

MULTIPHYSICS SIMULATION

При поддержке
 COMSOL

 IEEE
SPECTRUM

ОКТАБРЬ 2017



**МНОГОУРОВНЕВОЕ
МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**
АНАЛИЗ СРЫВОВ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ
МАГНИТОВ БАК В ЦЕРН

СТРАНИЦА 6

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ — КЛЮЧ К ИННОВАЦИЯМ В ПРОЕКТИРОВАНИИ

МАЙКЛ ФОРСТЕР (MICHAEL FORSTER),
УПРАВЛЯЮЩИЙ ДИРЕКТОР ПО ПУБЛИКАЦИЯМ, IEEE

В ТЕЧЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЛЕТ МЫ ВМЕСТЕ с COMSOL рассказывали о том, как группы исследователей используют мультифизическое моделирование, чтобы получать детальную расчетную информацию и совершенствовать проектируемые изделия.

В этом выпуске журнала вы найдете самые разные примеры того, как численное моделирование преобразует научно-исследовательскую работу и разработку новых продуктов в ведущих компаниях.

Инструменты мультифизического моделирования незаменимы для компаний, производящих электромобили и компоненты для сетей 5G, а также крупных научных групп в тех сложных и уникальных технологических задачах, которые они решают.

Компания Faraday Future — производитель электромобилей — благодаря мультифизическому моделированию снизила число итераций в разработке одного из своих двигателей с 10 до 2.

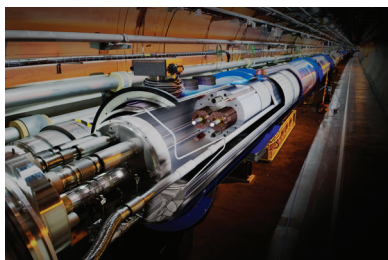
Производственная и консалтинговая компания Signal Microwave разрабатывает специализированные высокоскоростные разъемы для радиочастотных прикладных задач. С помощью мультифизического моделирования они оптимизируют конструкции, соединяющие бесчисленное множество сетевых компонентов. Все эти компоненты важны для своевременного и успешного внедрения технологии 5G.

Группа ученых, работающих на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН, разработала устройство защиты от отказов, которое помогает избежать дорогостоящего простоя систем охлаждения коллайдера.

Во всех этих случаях численное моделирование открыло новые перспективы, помогло проверить и оптимизировать конструкции с минимальными временными и материальными затратами. Техническим компаниям, стремящимся стать лидерами в разработке и в производстве, нужно пользоваться такими инструментами, чтобы получить конкурентные преимущества на быстро меняющихся рынках.

Мы надеемся, что вам понравится рассказ о впечатляющих инновационных конструкторских решениях в этом специальном выпуске журнала от COMSOL Multiphysics. ©

НА ОБЛОЖКЕ:
трехмерное изображение оборудования БАК
Изображение представлено ЦЕРН.



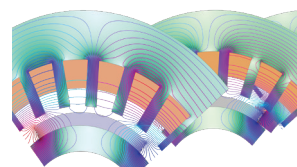
СОДЕРЖАНИЕ

3 И ПТИЦА, И САМОЛЕТ...: СТРУКТУРА ПОТОКА ВБЛИЗИ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЯТОРА

— Nokia Bell Labs, Ирландия

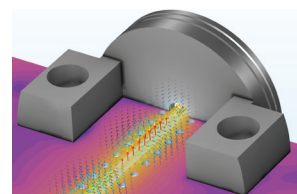
6 АНАЛИЗ СРЫВОВ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МАГНИТОВ БАК В ЦЕРН

— ЦЕРН, Швейцария



10 ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

— Faraday Future, США

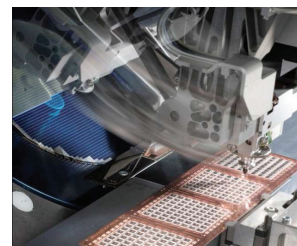


13 «НЕВИДИМЫЕ» РАЗЪЕМЫ ПРИБЛИЖАЮТ ПРИХОД СЕТЕЙ 5G

— Signal Microwave, США

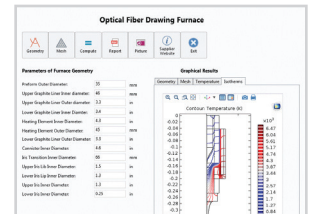
16 ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИХОДЯТ НА ЗАМЕНУ ДИЗЕЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРАМ В ИНДИИ

— NCL, Индия



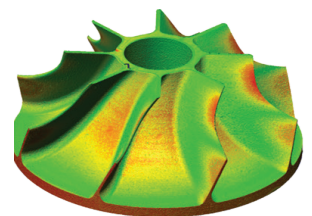
19 ЧИПЫ ПАМЯТИ: КАК ОТДЕЛИТЬ ВСЕ ЛИШНЕЕ

— Besi, Швейцария



22 ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЯЗЫВАЮТ ТОЧНЫЕ НАУКИ С РЕАЛЬНОЙ ЖИЗНЬЮ

— Университет Хартфорда, США



24 КОМПАНИЯ MTC СОЗДАЕТ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ЧТОБЫ ПОЛНОСТЬЮ ИЗМЕНИТЬ ПОДХОД К АДДИТИВНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

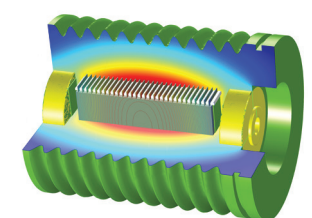
— MTC, Великобритания

27 НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОУТВЕРДИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

— Университет Кампинас и Институт передовых исследований, Бразилия

30 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМОГАЕТ РЕШАТЬ ПРОБЛЕМУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

— COMSOL, США



32 ЛУЧШИЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ — ПЛОД СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

— Cornell Dubilier Electronics, США

И ПТИЦА, И САМОЛЕТ...: СТРУКТУРА ПОТОКА ВБЛИЗИ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЯТОРА

В поисках бесшумных, надежных и экономичных решений для охлаждения инженеры Nokia Bell Labs применяют мультифизическое моделирование, чтобы проанализировать структуру потока воздуха, создаваемого колебаниями лопасти пьезоэлектрического вентилятора.

САРА ФИЛДС (SARAH FIELDS)

СКОЛЬЖЕНИЕ ЗМЕИ, ПРИСОСКИ ГЕККОНА, БЕГ ГЕПАРДА — природа все чаще вдохновляет инженеров, специализирующихся на робототехнике, электронике и медицинских изделиях. Один из примеров, когда сама природа подсказывает исследователям направление развития технологий, — движение птичьего крыла, которое вдохновило инженеров на создание пьезоэлектрического вентилятора с колеблющейся пластиной.

Электронные устройства становятся все меньше, а работают все дольше, и из-за роста внутренней тепловой нагрузки необходимы

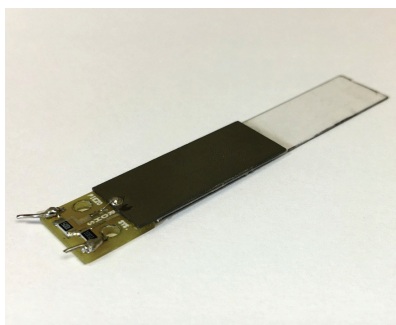
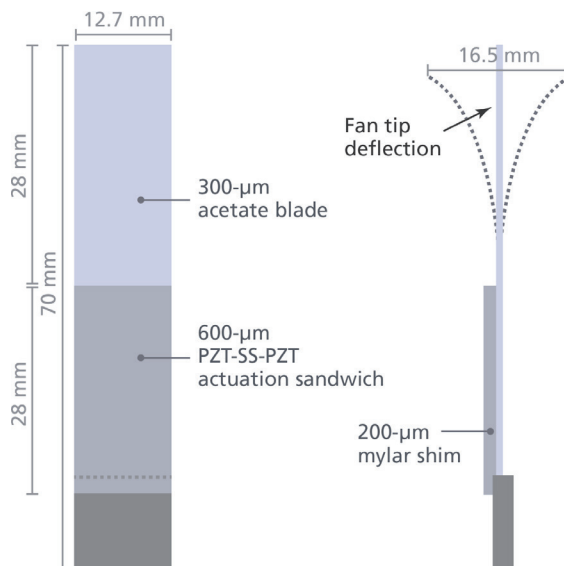


РИС. 1. Вентилятор выполнен из пьезоэлектрической керамики, прикрепленной к гибкой лопасти из ацетатной пленки. Эта сборка прикреплена к майларовой подложке с электрическими контактами для пьезоэлектрической керамики.



“ Преимущество COMSOL заключается в том, что мы можем создавать новые геометрические модели и оптимизировать конструкции гораздо быстрее.

АКШАТ АГАРВАЛ (AKSHAT AGARWAL), NOKIA BELL LABS

новые методы охлаждения с минимальными требованиями по пространству. Пьезоэлектрические вентиляторы используют пьезоэлектрический материал, который под воздействием электрического поля сжимается и расширяется, и таким образом приводит в движение консольную пластинку и создает поток воздуха. Такие вентиляторы надежны, потребляют мало энергии и не производят шума, а значит, подходят для охлаждения электроники.

Акшат Агарвал (Akshat Agarwal) из Nokia Bell Labs развивает эту технологию, изучая движение воздуха вокруг вентилятора. Представление о движении воздуха около колеблющейся пластины помогло найти и другие неожиданные применения для систем с похожей структурой потока воздуха.

» СОЧЕТАНИЕ СВОБОДНОЙ И ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕПЛО-ОТВОДА КОНСТРУКТОРЫ

электронных устройств инженеры долгое время полагались либо на свободную конвекцию, либо на вынужденную конвекцию, создаваемую электрическими вентиляторами. При этом вынужденная конвекция — это весьма энергоемкий процесс, и с уменьшением масштабов электронных устройств нынешнего поколения ее эффективность падает.

