

COMSOL NEWS

СПЕЦИАЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ **АКУСТИКА**



Вычислительная акустика обеспечивает понимание и прогнозируемость результатов в процессе проектирования

При упоминании слова «акустика» на ум в первую очередь приходит мощный низкочастотный динамик в концертном зале со всеми его звукоотражателями. Однако существуют и другие области применения акустики, с которыми мы имеем дело каждый день. Акустика — это междисциплинарная область науки и техники, и работающим в ней инженерам требуется не только неординарное мышление, но и самые мощные инструменты математического моделирования, чтобы создавать продукты, отвечающие многочисленным требованиям заказчиков.

В этом специальном издании *COMSOL News* освещена работа инженеров, конструкторов и исследователей в области акустики. Из историй этих людей становится ясно, что их объединяет страсть с высокоточному физическому моделированию, гибкость и способность совместно работать с коллегами посредством приложений для моделирования.

Виртуальная разработка продуктов, исследование шумовых и вибрационных характеристик, моделирование акустической маскировки и снижение обратной связи — вас несомненно вдохновит обзор всех замечательных возможностей вычислительной акустики и демонстрация того, как она позволяет с минимальными трудозатратами решать практические задачи и проектировать инновационные изделия.

Приятного чтения!



Валерио Марра (Valerio Marra)
Директор по маркетингу
COMSOL, Inc.

СООБЩЕСТВА COMSOL В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



plus.google.com/+comsol

BLOG comsol.ru/blogs

Forum comsol.ru/community/forums

Отзывы на материалы *COMSOL News* просим направлять по адресу info@comsol.com

COMSOL NEWS

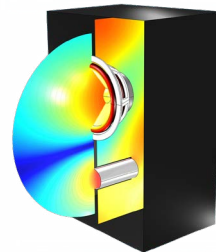
2017

Специальное издание:
Акустика

© 2017 COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками компании COMSOL AB. Все другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция не связаны с этими владельцами, не утверждались, не финансировались и не поддерживались ими. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен по ссылке www.comsol.com/trademarks.

Логотип IN является зарегистрированным товарным знаком компании LinkedIn Corporation и ее филиалов на территории США и в других странах. Логотип 'f' является зарегистрированным товарным знаком компании Facebook, Inc. Логотип в виде птицы является зарегистрированным товарным знаком компании Twitter, Inc. Логотип G+ является товарным знаком компании Google, Inc.

СОДЕРЖАНИЕ



АКУСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

4 Обоснование применения приложений для акустических расчетов

ВИРТУАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА

6 Виртуальная настройка автомобильной аудиосистемы

ВЫСОКОТОЧНЫЕ МИКРОФОНЫ

9 Прецизионная производительность: стремление к идеальному измерениям

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ

12 Мультифизическое компьютерное моделирование акустических характеристик осредненного течения в ракетных системах

ШУМОВЫЕ И ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

15 Мотоциклы Mahindra. Что скрывается за ревом моторов?

ШУМЫ ТРАНСФОРМАТОРА

18 От сводных электронных таблиц к приложениям для мультифизического моделирования — компания ABB продолжает определять будущее отрасли производства силовых трансформаторов



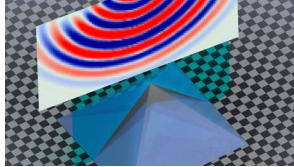
НА ОБЛОЖКЕ

Мотоцикл Mahindra Mojo для любителей настоящих приключений. Изображение предоставлено: Mahindra Two Wheelers Ltd.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МНОГОТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

- 22 | Моделирование вибраций
и шума в коробке передач



АКУСТИЧЕСКАЯ МАСКИРОВКА

- 25 | Управляя звуком: применение
математического моделирования
в передовых исследованиях
акустических метаматериалов

ВИБРАЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНФРАЗВУКА

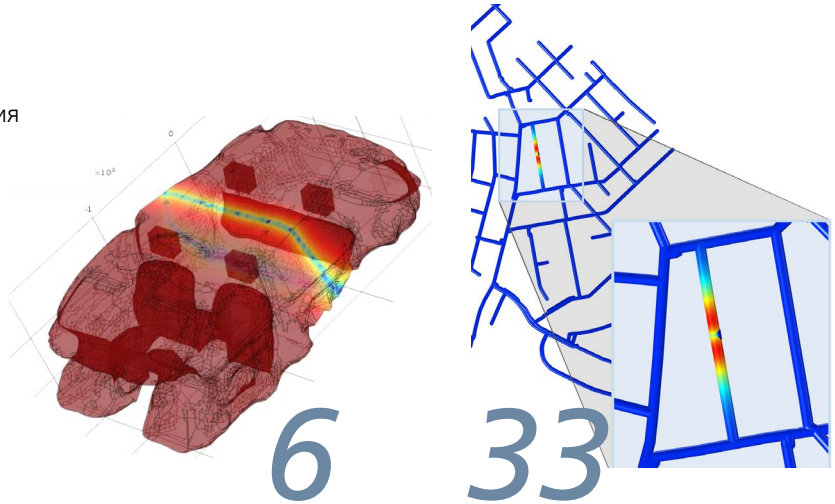
- 28 | Шум среди ясного неба: приложения
COMSOL помогают определить
воздействие вибраций на здания

СНИЖЕНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

- 30 | На переднем крае разработки
слуховых аппаратов

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

- 33 | С помощью мультифизического
анализа можно обнаруживать
утечки в водопроводных
магистралях



ВЫСОКОТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

- 36 | Музыка для ушей:
преобразователи нового типа для
электростатических наушников

МУЛЬТИФИЗИКА

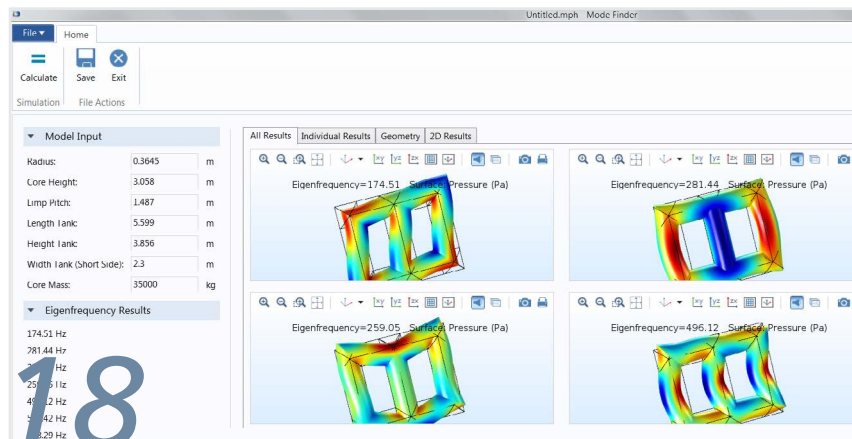
- 39 | Моделирование мира сквозь
призму мультифизики

ПРИГЛАШЕННЫЙ АВТОР

- 40 | Преимущества мультифизического
моделирования для
вычислительной акустики



36

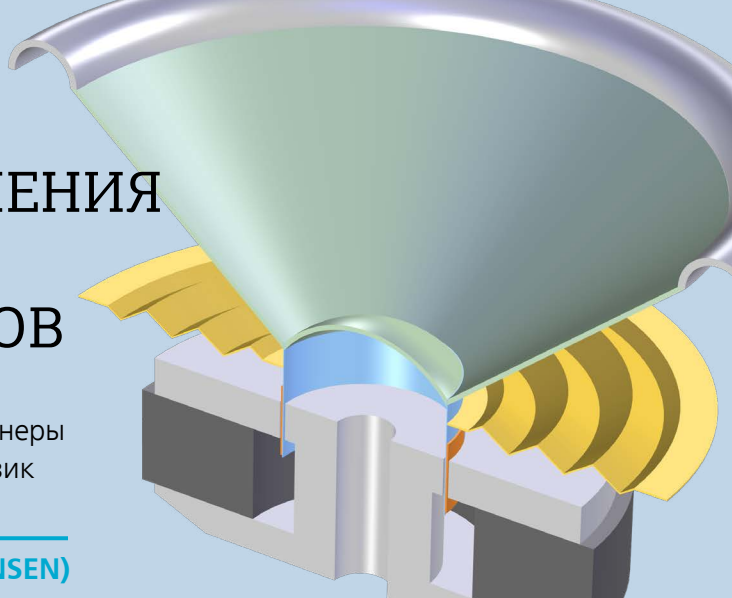


18

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Акустические явления по своей природе являются мультифизическими. При построении модели инженеры должны использовать и учитывать разные типы физик и их взаимосвязи на разных масштабах и частотах.

МЭДС Й. ХЕРРИНГ ЙЕНСЕН (MADS J. HERRING JENSEN)



В условиях постоянного усложнения систем и сокращения сроков сдачи проектов инженеры-акустики все чаще прибегают к использованию программ для численного моделирования. С вычислительными инструментами ускоряется процесс проектирования и сокращается необходимость в дорогостоящих прототипах, изготовление которых занимает много времени. Акустическое моделирование также помогает пониманию проекта и, тем самым, принятию взвешенных решений и созданию качественной продукции.

Какие возможности акустического моделирования являются наиболее значимыми с точки зрения практической выгоды? С помощью приложений для моделирования можно численно имитировать воспроизведение, распространение и прием звуковых сигналов в различных условиях. Сюда относится не только моделирование взаимодействия звукового сигнала с конструкциями, пористыми материалами и потоком текущей среды, но и моделирование преобразователей, задействованных в генерации и детектировании сигналов.

Все это по своей природе относится к мультифизическим задачам, которые необходимо решать специалистам по акустике для эффективной разработки новых изделий и технологий. Как следствие, выбор программ для моделирования основывается по большей части на возможности связывать несколько физических явлений, существенных для всей системы.

⇒ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ В АКУСТИКЕ

Качество звука является актуальной темой исследования во многих промышленных задачах. Сюда относится воспроизведение звука, например, в салоне автомобиля (рис. 1) или звука на выходе систем вытяжной вентиляции и глушителей. Другие примеры включают в себя исследование характеристик

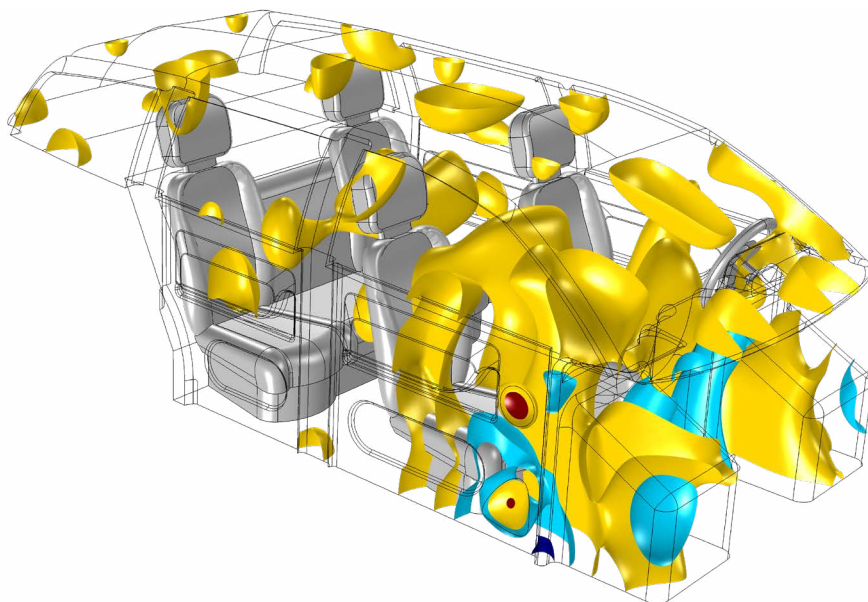


РИС. 1. Акустическое моделирование салона седана, динамики в котором расположены в типичных местах. Результаты показывают распределение акустического давления в салоне.

и оптимизацию наушников, динамиков громкоговорителей и мобильных устройств. Во всех подобных случаях для оптимизации систем необходимо понимание всех тонкостей распространения звука и работы преобразователей. Одной только грамотной цифровой обработки сигналов больше не достаточно для оптимальной работы и хорошего звучания. Например, чтобы улучшить характеристики слуховых аппаратов с помощью адаптивного подавления обратной связи, потребуется связать виброакустическую модель миниатюрного громкоговорителя с акустической конечно-элементной моделью, описывающей механику и акустику в окружающей среде, которая требуется для получения точных результатов моделирования.

В производстве громкоговорителей стандартная конструкция головок достигла такого уровня, при котором ее

уже невозможно совершенствовать простым методом проб и ошибок (рис. 2). Для оптимизации требуется подробный численный анализ. Уровень акустического давления, с которым работают современные миниатюрные громкоговорители, вызывает искажения и ослабление сигнала из-за нелинейностей. Последние также играют важную роль при создании звукопоглощающих конструкций (антивибрационных экранов) для авиакосмической промышленности.

Другой пример мультифизической связи — между электростатикой, структурными мембранами и термовязкой акустикой — это моделирование конденсаторных микрофонов. Эти физические явления тесно связаны, и их моделирование в совокупности необходимо для правильного прогнозирования чувствительности микрофона.

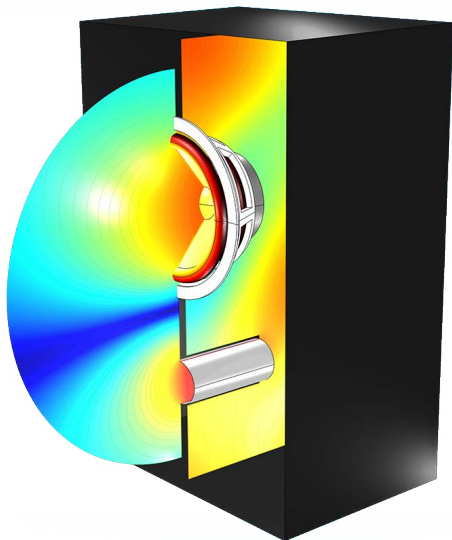


Рис. 2. Визуализация акустического давления в корпусе динамика громкоговорителя.

⇒ COMSOL MULTIPHYSICS И МОДУЛЬ АКУСТИКА

Модуль Акустика, который представляет собой расширение для пакета COMSOL Multiphysics®, идеально подходит для моделирования в самых разных акустических диапазонах, от инфразвука до ультразвука, а также на различных масштабах, характерных для акустики, например при анализе

механизмов термовязкостных потерь или аэроакустических расчетах. К возможностям акустического моделирования в программном пакете относятся встроенные и простые в использовании мультифизические связи для совмещения разных физических явлений, которые без проблем устанавливаются в одной среде моделирования, в то время как в модуле Акустика доступно множество специальных формул, основанных на определяющих уравнениях акустики.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения акустических проблем и задач, которые стоят перед специалистами данной области, даже не имея опыта работы с программами для моделирования, можно использовать приложения, адаптированные под конкретные требования, с предустановленными входными и выходными параметрами и значениями. Это становится возможным с помощью приложений, созданных в Среде разработки приложений COMSOL Multiphysics. Приложения для моделирования представляют собой мультифизические модели с пользовательским графическим интерфейсом. С помощью этого инструмента специалисты могут создавать комплексные модели, в которых можно изменить проектные параметры и проанализировать результаты автономно с учетом отраслевых стандартов и требований заказчика.

Благодаря локальной установке продукта COMSOL Server™ можно легко разворачивать приложения для коллег и заказчиков внутри

организации и по всему миру. Пользователи могут подключаться посредством клиента COMSOL Client или распространенных веб-браузеров. Специалистам по моделированию никогда не было так легко моделировать акустические устройства на таком уровне точности с возможностью передавать результаты своей работы коллегам. ❖

ФИЗИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕЙСЫ, ДОСТУПНЫЕ В МОДУЛЕ АКУСТИКА

Скалярная акустика: Звуковое поле описывается акустическими колебаниями вокруг статического давления окружающей среды. Возможен учет пористых и волокнистых материалов, узких конструкций и зазоров, а также объемного затухания. Для усечения неограниченных областей доступны идеально согласованные слои (PML).

Взаимодействие акустических волн и колебаний в твердотельных конструкциях (ASI): Моделирование явлений, в которых давление текучей среды создает нагрузку на твердотельную область, а ускорение конструкции воздействует на область текучей среды на ее границе с твердым телом. Функционал включает расчет пьезоэлектрических материалов, упругих и порупругих волн, а также акустики в трубопроводах.

Аэроакустика: Моделируется одностороннее взаимодействие фонового потока текучей среды с акустическим полем.

Термовязкостная акустика: Точное моделирование акустики в геометриях с небольшими размерами, в которых значительно влияние вязкого и теплового граничного слоев вблизи стенок.

Ультразвук: Моделируются большие линейные акустические задачи во временной области с учетом широкого спектра колебаний и стационарного фонового потока.

Геометрическая акустика: Моделируется высокочастотная акустика в случаях, когда длина волны значительно меньше характерных геометрических размеров моделируемой системы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

- [Блог COMSOL](#)
- [Видеогалерея COMSOL](#)
- [Галерея моделей и приложений COMSOL](#)

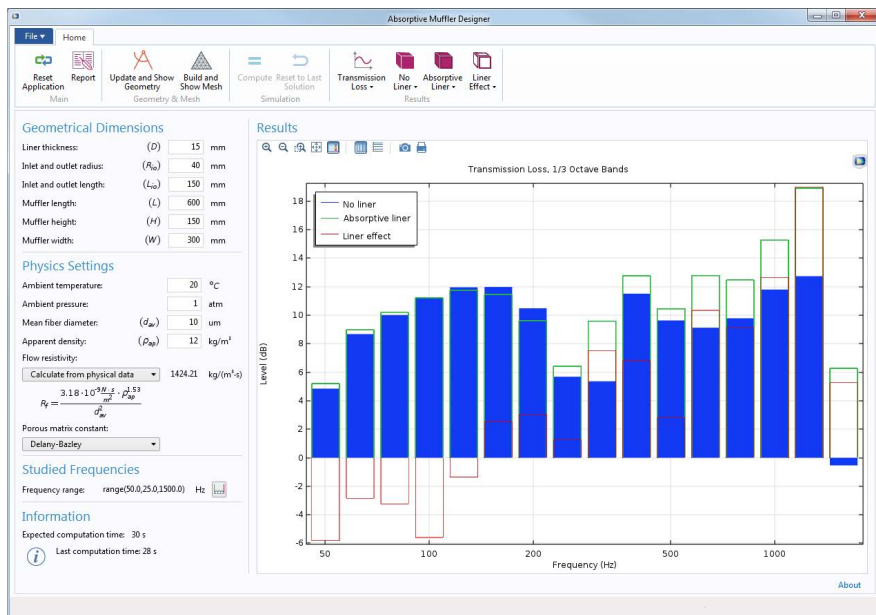


Рис. 3. Пример приложения, основанного на модели поглощающего глушителя в COMSOL Multiphysics®. Для расчета и анализа акустических свойств устройства пользователь может изменять геометрическую конструкцию глушителя, температуру и давление окружающей среды и свойства материала.

ВИРТУАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА АВТОМОБИЛЬНОЙ АУДИОСИСТЕМЫ

Специалисты HARMAN выполняют физические эксперименты в сочетании с численным моделированием для улучшения процесса разработки современных информационно-развлекательных мультимедийных систем и другой автомобильной электроники.

ДЖЕНИФЕР ХЕНД (JENNIFER HAND)



РИС. 1. Расположение тестового динамика в салоне автомобиля.

Современные автомобили оснащены информационно-развлекательными системами со множеством функций: от подключения смартфонов до интерактивных сенсорных дисплеев и выдвижных экранов. Компания HARMAN занимает лидирующее положение на данном рынке — ее аудиосистемами премиум-класса оснащены более 80 % автомобилей повышенной комфортности по всему миру.

Для каждой модели автомобиля требуется своя уникальная конфигурация, и специалисты по акустике и моделированию компании HARMAN учитывают это в процессе разработки и тонкой настройки различных компонентов автомобильной акустики. Акустическая картина в салоне зависит от целого спектра различных деталей и нюансов: расположения и направления динамиков, их монтажа, геометрических особенностей внутренней отделки и свойств материалов, выбранных при изготовлении автомобиля в целом.

Команда специалистов пользуется физическими экспериментами в сочетании с численным анализом, чтобы ускорить разработку продукта, испытывая свои системы виртуально еще до создания настоящих прототипов. Таким образом, на физические испытания тратится куда меньше времени — вместо реального прослушивания проводится виртуальное тестирование, и команда специалистов может создавать модели продуктов до окончательного утверждения конструкции и дизайна салона автомобиля.

«Мы приступаем к работе на ранних этапах разработки автомобиля, когда проектировщик еще не определился с требованиями к аудиосистеме, — объясняет Майкл Штраусс (Michael Strauss), старший менеджер отдела виртуальной разработки продуктов и инструментов (Virtual Product Development and Tools — VPD) компании HARMAN. — В некоторых случаях нам могут быть известны только основные детали, такие как размер и объем салона автомобиля. Тем не менее, часто нам нужно представить концепцию уже через несколько

дней, и тогда очень сложно выполнить требования заказчика и создать высококачественную аудиосистему без виртуальных прототипов и готовых наработок».

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ ОБЪЕДИНЯЮТСЯ В ИНТЕРЕСАХ ЗАКАЗЧИКА

Чтобы как можно скорее предоставить заказчику точную концептуальную модель, инженеры HARMAN используют математическое моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics®. «Для нас важным

инженер-акустик в компании HARMAN.

«Мультифизический подход — одна из самых важных составляющих процесса виртуальной разработки, — говорит Михал Богдански (Michał Bogdanski), специалист по моделированию и руководитель проекта в HARMAN. — Мы можем исследовать динамику поведения динамика с любым компонентом конструкции автомобиля, например с жесткостью двери, и затем дать заказчику рекомендации по ее проектированию».

В одном из случаев было выполнено измерение и моделирование акустического давления, создаваемого динамиком в салоне автомобиля Mercedes-Benz ML (рис. 1), чтобы проверить свои численные модели и использовать их в последующем для оптимизации акустического оборудования. «Модели салона автомобиля — одни из самых сложных для проведения расчетов, поскольку они охватывают множество различных областей физики», — поясняет Штраусс. К счастью, программное обеспечение COMSOL® позволяет связывать акустические, механические и электрические явления в системе.

Для повышения эффективности проектных работ во всей компании команда Штраусса

«Для нас важным критерием являлась возможность моделирования механических, акустических и электромагнитных явлений в одной интегрированной среде, и мы хотели найти пакет, который бы освободил нас от необходимости написания и верификации собственных программ.»»

критерием являлась возможность моделирования механических, акустических и электромагнитных явлений в одной интегрированной среде, и мы хотели найти пакет, который бы освободил нас от необходимости написания и верификации собственных программ», — отмечает Франсуа Мальбо (François Malbos), старший

создала библиотеку проверенных моделей и известных решений, с помощью которой можно прогнозировать характеристики самых разных конфигураций динамиков. «Мы можем предложить самые разные варианты, от высокоуровневого анализа трендов до подробного анализа эксплуатационных

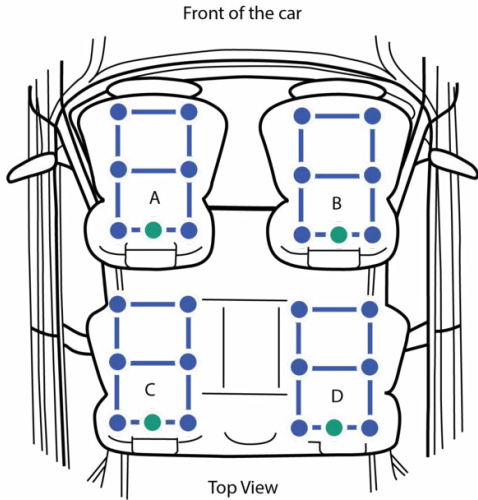


РИС. 2. Вид сверху микрофонных решеток, расположенных в четырех разных положениях.



РИС. 3. Визуализация трехмерного сканирования салона автомобиля, выполненного сотрудниками компании HARMAN.

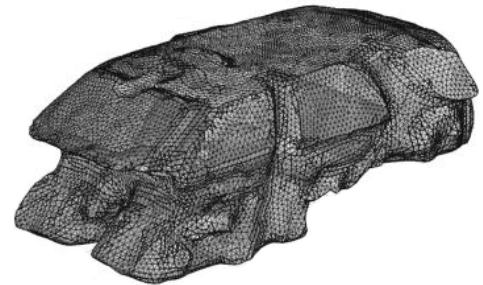


РИС. 4. Поверхностная сетка для салона автомобиля.

характеристик конкретной подсистемы», — продолжает он.

⇒ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИКОВ АВТОМОБИЛЬНОЙ АУДИОСИСТЕМЫ

В одном из исследований инженеры компании HARMAN использовали COMSOL для моделирования аудиосистемы в салоне автомобиля для оптимизации акустических характеристик динамиков, особенно на низких частотах. Они создали набор тестов для проверки модели. После проверки модель позволила бы команде HARMAN подобрать наилучшую конфигурацию динамиков для данного автомобиля.

В проверочных испытаниях динамик монтировали на жесткий каркас вблизи водительского сиденья. Четыре набора микрофонных массивов измеряли средние уровни давления звука в определенных точках салона (см. рис. 2).

