стабилизации в модуле LMS PolyMAX при возбуждении разверткой по синусу

прикрепленных в разных местах самолета. Качество АЧХ, полученных в результате такого испытания, было более высоким, чем при возбуждении случайным сигналом. Для оценки модальных параметров использовалось программное обеспечение *PolyMAX* (рис. 3б).

Интересно посмотреть на АЧХ в системе измерений. Это передаточные функции (N/V), выражающие связь между напряжением исходного сигнала в вольтах (V) и фактическим значением силы (N), измеренным датчиками. На низких частотах АЧХ в системе измерений не являются плоскими. Также очевидно, что напряжение, подаваемое на один вибратор, значительно влияет на показатели силы, измеряемые для другого вибратора. Это является следствием сильного взаимодействия вибраторов и конструкции, свойственного для полосы низких частот.

Испытание методом фазового резонанса

Результаты испытаний с *MIMO*-возбуждением синусоидальным сигналом переменной частоты были подтверждены с помощью метода фазового резонанса. С помощью метода фазового резонанса проводилось испытание следующих мод колебаний: всех мод двигателя; мод горизонтального хвостового оперения при поворотах вокруг вертикальной и продольной осей; мод руля высоты. Алгоритм автоматической настройки немедленно фиксирует исследуемые моды. Когда мода точно настроена, действительная составляющая должна быть нулевой. Кроме того, выполнялось испытание в нелинейном режиме. Процедура настройки повторялась для пяти разных уровней воздействия, и была установлена связь между собственной частотой нормальных мод колебаний и уровнем воздействия.

Формы мод

Несколько типовых “измеренных” форм мод колебаний самолета *A330* представлены на рис. 4.

Интегрированное использование КЭ-моделей

КЭ-модели, созданные до проведения НЧИ, могут использоваться для прогнозирования динамических характеристик самолета и для определения оптимального размещения датчиков и длительности испытания. КЭ-модель самолета *A330 MRTT* представлена на рис. 5а.

Нормальные моды колебаний, полученные на основании КЭ-модели до испытания, позволяют оценить собственные частоты и формы самолета. Эта информация используется для определения условий возбуждения, мест расположения вибраторов и датчиков. Перед началом НЧИ самолет вывешивается и измеряются его собственные частоты колебаний как твердого тела. На основе этих результатов выполняются расчеты следующих нормальных мод колебаний конструкции. После того как получены измеренные в результате испытаний массы и граничные условия, сравнение всех упругих мод покажет, нуждается ли КЭ-модель в коррекции. Если частоты отличаются больше, чем на 5%, то модель необходимо подправить, чтобы учесть локальные эффекты или отсутствующие компоненты. Диаграмма на рис. 5б позволяет сопоставить измеренные и расчетные значения нормальных мод колебаний для *A330-MRTT*. Она показывает, что все частоты расположены очень близко к прямой, построенной под углом 45 градусов, что свидетельствует об очень хорошем совпадении.

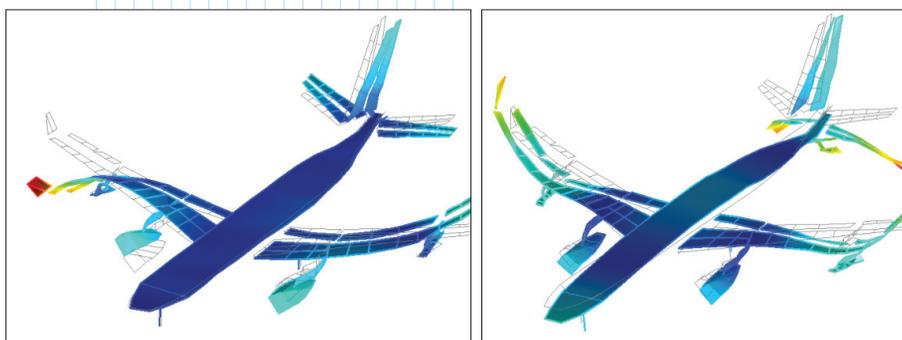
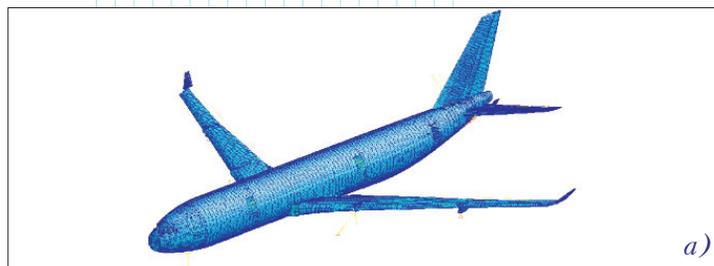
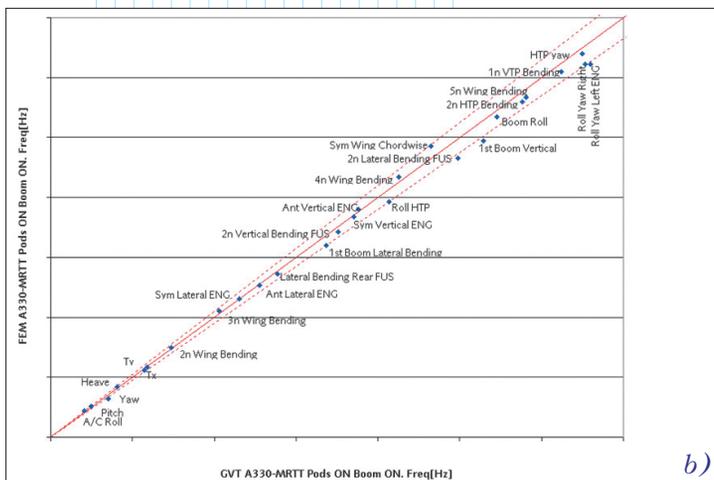


Рис. 4. Формы мод колебаний самолета *A330 MRTT*



а)



б)

Рис. 5: а – КЭ-модель самолета *A330 MRTT*; б – диаграмма сопоставления спрогнозированных и измеренных в ходе НЧИ нормальных мод