Пьезоэлектрический вентилятор обеспечивает отвод тепла, сжимаясь и расширяясь при приложении напряжения, что приводит к колебательному движению прикрепленной лопасти вентилятора и создает поток воздуха. Агарвал поясняет: «Пьезоэлектрический вентилятор — это промежуточное решение между свободной и вынужденной конвекцией. При возможности мы предпочитаем свободную конвекцию, но иногда оправданно ввести активное

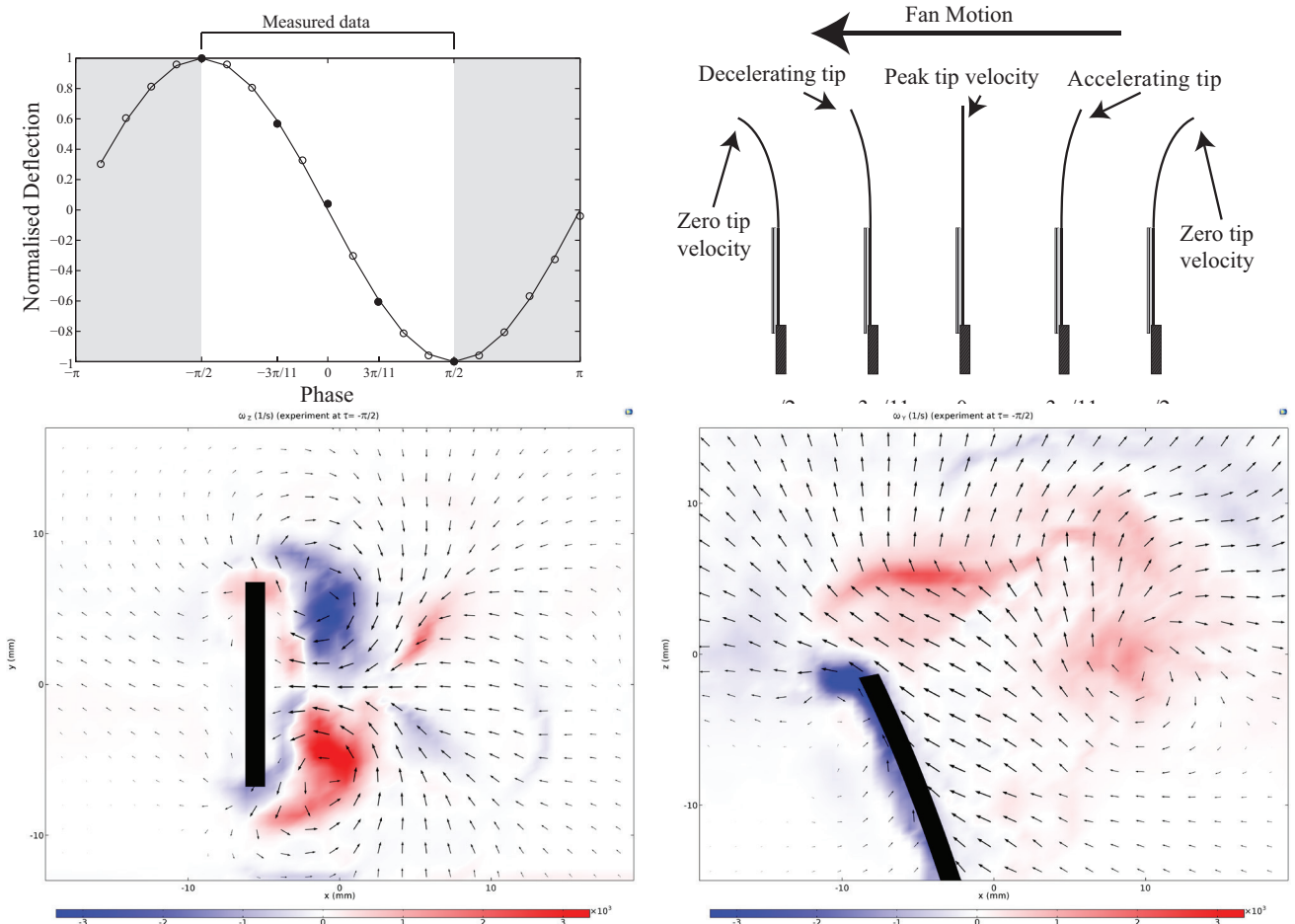


РИС. 2. Вверху слева: график измерений с фазовой синхронизацией, показывающий нормализованное перемещение конца лопасти вентилятора. Вверху справа: изображение, показывающее деформацию лопасти вентилятора в течение половины периода колебаний. Внизу: измерения скорости частиц по их изображениям с фазовой синхронизацией позволяют рассчитать завихренность (цветной контурный график) и скорость в плоскости (векторное поле) для свободного вентилятора.

устройство для движения воздуха». Лопасть вентилятора, которую используют исследователи компании Nokia, состоит из пьезоэлектрического материала, прикрепленного к полоске ацетатной пленки и майларовой подложки (рис. 1).

Гидродинамика динамических систем настолько малого размера может быть довольно сложной. Чтобы собрать надежную информацию о потоках воздуха вокруг колеблющейся лопасти, инженерам компании Nokia пришлось перейти от двумерных задач к трехмерному моделированию и физическим испытаниям.

» ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НАЧАЛА ИНЖЕНЕРЫ NOKIA BELL LABS

в своих экспериментах измеряли скорости частиц с фазовой синхронизацией по их изображениям (PIV). Это позволило им определить завихренность и скорость в плоскости для свободного вентилятора в свободном пространстве (рис. 2) для 11 разных положений колеблющейся лопасти. Для каждого положения лопасти были получены данные в пяти плоскостях x-y и в пяти

плоскостях x-z, чтобы получить трехмерное поле.

На следующем этапе была создана модель взаимодействия лопасти и воздуха, чтобы лучше понимать работу системы. Скорость и точность были основными критериями определения стратегии моделирования.

«Нам было важно создать точную модель потока текучей среды вокруг лопасти с минимальными требованиями к производительности, — говорит Агарвал. — В такой модели мы могли бы виртуально изменять

конструкции лопастей и изучать их поведение в разных условиях».

Сначала инженеры изучили методы моделирования, описанные в литературе, но требования к вычислительным ресурсам заставили их искать новые подходы. Программный пакет COMSOL® требует меньше вычислительных ресурсов и поддерживает лагранжево-эйлеров подход, который наилучшим образом описывает поведение этой физической системы. Этот метод сочетает эйлерово описание потока текучей среды

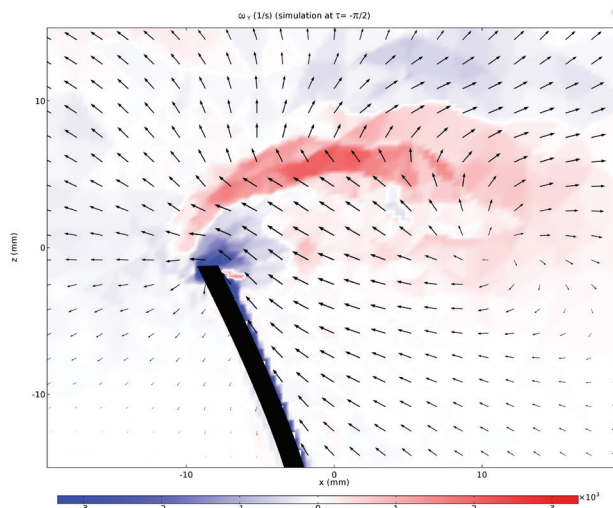
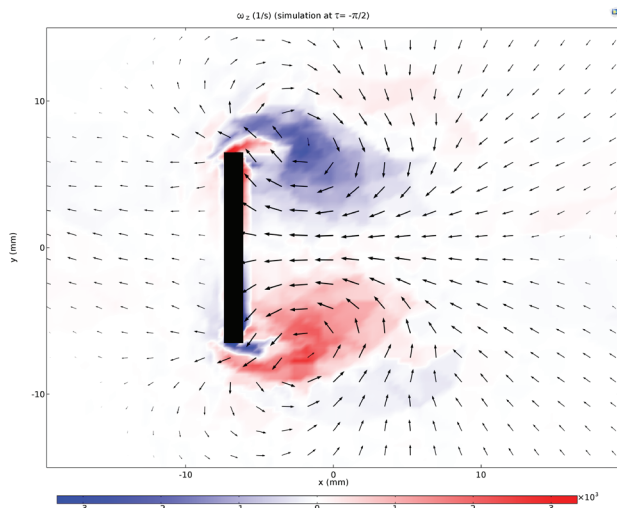


Рис. 3. Модель COMSOL показывает завихренность и поле скорости для двух положений колеблющейся лопасти.

и лагранжев формализм для механики твердого тела.

Агарвал использовал COMSOL для 3D моделирования взаимодействия потока и конструкции и анализа сил, действующих внутри пластины, и структуры течения вблизи нее. Это позволило построить точную физическую модель системы. Используя гибкие возможности COMSOL, Агарвал смог упростить некоторые свои модели, чтобы в каждом аспекте моделирования применить наилучший подход.

Чтобы повысить эффективность вычислений, инженеры моделировали касательные силы и давление при движении воздуха, а не само возбуждение пьезоventилиатора. Результаты моделирования демонстрируют скорость потока (рис. 3), а также структуры вихрей и их движение вокруг лопасти вентилятора (рис. 4).

«Мы получили данные о структуре потока воздуха вблизи лопасти с лучшим разрешением, чем мы могли получить экспериментально. На кроме лопасти поток наиболее интенсивен, а его импульс — максимален.

В наших экспериментах мы могли получать распределение скоростей частиц и анализировать их движение в плоскости. После этого мы сшивали плоскости, чтобы получить форму вихрей. Но полученное в эксперименте разрешение ограничено, поскольку одновременно можно проанализировать только определенное число плоскостей, — добавляет Агарвал. Когда же вы анализируете полноценную трехмерную модель, вы можете получить данные о скорости потока вблизи и вдали от вентилятора, а кроме того, можно строить графики множества различных переменных».

«Программный пакет также позволяет получить данные в узлах расчетной сетки, заданной пользователем. Эти данные мы можем использовать для различных целей, например для экспорта в другой программный пакет или обработки скриптом», — поясняет Агарвал, имея в виду постобработку, которую он проводил для визуализации завихренности потока воздуха вокруг лопасти.

» АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТ — МОЩНОЕ СОЧЕТАНИЕ УЧЕНЫЕ NOKIA BELL LABS

ОБНАРУЖИЛИ, что их модели учитывали все тонкости динамики системы и давали больше информации о движении потока воздуха вблизи лопасти, чем физические эксперименты сами по себе. В результате они получили проверенную модель, которую они надеются использовать как эталон для новых разработок. Полученные знания могут найти применение и в других областях,

например в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) с машущим крылом.

«Уникальность COMSOL — в том, что мы можем создавать новые геометрии и оптимизировать конструкции гораздо быстрее. Я мог быстро изменять конструкцию и использовать нужные мне конструктивные особенности», — заключает Агарвал. В будущем можно будет исследовать поток воздуха и гидрогазодинамику вокруг нескольких лопастей, чтобы понять, как совместная работа вентиляторов повлияет на процесс охлаждения. ☺



Слева направо: Николас Джефферс (Nicholas Jeffers), Кевин Нолан (Kevin Nolan), Диармайд О'Коннелл (Diarmuid O'Connell) и Акшат Агарвал (Akshat Agarwal).

АНАЛИЗ СРЫВОВ СВЕРХПРОВО- ДИМОСТИ МАГНИТОВ БАК В ЦЕРН

С помощью мультифизического моделирования инженеры ЦЕРН изучают переходные процессы в сверхпроводящих магнитах и магнитных цепях Большого адронного коллайдера (БАК).

САРА ФИЛДС (SARAH FIELDS) И ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

В ЕВРОПЕЙСКОМ ЦЕНТРЕ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ЦЕРН), расположенном в Швейцарии недалеко от Женевы, физики и инженеры проводят эксперименты, которые должны ответить на фундаментальные вопросы физики элементарных частиц, а также о происхождении и природе Вселенной.

В Большом адронном коллайдере (рис. 1), подземном ускорителе частиц длиной 27 километров, пересекающем границу между Швейцарией и Францией, два пучка частиц сталкиваются друг с другом, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света. Результаты высокоэнергетических столкновений дают нам информацию о фундаментальных взаимодействиях и простейших составляющих материи.

Мощные дипольные магниты, потребляющие до 12 кА тока и создающие магнитные поля до 8,33 Тл, поддерживают движение частиц внутри БАК по круговой траектории. Магниты (рис. 2) охлаждаются до температуры 1,9 К — ниже, чем в открытом космосе, — чтобы обмотки магнитов (рис. 3) оставались в сверхпроводящем состоянии. Теоретически, такие режимы работы должны

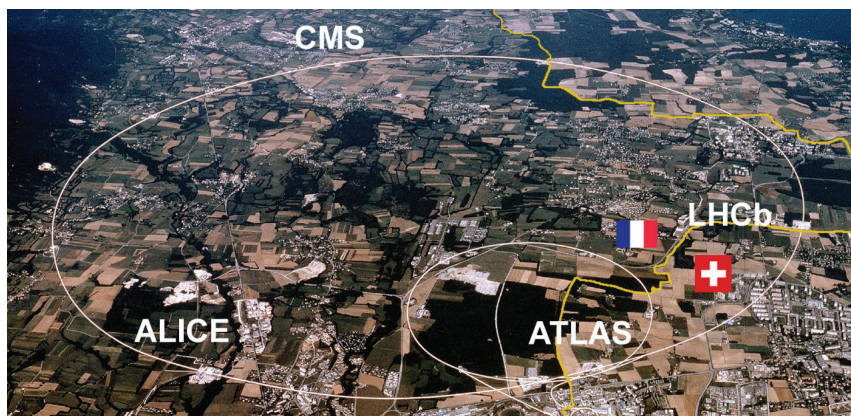


РИС. 1. Расположение туннеля БАК во Франции и Швейцарии.

обеспечивать постоянную циркуляцию тока в обмотках магнитов без резистивных потерь. На самом же деле, обмотки могут на некоторое время частично переходить из сверхпроводящего в нормальное состояние.

К этому могут приводить местные повышения температуры из-за механического перемещения, потерь по переменному току, а также потерь, связанных с обращаемыми высокоэнергетическими пучками протонов. Такие потери возникают по всей окружности установки, когда частицы отклоняются от идеальной траектории и сталкиваются с окружающим ускорительным оборудованием, например с магнитами. Если энергия столкновения достаточно высока, происходит местный скачкообразный переход материала обмотки из сверхпроводящего в нормальное состояние — срыв сверхпроводимости (в английской терминологии quench). Сверхпроводящее состояние материала характеризуется так называемой критической поверхностью, которая определяется критической температурой, плотностью электрического тока и магнитным полем, действующими на сверхпроводник (рис. 4). Переход за критическую поверхность вызывает переход от сверхпроводящего к резистивному состоянию и приводит к срыву сверхпроводимости магнита.

После перехода в резистивное состояние при срыве, если не предпринимать никаких защитных мер, обмотка магнита рассеивает всю электромагнитную энергию, накопленную в ее объеме. В одном дипольном магните БАК запасено около 7 МДж энергии — достаточно, чтобы расплавить более 10 кг меди. Рассеивание в обмотках мегаватт энергии может привести к большим перепадам температуры. Отметим, что во всех 1232 основных дипольных магнитах БАК запасено примерно 9 ГДж энергии — столько же, сколько в 1,5 тоннах динамита.



РИС. 2. Подробный вид апертуры главного дипольного магнита. Сверхпроводящие обмотки удерживаются поясами из аустенитной стали, выдерживающими электромагнитные силы величиной 2 МН/м на четверть витка обмотки при номинальном магнитном поле.

В маловероятном случае срыва сверхпроводимости при номинальной энергии и без защиты мощные магниты ускорителя, скорее всего, будут невосстановимо повреждены. На замену неисправного магнита потребуются до нескольких месяцев, в течение которых работать с пучками частиц будет невозможно и установка будет простаивать.

Лоренцо Бортог, исследователь и инженер-электротехник в ЦЕРН, разработал двухмерную конечноэлементную электротермическую модель сверхпроводящих магнитов, которая включает исследование во временной области и позволяет оценивать, насколько хорошо новейшие технологические решения подходят для автоматических систем реагирования на срыв сверхпроводимости.

» ОБНАРУЖЕНИЕ СРЫВА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЕ магниты в основном находятся в стационарном

состоянии, и их поле (рис. 5) направляет частицы по кольцу БАК. Обмотки магнитов сверхпроводящие, поэтому измеряемое падение напряжения на магнитах равно нулю, а джоулевых потерь почти нет. Специализированные электронные системы следят за магнитами и быстро реагируют на внезапное падение напряжения на сопротивлении обмотки или между соседними магнитами. Как только сигнал превысит пороговое напряжение в течение минимального контрольного времени, система обнаружения срыва сверхпроводимости активирует защитные меры.

Система защиты должна быть правильно спроектирована и подстроена под контролируемый ею магнит, а электронная часть системы — правильно настроена и оптимизирована. С одной стороны, система обнаружения должна быть достаточно чувствительной, чтобы не пропустить срыв сверхпроводимости. С другой стороны, слишком строгие критерии срабатывания могут привести к ложным тревогам. Это приостановит работу на БАК и на несколько часов выведет установку из строя, снижая ее техническую готовность.

» ЗАЩИТА ОТ СРЫВА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ МАГНИТОВ ОТ СРЫВА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ИСПОЛЬЗУЕТ ПРОСТУЮ, но эффективную стратегию — распространение области срыва на весь магнит, увеличивая объем, в котором рассеивается энергия, и не позволяя части магнита поглотить всю запасенную энергию.

«Мы нагреваем сам магнит, чтобы увеличить размеры нормально проводящей области и рассеять запасенную в магните энергию во всем объеме обмотки», — объясняет Бортот. Это парадоксальный ход: если магнит работает нормально, мы охлаждаем его, насколько можем, и поддерживаем в сверхпроводящем состоянии, но при первом же отказе нам требуется нагреть весь магнит как можно быстрее. И здесь очень важна равномерность температуры».

Новая, но очень многообещающая технология защиты от срыва сверхпроводимости, недавно разработанная в ЦЕРН, получила название «система срыва сверхпроводимости за счет индукционных потерь» (Coupling-Loss Induced Quench system, CLIQ). Основная ее составляющая — заряженная батарея конденсаторов, подключенная параллельно обмотке магнита. При срабатывании система вызывает резонанс LC-контура, создавая колебательное магнитное поле внутри магнита.

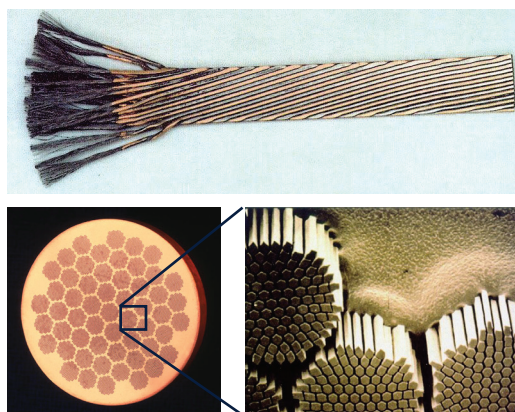
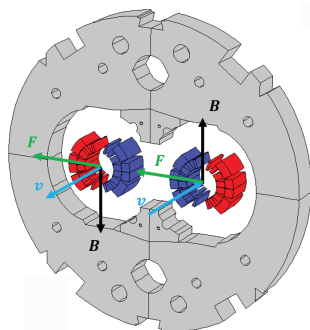


РИС. 3. Слева: поперечное сечение главного дипольного магнита БАК. Красным и синим отмечены сверхпроводящие обмотки, удерживающие частицы на круговой траектории. Серым отмечено железное ярмо. Справа: сильноточные сверхпроводящие магниты БАК, включающие кабели из сверхпроводящих микрожил в медном каркасе.