Для частот ниже 1 кГц допустима замена полноценной модели громкоговорителя на эквивалентную сосредоточенную модель жесткого плоского поршня. Эта модель учитывала напряжение на клеммах звуковой катушки, жесткость подвеса и поверхности мембраны динамика. Геометрия была создана на основе ручного трехмерного сканирования

(см. рис. 3). С помощью алгоритма постобработки, реализованного в ПО MATLAB® и модуля расширения LiveLink for MATLAB® для COMSOL®, посредством которого создается двунаправленная связь между двумя программами, группа разработчиков преобразовала набор точек, полученный в процессе сканирования, в поверхностную конечно-элементную сетку салона автомобиля (см. рис. 4), а затем создала оптимизированную сетку для изучения акустических волн в системе.

С помощью моделирования было проанализировано взаимодействие звуковых волн, генерируемых динамиком,

с материалами лобового стекла, пола, сидений, подголовников, руля и других деталей автомобиля — крыши, дверей и приборных панелей, каждая из которых имела свои поглощающие свойства.

⇒ ОПТИМИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В дополнение к анализу различных материалов группа разработчиков также определила перемещение и ускорение мембраны динамика в зависимости от объема корпуса с помощью Livelink™ for MATLAB®, а также разработала специальные скрипты в среде MATLAB® для упрощения процесса пред- и постобработки результатов.

«Все полностью оптимизировано и автоматизировано — когда заканчивается расчет одной модели, запускается следующая, — объясняет Михал Богданский. — Так мы можем быть уверены, что весь процесс будет простым и безошибочным; мы только запускаем скрипты».

Команда также оптимизировала данные по частотным зависимостям коэффициентов поглощения, необходимым для получения строгой корреляции между измеряемыми и расчетными значениями звукового давления. По результатам анализа были определены уровни звукового давления для каждой микрофонной решетки (см. рис. 5).

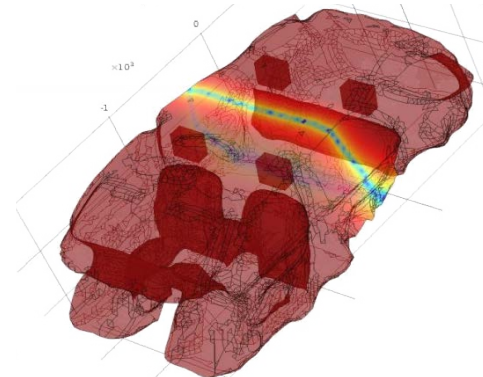
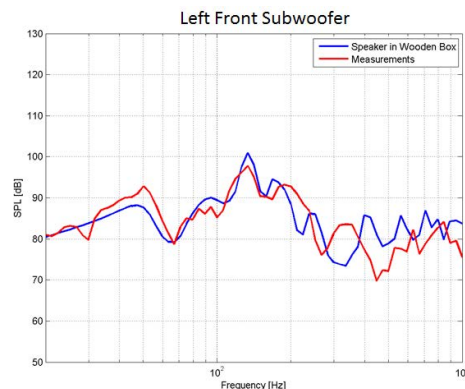


РИС. 5. Частотная зависимость уровня звукового давления в точке над креслом водителя (слева) и распределение SPL в салоне автомобиля (справа).

⇒ ОБЪЕКТИВНАЯ И СУБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗВУКА С ВОДИТЕЛЬСКОГО СИДЕНЬЯ

Использование проверенных компьютерных моделей позволяет инженерам HARMAN начать разработку дизайна аудиосистемы задолго до того, как закончится проектирование автомобиля. Точное прогнозирование акустических полей в салоне автомобиля позволяет оптимизировать качество работы аудиосистем. Эквалайзеры и психоакустические эффекты также учитываются в алгоритме настройки, благодаря чему можно изменять конструкцию без необходимости в физических прототипах.

«С помощью моделирования мы — инженеры HARMAN — можем оценить, оптимизировать и рассчитать характеристики предлагаемой аудиосистемы, даже если она еще не существует физически.»

Большой интерес в области создания высококлассных аудиосистем представляет аудирование, или воспроизведение звука виртуально рассчитанной акустикой. Инженеры HARMAN разработали систему воспроизведения, которая позволяет прослушивать (используя наушники класса «хай-энд»), оценивать и сравнивать аудиосистемы, состоящие из низкочастотных, среднечастотных

и высокочастотных динамиков. «Все это базируется на результатах моделирования и принципах обработки сигналов», — говорит Мальбо.

Инженеры HARMAN учитывают влияние головы, туловища и ушных каналов человека на акустику при прогнозировании бинауральной импульсной характеристики, то есть восприятия звука ушами. Для захвата полностью трехмерного звука эта характеристика рассчитывается при разных положениях головы в азимутальной плоскости. Для идеального воспроизведения звуковых ощущений слушателя, находящегося, например, на месте водителя, в системе воспроизведения используется датчик положения головы.

На рис. 6 изображена сетка, созданная в программном пакете COMSOL®, которая использовалась при анализе бинауральной импульсной характеристики. На рис. 7 показано сравнение прогнозируемой и смоделированной бинауральной импульсной характеристики.

В аудировании, несомненно, есть свои сложности. Качество аудирования, которое по сути субъективно, должно соотноситься с прослушиванием в реальном мире. В связи с этим проводятся субъективные измерения, чтобы обеспечить качество звуковых ощущений.

Возможность анализировать аудиосистему, основываясь только на моделировании, позволило HARMAN повысить качество изделий и скорость их разработки. Благодаря ей также повысилась гибкость в работе с заказчиками и снизились затраты на исправление проекта, что дало инженерам чувство свободы в проектировании.

«Преимущество моделирования заключается в том, что системный инженер может сесть за стол, надеть наушники и начать настраивать систему без самого автомобиля, — резюмирует Штраусс. — С помощью моделирования мы — инженеры HARMAN — можем оценить, оптимизировать и рассчитать характеристики предлагаемой аудиосистемы, даже если она еще не существует физически.» ❖

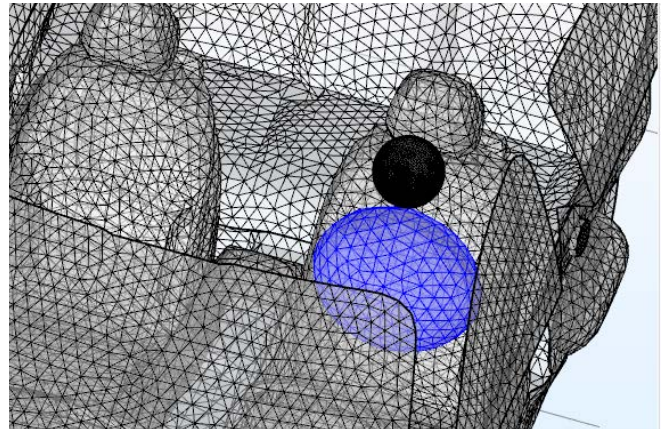


РИС. 6. Сетка, созданная с помощью COMSOL® и используемая для прогнозирования бинауральной импульсной характеристики, то есть восприятия звука ушами.

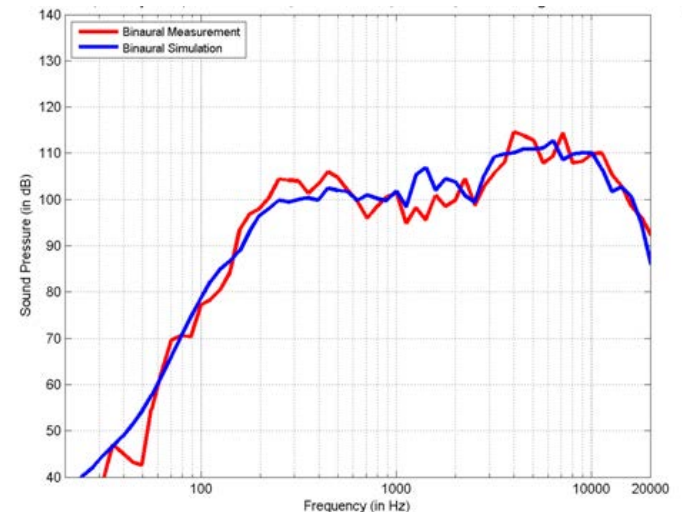


РИС. 7. Сравнение частотных зависимостей измеренной и смоделированной бинауральной импульсной характеристики.



Команда отдела виртуальной разработки продуктов и инструментов (Virtual Product Development and Tools — VPD) компании HARMAN: Марути Шринивасарао Редди, Михал Богдански, Майкл Штраусс, Нинранджан Амбати и Франсуа Мальбо.

Прецизионная производительность: стремление к идеальным измерениям

Исследователи компании Brüel & Kjær используют моделирование для достижения новых уровней точности своих промышленных и измерительных микрофонов и преобразователей.

ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

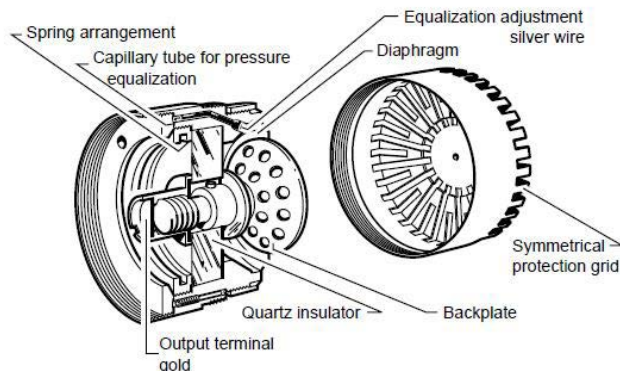


РИС. 1. Слева: фотография микрофона 4134 с защитной решеткой, установленной над мембраной. Справа: вид типового капсуля микрофона в разрезе, где показаны его основные компоненты.

Ничего идеального не существует: ни идеальных измерений, ни идеальных измерительных приборов.

Несмотря на то что мы можем полагаться на выполняемые нами измерения, ни одно из них никогда не будет безупречным, поскольку наши приборы не определяют непосредственно то, что измеряют. Вместо этого они реагируют на окружающие явления и сопоставляют эти данные с безупречным представлением абсолютного эталона.

Следовательно, все приборы имеют степень допустимой погрешности — допустимую величину, на которую измерения могут различаться, оставаясь пригодными для использования. Поэтому в настоящее время актуальной задачей представляется разработка приборов, диапазон погрешности которых остается определенным и постоянным даже на протяжении длительных временных периодов.

Уже более 40 лет компания Brüel & Kjær AS сохраняет лидерство в сфере звукометрии, измерения вибраций, анализа вибраций и звуковых сигналов. Среди ее клиентов Airbus, Boeing, Ferrari, Bosch, Honeywell, Caterpillar, Ford, Toyota, Volvo, Rolls-Royce, Lockheed Martin, NASA и многие другие.

Знания в области промышленной акустики и вибраций помогают уменьшить шум авто- и авиатранспорта, ветряных турбин, вибрации автомобильных двигателей, а также обеспечить контроль

качества готовой продукции — компания Brüel & Kjær должна разрабатывать микрофоны и акселерометры, которые соответствуют целому ряду различных измерительных стандартов. Для обеспечения соответствия данным требованиям научно-исследовательская деятельность компании включает в себя моделирование как способ проверки точности устройств и испытания новых инновационных решений

⇒ РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ МИКРОФОНОВ

Компания Brüel & Kjær разрабатывает и производит конденсаторные микрофоны, работающие в диапазоне частот от инфразвука до ультразвука, а уровни воспринимаемых ими сигналов начинаются ниже слухового порога и заканчиваются высочайшим звуковым давлением, возможным в нормальных атмосферных условиях. Линейка продукции включает в себя промышленные и лабораторные измерительные микрофоны, а также специализированные микрофоны особого назначения. В разработке всех своих микрофонов компания Brüel & Kjær руководствуется такими ключевыми параметрами, как стабильность, надежность и точность измерений.

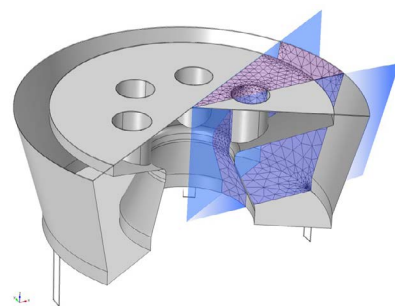


РИС. 2. Геометрический чертеж конденсаторного микрофона типа 4134. На рисунке изображена сетка, используемая в усеченной геометрии сектора, составляющей 1/12 общей геометрии.

«Мы используем моделирование для разработки конденсаторных микрофонов и для обеспечения их соответствия действующим стандартам Международной электротехнической комиссии (IEC) и Международной организации по стандартизации (ISO), — говорит Эрлинг Олсен (Erling Olsen), инженер-конструктор отдела исследований и разработок компании Brüel & Kjær. — Моделирование входит в процесс исследования и разработки наряду с прочими инструментами для обеспечения надежной работы наших микрофонов в широком диапазоне условий.

Например, мы точно знаем влияние на все наши микрофоны статического давления, температуры и влажности, а также прочих факторов, измерить которые было бы весьма сложно без применения моделирования».

Конденсаторный микрофон Brüel & Kjær типа 4134, показанный на рис. 1, — старый классический микрофон, с которым на протяжении долгого времени проводились многие теоретические и практические исследования. Таким образом, микрофон 4134 использовался и используется в качестве прототипа для разработки мультифизических моделей конденсаторных микрофонов Brüel & Kjær. Для эффективного анализа работы микрофона модели Олсена учитывают движение диафрагмы, электромеханические взаимодействия в процессе деформаций мембраны и выработки электрических сигналов, резонансные частоты, а также вязкостные и термоакустические потери во внутренних полостях микрофона.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОФОНОВ

Когда звук попадает в микрофон, волны звукового давления вызывают деформации диафрагмы, которые измеряются в виде электрических сигналов. Эти электрические сигналы затем преобразуются в значения уровня звукового давления в децибелах. «Моделирование микрофона включает в себя комплексный расчет тесно связанных между собой механических, электрических и акустических задач с учетом деформации геометрии, реализованной через подвижные сетки, а это невозможно без мультифизического анализа, — отмечает Олсен. — Модели должны обеспечивать подробную детализацию, поскольку в большинстве случаев высокоаспектные соотношения сторон (из-за формы капсулей микрофонов) и небольшие размеры приводят к возникновению тепловых и вязкостных потерь, которые сильно влияют на характеристики микрофона».

Эта же модель также может использоваться для предсказания взаимодействий, возникающих между задней пластиной и диафрагмой. Помимо прочего, это влияет на характеристики направленности микрофона. «Мы использовали моделирование для анализа изгибных колебаний диафрагмы», — отмечает Олсен. При расчетах термического напряжения и резонансных частот в целях уменьшения времени вычисления использовалась симметрия в модели (см. рис. 2). Кроме того, упрощенная модель также использовалась при анализе уровня звукового давления в микрофоне для полей, нормально падающих на поверхность диафрагмы микрофона (см. рис. 3). Однако, когда звук, попадающий в микрофон, падает не под нормальным углом, с математической точки зрения на мембрану действует асимметричное граничное условие. Это требует учета полной геометрии для обеспечения точного определения прогиба мембраны (см. рис. 4).

Моделирование также использовалось для определения влияния вентиляционного отверстия микрофона на измерение низкочастотных звуков. «Мы моделировали микрофон с вентиляционным отверстием, подверженным воздействию внешнего звукового поля, с отверстием, не подверженным такому воздействию, а также устройство вообще без вентиляционного отверстия, — объясняет Олсен. — Хотя последний вариант не реализуем на практике, он позволил нам определить влияние конфигурации вентиляционного отверстия на результирующие значения входного сопротивления для различных вариантов низкочастотного поведения. Это одно из самых важных преимуществ моделирования: мы можем изменять параметры модели, не ограничиваясь уже изготовленными устройствами, что позволяет нам испытывать альтернативные конструкции и изучать пределы возможностей устройств (см. рис. 5)».

Включение моделирования в процесс исследования и разработки позволяет Олсену и его коллегам не только разрабатывать и испытывать стандартные изделия компании Brüel & Kjær, но и создавать уникальные устройства по требованиям заказчика.

«С помощью моделирования мы можем точно определять подходы для внесения конкретных усовершенствований согласно требованиям заказчика. Хотя акустические характеристики микрофона очень сложно измерить только при помощи испытаний, после проверки нашего моделирования на физической модели в определенной конфигурации появляется возможность использовать моделирование для анализа других конфигураций и сред в индивидуальном порядке».

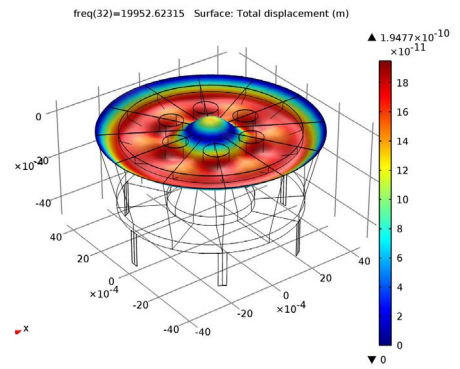


РИС. 3. Уровень звукового давления под диафрагмой для случая падения под прямым углом, рассчитанного с использованием секторной симметрии. Деформации мембраны представлены для частоты $f = 20$ кГц.

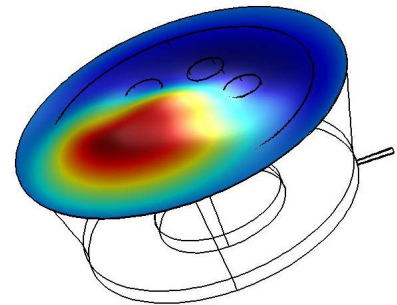


РИС. 4. Результаты моделирования, представляющие деформации мембраны, рассчитанные для падения под не нормальным углом на частоте 25 кГц. Поскольку деформация асимметрична, расчет производится с использованием полной трехмерной модели.

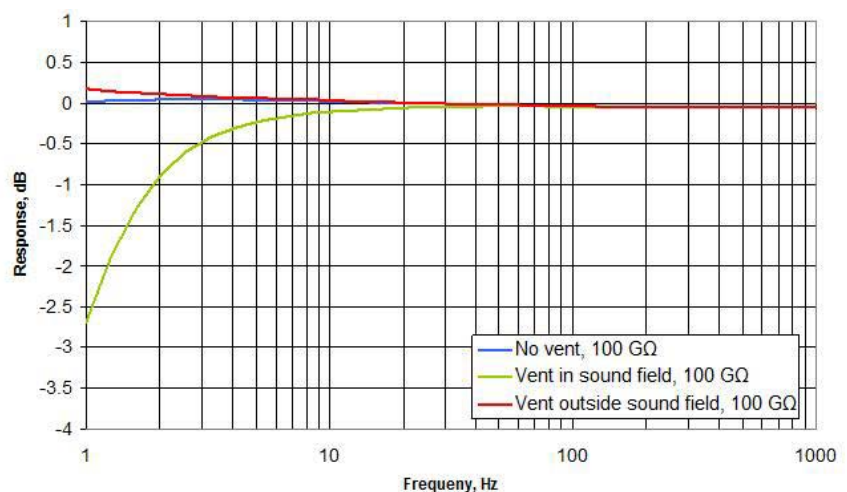


РИС. 5. В конфигурации с отсутствующим вентиляционным отверстием повышение чувствительности происходит вследствие того, что звуковое поле внутри микрофона при очень низких частотах становится чисто изотермическим. Если вентиляционное отверстие находится вне конфигурации звукового поля, то кривая сначала повторяет кривую при отсутствии отверстия, но чувствительность продолжает повышаться, поскольку отверстие позволяет понизить давление с обратной стороны диафрагмы.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

Сорен Андерсен (Søren Andresen), инженер-конструктор компании Brüel & Kjær, также использует моделирование для проектирования и испытания конструкций датчиков вибрации.

«Одна из сложностей, возникающих при разработке датчиков для анализа вибраций, заключается в неблагоприятных условиях окружающей среды, которые эти устройства должны выдерживать, — говорит Андерсен. — Наша цель состоит в разработке устройства с высокой конструктивной прочностью, которое выдерживало бы крайне неблагоприятные условия».

Большинство механических систем обладают резонансными частотами, ограниченными относительно узким диапазоном, обычно от 10 до 1000 Гц. Одна из самых важных особенностей конструкции датчика заключается в том, что данное устройство не резонирует на частоте измеряемых вибраций, поскольку это негативно сказалось бы на результатах измерения. На рис. 6 показаны механические деформации подвешенного датчика вибрации, а также график с резонансной характеристикой устройства.

«Нам необходимо, чтобы у датчика была плоская АЧХ и резонансная частота не попадала в измеряемый диапазон вибраций, — говорит Андерсен. — Мы используем COMSOL, чтобы экспериментировать с различными конструкциями и найти сочетание материалов и геометрии, которое обеспечит плоский профиль (отсутствие резонанса) для каждой конкретной конструкции. Это область, в которой будет использоваться данный датчик».

При проектировании датчика для отсеивания нежелательного сигнала, вызванного его возможным резонансом, может использоваться фильтр нижних частот (или механический фильтр). Такие фильтры состоят из материала, обычно резины, вклеенного между двумя опорными дисками, которые закрепляются между датчиком и установочной поверхности.

«Как правило, мы устанавливаем верхний предел частоты на одну треть резонансной частоты датчика, так чтобы вибрационные составляющие, измеряемые на верхнем пределе частоты, имели погрешность, не превышающую 10–12 %», — говорит Андерсен.

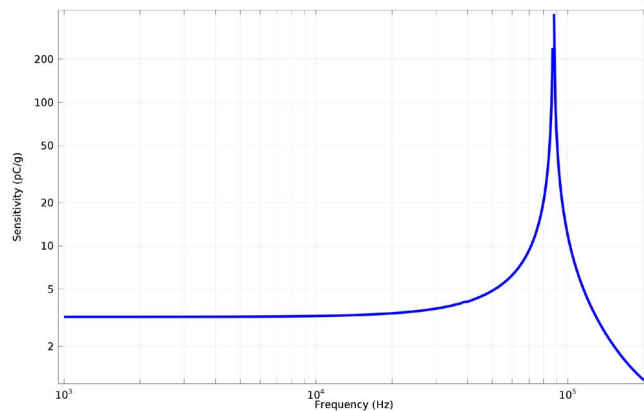
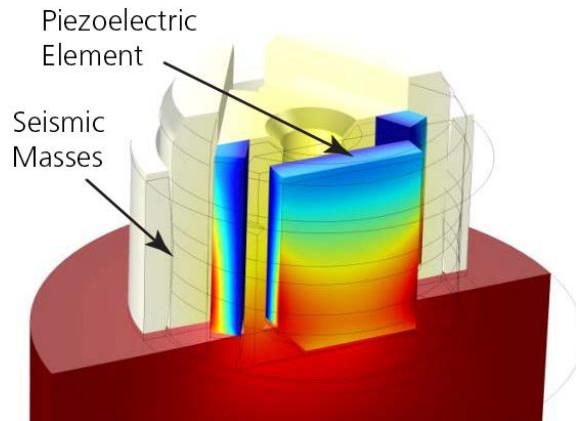


РИС. 6. Результаты моделирования подвешенного пьезоэлектрического датчика вибрации. Вверху: Механические деформации и электрическое поле в пьезоэлектрическом чувствительном элементе и сейсмических массах. Внизу: Частотная характеристика, показывающая первый резонанс датчика приблизительно на 90 кГц. Данное устройство следует использовать исключительно для измерения на объектах, колеблющихся с частотой значительно ниже 90 кГц.

⇒ МАКСИМАЛЬНО ДОСТИЖИМАЯ ТОЧНОСТЬ

Хотя разработать идеальный датчик или произвести безошибочное измерение все же невозможно, моделирование как никогда ранее сближает исследователей и разработчиков, позволяя им быстро и эффективно испытывать новые проектно-технические решения для множества различных сценариев эксплуатации.

«Для того чтобы опередить конкурентов, необходимы уникальные знания, — говорит Андерсен. — Их нам дает моделирование. Оно позволяет вносить необходимые коррективы и производить виртуальные измерения, которые невозможно выполнить экспериментальным путем. Благодаря этому мы можем испытывать и оптимизировать инновационные решения».

«С помощью моделирования мы можем точно определять подходы для внесения конкретных усовершенствований согласно требованиям заказчика.»

