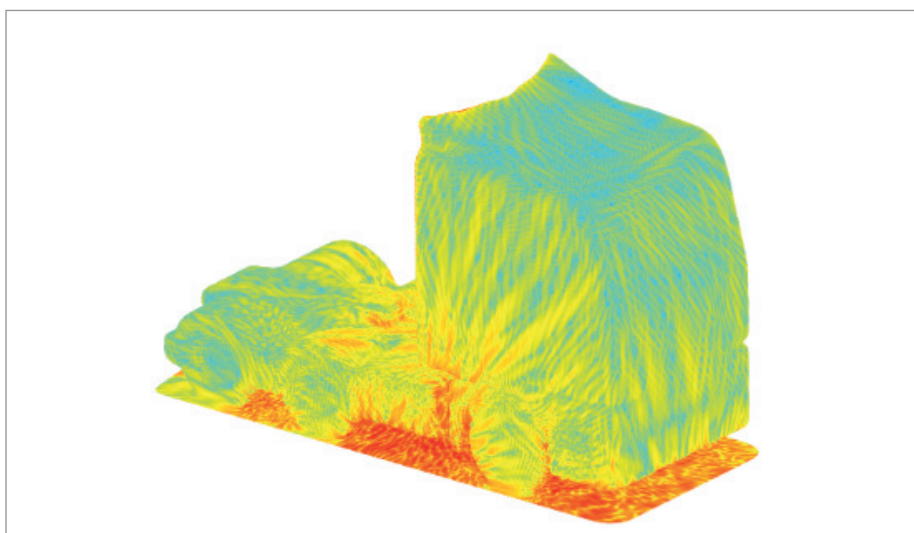


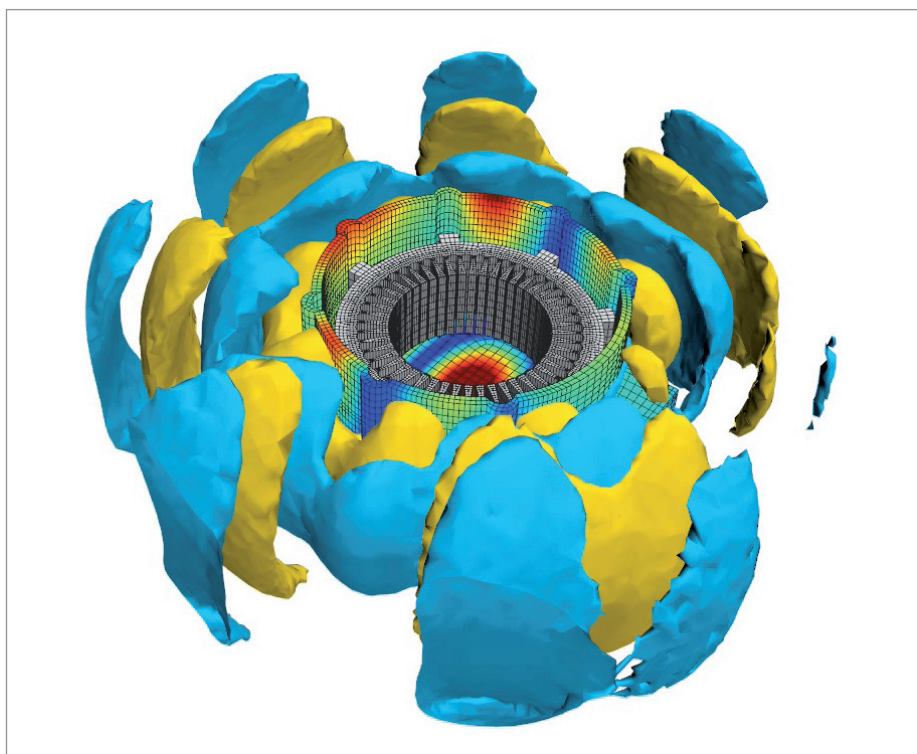
➤ АНАЛИЗ АКУСТИКИ, ВИБРОАКУСТИКИ И АЭРОАКУСТИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АСТРА. ОБЗОР ОСНОВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Цели анализа акустики

Защита человека от шума и вибраций, а также обеспечение акустического комфорта при эксплуатации технических систем являются важными задачами при разработке новых изделий в различных производственных отраслях. В ряде случаев для достижения прочности и долговечности элементов конструкций и работы электронных систем требуется произвести анализ акустической нагруженности. Вычислительные методы такого анализа активно применяются разработчиками технических устройств для оценки влияния конструктивных параметров изделий на акустические характеристики, для повышения эффективности использования звукопоглощающих материалов и т.д.