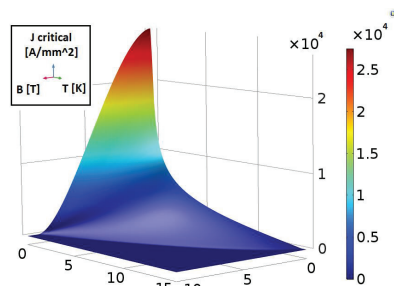


РИС. 4. Критическая поверхность для ниобий-титанового сплава — сверхпроводящего материала магнитов.

Поле, в свою очередь, создает индукционные и вихревые токи в кабелях, в том числе на уровне отдельных жил кабеля. Обмотки магнита равномерно нагреваются изнутри в похожем на микроволновой нагрев процессе. Система CLIQ преследует две цели: увеличить объем, в котором возникают вихревые токи, и уменьшить время, в течение которого эти потери переводят сверхпроводящий кабель в резистивное состояние выше критической температуры. Рассеяние энергии в резистивном состоянии определяется джоулевым нагревом, который происходит по всей длине обмотки, а не в одной области, при этом область срыва сверхпроводимости и область джоулевого нагрева распространяются максимально равномерно.

» ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЛОЖНОСТИ И ВЫЗОВЫ ГРУППА ИНЖЕНЕРОВ-ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ в ЦЕРН также занимается внедрением модульного подхода к моделированию переходных эффектов в цепях магнитов

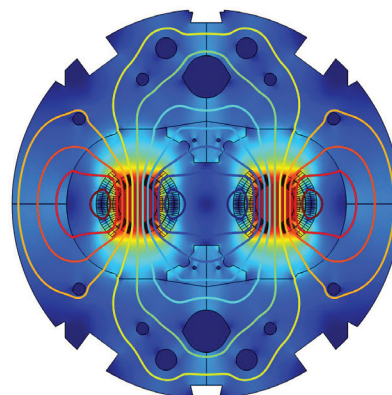


РИС. 5. Магнитные поля в системе при номинальном приложенном токе в сверхпроводящем состоянии

ускорителя на основе набора коммерческих САПР. Бортот, специализирующийся на использовании программного обеспечения COMSOL Multiphysics® и языка программирования Java®, разработал уникальную численную модель, описывающую электродинамику и термодинамику распространения срыва сверхпроводимости. Чтобы учесть все возможные вычислительные трудности при моделировании указанных ресурсоемких процессов, потребовались тщательная подготовка и набор гибких инструментов.

Поперечное сечение дипольного магнита БАК состоит из нескольких сотен подобластей, каждая из которых соответствует полувитку витого кабеля обмотки (вверху на рис. 6). Срыв сверхпроводимости в полувитках происходит не одновременно, но из-за местного характера срыва

его зона распространяется по поперечному сечению, демонстрируя сложное для моделирования поведение. «Важно правильно учесть и согласовать взаимное влияние термодинамики и электродинамики, — объясняет Бортот. — Чтобы численно описать такую геометрию, в которой

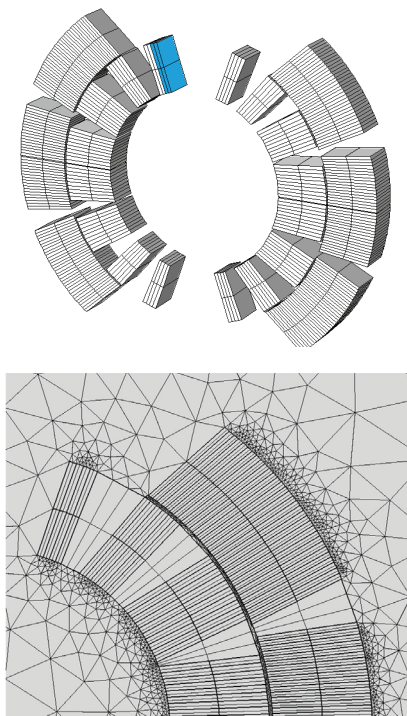


РИС. 6. Вверху: геометрия сечений магнита. Внизу: сетка конечноэлементной модели сечений магнита.

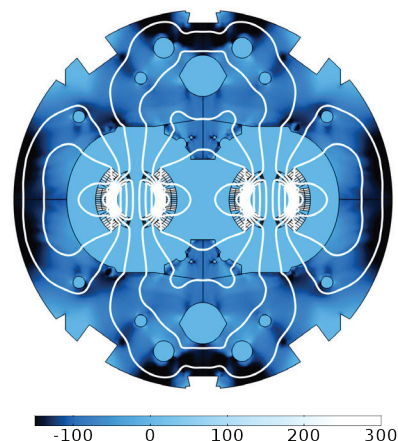


РИС. 7. Эквивалентная намагниченность, создаваемая вихревыми токами (А/м) при линейном росте со скоростью 100 А/с и величине 8 кА.

срывает в каждом полувитке может происходить независимо, требуется отдельный набор уравнений для каждой подобласти».

Чтобы описать электродинамику и термодинамику процесса срыва, требуется смоделировать поведение системы в масштабах порядка метров (размер поперечного сечения магнита) и порядка микрометров (вследствие малого диаметра жил кабеля). Кроме того, процесс срыва развивается за несколько микросекунд и распространяется за несколько миллисекунд, а полная потеря энергии магнитом может занять до одной секунды. Таким образом, исследователям пришлось одновременно изучать три разных временных масштаба.

«Это мультифизическая многоуровневая и мультимасштабная задача, в которой зависящие друг от друга явления развиваются в различных пространственных и временных масштабах», — объясняет Бортот.

Большая часть программного обеспечения для моделирования не позволила бы создать эффективную вычислительную модель, поскольку для этого потребовалась бы сетка, покрывающая шесть порядков величины, и шаг решателя, определяемый самым малым временным масштабом, приводя к огромным объемам данных и чрезмерным затратам времени.

Чтобы обойти это затруднение, группа ученых в ЦЕРН применила выражение для эквивалентной намагниченности для изучения системы, используя функционал программного обеспечения COMSOL® (рис. 7). Вместо того чтобы рассчитывать в микрометровом масштабе пути индукционных токов, возникающих в сверхпроводящих кабелях, инженеры смоделировали эти паразитные токи через их эквивалентный вклад в результирующее магнитное поле. «Мы использовали формулировку на основе эквивалентной намагниченности, пропорциональной производной поля через некоторую постоянную времени, — говорит Бортот. — Это комбинация законов Фарадея-Неймана-Ленца и Ампера-Максвелла. Это возможно при знании пути протекания индукционных токов в кабеле, что позволяет задать эквивалентную постоянную времени».

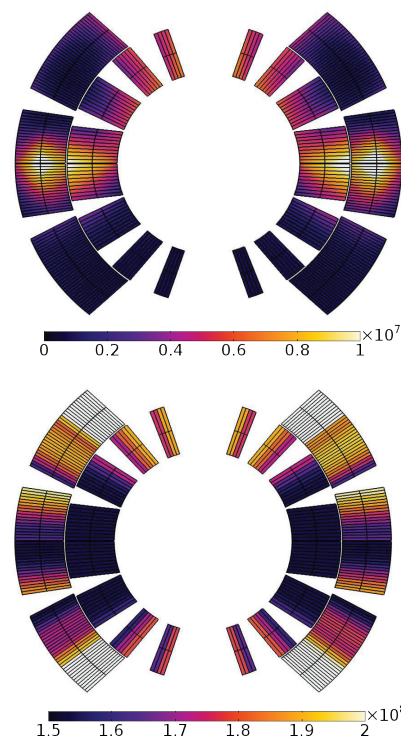


РИС. 8. Различные механизмы потерь в обмотках, Вт/м³. Вверху: потери на вихревые токи, создаваемые системой CLIQ. Внизу: омические потери из-за распространения срыва сверхпроводимости.

Для указанных преобразований Бортот воспользовался гибкими возможностями редактирования стандартных уравнений Максвелла и замены переменных в COMSOL. «Изменив уравнения, которые решает COMSOL, я смог подстроить стандартную формулировку на основе векторного магнитного потенциала для своих задач. Кроме того, крайне важным этапом было получение удобного доступа к предыдущему временному шагу решения для вычисления производной поля».

«Так как мы уже учитываем индукционные токи в эквивалентной намагниченности, нам не требуются дополнительные циркулирующие токи. Я отключил индукционные токи в области обмотки,

“ «Имея возможность редактировать уравнения, которые решает COMSOL, я смог подстроить стандартную формулировку для своей задачи»

— ЛОРЕНЦО БОРТОТ, ИНЖЕНЕР-ЭЛЕКТРОТЕХНИК, ЦЕРН

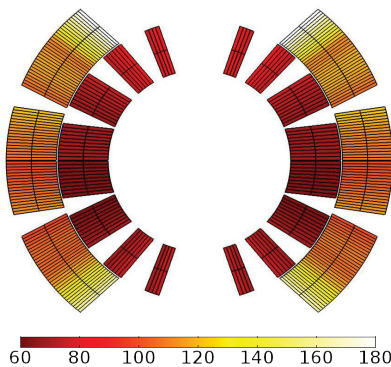


РИС. 9. Распределение температуры (К) в обмотках после срыва сверхпроводимости продолжительностью 500 мс

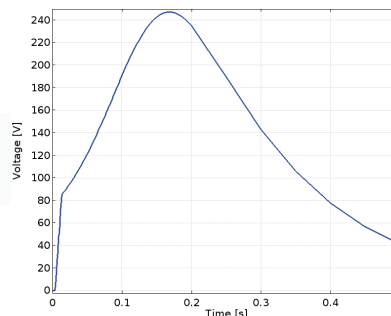
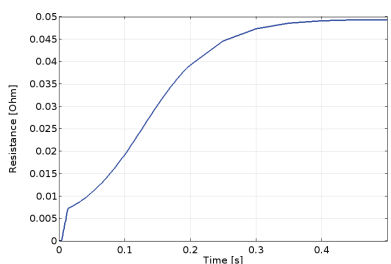


РИС. 10. Результаты, полученные в COMSOL[®], при моделировании срыва сверхпроводимости. Вверху: рост омического сопротивления в обмотке. Внизу: напряжение, измеряемое на выводах обмотки.