— ЭРЛИНГ ОЛСЕН, ИНЖЕНЕР-КОНСТРУКТОР КОМПАНИИ BRÜEL & KJÆR

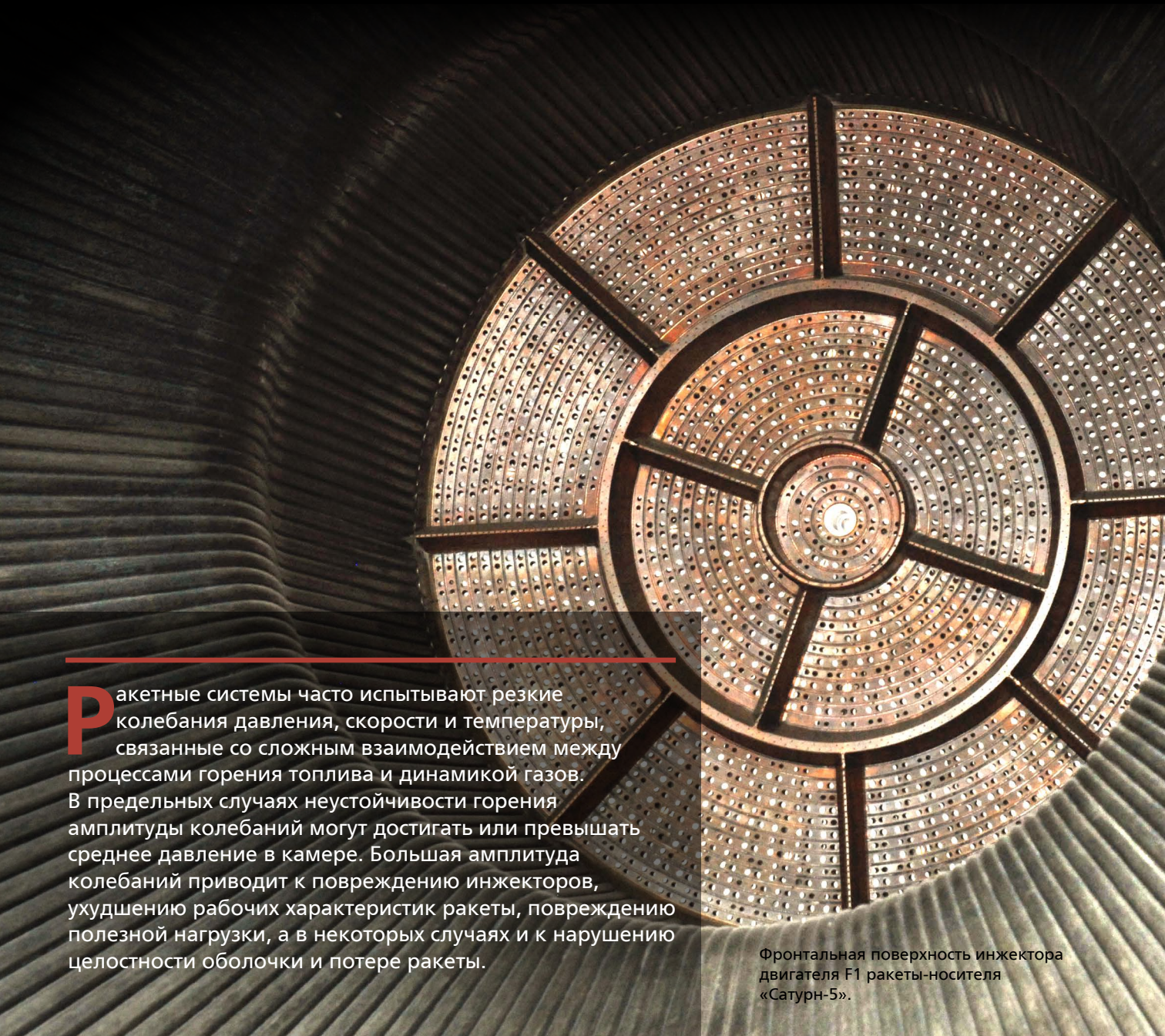
МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В РАКЕТНЫХ СИСТЕМАХ

Неустойчивое горение в моторах твердотопливных и жидкостных ракетных двигателях — проблема, которая продолжает беспокоить конструкторов и инженеров. Высокоточный подход к моделированию на основе мультифизического анализа позволяет лучше понять и спрогнозировать эти явления.

ШОН Р. ФИШБАХ (SEAN R. FISCHBACH)

Ракетные системы часто испытывают резкие колебания давления, скорости и температуры, связанные со сложным взаимодействием между процессами горения топлива и динамикой газов. В предельных случаях неустойчивости горения амплитуды колебаний могут достигать или превышать среднее давление в камере. Большая амплитуда колебаний приводит к повреждению инжекторов, ухудшению рабочих характеристик ракеты, повреждению полезной нагрузки, а в некоторых случаях и к нарушению целостности оболочки и потере ракеты.

Фронтальная поверхность инжектора двигателя F1 ракеты-носителя «Сатурн-5».



В прошлом сложности в моделировании и прогнозировании неустойчивости горения приводили к тому, что в большей части ракетных систем неустойчивость устранялась в ходе дорогостоящих испытаний (см. рис. 1), либо систему списывали целиком.

«Мы приближаемся к более полному описанию неустойчивости горения, используя глобальные оценки на основе энергетического баланса.»

На ранних этапах развития технологии реактивных двигателей ученые и инженеры собирали данные об основополагающих физических явлениях, проводя измерения на вибрационных стендах, наблюдая за колеблющимися факелами выхлопных газов и, что наиболее важно, слушая шумы, связанные с неустойчивостями. Благодаря этим наблюдениям первые исследователи неустойчивого горения сосредоточили свои усилия на моделировании акустических волн внутри камер сгорания.

Это решение довольно логично с учетом того, что измеренная частота колебаний часто близко соответствует нормальным акустическим модам камеры сгорания. Но такой подход не учитывает влияние поперечных и тепловых волн, вызванных акустическими волнами или тесно связанных с ними. К более полному описанию неустойчивого горения можно приблизиться, если использовать глобальные оценки на основе энергетического баланса.

Последние достижения в области моделирования неустойчивого горения на основе учета энергетического баланса требуют точного определения акустических частот и мод колебаний. Особенный интерес представляют акустические взаимодействия осредненного течения в сужающейся области ракетного сопла, где наблюдаются большие перепады давления, плотности и скорости. Неравномерный выброс энергии через сопло ракеты считается основным источником акустического снижения тяги в ракетных системах.

Подход к решению проблемы снижения тяги в сопле с учетом эффектов осредненного течения был недавно разработан Френчем (French)². Этот новый подход продолжает работу Сигмана и Зинна (Sigman, Zinn)³ и основан на решении уравнения для

потенциала акустической скорости, получаемого из уравнений Эйлера методом возмущений⁴.

Найти собственные значения уравнения для потенциала акустической скорости, в котором ψ — комплексный акустический потенциал, λ — комплексные собственные значения, c — скорость звука, M — вектор Маха,

$$\nabla^2 \psi - \left(\frac{\lambda}{c}\right)^2 \psi - M \cdot [M \cdot \nabla(\nabla \psi)] - 2 \left(\frac{\lambda M}{c} + M \cdot \nabla M\right) \cdot \nabla \psi - 2\lambda \psi \left[\frac{1}{c}\right] = 0$$

гораздо сложнее, чем решить стандартное волновое уравнение для давления.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p\right) + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

Для решения этой задачи потребуются численные приближения для поля течения в камере и собственных значений.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ В КАМЕРЕ

Новейшие теоретические модели колебательных возмущений в высокоскоростных потоках требуют точного определения акустических мод камеры сгорания. Но сначала требуется выполнить моделирование осредненного течения в камере сгорания.

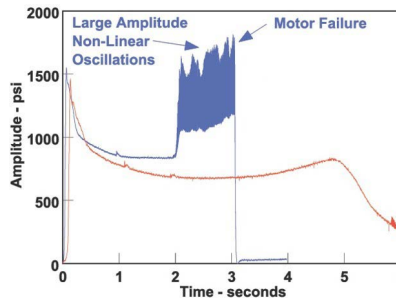


РИС. 1. Оциллограмма давления устойчивого (красная кривая) и неустойчивого (синяя) твердотопливного ракетного двигателя¹.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® предоставляет численную платформу для удобного и точного моделирования динамики газов в камере сгорания и внутренних акустических явлений. Программный пакет для моделирования при помощи метода конечных элементов включает в себя большое число предварительно заданных физических моделей и обобщенный математический интерфейс.

В данной работе мы использовали метод конечных элементов в COMSOL для

моделирования параметров установившегося поля течения в типичном жидкотопливном двигателе с помощью физического интерфейса High Mach Number Laminar Flow (Ламинарный поток с большим числом Маха), который использует уравнения Навье-Стокса для полностью сжимаемого идеального газа совместно с уравнениями сохранения энергии и массы.

Для учета ввода горячего газа, образующегося в результате горения топлива, фронтальная плоскость инжектора моделировалась однородным входным течением сгоревшего ракетного топлива (см. рис. 2). На всех остальных твердых границах было задано граничное условие проскальзывания, а в плоскости среза — условие гибридного выходного потока, учитывающего дозвуковые и сверхзвуковые течения.

Результаты анализа осредненного течения были проверены на действительность и сходимост. Параметры осредненного течения: давление, плотность, скорость течения и скорость звука — требуются для дальнейшего решения уравнения для потенциала акустической скорости. Особенный интерес представляют значения осредненного течения в сужающейся части сопла, в области критического сечения. Плоскость, на которой число Маха равно единице, создает звуковой барьер в потоке. Чтобы создать точную геометрию для акустического анализа, эта плоскость (показанная сиреневым цветом на рис. 3) исключается из анализа осредненного течения.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Математический интерфейс Coefficient Form PDE (коэффициентная форма записи дифференциального уравнения в частных производных) в COMSOL Multiphysics была использована для того, чтобы определить комплексные собственные значения из уравнения для потенциала акустической скорости. Параметры осредненного течения в уравнении потенциала акустической скорости были взяты из результатов анализа осредненного течения. Газодинамика в камере сгорания играет решающую роль в определении граничных условий для акустического анализа. В сужающейся и расширяющейся частях ракетного сопла, а именно в плоскости, где число Маха равно единице, градиенты давления, скорости и плотности теоретически стремятся к бесконечности. Далее по течению от этой плоскости акустические возмущения переносятся с осредненным течением на сверхзвуковых скоростях.

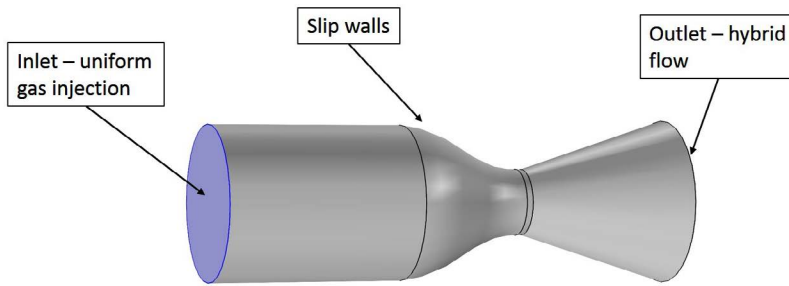


РИС. 2. Используемая в модели геометрия жидкостного двигателя с указанием граничных условий.

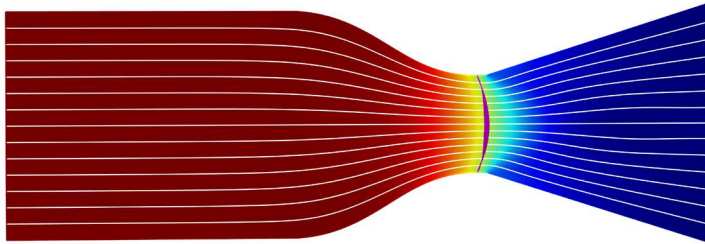


РИС. 3. Линии тока скорости на графике давления в камере. Плоскость, на которой число Маха равно единице, выделена сиреневым.

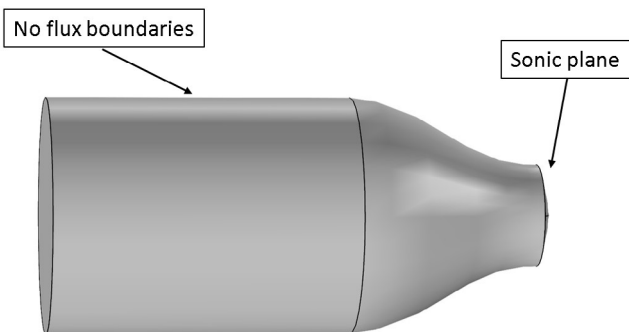


РИС. 4. Геометрия для акустического анализа с указанными граничными условиями.

По этой причине возмущения, возникшие далее по течению от этой плоскости, не распространяются против течения. Расширяющаяся секция сопла не производит шумов и не влияет на акустику камеры сгорания. Геометрия модели обрезается на звуковой линии сопла, где автоматически выполняется граничное условие нулевого потока (см. рис. 4). Остальные границы моделируются граничным условием нулевого потока, что предполагает нулевое поглощение звука на всех поверхностях.

Анализ собственных значений дает комплексные моды собственных колебаний и собственные значения, соответствующие каждой моде акустических колебаний. Действительная часть комплексных собственных значений соответствует затуханию акустических колебаний,

рассчитанных из уравнения потенциала акустической скорости, мы видим, что высокоточные модели лучше описывают физику этих явлений (см. рис. 5). Включение параметров осредненного течения в уравнение потенциала акустической скорости позволяет точно учесть сдвиг фазы, вызванный установившимся течением газа. Учет фазы совершенно необходим, поскольку модели неустойчивого горения основаны на интегрировании акустических собственных векторов по времени и пространственным координатам.

Моделирование газодинамики ракеты и вычисление собственных мод акустических колебаний в COMSOL Multiphysics дает более точную форму мод, чем ранее используемые методы. Данные высокоточные акустические расчеты легко включить в модели неустойчивого горения для того, чтобы

а мнимая часть определяет частоту колебаний. Комплексные собственные векторы определяют пространственную амплитуду и фазу акустических волн.

Сравнивая формы акустических мод, рассчитанных из классического однородного волнового уравнения (уравнения Гельмгольца), с формами мод,

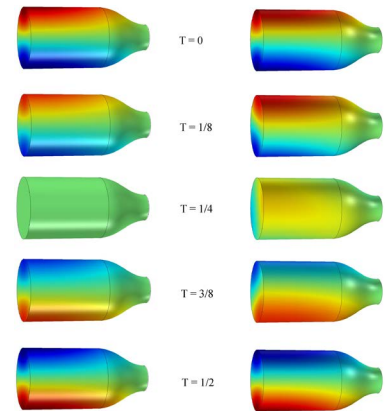


РИС. 5. Сравнение первой тангенциальной моды собственных колебаний, полученной из классического однородного уравнения (слева) и из уравнения потенциала акустической скорости (справа) на половине периода колебаний T .

конструкторы и инженеры могли лучше прогнозировать процессы горения. Теперь мы сможем точно смоделировать добавление перегородок для демпфирования или изменение рабочих условий до испытаний.

⇒ ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА

Более подробное описание неустойчивого горения должно включать в себя поперечные и тепловые колебания, сопряженные с акустикой камеры. Поперечные колебания являются прямым следствием акустических колебаний, а тепловые колебания могут возникать и в их отсутствие. Дальнейшая работа с использованием COMSOL Multiphysics будет сосредоточена на расчете вязких поперечных волн, которые сопутствуют любым акустическим колебаниям. ❖

Эта статья была написана Шоном Р. Фишбахом (Sean R. Fischbach), Marshall Space Flight Center/ Jacobs ESSSA Group, MSFC, Хантсвилл, штат Алабама, CLIA.

ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. F. S. Bloomshield, *Lessons Learned in Solid Rocket Combustion Instability*, 43rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007.
2. J. C. French, *Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling*, Vol. 27, Journal of Propulsion and Power, 2011.
3. R. K. Sigman and B. T. Zinn, *A Finite Element Approach for Predicting Nozzle Admittances*, Vol. 88, Journal of Sound and Vibration, 1983, pp. 117-131.
4. L. M. B. C. Campos, *On 36 Forms of the Acoustic Wave Equation in Potential Flows and Inhomogeneous Media*, Vol. 60, Applied Mechanics Reviews, 2007, pp. 149-171.



МОТОЦИКЛЫ MAHINDRA. ЧТО СКРЫВАЕТСЯ ЗА РЕВОМ МОТОРОВ?

Для того чтобы обеспечить соответствие двигателей своих мотоциклов нормативам по шуму и при этом сохранить уровень удовлетворенности клиентов, компания Mahindra Two Wheelers использовала методы мультифизического моделирования.

ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

Индийская компания Mahindra Two Wheelers производит широкий ассортимент мопедов, мотороллеров и мотоциклов для внутреннего рынка. Благодаря внедрению методов численного моделирования на раннем этапе разработки водители и пассажиры могут наслаждаться превосходной динамикой и экономичностью мототехники и путешествовать с комфортом даже по самым плохим дорогам Индии. Для исследования шумовых и вибрационных характеристик двигателя, систем впуска и выпуска в компании Mahindra прибегли к мультифизическому моделированию.

Знания, полученные инженерами в результате численного моделирования, позволили улучшить конструкцию двигателя и уменьшить шум до желаемого уровня. «Программное обеспечение COMSOL помогло нам существенно снизить количество итераций на этапе разработки, экономия, таким образом, наше время», — говорит Никет Бхатия (Niket Bhatia), заместитель руководителя отдела R&D, Mahindra.

⇒ ДОСТИЖЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ШУМА

Двигатель внутреннего сгорания содержит множество узлов и компонентов, которые могут быть источником шума. Впуск воздуха, сгорание топливовоздушной смеси, выпуск отработанных газов,

работа поршней, зубчатых колес и клапанного механизма — все это является источником шумового излучения.

Шум, сопровождающий сгорание топливовоздушной смеси, вызван вибрациями конструкции в результате быстрого увеличения давления в цилиндрах. Через подшипники такие вибрации передаются от коробки передач на картер двигателя, создавая шум.

Исследование акустических характеристик двигателя путем физических испытаний требует значительных материальных и временных затрат. Команда инженеров компании Mahindra решила дополнить физические испытания акустическим моделированием, чтобы изучить, как именно конструкция двигателя может влиять на уровень производимого им шумового излучения. Задача исследователей состояла в том, чтобы найти наиболее шумные узлы и компоненты двигателя, а также внести изменения в конструкцию для снижения его уровня.

С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics® рабочая группа выполнила расчет акустического излучения одноцилиндрового двигателя внутреннего сгорания (ДВС) во время его работы. Расчетная область вокруг двигателя была ограничена

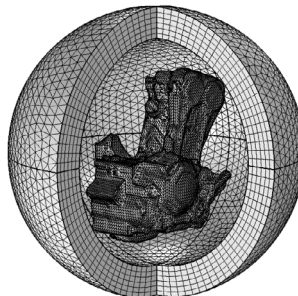
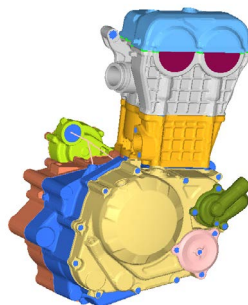


РИС. 1. Вверху: геометрическая CAD-модель двигателя. Внизу: трехмерная модель, окруженная PML, с наложенной сеткой.

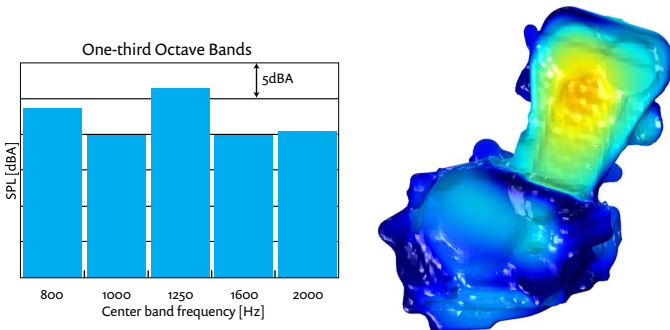


РИС. 2. Слева: график третьоктавной полосы частот. Справа: трехмерный поверхностный график с результатами расчета уровня звукового давления.

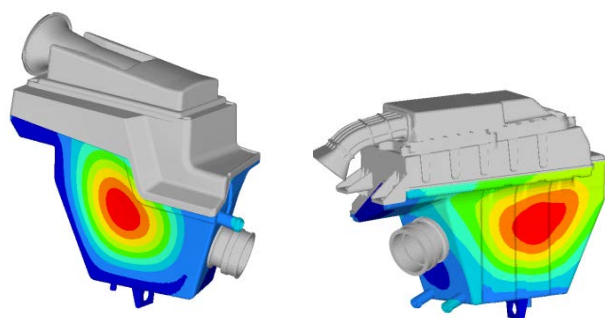


РИС. 3. Конструкция воздушного фильтра. Слева: Исходная конструкция. Справа: модифицированная конструкция, оснащенная ребрами, улучшающими амплитудную передаточную функцию.

снаружи с помощью идеально согласованных слоев (PML — Perfectly Matched Layers). Идеально согласованные слои поглощают испускаемые волны практически без отражений (рис. 1). Это обеспечивает высокую точность получаемых результатов, позволяя уменьшить размер вычислительной области.

Команда решила изучить диапазон частот от 800 Гц до 2000 Гц, поскольку физические испытания показали, что именно на эту часть акустического спектра приходится большая часть шумового излучения, создаваемого двигателем во время работы. Подобный выбор позволил инженерам сэкономить вычислительные ресурсы, а также лучше понять, какие участки конструкции мотоцикла ответственны за большую часть испускаемого им шума.

Полученные результаты послужили отправной точкой для дальнейшего изучения уровня звукового давления, а также стали основанием для предложенных изменений в конструкции головки и блока цилиндра: увеличения высоты ребер и толщины стенок, усиления места крепления (рис. 2). Регулировка данных параметров позволила снизить уровень звукового давления в заданном частотном диапазоне.

⇒ СНИЖЕНИЕ ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ВПУСКА

Системы впуска и системы выпуска в автомобилях и мотоциклах производят немало шума. Основным фактором, влияющим на уровень шума системы впуска, является шум, возникающий в корпусе воздушного фильтра, обычно изготовленном из пластмассы. Поэтому был выполнен анализ акустической передаточной функции пластмассовых стенок корпуса воздушного фильтра. Для улучшения данной функции конструкция корпуса воздушного фильтра была изменена путем добавления ребер (рис. 3). Это позволило снизить уровень шума, производимого воздушным фильтром (рис. 4).

⇒ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЗВУКА ГЛУШИТЕЛЯ

Требования стандартов зачастую противоречат желанию клиентов получить громкий рычащий звук выхлопа, который воспринимается большинством как важный показатель мощности мотоцикла. Ограничения допустимого уровня шума заставили инженеров Mahindra искать способ усилить рычание глушителя в низкочастотном диапазоне, одновременно уменьшив громкость высокочастотных звуков.

Поскольку ослабление звука выхлопа является основной функцией глушителя, необходимо дополнительно учитывать такие факторы, как возможность обеспечения малого обратного давления и соответствие нормативам по шуму. Характеристики глушителя системы выхлопа в автомобилестроении определяются следующими тремя параметрами: затуханием, вносимыми потерями и уровнем излучаемого шума. Затухание является наиболее важным из них и зависит исключительно от конструкции глушителя, а не от источника давления. Основной задачей, которая стояла перед

командой инженеров, было спрогнозировать затухание для мотоциклетного глушителя, после чего оптимизировать его уровень в определенном диапазоне частот.

Расчет выполнялся для глушителя одноцилиндрового мотоциклетного мотора. Расчет затухания для глушителя проводился с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. С помощью инструментов модуля Акустика в соответствующих местах были заданы такие граничные условия, как непрерывность и жесткая акустическая стенка (sound hard wall).

Характеристики перфораций в трубках задавались на основе данных о пористости данного участка с помощью встроенной модели переходного (трансферного) импеданса. Необходимые для расчета исходные данные включали пористость участка, толщину

экрана и трубки, а также диаметр отверстий. Для пористых материалов, например стекловаты, аэродинамическое сопротивление определяется с помощью пороакустической модели, также доступной в программе. В качестве исходных данных для зоны впуска было использовано единичное давление, а на границах впуска и выпуска было применено граничное условие излучения/поглощения для плоской волны.

На основании полученных результатов в конструкцию были внесены изменения — увеличена длина трубы, размещенной внутри глушителя. Глушитель новой конструкции позволил команде выполнить задачу по уменьшению затухания на низких частотах (рис. 5). В результате было достигнуто требуемое увеличение уровня шума на низких частотах, так называемое «рычание».

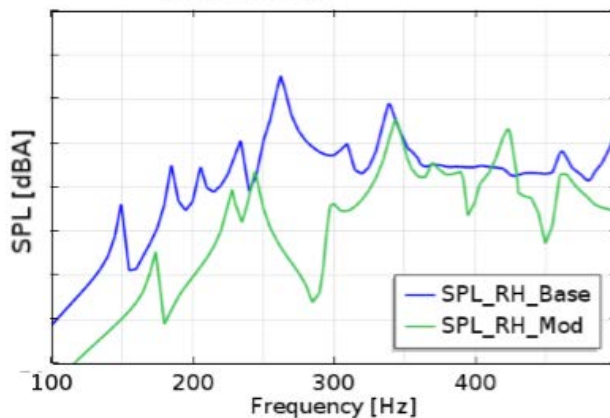


РИС. 4. Результаты расчетов, демонстрирующие снижение шума модифицированного корпуса воздушного фильтра.

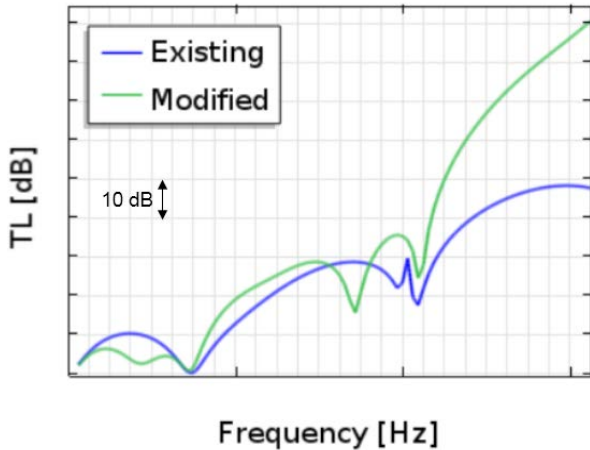


РИС 5. Сравнение затухания для различных конструкций. Модернизированная конструкция характеризуется пониженным затуханием на низких частотах и повышенным на высоких. Модифицированная конструкция обеспечивает желаемый «рычащий» звук выхлопа и соответствие нормативам.