Внешний шум от работы двигателя и трансмиссии грузового автомобиля



Излучение шума корпусом электродвигателя

Общие сведения о системе Astrap

Astrap — программный комплекс для компьютерного моделирования возникновения, распространения и поглощения звука в акустических средах (воздух, вода и др.). Он включает в себя модули для решения следующих классов задач:

- акустика и виброакустика в частотной и временной области;
- аэроакустика с прямым вычислением источников шума;
- аэроакустика с генерацией шума в Astrap;
- аэроакустика ГТД — специализированные модули;
- акустика с применением статистического энергетического метода;
- ряд специализированных модулей:
 - генерация профилей и шума вентиляторов;
 - анализ виброакустики на основе теоремы Грина;
 - "пленочный" анализ виброакустики на основе форм колебания вибрирующих поверхностей;
 - определение модального состава шума в каналах для последующего использования в качестве источников;
 - вычисление передаточных функций в виде постпроцессинга результатов, вычисление откликов на основе этих функций и других задач.

В состав Astrap входит удобная современная специализированная графическая среда Astrap VI для создания моделей, обработки и визуализации результатов.

Типичные области применения Astrap — моделирование внутренних и внешних акустических полей различных транспортных систем (например, шума в подкапотном пространстве автомобиля и воздействия шума на водителя и пассажиров в салоне; акустических характеристик системы выпуска двигателя внутреннего сгорания; шума в салоне самолета от различных внешних воздействий и т.д.). Кроме того, комплекс позволяет осуществлять подбор характеристик и конструкций звукопоглощающих устройств и покрытий, а также производить акустический анализ характеристик потребительских товаров, таких как динамик мобильного телефона, отдельные стоящие акустические системы, музыкальные инструменты и т.п.

Анализ акустики и виброакустики

Решение акустических и виброакустических задач обеспечивает возможность определения акустических полей при работе различных технических устройств.

В основе Astrap лежат методы конечных и бесконечных элементов, позволяющие моделировать акустические эффекты как в замкнутых объемах (полостях), так и в открытом пространстве с учетом ус-

ловий неотражения звука на границах расчетной области. Богатая библиотека элементов и материалов предоставляет широкие возможности для моделирования. Ее основу составляют одномерные, двумерные и трехмерные элементы для решения трехмерных, двумерных и осесимметричных задач, многоточечные связи, бесконечные элементы и др. Представленные в Astrap материалы позволяют моделировать акустические среды (газы, жидкости) с учетом вязко-термических потерь, упругие конструкционные материалы с учетом демпфирования, слоистые композиционные материалы, звукопоглощающие материалы и перфорированные панели в различных постановках, материалы с пьезоэлектрическими свойствами и др.

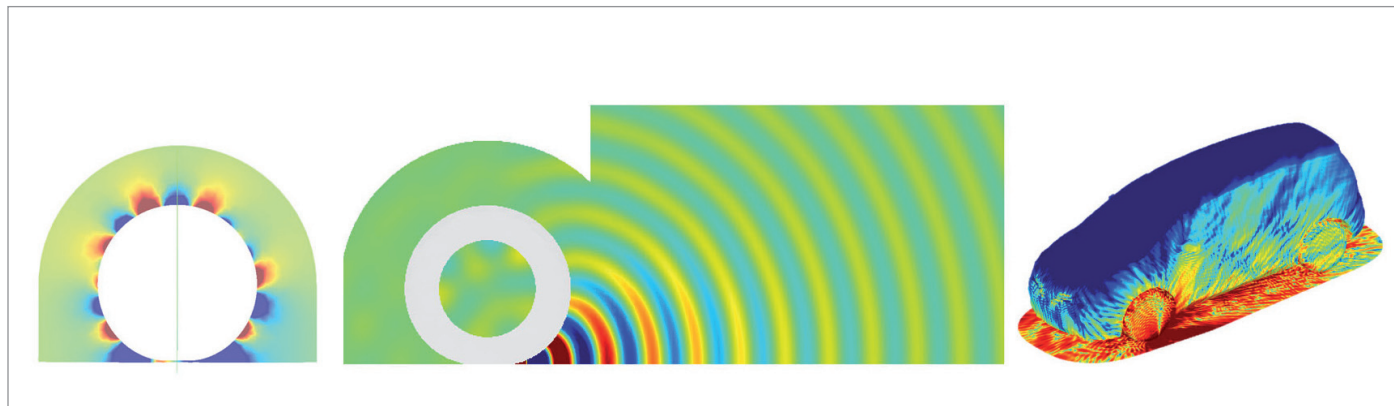
Анализ акустики может производиться в детерминированной или случайной постановке в частотной области прямым или модальным методом. Во временной области возможно проведение анализа переходных виброакустических процессов.