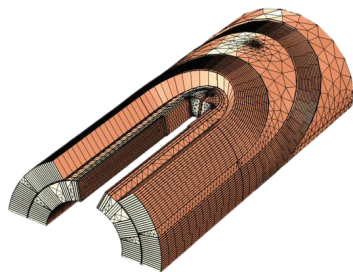


РИС. 11. Предлагаемая геометрия и сетка для будущей трехмерной модели.

и это сильно упростило работу. Я бы сказал, это стало краеугольным камнем архитектуры нашего решения». Не моделируя индукционные токи непосредственно, ученые также смогли значительно упростить сетку (внизу на рис. 6).

Сложно было не только согласованно и эффективно смоделировать физику системы, но и воссоздать на практике реалистичную модель устройства. При сверхнизких температурах сильно нелинейные свойства материалов описываются сложными численными структурами, которые эффективно реализуются и управляются внешними функциями на языке С, организованными в общую совместно используемую библиотеку. Кроме того, каждый полувиток обмотки описывается своим набором переменных и операторов и имеет собственный слой изоляции микрометровой толщины. В точной модели распространения срыва сверхпроводимости важно учитывать этот слой, который возможно смоделировать за счет встроенного в пакет граничного условия для тонкого слоя, не требующего явного построения сетки по толщине.

Сборка этих повторяющихся подблоков была автоматизирована, чтобы сэкономить время и избежать влияния человеческого фактора и соответствующих ошибок. Именно поэтому конечноэлементная (FEM) модель поперечного сечения магнита создается и собирается отдельным алгоритмом на языке Java, превращающим пользовательские входные данные в распределенную модель с помощью прикладного программного интерфейса (API) COMSOL. Этот прием обеспечивает для используемого метода конечных элементов достаточную гибкость при его адаптации под разные типы магнитов.

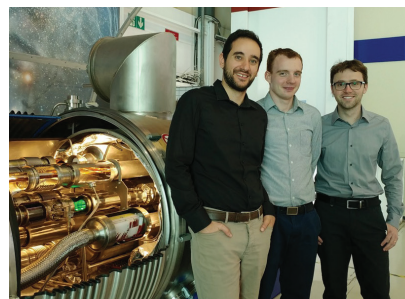
Моделирование индукционных токов через эквивалентную намагниченность позволило ученым сразу же рассчитывать потери и выражать их как функцию от колебаний магнитного поля. Группа пришла к выводу, что колебания магнитного поля непосредственно рассеиваются в виде потерь на индукционные токи.

Одним из главных достижений стало моделирование процесса срыва сверхпроводимости в главном дипольном магните БАК после внезапной активации системы защиты CLIQ для предотвращения последствий срыва. Модель, учитывающая нелинейные свойства материалов, зависящие от температуры и магнитного поля, демонстрирует колебания магнитного поля и вызванные колебаниями потери на вихревые и индукционные токи (вверху на рис. 8) в сверхпроводнике, распространение

срыва сверхпроводимости и вызванный им резистивный нагрев (внизу на рис. 8), а также итоговое распределение температуры из-за накопления тепловых потерь в обмотке (рис. 9). Конструкция системы CLIQ также была проверена независимо путем решения уравнения теплового баланса, при этом было подтверждено, что магнит достигает температуры, требуемой для распространения срыва по его объему, а обмотка получает нужное количество энергии. Кроме того, модель позволила установить сосредоточенные параметры, связанные со срывом: сопротивление обмотки и падение напряжения по времени (рис. 10), которые можно использовать как входные данные при моделировании внешних электрических цепей магнита.

» ОТ БАК ДО УСКОРИТЕЛЕЙ БУДУЩЕГО
МОДЕЛЬ БОРТОТА ПОЗВОЛЯЕТ ВОСПРОИЗВЕСТИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, возникающие при быстром рассеивании энергии, и глубоко изучать явление срыва сверхпроводимости в магнитах.

Эти модели сейчас адаптируются для проектируемых и сооружаемых магнитов, предназначенных для модернизации БАК с целью повышения светимости (High Luminosity), а также для будущего кольцевого коллайдера следующего поколения (Future Circular Collider). Также будет исследована возможность расширения моделей на трехмерные задачи (рис. 11). Моделирование, идущее одновременно с процессом проектирования, помогает и поддерживает разработку новых систем обнаружения и защиты от срыва сверхпроводимости. Работа группы ученых поможет защитить нынешние и будущие ускорители от последствий срыва и позволит исследователям продолжать изучение природы материи без опасения повредить сверхпроводящие магниты. ©



Слева направо: Лоренцо Борто (Lorenzo Bortot), Михал Мацеевский (Michal Maciejewski) и Марко Приоли (Marco Prioli)

ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Компания Faraday Future о цикле проектирования и разработки электродвигателей для электрокаров.

ДЖЕММА ЧЕРЧ (GEMMA CHURCH)

ЗА СЧЕТ ВСЕ ВОЗРАСТАЮЩЕЙ ПОПУЛЯРНОСТИ И ДОСТУПНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ СТРЕМИТЕЛЬНО МЕНЯЕТСЯ и пытается подстроиться под современные требования и реалии рынка.

Одно из ключевых направлений развития — разработка электродвигателей, которые по-прежнему нуждаются в серьезных улучшениях. Одно из решений — использование силовых магнитных устройств (PMD), к категории которых относятся электродвигатели, генераторы, трансформаторы и индукторы. Говоря простыми словами, эти компоненты с помощью электромагнитного поля преобразуют электрическую энергию в механическую или наоборот.

Последние разработки в области электроэнергетики и проектирования силовых магнитных устройств направлены на снижение потерь, массы, объема и стоимости этих систем, а также на увеличение мощности, надежности и технологичности крупномасштабного производства.

» СОЧЕТАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РАБОТЫ НАД СОВМЕСТНЫМИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЕКТАМИ

ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ, которые нередко являются взаимоисключающими, требуются новые методы оптимизации конструкции различных силовых магнитных устройств, например электродвигателей. Такие методы включают вычислительно эффективные модели устройств в сочетании с новейшими методами оптимизации. Кроме того, инженерная разработка электродвигателей представляет собой сложную мультифизическую задачу на стыке механики, электротехники и термодинамики.

Технологический стартап Faraday Future нацелен на разработку интеллектуальных моделей электромобилей и использует программное обеспечение COMSOL Multiphysics® — программу для мультифизического конечноэлементного анализа — для создания современных и мощных электродвигателей.

Для достижения эффективности компания применяет инновационный модульный подход к проектированию электромобилей. Омар Лэлдин (Omar Laldin), ведущий инженер-электротехник компании

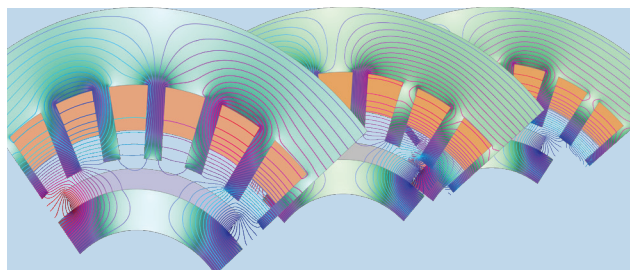


РИС. 1. Конечноэлементный анализ синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и нелинейными материалами.

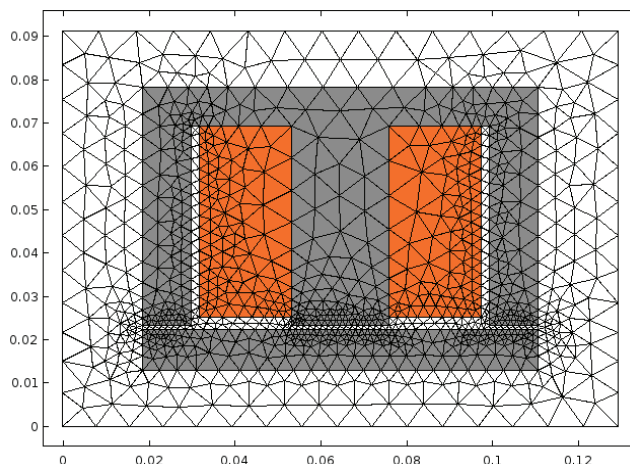


РИС. 2. Конечно-элементная сетка привода с сердечником типа EI.

Faraday Future, объясняет: «Моя группа проектирует универсальные двигатели для электротранспорта, в основном предназначенные для нашей архитектуры с заменяемой ходовой частью, что позволяет вести модульную разработку трансмиссии электромобилей. Мы можем добавлять и убирать двигатели, менять число аккумуляторных батарей, уменьшать или увеличивать размер ходовой части».

«Для этого приходится рассчитывать двигатели на различные условия работы и учитывать ряд аспектов, помимо непосредственно электродинамических компонентов и эффектов, таких как механические и температурные характеристики электромоторов», — добавляет Лэлдин. На рис. 1 показан пример электродинамического расчета, проведенного группой.

Он включает в себя ряд сложных алгоритмов оптимизации, быстро моделирующих поведение конкретной конструкции. Алгоритмы оптимизации должны выполнить множество итераций, и чтобы исследователи могли изучить большое число возможных конструкций, скорость этих алгоритмов чрезвычайно важна. Поэтому некоторые аспекты моделей требуется упростить.