⇒ **ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЗВОЛЯЕТ СЭКОНОМИТЬ ВРЕМЯ И ДЕНЬГИ**

«Лично мне понравилась как гибкость программного обеспечения в целом, так и возможности входящих в его состав инструментов, таких как COMSOL API, — говорит Ульхас Мохите (Ulhas Mohite), руководитель отдела исследований и разработок Mahindra. — Это позволило нам автоматизировать процессы, используя Java-скрипты, которые, например, при выполнении анализа акустических характеристик позволили нам использовать разные сетки для различных частотных точек и найти компромисс между точностью моделирования и затрачиваемым на вычисления временем. Также благодаря этому мы могли автоматически экспортировать необходимые данные, такие как графики уровня звукового давления на поверхности или данные об уровне звукового давления в дальней зоне, непосредственно во время расчета. Это помогло нам сэкономить массу времени по сравнению с постобработкой и экспортом данных вручную».

Также Мохите назвал невероятно полезной среду разработки приложений, входящую в состав программного пакета COMSOL. «С помощью среды разработки приложений мы создали приложение для моделирования (рис. 6), которое сравнивает файлы результатов расчета, а также строит графики уровня звукового давления, экономя огромное количество времени».

«С помощью среды разработки приложений мы создали приложение для моделирования, которое сравнивает файлы результатов расчета, а также строит графики уровня звукового давления, экономя огромное количество времени.»

— УЛЬХАС МОХИТЕ (ULHAS MOHITE), РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК MAHINDRA

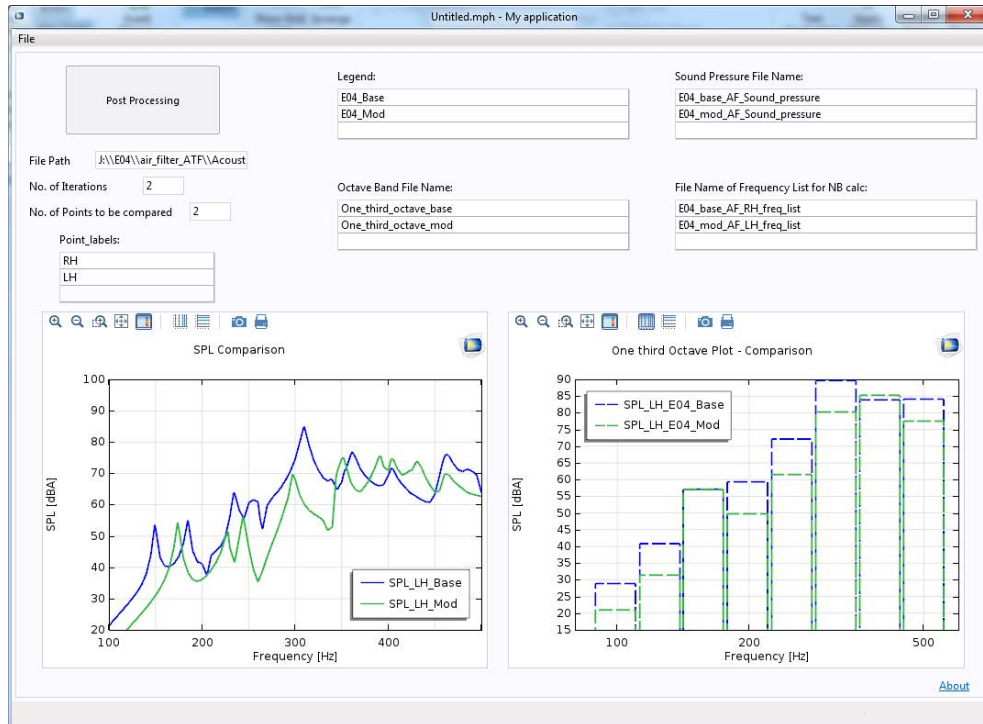


РИС 6. С помощью среды разработки приложений инженерам компании Mahindra удалось создать простое в использовании приложение, позволяющее сравнивать расчетные данные и строить графики уровня звукового давления.

Результаты расчета очень хорошо коррелировали с данными физических испытаний. Используя средства моделирования, инженеры компании Mahindra смогли на раннем этапе внести в конструкцию необходимые изменения, руководствуясь имеющимися результатами расчетов. Это помогло сэкономить материальные и временные ресурсы, необходимые для эффективной разработки изделия. «Верифицированные на экспериментальных данных модели помогли нам двигаться в правильном направлении для поиска наиболее подходящего решения проблем шума мотоциклов», — подводит итог Бхатия. ❖

ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mohite, U., Bhatia, N., and Bhavsar, P., "An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load," SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244.
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, COMSOL Blog



ОТ СВОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ К ПРИЛОЖЕНИЯМ ДЛЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ — КОМПАНИЯ АВВ ПРОДОЛЖАЕТ ОПРЕДЕЛЯТЬ БУДУЩЕЕ ОТРАСЛИ ПРОИЗВОДСТВА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Компании, разрабатывающие новое оборудование для силовых трансформаторов, несут затраты на прототипирование и испытания, стремясь снизить уровень шума. Команда инженеров из компании АВВ разрабатывает мультифизические модели и специализированные приложения, чтобы дать представление о создаваемых ими конструкциях другим отделам компании.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Каждый день, что бы мы ни делали — готовили обед или заряжали смартфон, — мы пользуемся электрическими сетями, которые снабжают энергией наши дома, офисы и школы. В эти многокомпонентные сети входят электростанции, вырабатывающие электроэнергию, высоковольтные линии передачи электроэнергии на большие расстояния, распределительные линии,

доставляющие энергию в каждый дом, и связанное с ними оборудование для управления потоками мощности и защиты.

Часть этого оборудования — силовые трансформаторы, которые повышают или понижают напряжение в линиях электропередачи переменного тока (см. рис. 1). Повышение напряжения выгодно для передачи энергии на большие расстояния, так как при этом уменьшаются

потери энергии. С другой стороны, высокие напряжения были бы опасны для потребителей электричества, поэтому трансформаторы повышают напряжение при подаче мощности в энергосистему и понижают его перед жилыми районами и домами.

Но трансформаторы не бывают бесшумными — в нескольких шагах от работающего трансформатора слышно



РИС. 1. Фотография трансформаторного оборудования для высоковольтных линий электропередачи.

жужжание или гудение. Хотя невозможно избавиться от шума полностью, нормативные документы требуют, чтобы шум был снижен до безопасного уровня. Грамотное проектирование трансформаторов позволяет достичь этого.

Компания ABB (с головным офисом в Цюрихе, Швейцария), один из крупнейших производителей трансформаторов по всему миру, использует численное моделирование и вычислительные приложения для прогнозирования и снижения уровня шума от своих трансформаторов. С помощью программного обеспечения для моделирования COMSOL Multiphysics® и Среды разработки приложений они выполняют виртуальные проверки проектов, тестируют различные конфигурации и распространяют результаты моделирования через специализированные пользовательские интерфейсы, дающие доступ к численным моделям.

⇒ **СНИЖЕНИЕ ШУМА ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ**

Шум трансформатора обычно исходит из нескольких источников, например

от вибрации сердечника трансформатора, вспомогательных вентиляторов и насосов системы охлаждения. Для снижения уровня шума каждый источник требуется рассматривать отдельно.

Трансформаторы, производимые ABB, включают в себя металлический сердечник с витками проводов вокруг различных секций, защитный кожух или резервуар и изоляционное масло, заполняющее резервуар (см. рис. 2, верхняя часть). Переменный ток, текущий по виткам одной обмотки, создает магнитный поток, наводящий ток в соседней обмотке. Напряжение изменяется за счет различного числа витков в обмотках.

Так как сердечник выполнен из магнитоэластичного материала — стали, эти магнитные потоки, меняющие свое направление, вызывают механические деформации. Быстрое расширение и сжатие металла и создает вибрации. Эти вибрации передаются на стенки резервуара через масло и фиксаторы, удерживающие сердечник и создают характерный гул, который называют шумом сердечника (см. рис. 2, нижняя часть).

Кроме шума сердечника, переменный ток в обмотках создает силу Лоренца, действующую на отдельные витки

и вызывающую вибрации, известные как шум нагрузки. Их механическая энергия также передается на резервуар.

Так как уровень шума от этих источников определяется взаимосвязанными электромагнитными, акустическими и механическими явлениями, инженеры из Корпоративного исследовательского центра ABB (ABB CRC) в Вестеросе, Швеция, должны хорошо понимать характер этих внутренних процессов, чтобы снизить уровень шума при проектировании трансформаторов.

⇒ **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

«Мы выбрали пакет COMSOL Multiphysics, — говорит исследователь из ABB CRC Мустафа Кавасоглу (Mustafa Kavassoglu), — поскольку он позволяет легко решать связанные междисциплинарные задачи». «Поскольку в этом проекте требовалось моделировать электромагнитные, акустические и механические явления, программный пакет COMSOL® оказался лучшим доступным вариантом для решения этих трех классов задач в единой среде».

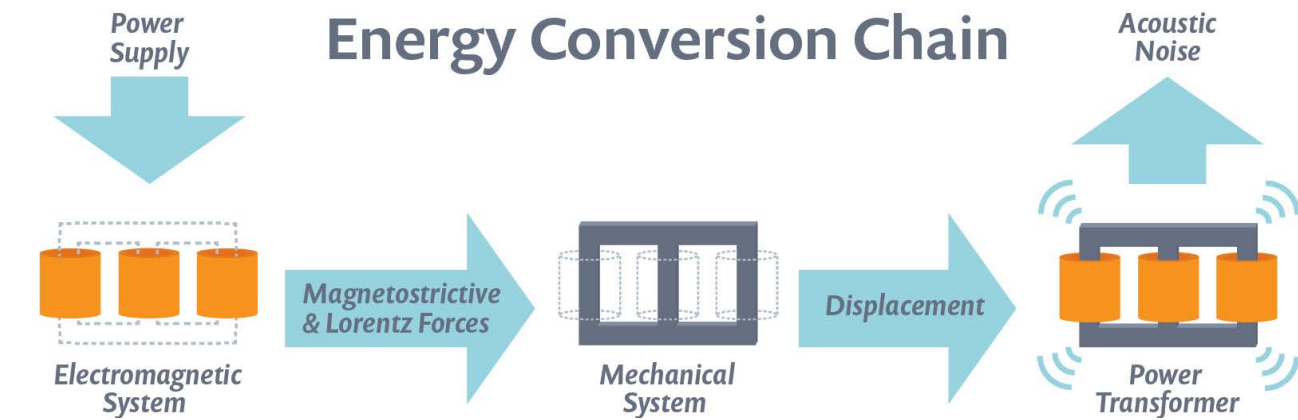
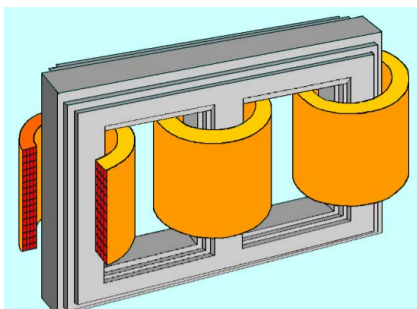


РИС. 2. Слева сверху: CAD-модель активной части трехфазного трансформатора с обмотками вокруг сердечника. Вверху справа: активная часть силового трансформатора, погруженная в резервуар с маслом. Внизу: последовательность преобразования энергии, ведущая к созданию шума сердечника (магнитоэластичность в сердечнике) и шума нагрузки (силы Лоренца в обмотках).

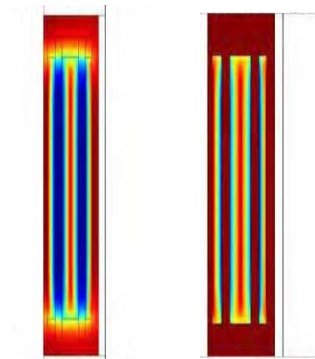


РИС. 3. Расчетная плотность магнитного потока (слева) и сила Лоренца (справа) в витках обмотки трансформатора.

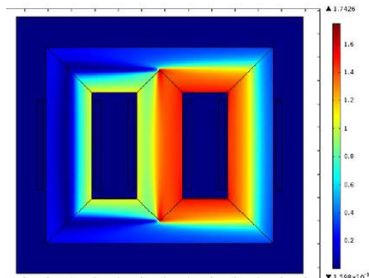
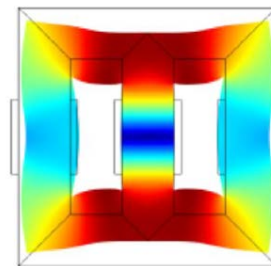


РИС. 4. Слева: результаты, полученные в программном пакете COMSOL®, для уровней магнитного потока в стали. Справа: Механические резонансы в сердечнике. Деформации увеличены для наглядности.



Мустафа Кавасоглу, доктор Андерс Данерюд (Anders Daneryud), главный исследователь, и доктор Ромен Атель (Romain Haettel), главный инженер, составляют рабочую группу ABB CRC, работающую над акустикой трансформаторов. Их целью было создание набора моделей и вычислительных приложений для расчета магнитных потоков в сердечнике трансформатора и обмотках (рис. 3, слева), сил Лоренца в обмотках (рис. 3, справа), механических перемещений, вызванных магнитострикционной деформацией, и обусловленных этим шумов, т. е. уровня звукового давления акустических колебаний, распространяющихся в резервуаре. Команда разработчиков тесно сотрудничает с бизнес-подразделением ABB Transformers, часто полагаясь на опыт и знания доктора Кристофа Плетнера (Christoph Ploetner), известного эксперта в области силовых трансформаторов, чтобы точно следовать всем требованиям и нуждам бизнеса.

Одна из моделей прогнозирует уровень шума, создаваемого сердечником вследствие магнитострикции. Команда начала с электродинамической модели, позволяющей рассчитывать магнитные поля, создаваемые переменным током, а также магнитострикционные деформации в стали.

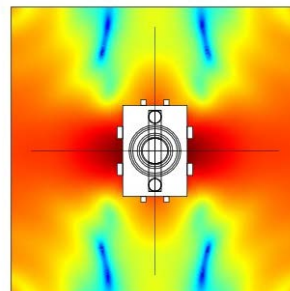
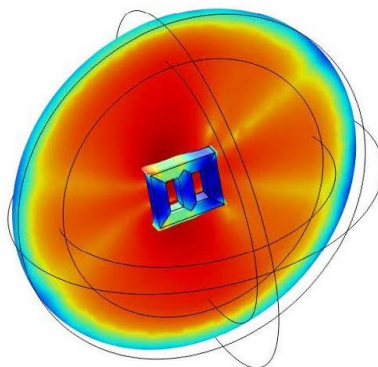


РИС. 5. Результаты акустического анализа, отображающие поле звукового давления вокруг сердечника (слева) и вокруг трансформатора (справа).

Геометрия модели состояла из стального сердечника, обмоток и внешней области, представляющей резервуар. «На основе магнитострикционных деформаций мы рассчитали перемещения, а затем вычислили резонансные характеристики на разных частотах с помощью модального анализа», — рассказал Кавасоглу (см. рис. 4). «Резонансы с легкостью вызываются магнитострикционными деформациями, что приводит к заметному усилению вибраций на этих частотах».

Затем они смогли спрогнозировать распространение звуковых волн в масле и рассчитать обусловленные ими вибрации

резервуара, которые ведут к излучению звуковых волн в окружающую среду (см. рис. 5).

Они также выполнили моделирование вибраций витков обмотки, вызывающих шум нагрузки, и определили величины давления на стенки резервуара, связанного с создаваемым при этом звуковым полем (см. рис. 6). Параметрический анализ, выявляющий сложные связи между параметрами устройства (например, толщиной стенок резервуара и свойствами материалов) и итоговым уровнем шума трансформатора, позволил снизить шум, изменяя геометрию и конструкцию сердечника, обмоток и резервуара.

«С помощью лицензии на COMSOL Server™ мы также устанавливаем и тестируем наше приложение в других офисах, что позволяет с легкостью распространять данные и результаты расчетов. Глобальная лицензия — это прекрасно; у нашей организации есть офисы по всему миру, и инженеры в других офисах могут пользоваться этими приложениями.»

⇒ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВО ВСЕЙ КОМПАНИИ ABB

Команда исследовательского центра продолжает использовать программный пакет COMSOL не только для понимания и моделирования физических процессов, но и для того, чтобы другие конструкторы компании ABB и бизнес-подразделение в целом могли воспользоваться плодами

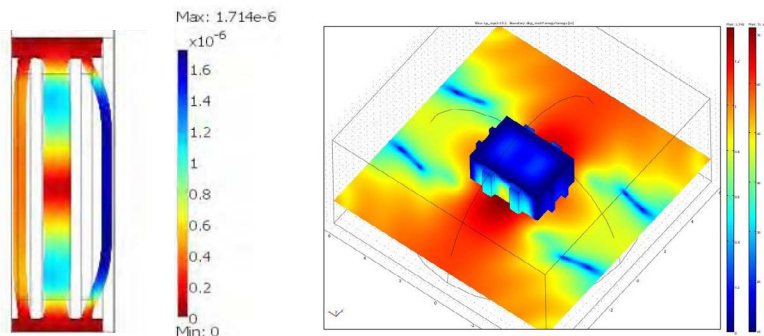


РИС. 6. Слева: Расчетные результаты деформаций в обмотках. Деформации увеличены для наглядности. Справа: результаты показывают уровни давления звука вне резервуара и перемещения стенок.

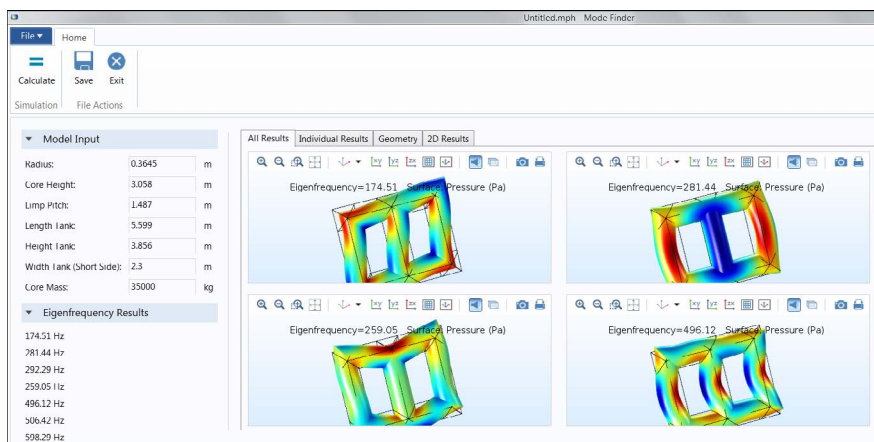


РИС. 7. Скриншот из первого приложения для моделирования, созданного для расчета собственных частот сердечника трансформатора. Вкладка слева показывает исходные данные модели, справа показаны результаты — расчетные значения собственных частот. Деформации увеличены для наглядности.

их трудов. С помощью Среды разработки приложений COMSOL Multiphysics они превратили свои мультифизические модели в приложения, которые легко подстраиваются под нужды каждого отдела компании.

Эти приложения для моделирования упрощают испытания и проверки, которыми заняты инженеры-конструкторы и инженеры научно-исследовательского отдела: «Конструкторы ранее пользовались инструментами, основанными на статистике и эмпирических моделях. Мы восполняем пробелы, развертывая приложения для моделирования. Среда разработки приложений предоставляет доступ к расчетам методом конечных элементов через пользовательский интерфейс, так что другим инженерам не требуется изучать теорию метода конечных элементов», — объясняет Атель.

Одно из приложений (см. рис. 7) вычисляет собственные частоты сердечника трансформатора, которые могут привести к повышению уровня шума из-за того, что некоторые частоты попадают в слышимый диапазон. Это приложение включает в себя

как физическую модель, разработанную в программном обеспечении COMSOL®, так и специальные методы (макросы), написанные на языке Java® в Среде разработки приложений.

«Наши конструкторы используют стандартные электронные таблицы, и это хорошо подходит для часто проектируемых трансформаторов. Но когда мы предлагаем новые конструкции или меняем габариты трансформаторов, этот подход может привести к проблемам, например ошибочным выводам и менее точным данным об уровнях шума. Такие ошибки могут дорого обойтись, если уже законченный трансформатор потребует дополнительных средств шумоподавления», — продолжает Атель.

«Кроме вопроса стоимости, есть еще вопрос времени. Новое приложение сделает работу конструкторов проще и продуктивнее благодаря точности метода конечных элементов».

Специализированные приложения дают пользователям удобный инструмент для того, чтобы проверить, как геометрия, свойства

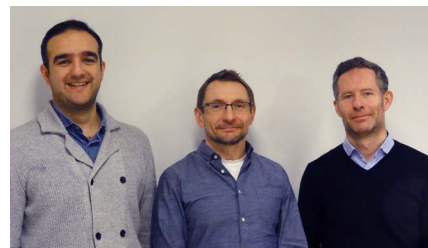
материалов и другие параметры конструкции влияют на итоговые уровни шума трансформатора. «Мы тщательно обдумали, к каким параметрам мы предоставляем доступ, уделяя внимание самым важным из них», — добавляет Кавасоглу.

Столь гибкие инструменты необычайно полезны в проектировании и виртуальных испытаниях, учитывая широкий диапазон промышленных задач, для которых ABB конструирует трансформаторы. «Мы проектируем трансформаторы для любых промышленных задач. Сейчас мы уделяем больше внимания трансформаторам переменного тока большой мощности, используемым производителями электроэнергии, которые передают и распределяют электроэнергию в масштабах города», — объяснил он.

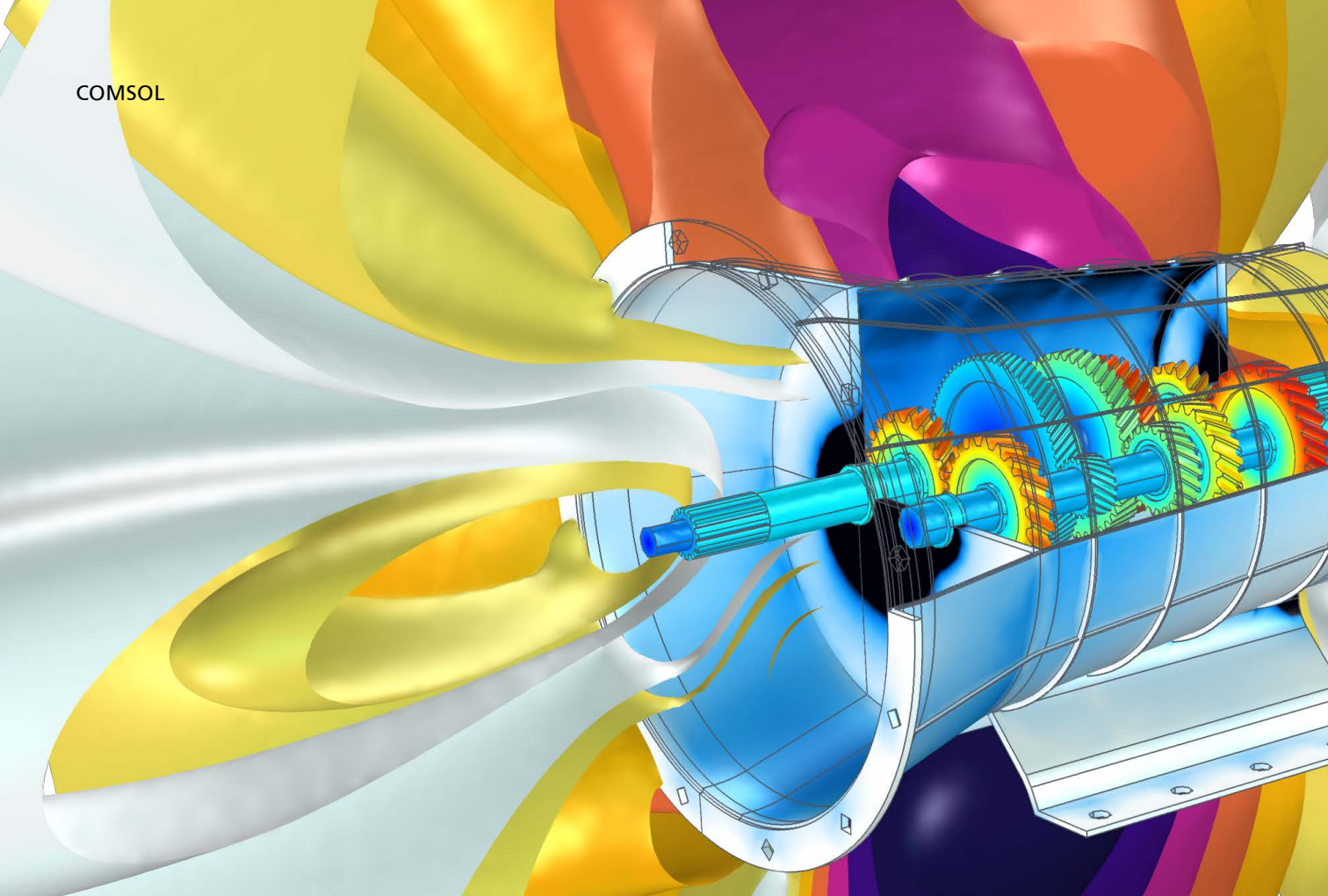
«Но результаты нашей работы пригодятся для любых видов трансформаторов, и при получении конкретного запроса мы адаптируем приложение в соответствии с ним. Это позволяет нам с легкостью выполнять дополнительные работы по проектированию. Среда разработки приложений сделала распространение знаний и технологий гораздо проще.