В качестве внешней нагрузки и граничных условий могут рассматриваться источники шума различных типов: монополи, диполи, плоские волны, случайные флуктуации давлений на поверхностях, объемные и поверхностные источники на основе акустических аналогий Лайтхилла и Мёринга, нагрузки от роторов в численной и аналитической постановке, электрические токи, вынужденные колебания акустической среды в каналах постоянного сечения — каналные моды; граничные условия по давлению, перемещению, скорости, ускорению и др. Поддерживается широкий набор граничных условий: импеданс, адмиттанс, звукопоглощающие конструкции, коэффициент поглощения, условия непроницаемости, структурные граничные условия и др.

Кроме того, Astrap позволяет проводить расчет собственных частот и форм, пленочный анализ, анализ на основе теоремы Грина, отдельное формирование и использование моделей звукопоглощающих материалов. В результате расчета выводятся поля акустического давления и частотные спектры, в том числе могут быть автоматически рассчитаны величины в дБ, дБА в октавных и третьоктавных полосах, общий уровень звукового давления и многое другое.

Шум шин

Снижение шума при взаимодействии шин с дорожным покрытием, водой



Распространение шума шины. Результаты расчета в Atran (по материалам компании Renault)

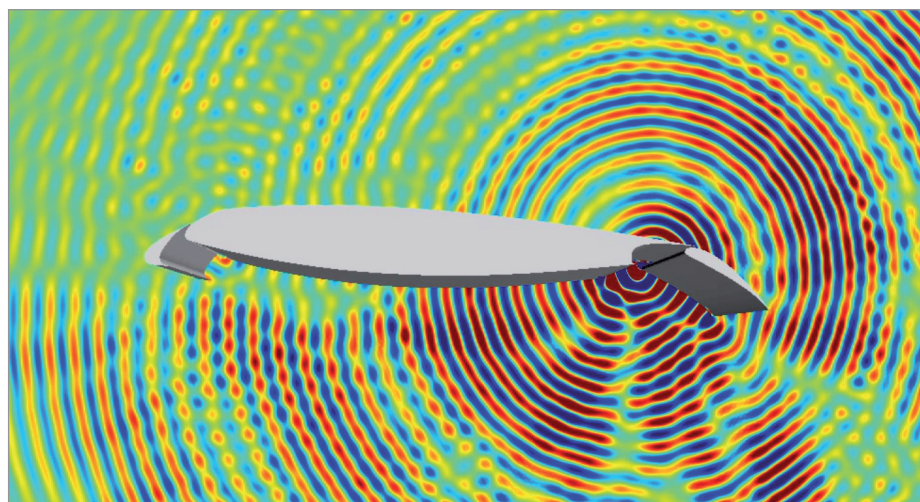
и воздухом во многих случаях является необходимым для снижения общего шума транспортного средства. Разработка перспективных конструкций малозумных шин требует расчетного исследования.