Лэлдин объясняет: «Полный анализ температурных характеристик методами вычислительной гидродинамики может занять несколько недель. А мы зачастую рассматриваем тысячи конструкций и сотни рабочих точек для каждой из них, и подробный мультифизический анализ средствами,

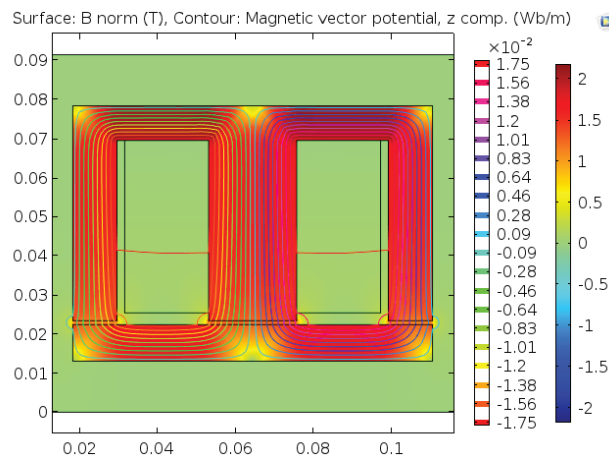
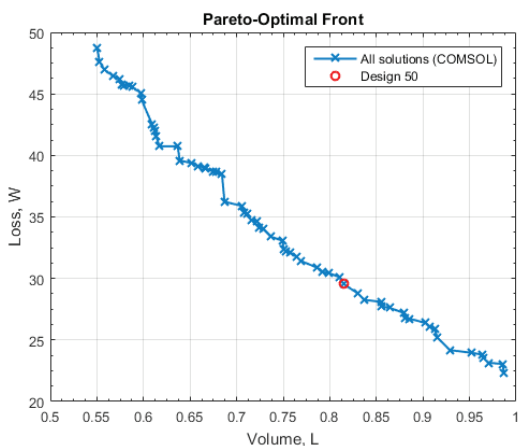


РИС. 3. Слева: паретооптимальный фронт, обеспечивающий компромисс между массой и потерями. Справа: распределение магнитной индукции в приводе с сердечником типа EI.

требуемыми больших вычислительных затрат, становится непрактичным. Такие инструменты, как программный пакет COMSOL®, позволяют нам провести подробный электротехнических и механический расчет вместе с упрощенным тепловым расчетом; они надежно работают и обеспечивают быструю обратную связь по всем этим аспектам в процессе проектирования».

Гибкие инструменты COMSOL также позволили группе проектирования электродвигателей сотрудничать с другими подразделениями компании Faraday Future: группами механики двигателей, инвертеров, управления двигателями, управления трансмиссией, разработки систем и другими. Все вместе эти группы образуют большую группу разработки силовых агрегатов внутри компании.

«Чтобы убедиться, что мы на верном пути, мы проводили анализ на ранних этапах, прежде чем отправлять данные другим группам. Это уменьшило число итераций, которые нам пришлось проходить в совместной работе. Я думаю, что это одно из самых больших преимуществ моделирования в COMSOL», — добавляет он.

» РАЗРАБОТКА ПРИВОДА

ГРУППА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ разработала привод с сердечником типа EI, который соответствовал заданным ограничениям и обеспечивал компромисс между требованиями к объему и потерям мощности. Разработчики хотели минимизировать потери мощности, но не были готовы увеличивать ради этого размер компонента, поскольку размер агрегата критически важен для большинства систем автомобиля. Привод состоит из многovitковой катушки, намотанной на неподвижный сердечник в форме буквы «E», и подвижного прямого сердечника в виде буквы «I» (рис. 2).

« COMSOL для нас был очень логичным выбором — мы разрабатываем современные технологии и ценим скорость вычислений.

— ОМАР ЛЭЛДИН, ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭЛЕКТРОТЕХНИК КОМПАНИИ FARADAY FUTURE

Разработчики провели двухмерный расчет электромагнитного поля в COMSOL® и совместили его с генетическим алгоритмом в программном пакете MATLAB®. Модель учитывала сильно нелинейное поведение различных стальных материалов, а генетический алгоритм рассчитывал глобальные оптимумы и многокритериальные паретооптимальные фронты, которые обеспечивали компромисс между снижением объема и потерей мощности (рис. 3).

Инженеры использовали геометрические параметры привода как исходные данные для алгоритма и рассчитывали потери, исходя из сопротивления обмотки. Это позволило быстро изучить многочисленные варианты конструкции электромагнитного привода, выдающего усилие до 2500 Н.

» ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕРЬ

ГРУППА ТАКЖЕ ИССЛЕДОВАЛА нелинейное поведение стали в электродвигателях, которое значительно влияет на характер высокочастотных потерь проводника в пазе. Эти потери растут из-за усиления скин-эффекта и эффекта близости

в проводниках. На них также влияет температура. Из-за геометрии двигателя некоторые конфигурации обмоток и их проводников охлаждаются легче, чем другие. Например, расстояние между проводниками и их геометрические размеры влияют на теплопередачу в зазоре.

Лэлдин и его коллеги провели дальнейший анализ мультифизический анализ, связывая электромагнитные компоненты и температурные характеристики, чтобы обнаружить в двигателе места перегрева, которые могут вызвать катастрофический отказ. Они обнаружили, что плотность тока в проводниках заметно меняется с изменением плотности магнитного потока в пазе. Рассчитав плотность потерь в каждом проводнике, они получили распределение температур и максимальную температуру мест перегрева в разных областях двигателя (рис. 4).

Лэлдин отмечает: «Потери в разных проводниках могут различаться даже при постоянном значении тока. Мы моделируем эти изменения и проводим быстрый оценочный тепловой расчет в COMSOL, который позволяет нам определить и проанализировать распределение температур».

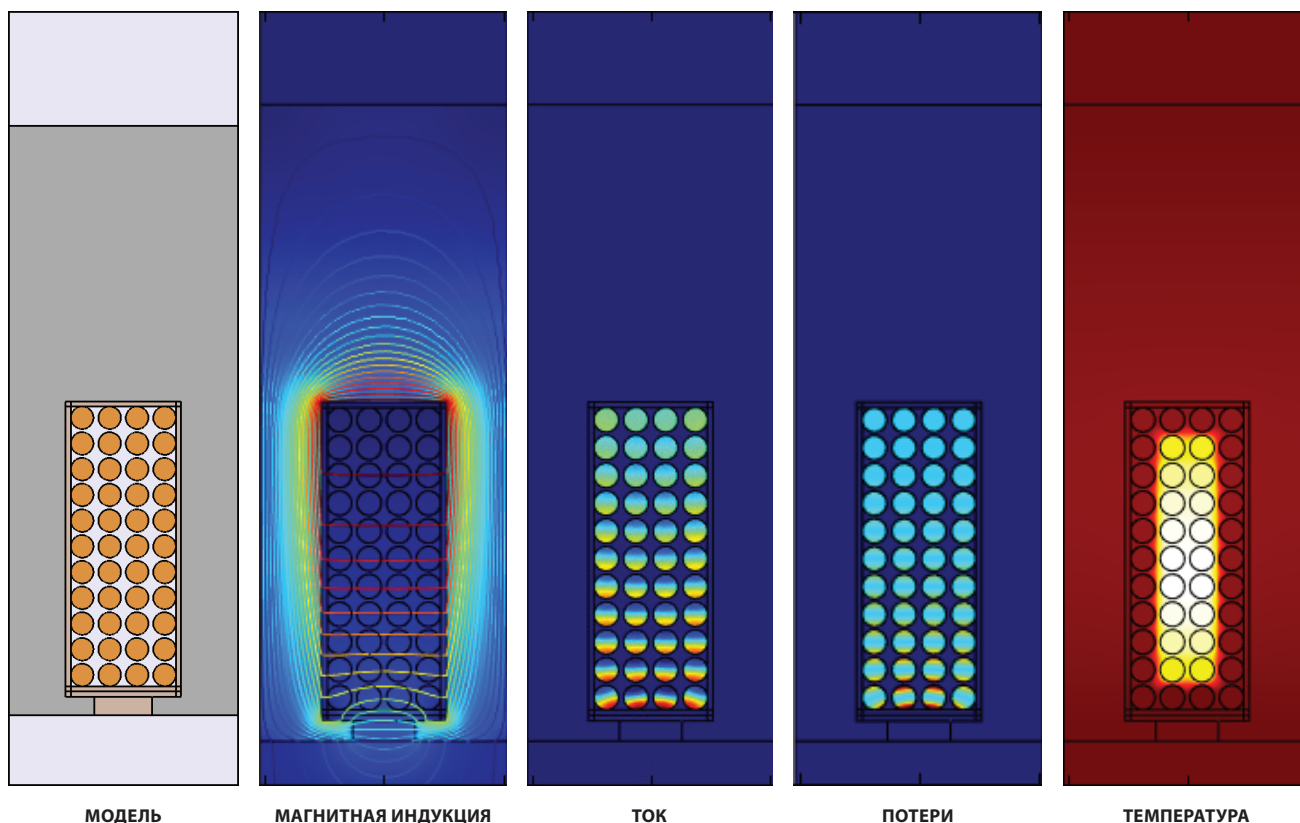


РИС. 4. Слева направо: геометрия модели, магнитная индукция, плотность тока, потери мощности и распределение температуры в модели статора.

Зная максимальную температуру в местах перегрева, производители могут оценить надежность конструкции и предотвратить разрушительные отказы двигателя.

Мультифизический подход экономит время для компании Faraday Future, поскольку один и тот же сотрудник может проектировать и анализировать и двигатель, и его составные компоненты. Лэлдин отмечает: «Используемые нами инструменты позволяют закончить цикл разработки за одну-две итерации вместо десяти итераций при совместной работе нескольких отдельных команд. Это одно из самых больших преимуществ мультифизических инструментов — мы уменьшаем число рабочих итераций в совместной работе нескольких групп. Один человек оптимизирует конструкцию, после чего несколько групп могут внести в нее небольшие улучшения. Это гораздо быстрее, чем если бы каждая команда независимо исследовала каждый физический аспект».

» БУДУЩЕЕ — ЗА APPLICATION EXCHANGE FARADAY FUTURE — ДОВОЛЬНО МОЛОДАЯ КОМПАНИЯ, но она уже добилась успеха в секторе электромобилей, спроектировав, разработав и собрав рабочий электромобиль всего за два года. Сотрудники компании поддерживают принципы открытой информации и в частности COMSOL Application Exchange — онлайн-портал для пользователей, которые загружают свои модели, делятся ими и обсуждают методы и результаты моделирования, помогая таким образом

развитию сообщества инженеров и проектировщиков. Лэлдин отмечает: «Единственный реальный способ достичь высоких результатов — воспользоваться опытом и возможностями наших поставщиков. В активном и открытом сообществе пользователей гораздо легче найти решения задач, стоящих перед всеми нами».