«С помощью лицензии на COMSOL Server™ мы также устанавливаем и тестируем наше приложение в других офисах, что позволяет с легкостью распространять данные и результаты расчетов. Глобальная лицензия — это прекрасно; у нашей организации есть офисы по всему миру, и инженеры в других офисах могут пользоваться этими приложениями». После локальной установки COMSOL Server специалисты по моделированию могут управлять приложениями и разворачивать их, делая их доступными через клиентское приложение или веб-браузер.

В настоящее время команда работает над вторым приложением, рассчитывающим шум нагрузки. После развертывания в бизнес-подразделении это приложение снимет с конструкторов и инженеров по продажам груз утомительных вычислений, позволяя им запускать больше виртуальных тестов без необходимости работать с подробной моделью, что позволит ABB быстро и легко производить лучшие трансформаторы в мире. ❖



Слева направо: Мустафа Кавасоглу, Ромен Атель и Андерс Данерюд из ABB CRC.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ И ШУМА В КОРОБКЕ ПЕРЕДАЧ

Численное прогнозирование уровней шума, создаваемого такой комплексной динамической системой, как коробка передач, обеспечивает инженеров-разработчиков нужной информацией на ранних стадиях проектирования.

ПАВАН СОАМИ (PAWAN SOAMI)

При своей работе коробка передач, используемая для передачи энергии от двигателя к колесам, достаточно сильно шумит, что объясняется двумя основными причинами. Первая состоит в том, что поперечные и осевые силы, возникающие в результате передачи энергии от одного вала к другому с помощью шестерни, оказывают нежелательное воздействие на подшипники и корпус. Вторая обусловлена гибкостью различных компонентов коробки передач, в том числе подшипников и корпуса, что также может приводить к вибрации.

Переменная жесткость зубчатого сцепления в коробке передач вызывает постоянную вибрацию, передающуюся на корпус, который, в свою очередь,

тоже вибрирует и передает энергию окружающей жидкости (например, трансмиссионному маслу), в результате чего в ней возбуждаются акустические волны. Чтобы точно смоделировать это комплексное явление, потребуется несколько связанных исследований: анализ механических контактов, анализ динамики многотельной системы и акустический анализ.

Рассмотрим для примера методику расчета для коробки передач, содержащей приводной вал, соединенный с промежуточным валом и пятью парами косозубых шестерен (рис. 1). Шестерни отличаются по размеру, но сделаны из одного и того же материала — конструкционной стали.

⇒ РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В ЗУБЧАТОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ

Зубчатое зацепление, которое считается упругим, является источником постоянной вибрации. По этой причине необходимо оценивать жесткость шестерен в разных положениях. Зубья шестерен во время работы деформируются, и для определения того, как изменяется жесткость в течение цикла работы зубчатого сцепления, выполняется стационарный параметрический анализ (по углу поворота). Для расчета к контакту применяется метод штрафов, и определяются ограничения для учета скручивания шестерен, в результате которого возникают контактные силы.

Результаты моделирования в виде распределения напряжения по Мизесу в зубчатой паре показывают высокие значения напряжений в точках контакта и в основаниях зубьев (рис. 2). Проведенный расчет позволяет пронаблюдать и проанализировать изменение жесткости зубчатого сцепления при вращении вала, что показано на рис. 2.

⇒ АНАЛИЗ МНОГОТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗ ВАЛОВ, ШЕСТЕРЕН И КОРПУСА

Анализ многотельных систем выполняется во временной области для одного полного

поворота приводного вала с учетом жесткости зубчатого сцепления, спрогнозированного при расчете контакта. Этот анализ необходим для расчета динамики работы шестерен и величин результирующих вибраций, передаваемых на корпус. В данном случае анализ выполняется при частоте вращения двигателя 5000 об./мин и выходном крутящем моменте 2000 Н·м. Расчет проводится в предположении, что валы и шестерни являются жесткими, за исключением зубчатого сцепления, жесткость которого взята из предыдущего исследования механического контакта. Корпус выполнен из стали и рассматривается как упругий.

Распределение напряжений по Мизесу в корпусе под действием сил, передаваемых приводным и промежуточными валами, показано на рис. 3. На рис. 3 также показано нормальное ускорение вибрирующего корпуса, являющееся причиной шумового излучения.

На рис. 4 изображена временная диаграмма нормального ускорения в одной из точек наверху корпуса и ее частотный спектр. Частоты, на которых корпус вибрирует с наибольшими амплитудами, лежат в диапазоне между 1500 и 2000 Гц. Деформация корпуса показана на рис. 5.

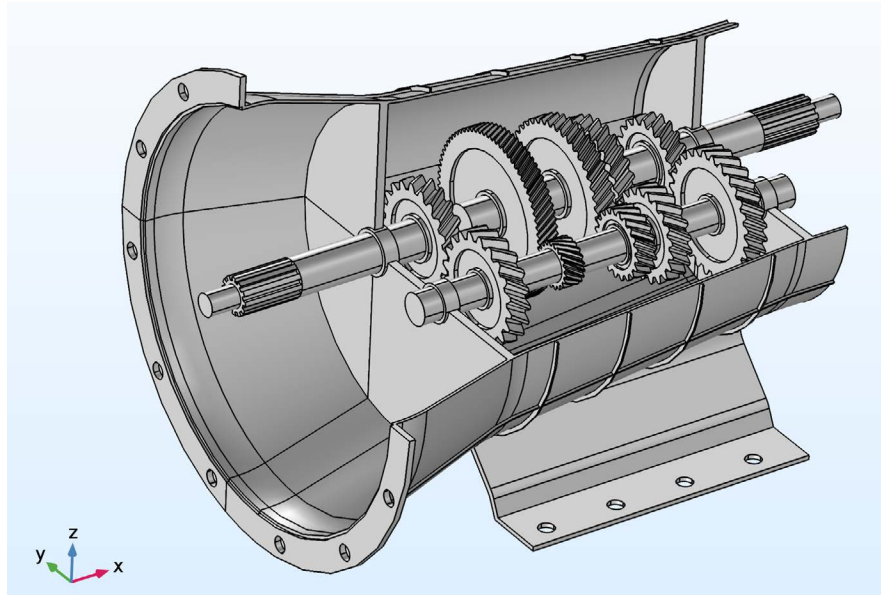


РИС. 1. Геометрия модели 5-ступенчатой механической синхронизированной коробки передач для автомобиля. На рисунке показаны только те компоненты коробки передач, которые задействованы в анализе многотельной системы.

⇒ АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОРПУСА

Нормальное ускорение корпуса, полученное в результате анализа динамики многотельных систем, затем может быть использовано в акустическом исследовании в качестве источника шума. Путем исследования в частотной области можно спрогнозировать уровень звукового давления снаружи коробки передач. Поскольку значения нормального ускорения получены во временной области, для преобразования их в частотную область применяется прямое быстрое преобразование Фурье (БПФ — FFT). Для расчета акустического давления коробку

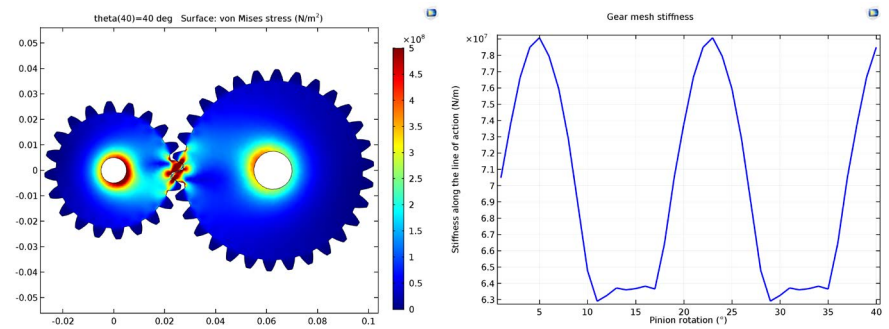


РИС. 2. Слева: распределение напряжений по Мизесу в зубчатой паре. Справа: изменение жесткости зубчатого сцепления при вращении вала.

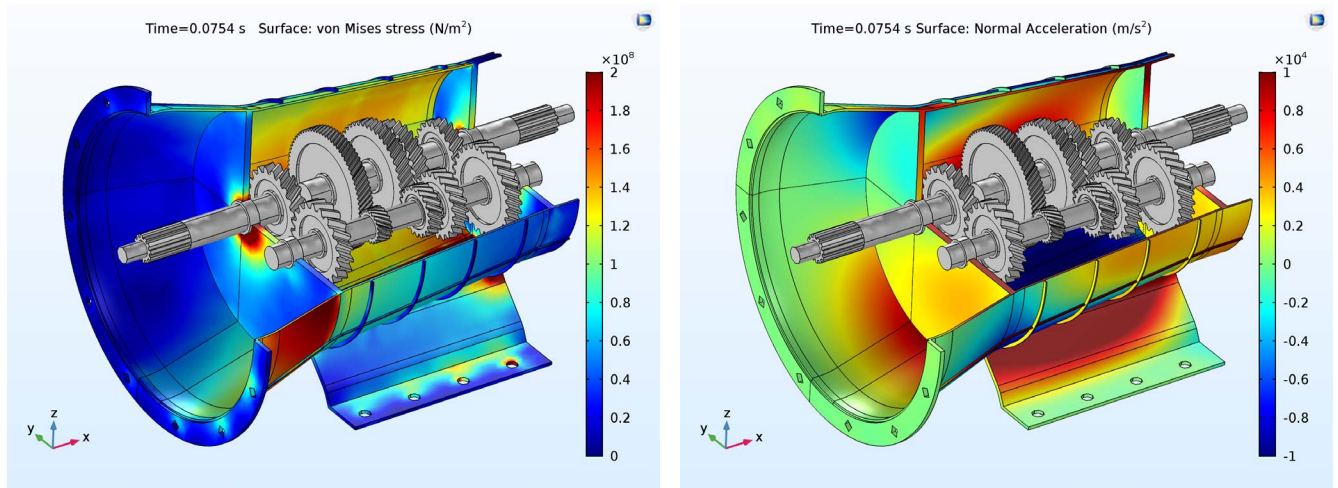


РИС. 3. Слева: распределение напряжений по Мизесу в корпусе. Справа: нормальное ускорение корпуса.

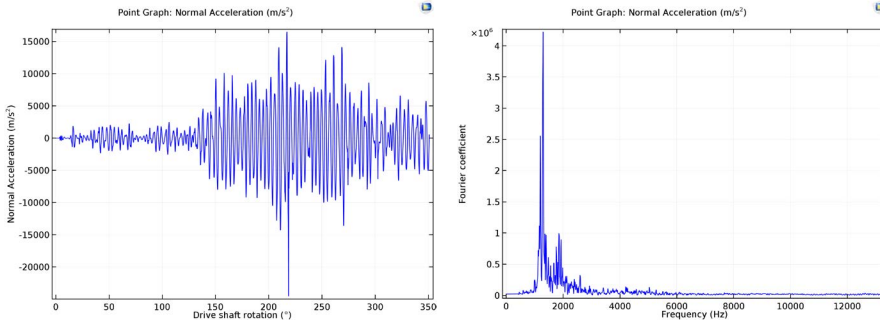


РИС. 4. Нормальное ускорение наверху корпуса. Слева: Временная диаграмма. Справа: Частотный спектр.

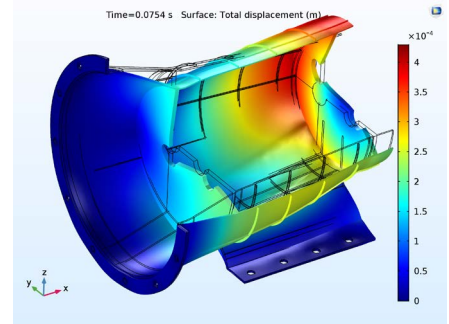


РИС. 5. Деформация корпуса, промасштабированная в 200 раз.

передатчик следует окружить воздушной областью (рис. 6). Чтобы уменьшить размер расчетной области без снижения точности результатов, на внешние границы воздушной области применяется условие излучения типа Зоммерфельда для сферических волновых фронтов, чтобы исходящие акустические волны могли покинуть область моделирования с минимальным отражением.

Уровни звукового давления на поверхности корпуса и в ближней зоне показаны на рис. 7. Также можно построить уровни звукового давления в дальней зоне, что показано на рис. 8. Из графиков дальней зоны в разных плоскостях и на расстоянии 1 м можно узнать преобладающее направление шумового излучения при выбранной частоте.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

- Using Software For Gearbox Noise Prediction, Auto Tech Review, июнь 2017 г.
- How to Model Gearbox Vibration and Noise in COMSOL Multiphysics®, COMSOL Blog
- Моделирование вибраций и шума в коробке передач, Галерея приложений COMSOL

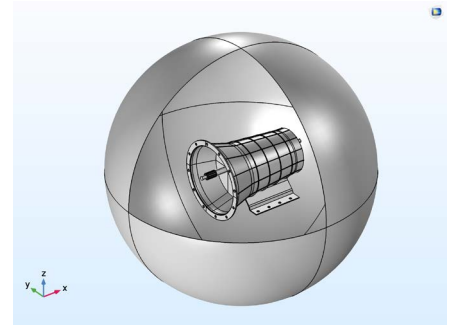


РИС. 6. Воздушная область, окружающая коробку передач и используемая для акустического анализа.

⇒ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В данной заметке мы кратко описали алгоритм расчета вибраций и шума, основанный на моделировании взаимосвязи между динамикой многотельных систем и акустическими волнами. Его можно использовать на ранних стадиях разработки коробки передач, тем самым оптимизируя конструкцию, чтобы свести к минимуму уровень шума для различных режимов работы. ❖

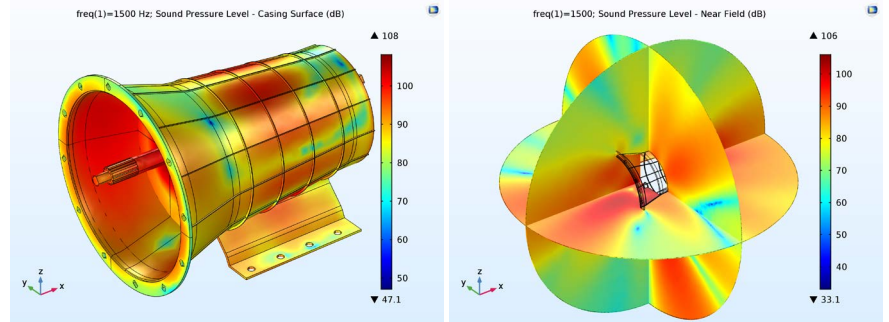


РИС. 7. Уровень звукового давления при частоте 1500 Гц. Слева: Поверхность корпуса. Справа: Ближняя зона.

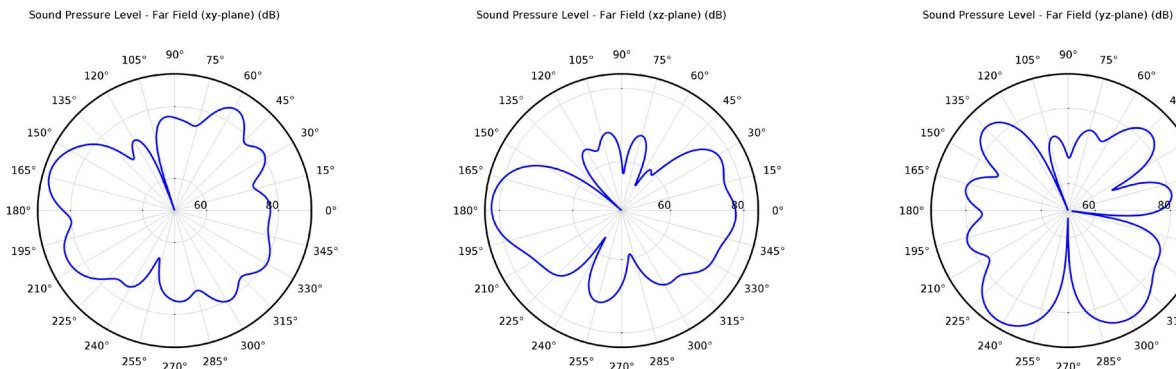


РИС. 8. Уровень звукового давления (дБ) в дальней зоне в плоскостях x-y, x-z и y-z соответственно на расстоянии 1 м для частоты 1500 Гц.

Управляя звуком: применение математического моделирования в передовых исследованиях акустических метаматериалов

Исследования конструкций из метаматериалов с возможностью акустической маскировки завораживают и открывают потенциал для различных вариантов применения: от использования в потребительской аудиотехнике до ультразвуковой диагностики. Исследователи используют математические модели для разработки акустических метаматериалов, сочетая подходы трансформационной акустики и расчеты сильно анизотропных структур.

ГЕММА ЧЕРЧ (GEMMA CHURCH) И ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

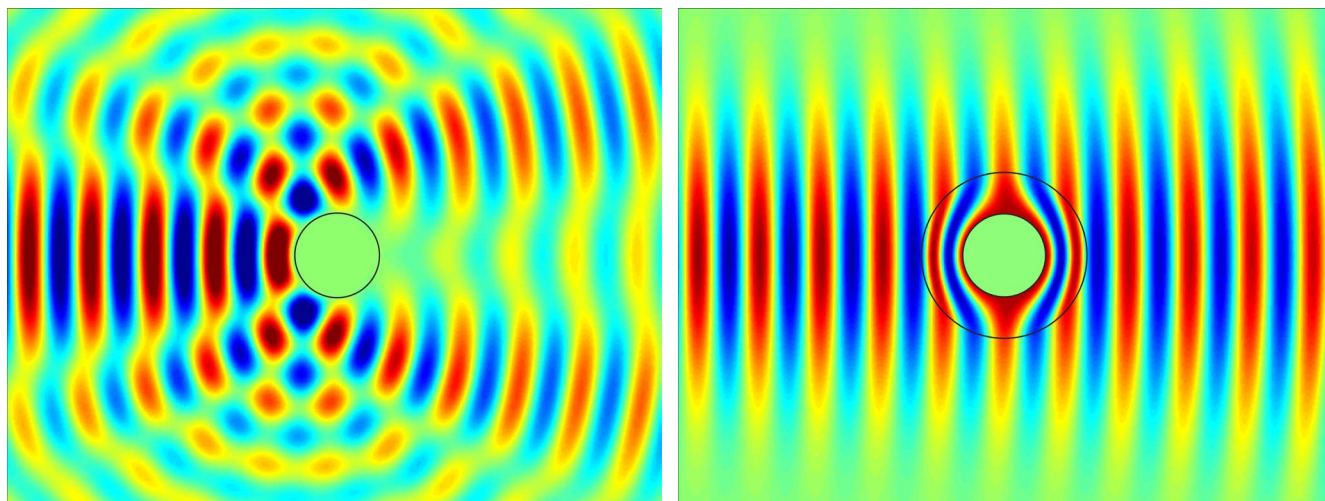


РИС. 1. Управление рассеянием акустической волны от объекта. Слева: картина рассеяния падающей слева волны на жестком объекте очевидна: волна отражается почти зеркально, объект отбрасывает глубокую тень, часть энергии волны излучается (рассеивается) во всех направлениях. Справа: Идеальная маскировочная оболочка объекта сводит к нулю и отражение, и тень, а волна огибает объект из метаматериала практически без потерь.

Метаматериалы — это искусственные материалы со специальными свойствами, не встречающимися в природе, например нулевым или даже отрицательным показателем преломления. Они позволяют создать самые современные приборы с новыми функциональными возможностями, такие как суперлинзы и звукопоглощающие материалы. Недавние работы исследователей были направлены на произвольное манипулирование звуковыми волнами с помощью метаматериалов, в том числе анализировалась возможность сделать объект акустически необнаружимым.

Эти исследования увенчались успехом. С помощью всего лишь нескольких перфорированных листов пластика и огромной работы по математическому и численному моделированию инженеры из университета Дьюка создали первую в мире установку для трехмерной акустической маскировки. Это устройство плавно «изгибает» звуковые волны

вокруг объекта, перенаправляет их в тень и создает впечатление, что волны проходят прямо через окружающую среду. Акустическая «невидимость» — всего лишь один пример применения широкой научной дисциплины под названием «трансформационная акустика», которая применяет тщательно спроектированные материалы для почти произвольного управления звуковыми волнами. Данный технологический прорыв нашел множество вариантов применения — от повседневных до фантастических.

⇒ РАЗРАБОТКА БЕСШУМНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Университет Дьюка вместе с Массачусетским технологическим институтом, Калифорнийским университетом в Беркли, Ратгерским университетом и Техаским университетом в Остине участвует

в пятилетней исследовательской программе, спонсируемой научно-исследовательским управлением ВМС США; ее целью является разработка новых эффективных акустических метаматериалов, которые могут быть созданы в реальности. Стив Каммер (Steve Cummer), профессор по направлению электронной

«В COMSOL просто и достаточно легко манипулировать свойствами материалов и лежащими в их основе динамическими уравнениями.»

— СТИВ КАММЕР, ФАКУЛЬТЕТ ЭЛЕКТРОННОЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ, УНИВЕРСИТЕТ ДЬЮКА

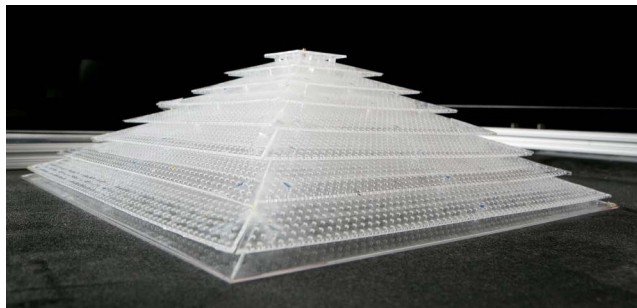
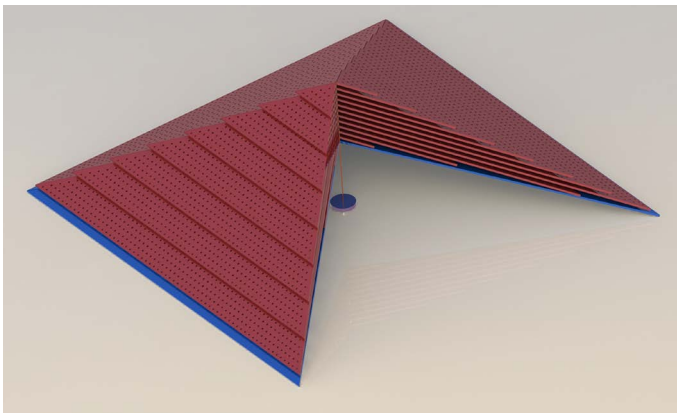


Рис. 2. Модель (слева) и сконструированный вариант (справа) трехмерной акустической маскировочной оболочки в форме пирамиды.

и вычислительной техники в Университете Дьюка, отмечает: «Математические модели — это отправная точка. Разработки акустических метаматериалов оптимизируются с помощью численных моделей, от которых мы переходим к современным технологиям производства и физическим испытаниям».

Одно из направлений текущих исследований группы — разработка конструкций из акустических метаматериалов, применимых в средах на водной основе (например, в человеческом теле) и управляющих падающими звуковыми волнами. Устройства акустической маскировки (рис. 1) оказались хорошей испытательной моделью для демонстрации возможностей произвольного управления звуковыми волнами с помощью трансформационной акустики. Разработка таких покрытий для водных сред стала открытием в области исследования метаматериалов, которые начинались с электромагнитной маскировки и трансформационной оптики, а затем развились в направлении акустической маскировки и двумерных преобразований, а затем нашли применение в трехмерных воздушных конструкциях.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® было важнейшей частью каждого этапа исследований, начиная с самых первых шагов в электромагнитной маскировке. Каммер отмечает: «В первой статье, в которой мы показали модели электромагнитной маскировки с помощью материалов с реальными электромагнитными параметрами, мы использовали программное обеспечение COMSOL®, поскольку это единственный инструмент для расчетов по электромагнетизму, который мог учитывать электромагнитные параметры материалов с произвольной анизотропией».

Решение акустической постановки задачи ученые начали с расчета требуемых свойств материалов. Каммер поясняет: «Чтобы

произвольным образом управлять звуком с помощью трансформационной акустики, мы сначала проводим преобразование координат, описывающее, как требуется изогнуть, повернуть или деформировать поле звуковой волны в конкретном устройстве. После определения этого преобразования координат можно рассчитать, какие эффективные свойства материала требуются для данной конкретной трансформации звуковой волны».

Полученный набор параметров материала почти всегда анизотропен, то есть материал ведет себя по-разному в зависимости от направления. Чтобы работать с такими материалами, исследователи должны иметь возможность менять уравнения, описывающие физику модели. «В COMSOL просто и достаточно легко манипулировать свойствами материалов и лежащими

в их основе динамическими уравнениями. Это было очень важно, потому что мы могли сразу добавить анизотропию к модели и моделировать именно те материалы, которые мы изучали методами трансформационной акустики», — говорит Каммер.