В Atran реализован подход к комплексному анализу шума шин на основе не-

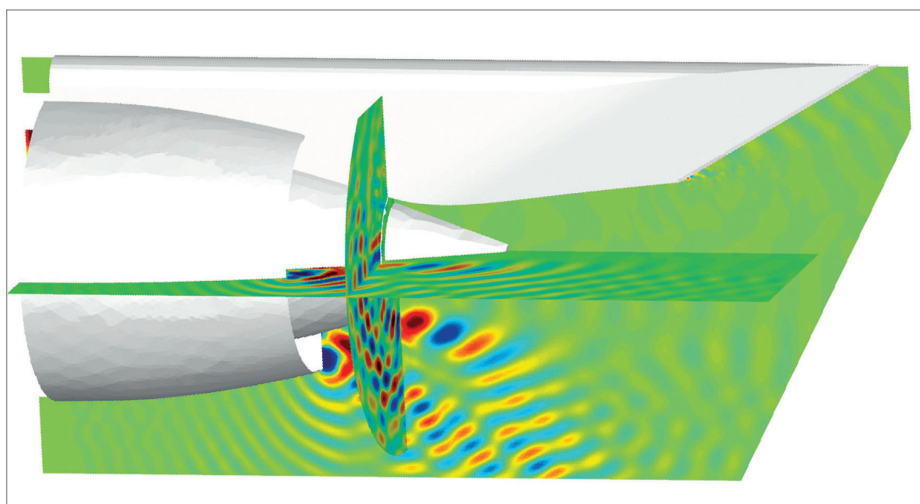
линейного динамического анализа качения шины, который можно проводить в системе Marc или других системах с последующим анализом генерации и распространения шума в Atran.

Большие перемещения шины в пространстве и большие деформации материала шин являются препятствием для

проведения акустических расчетов в сторонних системах. В Atran реализован эффективный алгоритм разделения больших углов поворота шины и сравнительно малых вибрационных компонентов ее движения. В результате работы этого алгоритма могут быть получены исходные данные для расчета шума шины.



Шум обтекания профиля крыла с элементами механизации



Шум выходного устройства газотурбинного двигателя (по материалам компании Airbus)

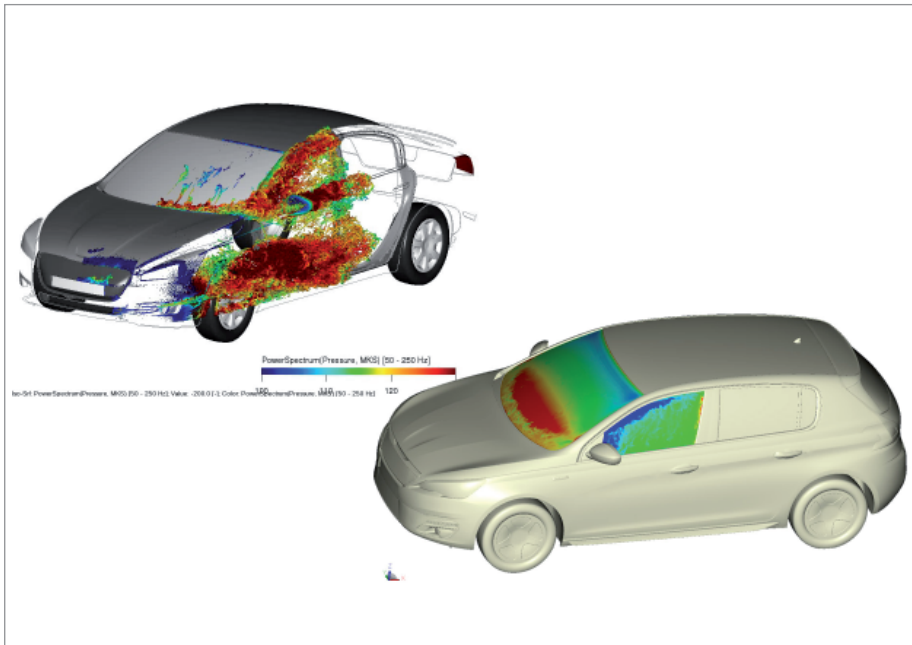
Анализ шума турбулентных течений акустических сред

Во многих случаях возникновение шума обусловлено явлением турбулентности в потоке газа (воздуха). Общеизвестными примерами являются шум газотурбинных и ракетных двигателей, шум от обтекания воздухом транспортных средств, шум при работе систем вентиляции и кондиционирования и т.д. Анализ уровней аэроакустического шума может проводиться с использованием модуля Atran AeroAcoustics.