Он добавляет: «COMSOL для нас был очень естественным выбором — мы разрабатываем современные технологии и ценим скорость вычислений. К примеру, если нам не хватало какой-то функциональной возможности, компания быстро реагировала и добавляла эту возможность в следующую версию программного пакета».

По словам Лэлдина, открытая и динамичная платформа типа Application Exchange поможет компании Faraday Future развиваться и оставаться конкурентной: «Кроме того, развитие онлайн-сообщества хорошо вписывается в идеологию стартапа — мы готовы передавать неконфиденциальные данные и методики открытому сообществу, чтобы ими пользовались все желающие. Я всегда считал, что от участия в таких сообществах мы только выигрываем, особенно если сообщество поддерживает передовой промышленный партнер. Для такой компании, как наша, это превосходное сочетание». ©

«НЕВИДИМЫЕ» СОЕДИНЕНИЯ ПРИБЛИЖАЮТ ПРИХОД СЕТЕЙ 5G

Компания Signal Microsystems использует моделирование при разработке специализированных разъемов для высокоскоростных радиотехнических изделий.

САРА ФИЛДС (SARAH FIELDS)

ЧИСЛО ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ и спрос на высокоскоростные соединения постоянно растут, поэтому промышленные компании и промышленные группы неустанно работают, чтобы ответить на этот вызов. Сети 5G должны стать в 100 раз быстрее, чем 4G LTE, и ускорить широкополосные соединения в 10 раз. «Много деталей головоломки должно совпасть, чтобы сеть 5G из идеи стала реальностью, — говорит Билл Розас (Bill Rosas), соучредитель компании Signal Microwave. — Исследователи должны не только создать саму технологию 5G, но и проработать все ее аспекты: от тестирования сетей до обновления соединений в их системах».

Даже такая незаметная деталь, как коннекторы, на самом деле требует значительного объема исследований и разработок. Эти незаменимые электромеханические компоненты соединяют электрические выводы и передают энергию электромагнитного поля из линии передачи к другим передающим или обрабатывающим компонентам. Разъемы встречаются во всех электронных устройствах и системах, и точность их работы критически важна для цепей передачи данных, особенно на высоких скоростях.

Эрик Гебхард (Eric Gebhard) и Билл Розас вместе основали компанию Signal Microwave, чтобы создавать специализированные разъемы для сохранения целостности передаваемых сигналов. Предвосхищая спрос на оптимизированные разъемы для передачи радиочастотных, микроволновых и миллиметровых сигналов с постоянно растущими скоростями, Signal Microwave таким образом поддерживает и способствует разработке будущих сетей 5G.

» ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ РАЗРАБОТЧИКИ, ПРОЕКТИРУЮЩИЕ РАДИОЧАСТОТНЫЕ РАЗЪЕМЫ,

сталкиваются с разнообразным набором проблем: ограничениями конструкции, геометрических размеров и передаточных характеристик, при этом полное сопротивление разъема должно быть согласовано с остальной линией передачи. «Производители компонентов очень быстро вывели на рынок продукты для сетей 5G, — говорит Розас. — Но по-настоящему раскрыть потенциал технологии могут только хорошо оптимизированные компоненты».

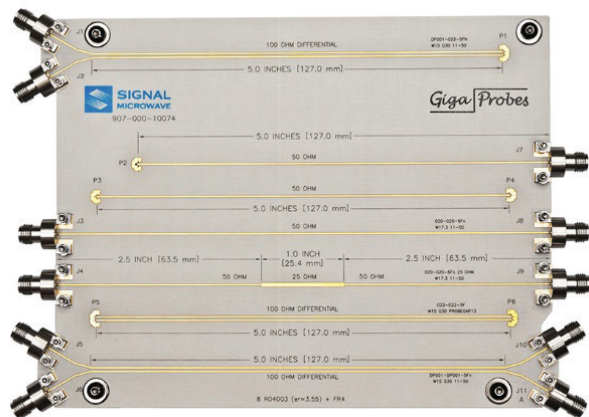
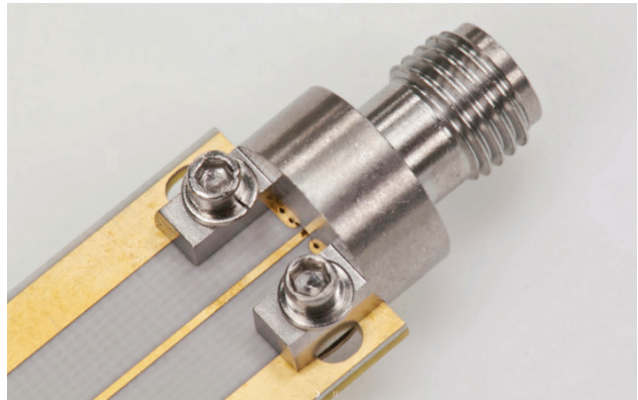


РИС. 1. Крупный план торцевого коннектора (вверху). Готовый стенд для автоматического тестирования, который используют инженеры-разработчики систем 5G (внизу).

С повышением частоты все сложнее согласовывать полное сопротивление, поскольку небольшие отклонения, возникающие из-за геометрии или выбора материалов, могут нарастать. На рис. 1 показана фотография разрабатываемого радиочастотного разъема для работы в сетях 5G.

Гебхард и Розас задумались о том, как эти критически важные компоненты

радиочастотных сетей можно дополнительно оптимизировать с помощью моделирования. При этом заказчики компании Signal Microwave — это инженеры, разрабатывающие высокочастотные приложения для телекоммуникационной промышленности, коммерческого и специального применения в диапазоне от 40 ГГц до 110 ГГц.

«По-настоящему раскрыть потенциал технологии могут только хорошо оптимизированные компоненты»,

— БИЛЛ РОЗАС, СОУЧРЕДИТЕЛЬ КОМПАНИИ SIGNAL MICROWAVE

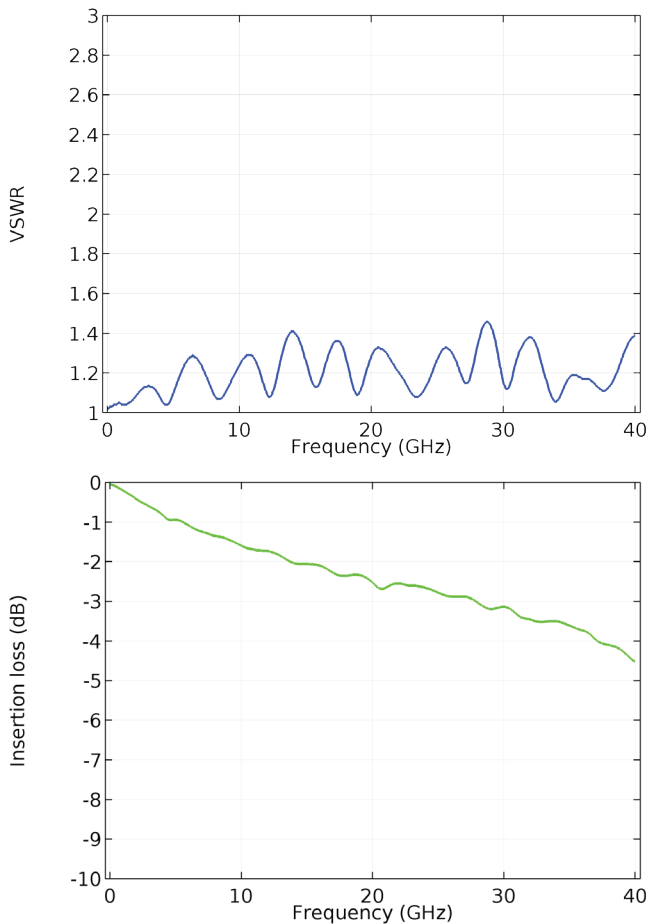


РИС. 2. Измеренный коэффициент стоячей волны по напряжению (вверху) и вносимые потери, параметр S21 в логарифмическом масштабе на тестовом стенде с компонентами Signal Microwave (внизу).

» ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ РАДИОЧАСТОТНОГО РАЗЪЕМА

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ПОЗВОЛЯЕТ Эрику и его группе быстро решать задачи проектирования, которые ставят новые заказчики. «Программный пакет может обмениваться информацией с другими инструментами для проектирования, и это позволило нашей группе быстро разработать оптимизированные разъемы, соответствующие индивидуальным требованиям самых разных заказчиков», — рассказал Гебхард. Такой подход

уменьшает время, требуемое для выхода продукта на рынок, общие затраты на разработку и капиталовложения, позволяя разработчикам устройств сосредоточить свои усилия на других задачах и быть уверенными в том, что соединительные компоненты не подведут.

Говоря простым языком, проектировщик разъема берет механическую деталь и превращает ее в линию передачи. Цель при проектировании радиочастотного разъема — создать электрически «невидимую» деталь, которая не будет отличаться

от остальной линии передачи. Для этого деталь должна соответствовать минимальным требованиям по сопротивлению и потерям энергии. «Мы стремимся уменьшить рассогласования, которые создают отражения, ведущие к искажению или затуханию сигнала», — говорит Гебхард. Моделирование позволяет решить эту задачу до запуска производства и натуральных испытаний.

» В ПОИСКАХ ИДЕАЛЬНОГО РАЗЪЕМА КЛИЕНТЫ ЧАСТО ОБРАЩАЮТСЯ В SIGNAL MICROWAVE

с особыми требованиями к геометрическим размерам одной части разъема и к полному сопротивлению, которые определяют остальную конструкцию. Гебхард и Розас предпочитают комплексный подход к проектированию. Поэтому они определяют все требования к печатной плате и устройству, прежде чем приступить к проектированию разъема. Сначала группа строит геометрию разъема в программном пакете Solid Edge® и импортирует ее в программный пакет COMSOL Multiphysics®, в котором можно моделировать радиочастотные эффекты, а также изучать и оптимизировать конструкцию приборов.