Полученные реальные конструкции работали очень успешно и, по словам Каммера, «удивительно хорошо» соответствовали моделям. «Эталонным подходом в публикациях о метаматериалах для проверки правильности работы конструкции и получаемых физических эффектов сейчас считается измерение полного звукового поля, создаваемого акустическим метаматериалом, и его сравнение с моделью», — добавляет он. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® позволяет стабильно

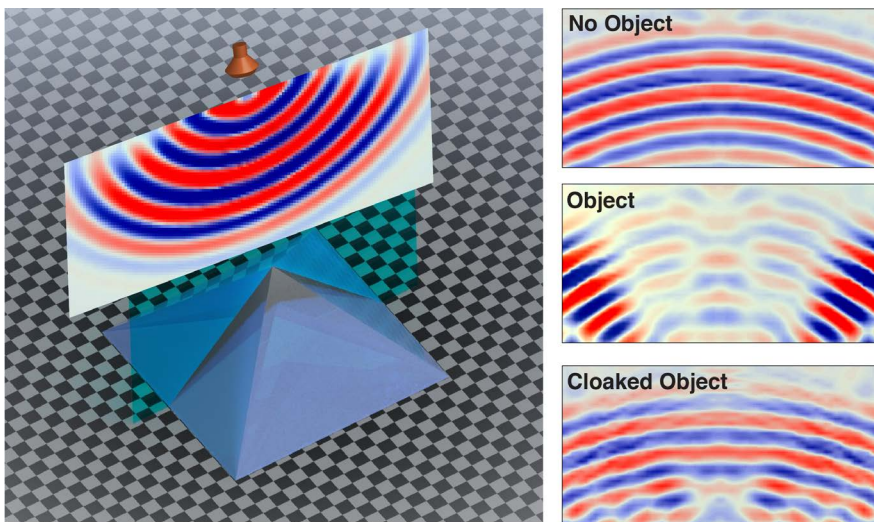


Рис. 3. (Слева) Для испытания оболочки из метаматериала звуковой импульс создается в трех разных конфигурациях, а отраженный звуковой импульс измеряется сканирующим микрофоном. (Справа) отраженный от испытательного объекта звуковой импульс сильно отличается от импульса в отсутствие объекта. Когда на объект помещается маскировочная оболочка, отраженный импульс почти совпадает с импульсом в отсутствие объекта, что демонстрирует «невидимость» для звуковых волн.

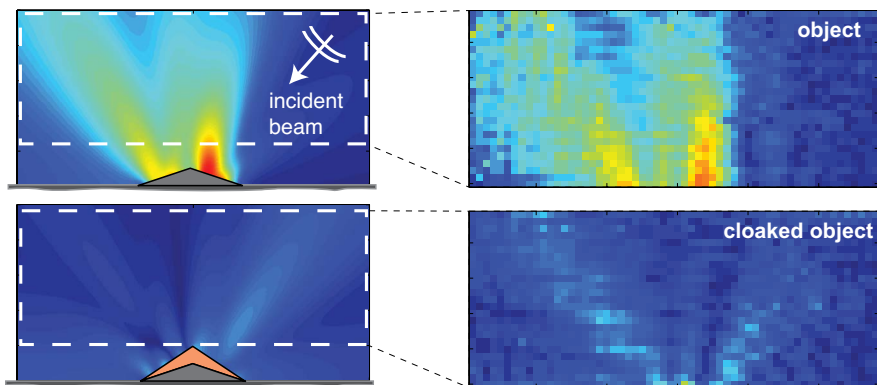


РИС. 4. Хорошее соответствие результатов моделирования (слева) и измерений (справа) рассеянных акустических полей не только демонстрирует уровень акустической маскировки объекта, но и подтверждает, что COMSOL точно предсказывает свойства изготовленного устройства.

достигать таких результатов, даже когда в исследовании вкрадываются человеческие ошибки. Так в одном из прошлых проектов было рассчитано и создано устройство для двухмерной акустической маскировки, включавшее в себя оболочку с рядом мелких отверстий, однако результаты экспериментов не соответствовали расчетным. Группа была в замешательстве и не могла найти причину несоответствий. Затем они поняли, что отверстия в конструкции были неверного размера из-за путаницы при ее изготовлении.

Каммер отмечает: «Эффективность COMSOL была жизненно важна для нашей работы, потому что мы могли провести численное моделирование и идеализированных параметров, и конструкции, которую мы действительно могли создать, чтобы подтвердить, что они ведут себя одинаково».

⇒ ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

При разработке средств трехмерной акустической маскировки ученые пользовались той же базовой структурой перфорированной пластины пирамидальной формы (рис. 2), под которой объект скрывается от звуковых волн. Такая структура может на первый взгляд показаться сравнительно простой, но желаемую трансформацию звуковых волн определяет множество факторов, включая диаметр отверстий, расстояние между пластинами и угол наклона пластин. Сочетание всех этих параметров и создает акустическую анизотропию структуры, необходимую для ее правильной работы.

Такая пирамидальная структура была первым устройством для трехмерной

акустической маскировки в мире, и лабораторные измерения подтвердили, что она перенаправляет звуковые волны, создавая иллюзию, что ни самой структуры, ни объектов за ней не существует (рис. 3). Устройство работает во всех трех измерениях независимо от того, откуда падают звуковые волны и где находится наблюдатель, и может в будущем применяться для маскировки от сенсоров или в архитектурной акустике.

Учитывая требуемую толщину оболочки из акустического метаматериала, второе применение кажется более привлекательным — устройства акустической маскировки можно использовать для оптимизации акустики концертного зала или, например, для звукоподавления в шумном ресторане. Каммер отмечает: «Материал для маскировки — это не волшебная краска, которую можно нанести на что угодно. Вообще говоря, такую идею было бы невозможно реализовать на практике».

Помимо этапа разработки, моделирование также использовалось для расчета количественных характеристик подобных оболочек из метаматериалов, включая подробный анализ рассеяния на маскирующей двухмерной оболочке (рис. 4). Такой анализ не только показывает, какая часть рассеянного поля поглощается оболочкой — COMSOL может точно рассчитать величину ослабления за счет поглощения с учетом всех компромиссных решений, связанных с изготовлением акустического метаматериала.

⇒ ИЗ ВОЗДУХА В ВОДУ: ДРУГАЯ СРЕДА, НОВЫЕ ЗАДАЧИ

В последнее время много внимания уделяется акустическим метаматериалам, способным работать в водной среде, например под водой или в человеческом

организме. Мультифизическое моделирование здесь выступает как основной инструмент разработки, позволяющий перенести ранее разработанные структуры и выполнять моделирование для проверки их характеристик в водной среде. Переход из воздуха в воду не так прост, как кажется.

Проблема состоит в том, что механические свойства воздуха разительно отличаются от свойств воды. Каммер поясняет: «В воздушной среде мы можем создавать акустические метаматериалы на основе пластика или любого другого твердого материала, который может действовать как абсолютно жесткая конструкция, управляющая звуковым полем. При этом не так важно, из какого именно материала она изготовлена».

Однако вода по своей удельной плотности и жесткости на сжатие не сильно отличается от твердых материалов. «Если звуковые волны падают на твердую структуру в воде, многое зависит от механических свойств этой структуры. Чтобы получить нужные свойства, требуется контролировать взаимодействие энергии звуковой волны с твердым телом, а для этого нам необходимы новые методы, применяемые на этапе разработки», — добавляет он.

«Очень важна возможность учета взаимосвязи между акустикой и механикой конструкций, особенно когда мы работаем с конструкциями в воде и нельзя пренебречь механической реакцией твердого материала, служащего основой для метаматериала. В акустических расчетах в воздухе нам достаточно считать твердый материал бесконечно жестким, что является простым и эффективным с точки зрения вычислений приближением, но для материала в воде важно учесть взаимодействие жидкости и конструкции, что легко сделать в COMSOL».

Переход от исследований к коммерчески успешным акустическим метаматериалам далеко не прост и требует создания надежного и точного производства таких материалов. Каммер делает вывод: «На следующем этапе создания любого акустического метаматериала требуется его соответствие определенным количественным показателям. Благодаря COMSOL можно гораздо быстрее вносить изменения в проект и умело пользоваться оптимизацией для выявления степеней свободы конструкции, которыми можно манипулировать для получения желаемых численных параметров. Это важное звено при переходе от прототипов для проверки концепции к реализуемым на практике и применимым в реальном мире конструкциям». ❖

Шум среди ясного неба: приложения COMSOL помогают определить воздействие вибраций на здания

Норвежские ученые пытаются выяснить, как низкочастотные звуковые волны распространяются внутри зданий, и определить, какие улучшения необходимо внести в их конструкцию для уменьшения раздражающих вибраций.

ДЖЕНИФЕР ХЕНД (JENNIFER HAND)

Каждому, кому доводилось проводить ночь вблизи аэропорта, знакомо это ощущение — пробуждение во время взлета или посадки раннего утреннего рейса, и не только от шума двигателей, но и от того, что все вокруг трясется. Люди, живущие вблизи ветрогенераторов, военных объектов и госпиталей с вертолетными площадками, высказывают похожие жалобы: при возникновении шума снаружи оконные стекла начинают дребезжать, а предметы в помещении — гудеть. Более загадочным для них является то, что раздражающие вибрации могут быть ощутимы даже тогда, когда никакие звуки поблизости не слышны.

В случае, если частота звуковых колебаний составляет 20 колебаний в секунду (20 Гц) или менее, подобный звук называется инфразвуком, который, как правило, не воспринимается человеческим ухом. Однако его воздействие легко заметить. Когда такие волны ударяются в оконное стекло, распространяются по полу и воздействуют на внутренние стены, они вызывают заметную вибрацию внутри помещения. Низкочастотные звуковые волны известны тем, что часто вызывают раздражение и беспокойство.

⇒ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ЗДАНИЯХ

Шум уже стал частью современной жизни. Для определения уровней восприятия, проникновения звука и опасности высокочастотных звуковых волн для человека применяются стандарты, основанные на измерении уровня звукового давления. Финн Левхольт (Finn Løvholt) из Норвежского геотехнического института (NGI) считает, что возникновение в зданиях вибраций под воздействием инфразвука до сих пор исследовано недостаточно подробно. Именно поэтому в течение нескольких лет сотрудники NGI, международного исследовательского и консультационного центра в области наук о Земле, проводили исследования по заказу Агентства по управлению недвижимостью Министерства обороны Норвегии.

Низкочастотные звуковые волны меньше поглощаются воздушной средой, чем высокочастотные, поэтому они могут распространяться на большие расстояния. Соответственно возрастает и мощность

«**Нам никогда еще не удавалось добиться такого уровня соответствия результатам натуральных испытаний. Это стало возможным благодаря моделированию различных компонентов конструкций в COMSOL Multiphysics.**

— ФИНН ЛЕВХОЛЬТ (FINN LØVHOLT), NGI

звуковых волн, попадающих внутрь зданий. «Нам интересно узнать, что же происходит на границе слышимости», — поясняет Левхольт. — Мы хотим выяснить, как звук от внешнего источника взаимодействует со зданием и создает воспринимаемые людьми вибрации. После этого мы сможем рекомендовать контрмеры, направленные на предотвращение вибрации, а также предложить стандарт для измерения и учета «коэффициента раздражающего воздействия».

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Совместно с коллегами Левхольт решил создать компьютерную модель, которая позволила бы отдельно изучить механизм столкновения низкочастотных звуковых волн со зданием и их дальнейшего проникновения. Для моделирования деревянной постройки из двух разделенных стеной комнат (вверху на рис. 1), практически повторяющей лабораторный экспериментальный стенд, они использовали программный пакет COMSOL Multiphysics®. В одну из комнат внутри модели был помещен громкоговоритель, во вторую — микрофон. Для наблюдения за уровнем звукового давления и вибрациями в модели было установлено несколько датчиков. Были тщательно смоделированы все элементы конструкции, включая стальной каркас, воздушную полость

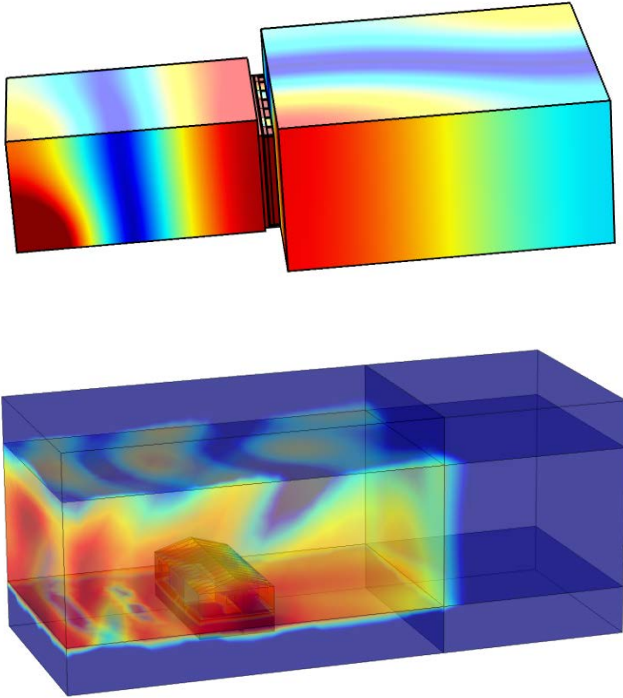


РИС. 1. Вверху: Расчетное звуковое давление в лаборатории с двумя разделенными стеной помещениями. Громкоговоритель размещен в помещении слева. Модель показывает, что акустические резонансы внутри каждого помещения влияют на характеристики звукоизоляции. Внизу: Низкочастотный звук с источником снаружи, вокруг и внутри здания. В обоих случаях цвет отражает перепады звукового давления внутри помещений и пустот в стенах.

и стойки в стене, окна, листы фанеры и гипсокартона. «Резонансные характеристики каждого элемента зависят от длины звуковой волны и распределения давления. Например, зона высокого давления располагается в комнате с громкоговорителем, а зона низкого давления — в комнате с микрофоном. Таким образом, резонансные характеристики стены будут зависеть от ее длины, толщины и жесткости», — объясняет Левхольт.

Также команде пришлось учитывать сложные резонансы, возникающие при соединении двух компонентов, например двух скрепленных винтами деревянных брусков. «Преимущество COMSOL Multiphysics состоит в том, что мы можем задать все параметры, которые требуется

контролировать. В частности, это позволило нам совместно моделировать различные физические явления, и мы смогли, например, увидеть воздействие звука, приходящего снаружи, на твердотельные конструкции помещения. Так как подобная связь является двусторонней, мы можем изучить и обратное взаимодействие. Моделирование взаимосвязанных физических процессов является ключевым для нашего анализа, поскольку звуковые волны могут порождать огромное количество резонансных явлений в широком диапазоне. С помощью моделирования мы смогли это увидеть».

После завершения этого этапа команда NGI проверила результаты моделирования с помощью лабораторных

исследований низкочастотных звуковых волн, проходящих через деревянную конструкцию из двух комнат. Левхольт объясняет, что основными измеряемыми величинами являются вибрации стены и уровень звукового давления. Полученные результаты демонстрируют близкую корреляцию с моделью, построенной в COMSOL Multiphysics (см. рис. 2). «Отклик реальной стены легко измерить, и наша модель воспроизводит их практически идеально. Это наиболее наглядный пример».

Модель показывает, что передача звука внутри здания определяется взаимодействием низкочастотных волн с основными модами компонентов здания, размерами помещения и тем, как воздух покидает оболочку здания. Основными источниками низкочастотного звука внутри помещения являются вибрации стен и потолка, а также вибрации пола, возникающие под действием звукового давления внутри комнаты.

⇒ ДЕШЕВЛЕ И БЫСТРЕЕ, ЧЕМ НАТУРНОЕ ИСПЫТАНИЕ

«Теперь у нас появился инструмент, с помощью которого мы можем моделировать звук и вибрации низких частот», — говорит Левхольт. — «Мы можем использовать данный инструмент для проектирования и проверки средств звукоизоляции, таких как ламинирование оконных стекол или повышение жесткости стен, — чем меньше движется стена или оконное стекло, тем меньше передача звука. Кроме того, модель показывает, какое влияние оказывают небольшие детали на систему в целом, например как винтовое соединение стоек и листов гипсокартона может снизить эффективность звукоизоляции, так как снижает общую жесткость конструкции».

На следующем этапе команда намерена провести полномасштабное испытание в настоящем доме, расположенном в той части Норвегии, что подвержена влиянию шумового излучения летательных аппаратов. Пока же команда продолжит использовать и улучшать имеющуюся модель. «Нам никогда еще не удалось добиться такого уровня соответствия результатам натуральных испытаний. Это стало возможным благодаря моделированию различных компонентов конструкций в COMSOL Multiphysics», — подводит итог Левхольт. — Имеющаяся модель позволяет нам принимать решения и предлагать контрмеры. По сравнению с натурными испытаниями стоимость данного процесса снизилась, а скорость возросла. Данная модель может быть расширена для исследования распространения звуковых волн и вибраций во всем здании целиком» (внизу на рис. 1). ❖

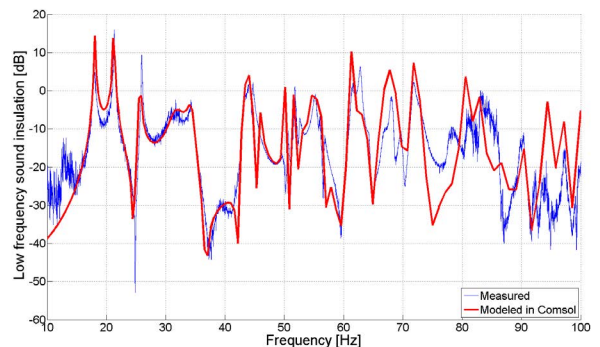


РИС. 2. Модель точно локализует резонансные явления, а также уровень резонанса в пределах единиц децибел. С увеличением частоты все большее количество мод во все более малых конструкциях будет приходить в возбуждение. Это видно по растущей разнице между измерениями и результатами моделирования.

На переднем крае разработки слуховых аппаратов

Инженеры компании Knowles развивают новые технологии слухопротезирования, устраняя акустическую обратную связь при помощи мультифизического моделирования.

ГЭРИ ДАГАСТИН (GARY DAGASTINE)

Известно, что почти 20 % населения Соединенных Штатов страдают нарушениями слуха. На самом деле эта цифра может оказаться выше — многие люди не хотят признавать наличие проблем со слухом. Пациенты, обратившиеся за медицинской помощью, получают миниатюрные слуховые аппараты, улучшающие и слух, и качество жизни. Создание слухового аппарата — от изготовления опытного образца до вывода изделия на рынок — требует значительного объема исследований и разработок.

В ходе работы инженеры постоянно сталкиваются со сложными техническими задачами. Основной проблемой является акустическая обратная связь. Она вызывает высокочастотный писк или свист, что ограничивает максимальный коэффициент усиления сигнала аппаратом. «Обратная связь обычно возникает, когда в микрофон слухового аппарата случайно попадают звуки или вибрации, направляемые самим аппаратом в ушной канал. Эти звуки попадают на вход усилителя, создавая нежелательные пульсации», — поясняет Бренно Варанда (Brenno Varanda), старший инженер-электроакустик компании Knowles Corp., расположенной в городе Итаска, штат Иллинойс.

«Для многих заказчиков компании Knowles создание нового слухового аппарата представляет собой длительный и дорогостоящий процесс, на который уходит от двух до шести лет», — добавляет он. Точное моделирование помогает в выборе динамиков и совершенствовании конструкции виброизолирующих опор и креплений, направленном на уменьшение доли излучаемой динамиком энергии, попадающей обратно в микрофон. Разработчикам слуховых аппаратов важно иметь возможность создавать простые модели преобразователей, которые облегчат процесс разработки и позволят предлагать заказчику более эффективные решения. Полные модели динамиков и микрофонов весьма сложны и включают множество факторов,

не влияющих на подавление обратной связи. «Конечно, конструкторам Knowles важно понимать происходящие в преобразователях электромагнитные, механические и акустические физические процессы, но столь высокая сложность моделирования не обязательно принесет реальную пользу нашим заказчикам», — говорит Варанда.

Knowles — мировой лидер в производстве преобразователей для слуховых аппаратов, интеллектуальных акустических систем и акустических компонентов специального назначения — организовала многосторонний проект по разработке виброакустических моделей преобразователей, которые были бы удобны в работе и пригодны для использования заказчиками, занимающимися слухопротезированием. Модели должны повысить эффективность перехода от опытного образца к окончательному варианту конструкции слухового аппарата без потери точности и качества.

⇒ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛУХОВЫХ АППАРАТОВ И ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

При разработке слуховых аппаратов инженерам приходится находить компромисс между двумя основными взаимоисключающими требованиями. Аппарат должен быть компактным и не создавать неудобств владельцу, но при этом обладать высокой выходной звуковой мощностью, чтобы компенсировать потерю слуха. Пациентам гораздо больше нравятся миниатюрные и легкие аппараты. Это еще более усложняет задачу подавления обратной связи. «Общая проблема при конструировании — разместить все элементы конструкции в наименьшем возможном объеме так, чтобы при этом не возникла обратная связь», — продолжает Варанда.

Типичный заушный слуховой аппарат (BTE) содержит микрофоны, преобразующие внешние звуки в электрические сигналы,

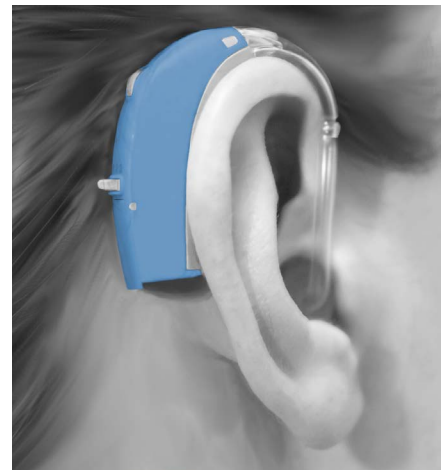
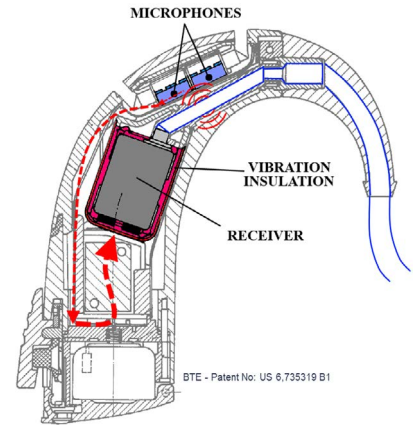


РИС. 1. Обычный заушный слуховой аппарат состоит из многих компонентов, включая микрофоны, виброизоляцию и ресивер. Компактное размещение этих компонентов приводит к возникновению нежелательных акустических и механических обратных связей (Изображение предоставлено Knowles Corp.)

цифровой сигнальный процессор и усилитель, которые преобразуют сигнал и усиливают его, а также миниатюрный громкоговоритель, иногда называемый ресивером (рис. 1). Ресивер или громкоговоритель получает усиленный электрический сигнал и преобразует его в акустическую энергию или звук, направляемый в ушной канал по трубке или через ушной вкладыш.

В ресивере установлен рычаг с электромагнитным приводом, называемый язычком. Рычаг соединен с мембраной, которая колеблется и создает звуковые колебания. Внутренние электромеханические силы также создают силы реакции, в результате чего вибрации передаются по конструкции слухового аппарата, создавая звук, попадающий в микрофон. Затем такой сигнал усиливается и снова подается на ресивер, вызывая появление обратной связи. Схема возникновения обратной связи представлена на рис. 1.

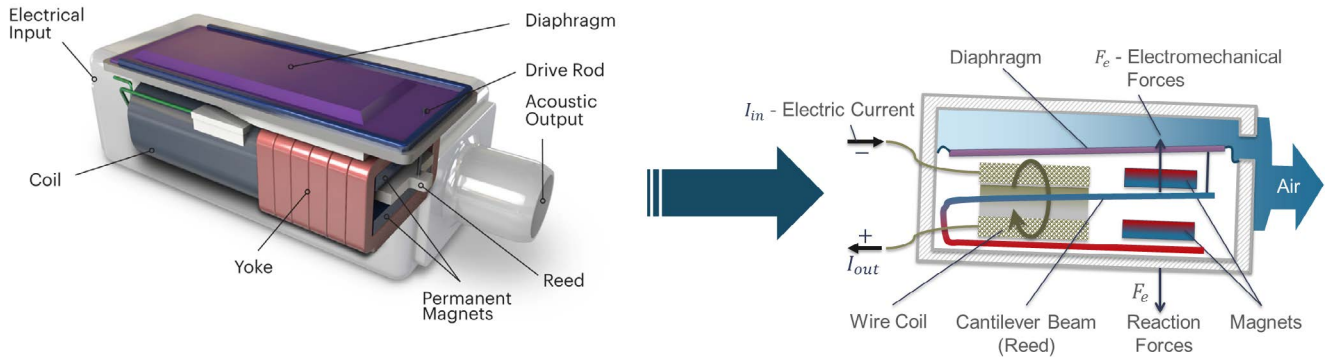


РИС. 2. Ресивер является ключевым элементом слухового аппарата. Он содержит миниатюрный динамик, включающий мембрану с электромагнитным приводом, которая и создает звук. Внутренние электромагнитные силы вызывают вибрацию конструкции, что приводит к возникновению механической обратной связи.