Гибридный подход к анализу аэроакустики, принятый в Atran, включает в себя два этапа: на первом этапе производится анализ гидрогазовой динамики на дозвуковых скоростях в специализированной системе, например в MSC Cradle CFD; на втором – вычисляются генерация и распространение шума в акустической среде с помощью системы Atran.

Основными физическими величинами, которые требуются для расчета шума гибридным методом, являются векторное поле скорости и поле плотности нестационарного течения газа или жидкости. Для импорта этих данных Atran напрямую интегрирован с широко распространенными системами анализа гидрогазовой динамики, а также позволяет загружать данные в общепринятых форматах EnSightGold и CGNS.

В Atran производится расчет источников шума в потоке, перенос их на акустическую расчетную модель и расчет



Анализ шума обтекания бокового зеркала заднего вида при движении автомобиля (по материалам компании Groupe PSA)

распространения шума с учетом неоднородного поля средней скорости течения акустической среды. Расчет источников шума осуществляется в модуле Actran AeroAcoustics на основе акустических аналогий Лайтхилла и Мёринга. Анализ аэроакустики турбомашин является сложной и актуальной задачей. Проблемно-ориентированные модули Actran позволяют с высокой точностью моделировать шум воздухозаборников и проточных частей турбомашин (модуль ActranTM), а также шум выходных устройств (сопла) с помощью разрывного метода Галёркина с использованием неструктурной р-адаптивной конечно-элементной сетки (Actran DGM).

Генерация и распространение случайного шума

В связи с большой ресурсоемкостью расчетов аэроакустики, а также общей тенденцией проводить расчеты на ранних этапах разработки изделий при отсутствии точной геометрической модели, может возникнуть потребность в приближенном, но быстром методе оценки шума турбулентного течения. "Генерация и распространение случайного шума" (SNGR) – новый метод в Actran, основанный на результатах расчета установившегося течения газа (как правило, методом RANS) и предположении о распределении энергии турбулентного течения между вихрями различных пространственных масштабов в форме за-

данного энергетического спектра. Пространственная ориентация и фазы колебаний акустической среды считаются случайными. Решатель Actran производит генерацию случайного шума, после чего рассчитывает его распространение в акустической среде. По умолчанию используется полуэмпирический энергетический спектр Кармана-Пао, однако пользователь может применить и другие спектры. Метод SNGR активно используется в автомобильной и других отраслях.

Решение задач акустики статистическим энергетическим методом – Virtual SEA

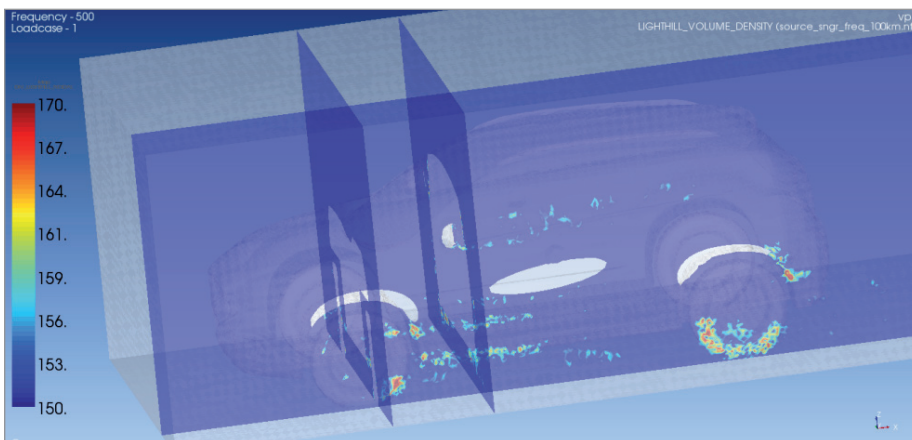
При обработке мер по снижению воздействия шума на человека и высокочувствительные устройства может возникнуть необходимость анализа акустических воздействий на относительно высоких частотах. Традиционные методы анализа частотного отклика прямым или модальным методами являются чрезвычайно ресурсоемкими и не могут быть эффективно применены. Использование энергетического метода расчета виброакустики, который реализован в модуле Actran Virtual SEA, является в этом случае менее затратным, при этом обеспечивая сравнимую точность расчета.