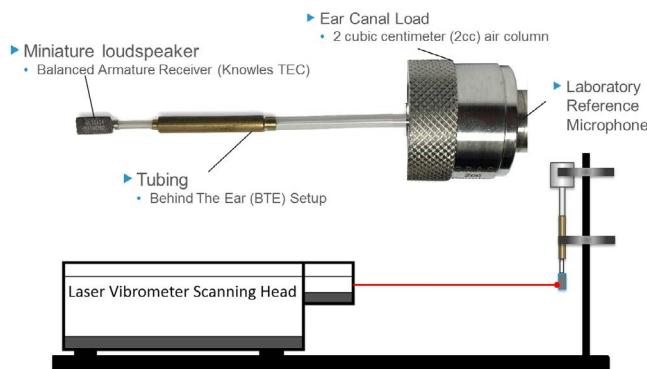


РИС. 3. Оборудование экспериментального стенда и схема его работы.

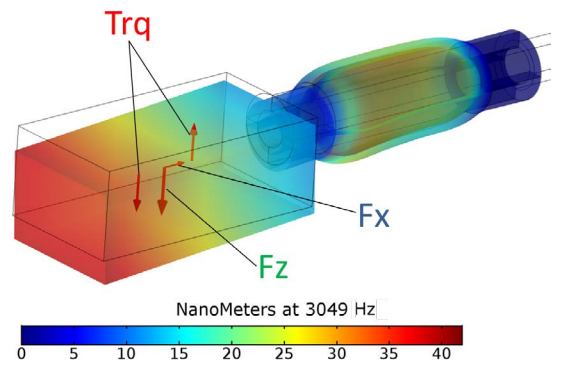


РИС. 4. Результаты расчета воздействующих сил и смещений ресивера и присоединенной к нему силиконовой трубки на частоте 3 кГц.

⇒ МОДЕЛЬ ТИПА «ЧЕРНЫЙ ЯЩИК»

Единственной задачей ресивера является преобразование подаваемого с микрофона усиленного электрического сигнала в звук. Хотя конструкция кажется простой, происходящий процесс весьма сложен (рис. 2). Сначала электрический сигнал преобразуется в магнитный, затем в механический и, наконец, в акустический. Каждый этап имеет свои собственные частотные характеристики. Выявление суммарного влияния всех элементов конструкции крайне важно для проектирования эффективных ресиверов, применяемых в различных видах слуховых аппаратов. Инженеры Knowles с начала 1960-х годов используют сложные эквивалентные электроакустические схемы, позволяющие моделировать происходящие в слуховых аппаратах электрические, магнитные, механические и акустические явления.

Точное моделирование сложных характеристик ресивера требует создания чрезвычайно большой и сложной мультифизической конечноэлементной модели, малопригодной для быстрой и эффективной разработки слуховых

аппаратов. Эту проблему удалось решить, когда специалист по ресиверам и микрофонам слуховых аппаратов доктор Даниэл Уоррен (Daniel Warren) в 2013 году предложил использовать модель типа «черный ящик». В ней содержится минимальное количество простых электронных компонентов, достаточное для нахождения электроакустической передаточной функции, связывающей напряжение и уровень выходного звукового давления для ресиверов с уравновешенным якорем. Факторы, не представляющие важности для ограничения обратной связи, при этом не учитываются.

Важнейший прорыв в упрощении модели был достигнут, когда Уоррен и Варанда показали, что упрощенный электроакустический контур можно превратить в полнофункциональную виброакустическую модель, лишь немного увеличив ее сложность. «Преобразование выполняется на основе анализа участка цепи "черного ящика", в котором напряжение на обмотках прямо пропорционально внутренним механическим силам, вызывающим вибрацию конструкции», — поясняет Уоррен.

«Черный ящик» и виброакустические модели было необходимо испытать на соответствие реальным акустическим и механическим системам ресивера. Только после этого такие модели можно было применять в проектировании слуховых аппаратов. Поэтому в 2014 году Knowles в сотрудничестве со своими заказчиками по всему миру начала проект по валидации моделей в программном обеспечении COMSOL Multiphysics® и проведению стандартных испытаний, принятых в отрасли.

⇒ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ ВАЛИДАЦИИ

Для оценки качества полученных моделей требовалось одновременно измерять выходной акустический сигнал и силы вибрации, используя конструкцию, легко моделируемую методом конечных элементов. Как и все стандартные испытания слуховых аппаратов, это испытание предусматривает подключение ресивера к короткому отрезку трубки, ведущей в замкнутую полость объемом 2 см³. Полость имитирует стандартную акустическую нагрузку в ушном канале (см. рис. 3).

Звуковое давление в полости измеряется при помощи лабораторного микрофона. Для проверки достоверности модели параметры ресивера также измерялись при помощи сложной конструкции из трубок, имитирующей заушный слуховой аппарат. Длинная трубка имеет переменный диаметр, а ее длина достаточна для возникновения множественных акустических резонансов. Одновременно с измерением выходного акустического сигнала лазерный измеритель вибраций фиксирует перемещения деталей ресивера. Смещения и повороты измерялись путем отслеживания положения ряда точек на поверхности корпуса ресивера.

Уоррен и Варанда проводили все эти измерения в сотрудничестве с рядом заказчиков Knowles. При помощи COMSOL Multiphysics им удалось создать упрощенную модель виброакустического контура, имитирующую описанный выше испытательный стенд. Данная модель связывает механическое взаимодействие между перемещениями ресивера и присоединенной к нему

силиконовой трубки, термовязкостные потери при различных площадях поперечного сечения трубки и нагрузки от звукового давления в полости и трубке с внутренними электрическими, магнитными и акустическими явлениями в модели ресивера типа «черный ящик».

Модель в программном обеспечении COMSOL позволила установить зависимость выходного давления и механических сил от приложенного напряжения, частоты и свойств материала. На рис. 4 показаны результаты расчета перемещений в модели с частотой 3 кГц и сил реакций, связанных с ресивером.

Варанда сравнил результаты моделирования с реальными измерениями, и они оказались прекрасно согласованными (рис. 5). Силы, действующие на мембрану и язычок, имеют акустическую зависимость от выходного звукового давления. При этом, как и ожидалось, силы, действующие на мембрану, прямо пропорциональны силам реакции конструкции.

Объединение усилий пошло на пользу всем предприятиям, занимающимся слухопротезированием. «В конечном счете разработчикам слуховых аппаратов не требуются сверхсложные модели преобразователей и занимающее много времени моделирование. Они хотят просто сосредоточиться на разработке собственной конструкции, пробуя в ней различные варианты преобразователей, — добавляет он. — Именно это и позволяет делать созданная в COMSOL модель. В ней можно легко сравнивать сотни вариантов преобразователей для одного и того же слухового аппарата».

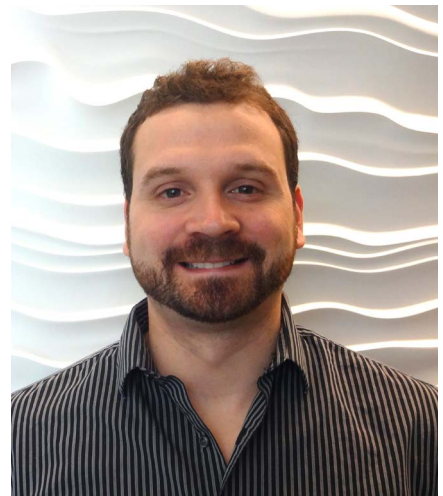
Конструкторы слуховых аппаратов получили возможность уменьшить обратную связь и в целом улучшить рабочие характеристики изделия, что работает на благо пациентов с нарушениями слуха. При этом были также сокращены экономические и временные затраты на проектирование. ✦

Конструкторы слуховых аппаратов получили возможность уменьшить обратную связь и в целом улучшить рабочие характеристики изделия, что работает на благо пациентов с нарушениями слуха. При этом были также сокращены экономические и временные затраты на проектирование.

➔ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗНАНИЙ

Knowles предоставила разработанную модель другим разработчикам слуховых аппаратов, чтобы они могли устранить обратную связь в выпускаемых изделиях. Имея полное представление об акустических, механических и электромагнитных характеристиках компонентов, можно успешно проводить виртуальную оптимизацию конструкции.

«Программное обеспечение COMSOL — один из немногих инструментов моделирования, позволяющий легко связать цепь ресивера с сосредоточенными параметрами типа "черный ящик" с акустикой и механикой твердого тела, — отмечает Варанда. — До сих пор верификация и оптимизация конструкций слуховых аппаратов была в одинаковой степени искусством и наукой. Мы очень рады появлению новых конструкций слуховых аппаратов, созданных на основе наших моделей».



Бренно Варанда (Brenno Varanda), старший инженер-электроакустик Knowles Corp.

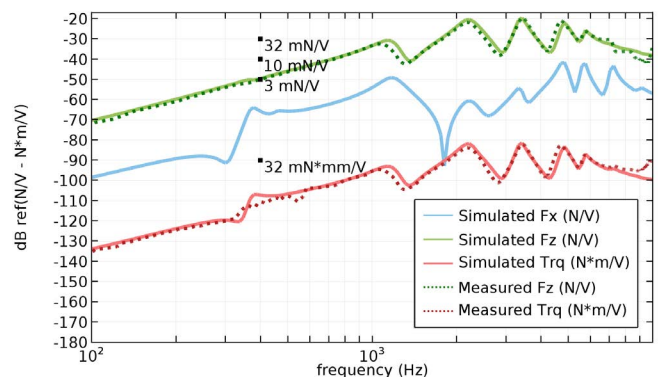
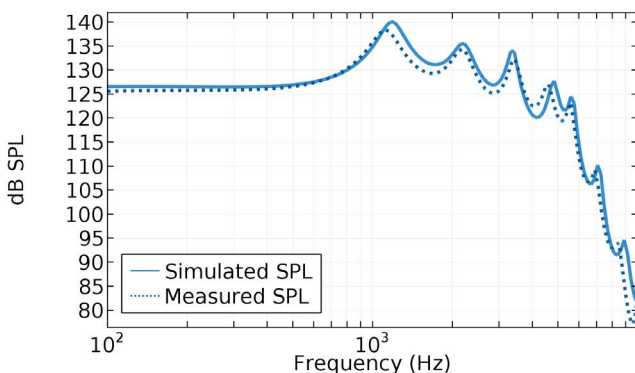


РИС. 5. Слева: сравнение измеренного (пунктирная линия) и расчетного (сплошная линия) уровней звукового давления в полости объемом 2 см³. Справа: сравнение измеренных (пунктирная линия) и расчетных (сплошная линия) сил и моментов, действующих на ресивер.

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОМОГАЕТ ОБНАРУЖИВАТЬ УТЕЧКИ В ВОДОПРОВОДНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

Чтобы точно обнаружить место утечки в заглубленных трубах, например в магистральном водопроводе, важно определить скорость распространения звука. Компания Echologics Engineering применяет метод конечных элементов для моделирования распространения акустических волн в трубах и оценки изменений скорости звука.

ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

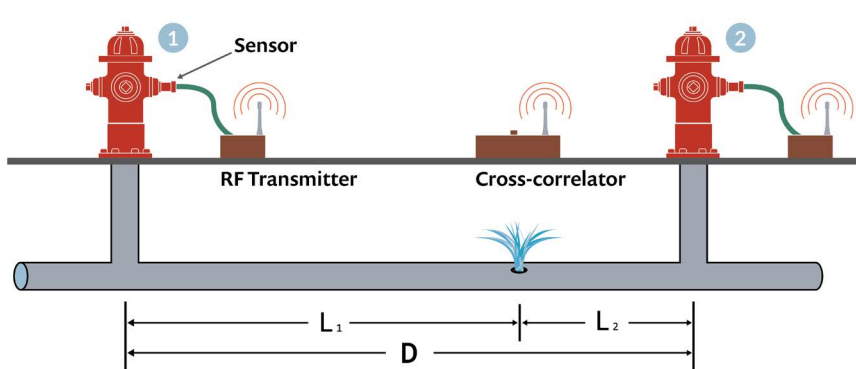


РИС. 1. Слева: исследуемая труба с утечкой. Справа: схема обнаружения утечки. По обе стороны от места утечки устанавливаются два датчика, расстояние между которыми равно D . Шум от утечки распространяется в обе стороны, а коррелятор измеряет время, за которое он достигает каждого датчика. Зная скорость распространения звука по трубам, можно определить точное местонахождение утечки.

Чистая питьевая вода — это ценный продукт, терять который через утечки в трубах муниципальные власти себе позволить не могут. По мере старения трубопроводной инфраструктуры находить утечки становится все сложнее. А с ростом цен на воду находить течи становится все более важной задачей.

С этой задачей прекрасно справляется компания Echologics из Торонто, входящая в состав Mueller Canada, Ltd., благодаря своим уникальным технологиям обнаружения утечек неразрушающими методами. «Эти дефекты создают шум», — объясняет Себастьян Перье (Sebastien Perrier), научный сотрудник Echologics по акустическим исследованиям. Перье — инженер-механик, специализирующийся в области акустики и вибраций, конструктивных соединений, а также обработки сигналов. «Трубы умеют "разговаривать", и если их слушать, они могут сообщить вам, где находится протечка», — говорит он.

В компании Echologics измеряют время распространения звуковой волны с помощью функции корреляции и акустических датчиков, установленных на трубах или пожарных гидрантах. Если утечка находится

где-то между двумя датчиками, она будет обнаружена, а результат корреляции будет использован для определения разницы во времени, за которое шум утечки достигает каждого датчика. Таким образом, определяется расстояние от места утечки до каждого датчика при известной скорости распространения звука по данным трубам (рис. 1).

Компания Echologics является ведущим разработчиком инновационных акустических систем для инфраструктуры водоснабжения и внедряет технологии, в которых используется описанная корреляция для обнаружения утечек и непрерывного мониторинга трубопроводов. Примеры продукции Echologics включают корреляционный течеискатель LeakFinderST™ (рис. 2) и систему мониторинга трубопроводов EchoShore®-DX (рис. 3). Корреляторы Echologics позволяют специалистам на объектах исследовать течи самых разных трубопроводов с помощью датчиков, преобразователей и пользовательского интерфейса, который может быть выведен на экран стандартного ноутбука. Данная акустическая технология

может обнаруживать даже очень слабые утечки на ранних стадиях. Это дает возможность оперативно предпринять соответствующие меры, экономия муниципальных средств и предотвращая повреждения трубопроводов.

Технология, лежащая в основе продуктов Echologics, требует точного знания скорости распространения звука в трубопроводах различных типов. Скорость звука зависит от материала, пропорциональна жесткости трубы и меняется в зависимости от геометрии трубопровода. «Ключевой задачей была разработка достаточно точной технологии, позволяющей обнаруживать утечки в трубах из ПВХ», — объясняет Перье. По сравнению с металлом, пластмасса обладает сильными демпфирующими свойствами, способствующими затуханию звуковой волны. Еще больше усложняет задачу то, что в старых системах водоснабжения, изначально выполненных из чугуна, в процессе ремонта часть сегментов заменяется на пластмассовые.

Одной из сфер ответственности Перье является обновление и поддержание точности сложных алгоритмов акустической корреляции. Он должен понимать



РИС. 2. Компактный и простой в применении корреляционный течеискатель LeakFinderST™.



характерное для участков, выполненных из различных материалов, давая возможность наглядно визуализировать процесс (рис. 4).

⇒ ПОВСЕДНЕВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выполняя каждый раз однотипные операции в данной расчетной модели, Перье задумался о возможности создания специализированного приложения для моделирования и его преимуществах. На основании своего анализа в COMSOL Multiphysics® с использованием встроенных программных инструментов он создал собственное приложение, объединяющее в себе исследования взаимодействия звуковой волны и конструкции, акустики трубопроводов, а также временной и частотный анализ системы (рис. 5). Приложение позволяет пользователю менять геометрию и свойства материала различных участков трубопровода и анализировать сегмент трубы или всю сеть.

В приложении пользователь может определить магистральную водопроводную сеть, задав длину и количество сегментов, а также характеристики труб. Скорость распространения звука вычисляется после выбора свойств материала из имеющегося списка, например чугуна или пластмассы. Моделирование использует результаты полевых измерений, которые пользователь обычно вводит вручную на основании корреляций для прогнозирования местоположения утечек.

Превращение мультифизической модели в приложение для моделирования упрощает взаимодействие между отделами компании. «Создав это приложение, я дал возможность пользоваться сложной моделью всем коллегам, где угодно и когда



РИС. 3. Система EchoShore®-DX дает возможность использовать существующие пожарные гидранты для интеллектуального обнаружения утечек.

фундаментальные основы физики для оптимизации и разработки новейших решений для подземных трубопроводных систем. Для ускорения процесса проектирования и обеспечения возможности использования его разработок другими отделами Перье создал акустические вычислительные модели и основанные на них приложения для моделирования.

⇒ ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧКИ ДО ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИИ

Как численное моделирование помогает спрогнозировать распространение звуковой волны по трубам? Анализ сети трубопроводов может оказаться сложным и долгим. Может возникнуть потребность проанализировать процесс распространения звуковой волны и ответных колебаний в одной трубе или всей системе. Поэтому сложность модели и время ее расчета могут существенно меняться в зависимости от степени детализации физических процессов в модели, необходимой для получения нужной точности.

На ранней стадии проектирования Перье решил основную задачу: убедился в том,

что скорость распространения звуковой волны определена точно для каждого участка трубопровода. Затем он применил мультифизическое моделирование для быстрой оценки и получения параметров, необходимых для его работы. Для анализа трубопроводной сети требуются мультифизические связи между такими дисциплинами, как акустика, гидродинамика и механика конструкций.

В работе Перье моделирование дает несколько преимуществ, например предоставляет возможность учесть небольшие допустимые погрешности и усовершенствовать технологию. Изучение параметров материала и геометрии сети трубопроводов с помощью акустического моделирования позволяет прогнозировать различные сценарии. Акустическое моделирование демонстрирует наличие шумов при различном расстоянии между датчиками или позволяет обнаружить пластмассовые ремонтные вставки, не учтенные при испытаниях. Расчеты, которые проводит Перье, также позволяют спрогнозировать давление в системе трубопроводов при распространении звуковой волны по направлению к датчику, а также учесть механическое затухание волны,

«Создав это приложение, я дал возможность пользоваться сложной моделью всем коллегам, где угодно и когда угодно.»

— СЕБАСТЬЕН ПЕРЬЕ, НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ECHOLOGICS ПО АКУСТИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

угодно», — говорит Перье. Приложения для моделирования можно защитить паролем и установить их вместе с локальной версией COMSOL Server™, что позволяет

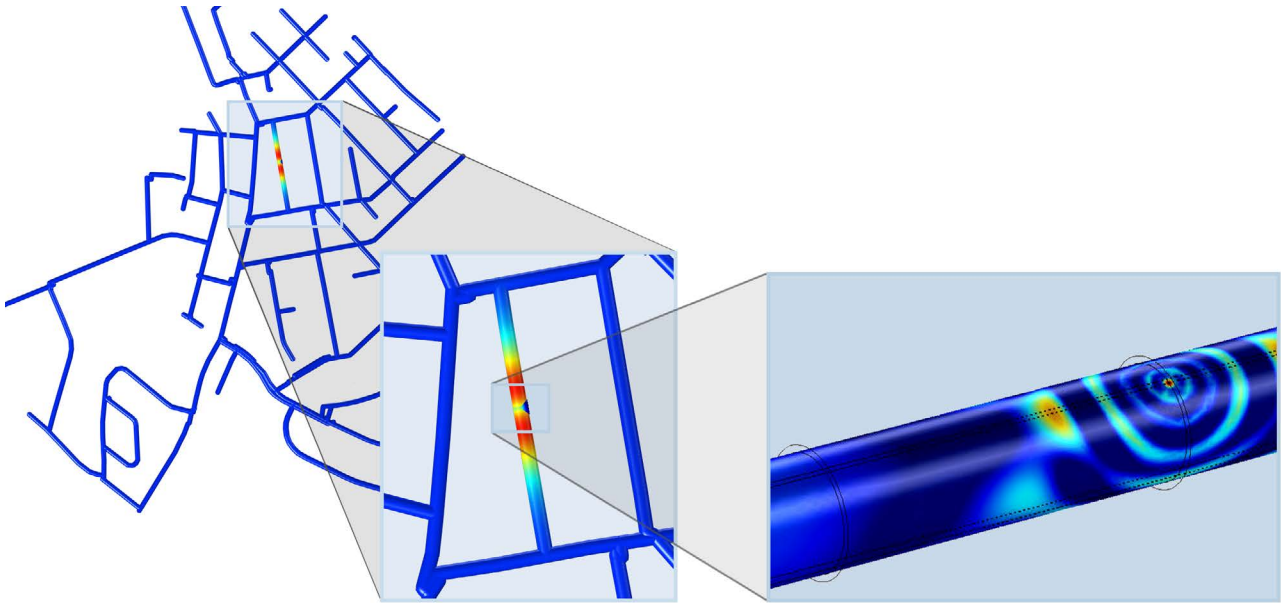


Рис. 4. Анализ распространения шума утечки в трубопроводной сети. На графике показано звуковое давление в зоне вокруг утечки.

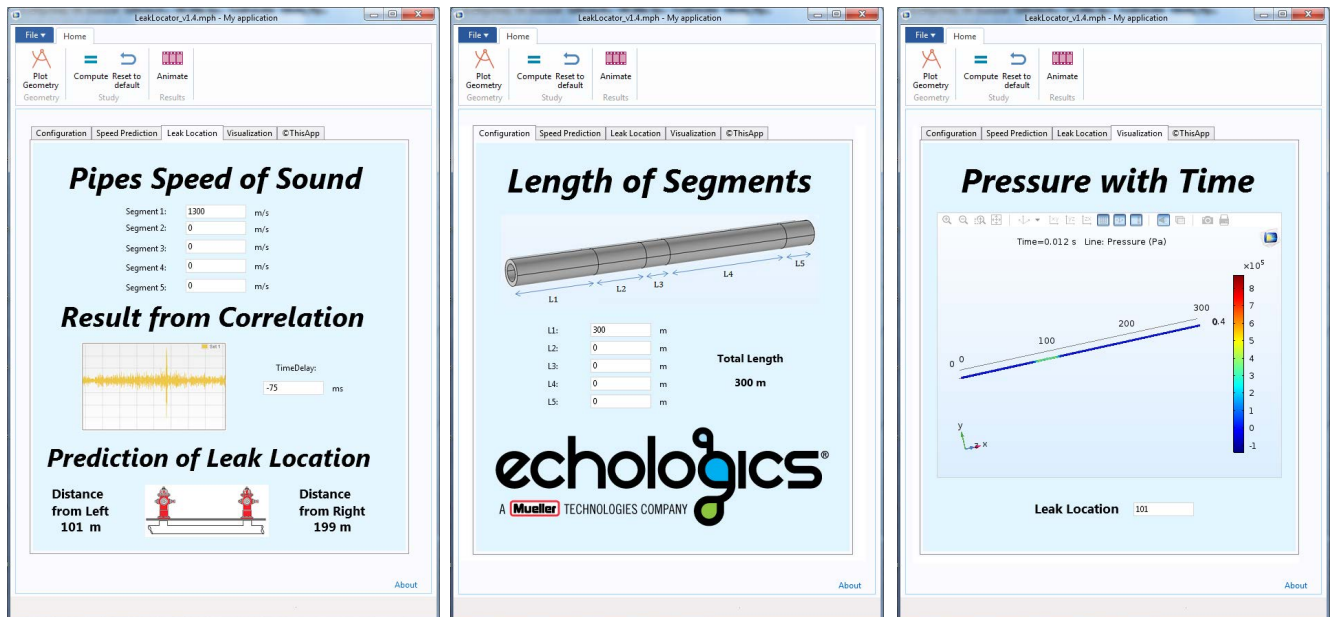


Рис. 5. Простой интерфейс помогает пользователю предсказать точное местоположение утечки путем задания геометрии и характеристик труб. Приложение вычисляет скорость звука в трубе и позволяет с помощью анимации визуализировать распространение волны от места утечки без необходимости сложных расчетов взаимодействия конструкции и звуковой волны для локализации утечки.

быстро обновлять их и обеспечивать конфиденциальность. Это представляло важность для разработчика, поскольку значительная часть его работы является конфиденциальной. Перье создал приложение, которое может использоваться полевыми инженерами на объектах. Он ожидает, что это приложение будет широко применяться в компании Echologics. Главным требованием полевых инженеров Echologics

является возможность быстрого и точного обнаружения утечек без необходимости понимания механических или математических основ моделирования. По мнению Перье, моделирование является мощным инструментом, позволяющим визуализировать распространение звуковой волны и дающим пользователю возможность увидеть снижение или увеличение скорости звука при изменении геометрии или свойств материала. ❖



Себастьян Перье, научный сотрудник Echologics по акустическим исследованиям

Музыка для ушей: преобразователи нового типа для электростатических наушников



Стартап в области аудиотехнологий представляет готовые к производству преобразователи нового типа для электростатических наушников класса Hi-End с уменьшенным завалом в области низких частот.

ДЖЕННИФЕР ХАНД (JENNIFER HAND)

Настоящие энтузиасты Hi-Fi высоко ценят звучание, которое обеспечивают электростатические наушники. Наушники такого типа характеризуются не только естественным и объемным звуком, но и большей четкостью, низким уровнем искажений и расширенным диапазоном частот по сравнению с другими источниками высококачественного звука, используемыми в наушниках.

Принцип работы большинства электростатических наушников заключается в приложении электрического заряда к тонкой эластичной мембране, размещенной между двух токопроводящих пластин. Входной электрический сигнал приводит в движение заряженную мембрану, создавая звуковые волны, которые наши органы слуха и головной мозг воспринимают как музыку, заставляющую нас радоваться или грустить.