Для определения частотного диапазона применения статистического энергетического метода принимаются два допущения:

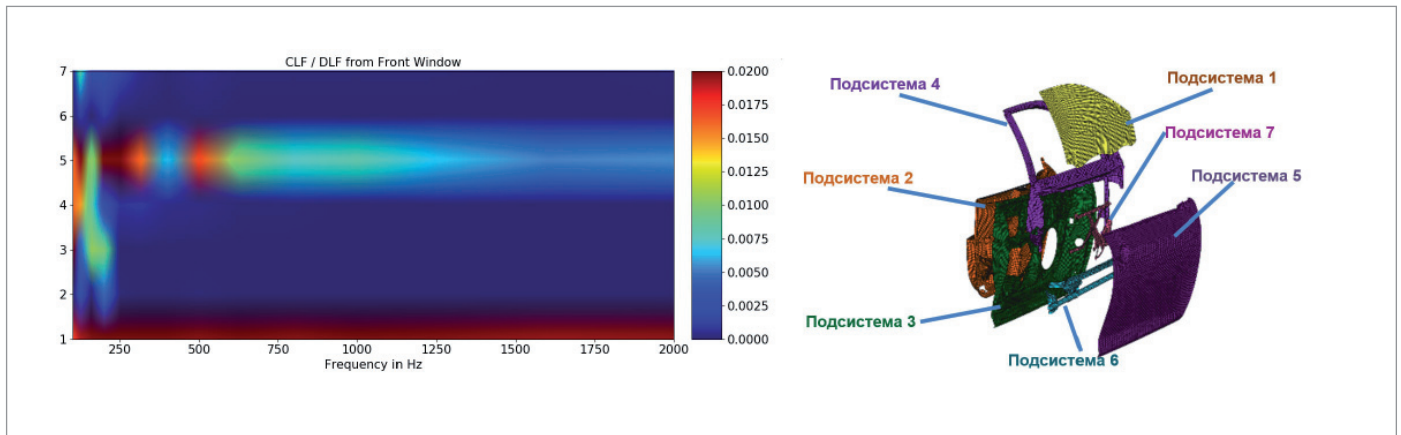
- энергия колебаний распределена между большим количеством форм собственных колебаний системы с примерно одинаковой амплитудой и длиной волны;
- механические свойства системы плавно изменяются с частотой.

В изделиях машиностроения эти допущения выполняются, как правило, на частотах выше 1 кГц. Первое допущение позволяет сделать предположение о случайном характере распределения энергии колебаний, в связи с чем статистический метод оценки энергии колебаний дает хорошее приближение к величинам энергии в натуральных объектах. Второе допущение позволяет провести расчет механических свойств системы для нескольких частот вблизи нижней границы частотного диапазона исследования энергетическим методом и экстраполировать их изменение на более высокие частоты.

Статистический энергетический метод анализа виброакустики известен с 60-х годов прошлого века. Этот приближенный



Шум обтекания автомобиля. Плотность источников шума, рассчитанных в Actran с применением метода SNGR (по материалам компании Mitsubishi)



Коэффициенты энергетической связи для подсистем. Виброакустическая модель двери автомобиля

метод расчета основан на представлении исследуемой системы в виде набора компонентов, для которых производится расчет энергетического баланса. Энергия, поступающая от внешних воздействий, возбуждает гармонические колебания в компонентах, накапливается и передается между ними. Кроме того, она может поглощаться и излучаться в окружающее пространство. Целью расчета является вычисление энергии, которая будет накапливаться в каждом компоненте, а также путей передачи энергии. На основе этих результатов можно делать выводы о вибронегруженности узлов и агрегатов натурального изделия. Зная основные пути передачи энергии в системе, можно указать на участки конструкции, модификация которых даст наибольший эффект по снижению уровня шума и вибраций.

В системе Astrap реализован один из новых подходов к реализации статистического энергетического метода. Предложенный в 2003 году, этот метод позволяет использовать стандартные конечно-элементные модели конструкций и акустической среды для формирования компонентов энергетической модели. На основе конечно-элементных моделей по встроенным в Astrap методикам автоматически формируются компоненты энергетической модели, вычисляются коэффициенты энергетической связи между компонентами и коэффициенты потерь в самих компонентах.