Несмотря на высокое качество звука и точность воспроизведения, стоимость электростатических наушников может быть слишком высока, а конструкция не обладать достаточной прочностью. Кроме того, до недавнего времени такие наушники изготавливались вручную в силу жестких требований к точности механической обработки. Видя потребность рынка в доступных и вместе с тем высококачественных и простых в изготовлении наушниках, специалисты компании Warwick Audio Technologies Limited (WAT) разработали высококачественный электростатический ламинатный преобразователь (HPEL). Эта запатентованная технология основана на использовании сверхтонкой диафрагмы и одной проводящей пластины вместо двух. Специалисты компании WAT, тесно связанные с Уорвикским университетом (Великобритания), разработали легкую слоистую мембрану толщиной всего 0,7 мм, которая идеально подошла для использования в электростатических наушниках.

HPEL представляют собой легкие тонкопленочные изделия, изготовленные посредством непрерывного проката. «Разработанная нами технология уникальна, — объясняет Мартин Робертс

(Martin Roberts), генеральный директор компании WAT. — Преобразователь HPEL изготовлен из металлизированной полипропиленовой пленки, полимерного разделителя с шестиугольными ячейками и токопроводящей сетки» (рис. 1).

В отличие от типовой конструкции, предусматривающей приложение постоянного тока к эластичной мембране, а переменного — к пластинам, предложенный компанией односторонний динамик предполагает приложение постоянного тока к эластичной мембране, а переменного — к однопроводной сетке, расположенной напротив мембраны.

Способ изготовления позволяет создавать такие преобразователи с гораздо меньшими затратами по сравнению с обычными электростатическими динамиками. Это значит, что впервые за свою историю электростатические технологии могут стать доступным решением для различных аудиоустройств сегмента Hi-Fi.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА

Прежде чем прийти к окончательному варианту конструкции, специалисты компании WAT тщательно исследовали

взаимодействие многочисленных конструктивных элементов. Это было необходимо для обеспечения невысокой стоимости, простоты производства и высокого качества звука конечного изделия.

«Мы разработали несколько прототипов, каждый из которых показывал превосходные рабочие характеристики. Главная проблема состояла в том, что мы не вполне понимали, как именно отдельные материалы

и конструктивные параметры влияли на эксплуатационные характеристики преобразователя», — говорит Робертс.

Динамические характеристики HPEL зависят от крайнего сложного взаимодействия между величиной напряжения мембраны, уровнем сигнала переменного тока, геометрией динамика, упругими и диэлектрическими характеристиками материала, термоакустическими потерями, а также влиянием присоединенной массы воздуха у открытой стороны мембраны. Команда инженеров пыталась улучшить звучание басов,

уменьшив завал низких частот, понизив искажения и увеличив уровень акустического давления при заданной величине электрического заряда. Они пришли к выводу, что внесение даже незначительных изменений в какой-либо элемент конструкции оказывает воздействие на звучание.

Несмотря на то что инженеры компании WAT обладают огромным опытом в области

«Мы перешли от еженедельного изготовления многочисленных прототипов вручную к простому изменению параметров в модели. Мы получили не только желаемую конструкцию, но и возможность оптимизировать характеристики преобразователей в соответствии с требованиями заказчика.»

— МАРТИН РОБЕРТС,
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР WAT



РИС. 1. Сверху вниз: преобразователи HPEL компании WAT; отдельная слоистая мембрана, вид готового преобразователя HPEL в сборе и в виде отдельных компонентов. Все слоистые мембраны изготовлены в Великобритании.

механики, электрики и акустики, они не имели подходящих средств моделирования, которые помогли бы им понять подобные сложные процессы. Для выполнения виртуальной оптимизации конструкции HPEL они обратились к специалистам компании Xi Engineering, которая является сертифицированным консультантом COMSOL, специализирующимся в численном моделировании, анализе проектов, решении задач устранения шума и вибраций в промышленном оборудовании и других технологиях.

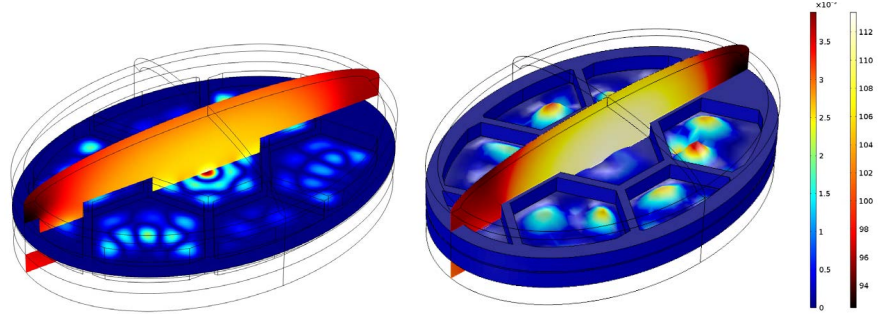


РИС. 2. Уровень звукового давления (термическая цветовая поверхность) в децибелах и перемещение мембраны (радужная цветовая поверхность) в миллиметрах, полученные при решении полностью взаимосвязанной акустической и микроэлектромеханической модели в частотной области. Слева: решение для частоты 5,000 Гц. Справа: решение для частоты 5,250 Гц.

Доктор Бретт Мармо (Brett Marmo), технический директор компании Xi Engineering, руководил разработкой модели в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®, использованном для исследования поведения HPEL. Это программное обеспечение позволило Xi Engineering выполнить моделирование нелинейных эффектов с учетом асимметричной конструкции HPEL.

«Мы постарались упростить конструкцию первой модели для того, чтобы полностью посвятить себя работе над теми ее характеристиками, что оказывают непосредственное влияние на качество звука. Так, например, мы старались удержать основную гармонику как можно ниже, чтобы понять взаимодействие акустических колебаний и конструкции наушников, а также определить эксплуатационные характеристики HPEL на низкой частоте, — объясняет Мармо, рассказывая о предварительных расчетах прототипа. — Моделирование позволило выяснить, как приложенное напряжение воздействует на уровни сигнала. Это помогло нам понять исходные искажения звука».

Поскольку преобразователь является односторонним, значение электростатической силы изменяется в зависимости от положения вибрирующей мембраны, уменьшаясь пропорционально квадрату расстояния между мембраной и сеткой. Выяснив итоговое значение нелинейного искажения и спрогнозировав его воздействие, инженеры WAT смогли оптимизировать возможные связанные искажения посредством электрических сигналов.

⇒ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ HPEL

Более детальное моделирование, учитывающее механические, микромеханические и акустические процессы, позволило изучить воздействие изменения таких геометрических параметров, как размер ячеек проводной сетки, толщина провода, напряжение мембраны, зазор между мембраной и сеткой, а также влияние материальных свойств каждого

компонента. Совместно со своими коллегами Мармо также исследовал воздействие различных смещений постоянного тока, которые зачастую ответственны за искажения на низких частотах. Кроме того, они проверили проводимость пластины, с тем чтобы определить участки повышенного напряжения. После этого они исследовали термоакустические потери и смоделировали смещение мембраны на различных частотах средствами COMSOL (рис. 2).

«Мы выяснили, что подобный подход является единственно правильным способом моделирования плоских электростатических преобразователей, — продолжает Мармо. — В данном случае моделирование с использованием сосредоточенных параметров может описать ограниченный набор эксплуатационных характеристик устройства, например низкочастотную амплитудную характеристику. Значение одного параметра может быть превосходным, но он может стать причиной значительных искажений в другой части устройства. Мультифизическое моделирование позволяет охватить все параметры, влияющие на восприятие нами звука, такие как характеристику во временной области и нелинейное искажение».

Моделирование позволило инженерам WAT предельно точно отрегулировать параметры конструкции для оптимизации общей производительности устройства. В конечном итоге удалось спрогнозировать, какие именно факторы будут вызывать пики в частотном отклике, и сделать сигнал более плавным для большей точности звучания.

«Это позволило нам сэкономить значительное количество времени и денег, — говорит Робертс. — Мы перешли от еженедельного изготовления многочисленных прототипов вручную к простому изменению параметров в модели. Мы получили не только желаемую конструкцию, но и возможность оптимизировать характеристики преобразователей в соответствии с требованиями заказчика».

Группа под руководством Мармо сравнила каждую модель с данными физических измерений, предоставленными группой проектировщиков WAT. «Результаты

моделирования оказались невероятно близки к физическим измерениям, — комментирует Дэн Анагнос (Dan Anagnos), технический директор компании WAT. — Было захватывающе наблюдать, как модель «оживает», предоставляя нам точные данные о том, как поведет себя динамик в реальном мире».

⇒ СВОБОДА И ГИБКОСТЬ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Когда результаты моделирования прошли проверку и валидацию, а специалисты WAT остались ими довольны, пришло время для следующего шага. Теперь команде Xi Engineering предстояло передать контроль над дальнейшим моделированием в руки своих коллег из WAT. Имеющаяся в COMSOL среда разработки приложений позволила команде Мармо создать приложение на основе созданной модели, доступное удаленно, в т. ч. в онлайн-режиме.

Интерфейс приложения позволяет пользователям изменять определенные исходные данные, чтобы проверить влияние изменения ряда параметров, таких как смещение постоянного тока, уровень сигнала переменного тока, частотный диапазон и разрешение, характеристики материала, размер динамика, форму и размер проволочной сетки, расположение разделителя (рис. 3). В приложении недоступны исходные параметры модели; вместо этого оно позволяет пользователям проводить дальнейшие тесты без необходимости обучения работе с ПО.

«Предоставление нашим коллегам из WAT приложения для моделирования избавило их от необходимости приобретения программного пакета и приема на работу опытного пользователя ПО, — говорит Мармо. — Благодаря приложениям наши заказчики могут взять процесс моделирования в свои руки. Им не нужно приходить к нам всякий раз, когда им потребуется внести небольшие изменения в конструкцию. Более того, это освобождает нас от разработки решений для задач, которые по сути являются вариациями уже решенных проблем, позволяя сосредоточиться на работе над новыми разработками». Специалисты компании Xi Engineering ожидают все более широкого применения подобных приложений в работе с другими заказчиками.

Компания WAT поступила точно так же, предоставив своим собственным заказчикам доступ к приложению, позволяя им подобрать преобразователь HPEL того типа, который лучше всего подойдет для их наушников. «Работа наших коллег из Xi Engineering была выше всяческих похвал. Они не только обладают глубоким пониманием предмета, но и помогли нам раскрыть всю сложность нашего изделия, — добавляет Робертс. — Интуитивно понятное приложение, разработанное специалистами Xi, стало для нас приятным дополнением. Не раскрывая данных, составляющих интеллектуальную собственность, мы даем нашим клиентам возможность самостоятельно испытывать и выбирать подходящие им решения». ✨

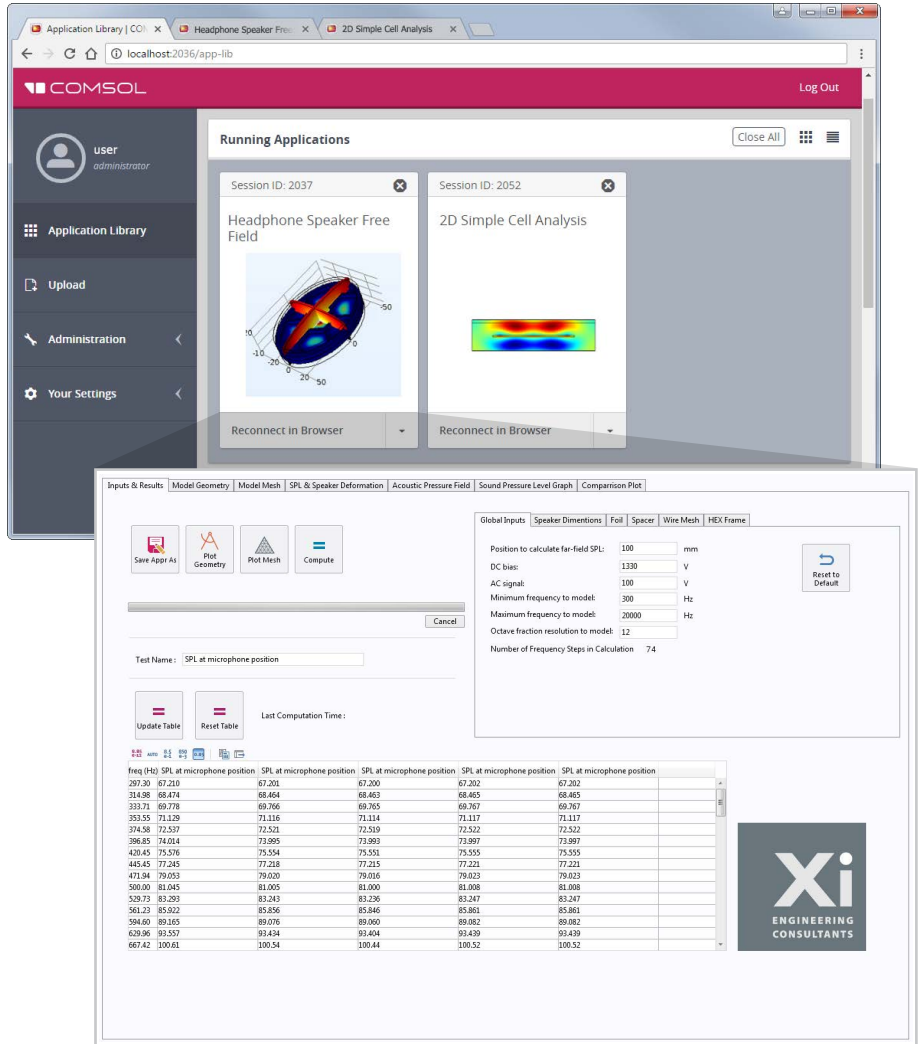


РИС. 3. На переднем плане: разработанное компанией Xi Engineering приложение позволяет инженерам изменять значения параметров, связанных с частотой, приложенной электрической нагрузкой, размерами динамика и характеристиками мембраны, разделителя и проволочной сетки. Полученные результаты демонстрируют уровни акустического давления для различных сценариев, смещение мембраны, частотную характеристику для различных смещений постоянного тока, а также сравнение с экспериментальными результатами. На заднем плане: Доступ к приложению предоставляется через COMSOL Server™. Пользователи могут запускать его непосредственно в браузере или в клиенте COMSOL Client для Windows®.



Слева: Брет Мармо (Brett Marmo), технический директор Xi Engineering. В центре: Мартин Робертс (Martin Roberts), исполнительный директор Warwick Audio Technology. Справа: Дэн Анагнос (Dan Anagnos), технический директор Warwick Audio Technology.

Моделирование мира через призму мультифизики

Явления, происходящие в реальном мире, изначально являются мультифизическими и должны рассматриваться и исследоваться именно в таком контексте.

ЭД ФОНТЕС (ED FONTES)

Уникальность программного пакета COMSOL® заключается в способе ввода пользовательских данных и создания математической модели физических явлений, состоящей из набора дифференциальных уравнений. Любая современная система инженерного анализа (CAE) основана на предопределенных численных моделях и методах, которые представляют собой аппроксимации исходных дифференциальных уравнений. Эти аппроксимации необходимы, поскольку в большинстве случаев соответствующие дифференциальные уравнения не удается решить аналитическим методом, то есть невозможно найти точное решение. Вместо этого для аппроксимации соответствующих дифференциальных уравнений используются различные типы дискретизации, например метод конечных разностей, конечных объемов и конечных элементов. В численную модель довольно сложно добавить явления, описания переменных и мультифизические связи, если они с самого начала не учтены в дифференциальных уравнениях. COMSOL отличается от других программ тем, что «с ходу» создает полную математическую модель, основываясь на заданных пользователем данных, еще до дискретизации и до нажатия пользователем кнопки Solve (Решить). Данная основополагающая технология позволяет пользователям задавать свои собственные выражения и мультифизические связи с помощью определенных переменных

и координат путем непосредственного ввода соответствующих математических выражений в пользовательском интерфейсе. В традиционном программном обеспечении описания, не являющиеся встроенными, должны создаваться на численном уровне, обычно уже после дискретизации — с помощью пользовательских подпрограмм, которые могут быть недостаточно точными, или процесс создания которых достаточно сложен и нетривиален.

Интуитивно понятный интерфейс COMSOL позволяет легко вводить произвольные математические выражения, описывающие свойства материала, нагрузки, источники, приемники и мультифизические связи. Это звучит парадоксально, поскольку математика обычно воспринимается как трудная наука, но наше программное обеспечение действительно позволяет быстро создавать чрезвычайно сложные модели. Интерфейс математического моделирования в COMSOL понятен, удобен в использовании и легко настраивается под конкретные требования пользователя.

Ученые и исследователи обладают глубокими знаниями и пониманием в отношении процессов или явлений в своей области специализации, в большинстве случаев не являясь при этом экспертами в математическом моделировании. Важно то, что эти знания и интуиция также используются при построении моделей и работе с ними, поскольку это позволяет

повысить точность моделей и улучшить результаты проектирования. По этой причине в COMSOL предусмотрена Среда разработки приложений для создания приложений со специализированными пользовательскими интерфейсами для конкретных прикладных целей. Как эксперты, так и новички в математическом моделировании могут использовать приложения для проверки моделей и с их помощью оптимизировать имеющиеся процессы и конструкции и разрабатывать новые.

Одним из примеров является компания Mahindra Two Wheelers (на стр. 15). Специалисты компании используют моделирование для изучения характеристик шума и вибраций двигателя, впускной и выхлопной систем мотоциклов. Ульхас Мохите (Ulhas Mohite), руководитель отдела исследований и разработок Mahindra, рассказал нам о «создании и использовании приложения для моделирования в Среде разработки приложений от COMSOL Multiphysics® для сравнения результатов различных расчетов и построения графиков акустического давления, что сэкономило много времени». В этом случае они решали акустическую задачу, параллельно выполняя в приложении сравнение и анализ, полученные в ходе моделирования данных.

Пользователи не устают поражать нас своими творческими проектами и методами использования приложений, которые мы и представить себе не могли — изучение их работы, анализ замечаний и предложений дали толчок для создания множества новых программных функциональных возможностей. Все усовершенствования, которые мы внесли и будем вносить в программное обеспечение, направлены на облегчение применения точных численных моделей на ранних стадиях проекта для лучшего понимания физических явлений и оптимизации конструкций. Основная концепция нашего программного обеспечения отражает нашу философию, которая заключается в изучении явлений реального мира через качественную призму мультифизических моделей. ❖

СЕМЕЙСТВО ПРОДУКТОВ

- › COMSOL Multiphysics®
- › COMSOL Server™

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- › Модуль AC/DC
- › Модуль Радиочастоты
- › Модуль Волновая оптика
- › Модуль Геометрическая оптика
- › Модуль Плазма
- › Модуль Полупроводники
- › Модуль MEMS

МЕХАНИКА КОНСТРУКЦИЙ И АКУСТИКА

- › Модуль Механика конструкций
- › Модуль Нелинейные конструкционные материалы
- › Модуль Геомеханика
- › Модуль Усталость материала
- › Модуль Динамика многотельных структур
- › Модуль Роторная динамика
- › Модуль Акустика

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

- › Модуль Вычислительная гидродинамика
- › Модуль Миксер
- › Модуль Течения в пористых средах

- › Модуль Течение в трубопроводах
- › Модуль Микрогидродинамика
- › Модуль Молекулярные течения
- › Модуль Теплопередача

ХИМИЯ

- › Модуль Химические реакции
- › Модуль Аккумуляторы и топливные элементы
- › Модуль Электроосаждение
- › Модуль Коррозия
- › Модуль Электрохимия

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ

- › Модуль Оптимизация
- › Библиотека материалов
- › Модуль Трассировка частиц

ИНТЕГРАЦИЯ

- › LiveLink™ for MATLAB®
- › LiveLink™ for Excel®
- › Модуль Импорт данных из САПР
- › Модуль Проектирование
- › Модуль Импорт данных из ECAD
- › LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- › LiveLink™ for Inventor®
- › LiveLink™ for AutoCAD®
- › LiveLink™ for Revit®
- › LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- › LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- › LiveLink™ for Solid Edge®
- › File Import for CATIA® V5

Преимущества мультифизического моделирования для вычислительной акустики

НАГИ ЭЛАБАСИ (NAGI ELABBASI), VERYST ENGINEERING

Акустика применяется во многих, самых разных, областях науки и техники, что накладывает определенные требования на требуемые для этих целей вычислительные инструменты. Акустическое моделирование широко применяется для изучения шума автомобилей, акустики в помещении, громкоговорителей, миниатюрных динамиков, музыкальных инструментов, акустических датчиков и приводов, неразрушающего контроля. Оно своевременно предоставляет инженерам ценные сведения, с помощью которых можно оптимизировать изделия и проанализировать новые концептуальные разработки. В Veryst Engineering мы уделяем все больше внимания акустическому моделированию, особенно в области медицинских устройств и микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков.

Формулировки, используемые в акустических исследованиях, значительно различаются для некоторых из перечисленных выше областей применения. Во многих случаях невозможно решить акустическую задачу, не принимая во внимание другие физические явления, в частности механику конструкций, гидродинамику, электродинамику, теплопередачу и эффекты, связанные с пористыми средами. Мультифизическая связь между акустикой и другими явлениями обычно становится более значимой с уменьшением размеров устройств.

При этом примеры и возможности таких мультифизических акустических приложений постоянно расширяются, особенно в двух важных областях: медицинских устройствах и нательных технологиях. Недавно мы использовали мультифизическое моделирование для решения акустической задачи медицинского профиля: устройство типа «лаборатория на кристалле», предназначенное для акустофореза физиологических жидкостей. В его основе лежит принцип перемещения частиц под воздействием колебательного звукового поля, что находит применение в технологиях очистки, разделения жидкостей и акустической левитации. В данной конкретной модели были задействованы следующие физики: скалярная акустика, механика твердого тела, электрические поля, гидродинамические потоки флюида и трассировка частиц. Геометрические размеры

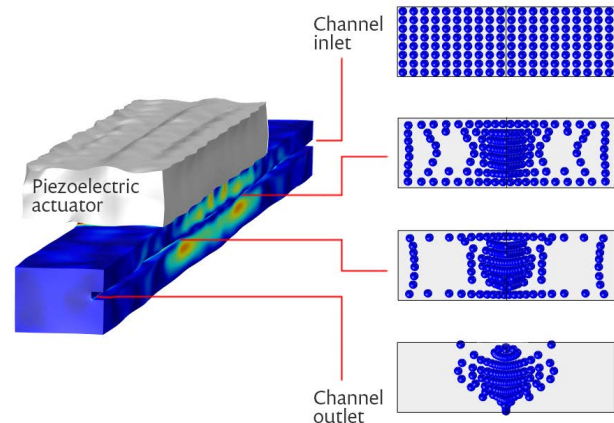
«На меня производит впечатление, то что примеры и возможности мультифизических акустических приложений постоянно расширяются, особенно в двух важных областях: медицинских устройствах и нательных технологиях.»

и свойства частиц, используемые в модели, были взяты из имеющейся литературы. На рисунке показано распределение частиц по каналу и эффективная фокусировка частиц в направлении его центральной оси. С помощью вычислительной модели инженеру проще выбрать размеры, материалы, рабочую частоту и скорость потока в устройстве.

При проведении акустических расчетов мы зачастую сталкиваемся с двумя общими проблемами, которые возникают и при моделировании других физических явлений: задание корректных и точных материальных свойств и валидация, т. е. проверка модели. По моему опыту, в акустических задачах одним из наиболее сложных в плане задания и оценки свойств является демпфирование или затухание. Если акустический привод работает вблизи резонансной частоты, а часто именно так и бывает, то заданные потери значительно влияют на результаты. Если в устройстве имеются полимерные компоненты (что также является частым случаем), то демпфирование,

скорее всего, будет зависеть от частоты. Одного параметра демпфирования, предоставленного производителем, например добротности или коэффициента потерь, просто недостаточно для точного анализа. Зачастую требуется больше испытаний как на уровне материала, так и на уровне прототипа устройства.

Чтобы устранить эти и многие другие проблемы, мы начали разрабатывать новые приложения для моделирования для наших клиентов. С помощью Среды разработки приложений в программном пакете COMSOL Multiphysics® мы можем создавать приложения с интуитивно понятным интерфейсом, которые можно легко адаптировать под требования каждого клиента. Надеемся, что эти приложения с их простым интерфейсом позволят пользователям, не являющимся экспертами в математическом анализе, оценить преимущества акустического моделирования. Клиенты смогут экспериментировать с параметрами или выполнять повторные расчеты, пользуясь своими собственными навыками. Благодаря мультифизическому моделированию область применения акустических расчетов стала гораздо шире, и мы ожидаем ее дальнейшего расширения благодаря разработке приложений для моделирования.



Расчет фокусировки акустофоретической частицы в микроканале, проведенный с помощью COMSOL Multiphysics®. Дополнительно показаны напряжения по Мизесу и деформация.



ОБ АВТОРЕ

Доктор Наги Элабаси — главный инженер компании Veryst Engineering, LLC. Он специализируется на моделировании мультифизических систем и имеет большой опыт в проведении CFD и тепловых расчетов, механических расчетов на прочность, акустических исследований и их мультифизических связей. Также занимается разработкой программного обеспечения для моделирования на основе метода конечных элементов. Получил докторскую степень по машиностроению в Университете Торонто. Чтобы узнать подробнее о консультационных, испытательных и образовательных услугах, предлагаемых компанией Veryst, посетите веб-страницу veryst.com/mechanical-engineering-services.