Пользователь строит расчетную модель для виброакустического расчета. Размер элементов подбирается таким образом, чтобы модель с инженерной точностью воспроизводила колебания в области нижней границы частотного диапазона для расчета энергетическим методом. Пользователь выделяет компоненты энергетической модели путем деления

своей модели на части. Размер каждого компонента должен быть таким, чтобы для него выполнялись допущения, указанные выше.

Собственно расчет статистическим энергетическим методом в Astrap производится в два этапа. На первом этапе Astrap вычисляет характеристики компонентов энергетической модели, включая распределение энергии, коэффициенты энергетической связи и коэффициенты потерь для набора исследуемых в расчете частот.

На втором этапе в качестве внешнего воздействия пользователь может прикладывать как его мощность, которая может быть напрямую использована в энергетической модели, так и различные распределенные нагрузки, детерминированные и случайные. На основе таких нагрузок система Astrap вычисляет мощность воздействия и прикладывает ее к энергетической модели.

Результатами расчета являются энергия в каждом компоненте, потоки энергии между компонентами, а также пути передачи энергии. С рядом допущений можно вычислять также акустические давления и деформированное состояние изделий.

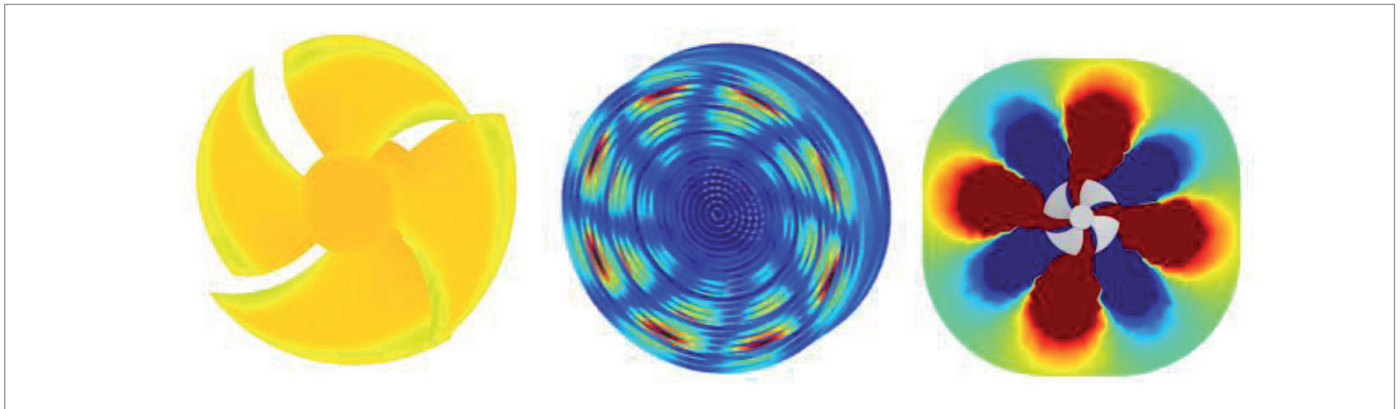
Реализация энергетического метода в Astrap имеет ряд преимуществ:

- при расчете можно использовать традиционные расчетные модели для анализа виброакустики в частотной области; реализована полная интеграция со стандартными методами и графическими средами для построения расчетных моделей;
- модели могут иметь произвольную конфигурацию, они не привязаны к нескольким стандартным формам, могут содержать конструкции, акустическую среду и звукопоглощающие материалы, а также широкий набор внешних воздействий;

- расчетные модели для решения задач энергетическим методом могут быть применены как для более высоких, так и для более низких частот, чем те, для которых они созданы; таким образом можно охватить широкий диапазон частот и убедиться в физической корректности решения;
- обеспечена возможность расчета и визуализации потоков энергии и путей передачи энергии для моделей произвольной конфигурации.

Непараметрическое варьирование свойствами

Одним из способов исследования акустики изделий в условиях неопределенности механических и инерционных свойств является непараметрическое варьирование свойствами. Типовая область применения этого метода — анализ виброакустики в среднечастотном диапазоне, когда стандартные подходы к моделированию несущих конструкций могут не давать надежных результатов. Например, это происходит в тех случаях, когда собственные формы колебаний изделия имеют малую длину волны, сопоставимую с размером отверстий, фасок, скруглений, мелких деталей сборок, покрытий и др., которые должны быть отброшены для упрощения расчетной модели. Кроме того, в таких случаях сложно учесть, как зависят свойства от затяжки крепежных элементов, обжатия прокладок, контакта с силовым набором и т.д. Неопределенность механических свойств может быть учтена в модели путем ввода в расчет случайных отклонений членов матриц (импедансной матрицы). В этом случае результатами расчета являются области возможного изменения откликов: акустических давлений, перемещений механической модели и др. Принимая нормальный закон



Профилирование лопаток вентилятора для системы охлаждения. Этапы построения модели и расчета в Actran

распределения отклонений откликов, можно определить, какие их величины не будут превышены с заданной вероятностью (например, 0,997 для "3 сигма"). Такие результаты могут иметь практическое значение, и они более полно отражают характеристики натуральных изделий на средних частотах. Для изделий машиностроения описанный метод, как правило, применяется на частотах 0,6-1,2 кГц и хорошо дополняет стандартные подходы к анализу виброакустики.

Actran предлагает удобный графический интерфейс для задания случайных отклонений свойств, а также возможность вывода диапазонов изменения откликов в виде графиков, заливок и др.

Сравнительный анализ шума вентиляторов с различной геометрией лопаток

Во многих изделиях машиностроения (например, в транспортных машинах, технологическом оборудовании, вычислительных устройствах и др.) шум вентиляторов вносит существенный, а иногда и основной вклад в общий генерируемый шум. Выбор профилей лопаток вентиляторов по критерию шума, разработка ограждающих конструкций с целью снижения шума при одновременном обеспечении протекания воздуха и других сред – актуальная техническая задача.

В системе Actran предусмотрен широкий набор инструментов моделирования и анализа шума вентиляторов и компрессоров различных типов, размеров и сложности.

В частности, имеются удобные средства формирования профилей вентиляторов на основе их общих геометрических размеров и стандартных профилей. Полу-

ченные профили можно средствами Actran "продуть" для ускоренного получения параметров установившегося течения газа в области лопатки. Затем с помощью Actran можно сформировать случайные источники шума, распределение которых по частоте и в пространстве близко к натурным для большинства случаев. Последующий расчет распространения шума с учетом конфигурации корпусных деталей изделия показывает акустические характеристики всего устройства. Такой быстрый способ

женных как в канале, так и в открытом пространстве.

Методика анализа аэроакустики в Actran также позволяет вычислять источники аэроакустического шума и включать их в виброакустическую модель Actran.

Комплексное применение различных модулей Actran и других систем (MSC Cradle CFD, MSC Nastran, Adams и др.) позволяет с высокой эффективностью и точностью анализировать акустические характеристики изделий с вентиляторами или компрессорами.

Типичные области применения Actran – моделирование внутренних и внешних акустических полей различных транспортных систем (например, шума в подкапотном пространстве автомобиля и воздействия шума на водителя и пассажиров в салоне; акустических характеристик системы выпуска двигателя внутреннего сгорания; шума в салоне самолета от различных внешних воздействий и т.д.)

Высокопроизводительные вычисления в Actran

Actran предоставляет возможность использования нескольких высокоэффективных алгоритмов, обеспечивающих высокую скорость решения задач акустики, которые в большинстве случаев требуют значительных машинных ресурсов.

Тесная интеграция Actran с MSC Nastran, Adams, MSC Cradle CFD и Dytran позволяет эффективно использовать сильные стороны каждого из продуктов. Например, проводить анализ колебаний конструкции с применением MSC Nastran (точность и скорость выполнения такого расчета общепризнанны), а моделирование распространения шума – с помощью Actran.

Широкий спектр решаемых задач позволяет применять Actran при разработке перспективных моделей автомобильной, авиационной, космической, железнодорожной техники, потребительских товаров, электроники, промышленных систем добычи и переработки полезных ископаемых и т.д.

*Александр Жарков,
старший технический специалист
MSC Software
E-mail: alexander.zharkov@mscsoftware.com*