Моделирование помогает Гебхарду рассчитать коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), потери на отражение, вносимые

потери или потери мощности из-за рассогласования или непредвиденных нарушений непрерывности, которые должны быть минимизированы. К примеру, измеренный на тестовой печатной плате коэффициент стоячей волны по напряжению для компонентов Signal Microwave соответствует результатам моделирования, составляя менее 1,5:1, что означает достаточно низкую отражательную способность и низкие потери (вверху на рис. 2). Было установлено, что потери не слишком велики и плавно растут с повышением частоты (внизу на рис. 2). С помощью моделирования компания Signal Microwave создала набор не требующих пайки торцевых коннекторов с низкой отражательной способностью. Этот набор можно расширить коннекторами и для сигналов миллиметрового диапазона.

» ВОЗБУЖДЕНИЕ ЗА СЧЕТ ТОРЦЕВЫХ КОННЕКТОРОВ

ГЕБХАРД ТАКЖЕ СПРОЕКТИРОВАЛ два торцевых коннектора, возбуждаемых и выводимых на коаксиальные сосредоточенные порты с сопротивлением 50 Ом. В этом примере печатная плата с заземленным копланарным волноводом была изготовлена на подложке с толщиной 8 мил и относительной диэлектрической проницаемостью 3,55. Металлизированные перемычки соединяют две заземленных плоскости

«Работающие на передовом рубеже должны не только создать саму технологию 5G, но и разработать все ее аспекты: от тестирования сетей до обновления соединений в их системах»,

— БИЛЛ РОЗАС, СОУЧРЕДИТЕЛЬ КОМПАНИИ SIGNAL MICROWAVE

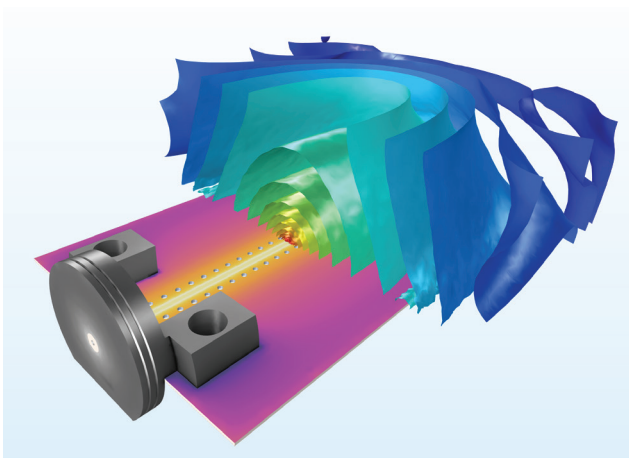
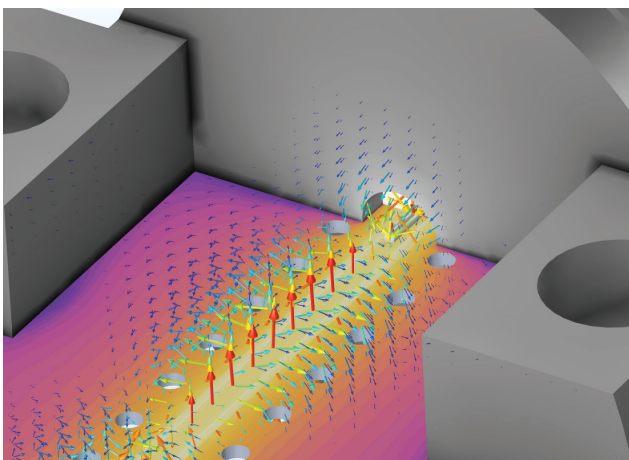
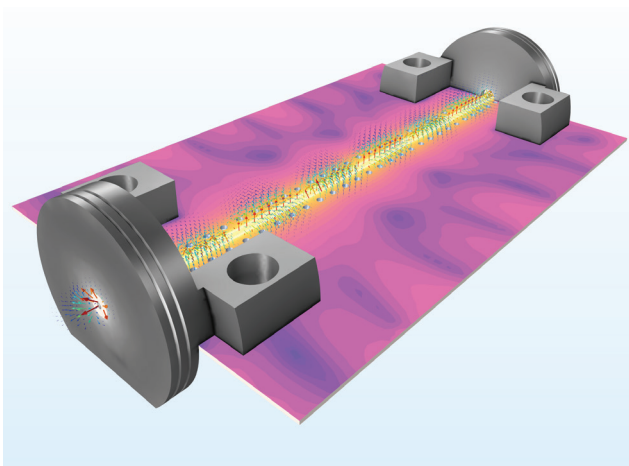


РИС. 3. Изображение модели тестового стенда для высокоскоростных соединений, объединенных с помощью 5G и SatCom. Контурный и векторный графики нормы электрического поля в логарифмическом масштабе на частоте 20 ГГц (вверху). Крупный план части первого графика (в центре). График изоповерхностей нормы электрического поля в логарифмическом масштабе на частоте 1 ГГц наверху стенда (внизу).

волновода с нижней заземленной плоскостью (рис. 3).

«Чтобы сделать разъем электрически „невидимым“, мы изучаем геометрические неоднородности и минимизируем отражения, описываемые параметрами рассеяния», — говорит Гебхард.

Кроме корректировки геометрии для минимизации отражения, Гебхард может также оптимизировать используемые диэлектрические материалы, чтобы получить желаемое полное сопротивление. В некоторых случаях Гебхард использует программный пакет COMSOL®, чтобы оценить дополнительные механические свойства конструкции, например минимальную силу, которую требуется приложить, чтобы выдернуть штифт из корпуса разъема.

» БЛИЗКОЕ СООТВЕТВИЕ РЕАЛЬНОСТИ

ГЕБХАРД ТАКЖЕ РАЗРАБОТАЛ разъемы с возможностью слепой стыковки для частоты 70 ГГц, которые используются для автоматизированного испытательного оборудования. После создания расчетной электродинамической модели он изготовил соответствующие ей физические прототипы. К его удивлению, прототипы разъемов работали не так, как он ожидал. Присмотревшись

к физическому прототипу, Гебхард заметил небольшой дефект в одном из разъемов. После подобного инженерного «расследования» Гебхард вернулся к модели и добавил в нее найденный дефект. Сразу после этого результаты моделирования совпали с физическими испытаниями.

«Программная модель была верной, а ошибка, которую мы не сразу нашли, была в прототипе. Мы обнаружили проблему, когда провели физические испытания и присмотрелись к деталям. Затем мы добавили дефект к программной модели и обнаружили, что результаты моделирования совпадают с тем, что мы увидели. Это был, если так можно сказать, момент истины».

«В этом случае я был особенно рад тому, что результаты моделирования так близки к реальности. Мы добавили к этой конструкции радиочастотного разъема несколько новшеств и очень хотели узнать, насколько хорошо будет работать разъем».

Высокоточное моделирование дало Гебхарду возможность проектировать и изготавливать разъемы для специализированных радиочастотных изделий, уменьшая число физических прототипов и ускоряя разработку. ©



Слева направо: Билл Розас и Эрик Гебхард, соучредители Signal Microwave.

ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИХОДЯТ НА ЗАМЕНУ ДИЗЕЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРАМ В ИНДИИ

Исследователи Национальной химической лаборатории создали экологически чистые и рентабельные топливные элементы, которые пришли на замену ненадежным и загрязняющим окружающую среду дизельным генераторам, питающим телекоммуникационные башни в Индии.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

НЕСМОТЯ НА ЗАМЕТНЫЙ РОСТ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

и мощности линий передач за последние годы, Индия все еще испытывает дефицит энергии в 2,1 %, а примерно 20 тысяч деревень все еще не подключены к энергосети. Кроме того, энергоснабжение в городах и сельской местности по-прежнему ненадежно. Поэтому для децентрализованной выработки электроэнергии широко используются дизельные генераторы. Эти дешевые генераторы (вверху на рис. 1) неэффективны, вредны для окружающей среды и здоровья людей.

Именно поэтому Национальная химическая лаборатория (NCL) Индии вместе с двумя другими лабораториями Совета по научным и промышленным исследованиям (CSIR), Центральным институтом электрохимических исследований (SECRI) и Национальной физической лабораторией (NPL) изучают более экологически чистые, экономически выгодные и надежные технологии для энергоснабжения телекоммуникационных башен, а в перспективе — и зданий.

Одно из решений этой экономической и экологической проблемы — топливные элементы с протонообменными мембранами (ТЭПМ, внизу на рис. 1), которые заменяют старые энергетические решения во многих прикладных задачах. Благодаря низким выбросам углекислого газа, низкому уровню шума, совместимости с различными видами топлива и отличной сочетаемостью с другими возобновляемыми источниками энергии они находят применение на транспорте, в жилых и офисных зданиях, а также в некоторых отраслях промышленности. Общий КПД систем ТЭПМ превышает 30 % (у дизельных

генераторов КПД составляет 22–25 %), и при использовании в качестве топлива чистого водорода элементы выбрасывают в окружающую среду только водяной пар.

» ВНУТРИ ТЭПМ

ЯДРОМ ТЭПМ ЯВЛЯЕТСЯ мембранно-электродный блок (МЭБ), состоящий из газодиффузионных слоев, электродов и мембраны с полимерным электролитом. В МЭБ протекают электрохимические реакции, в результате которых выделяется энергия.

Внутри топливного элемента водород подается на анодную сторону сборки, где в процессе каталитической реакции атомы водорода разделяются на протоны и электроны. Сеть из углеродных наночастиц в электроде проводит электроны, которые стремятся достичь катода на другой стороне цепи, создавая ток, питающий внешнее устройство. Протоны в это время проходят сквозь протонообменную мембрану, а кислород воздуха диффундирует сквозь газодиффузионный слой в МЭБ и достигает катода (рис. 2).

Протоны реагируют с кислородом и электронами на активных центрах катализатора и образуют воду; побочными продуктами реакции являются только вода и тепло. Несколько таких элементов, соединенных последовательно, образуют батарею топливных элементов (рис. 3).

Выходная мощность и КПД топливного элемента зависят от множества факторов: каталитической активности слоев анода и катода, способности электродов отводить жидкую воду из газодиффузионного слоя, проводимости и пористости углеродных электродов, переноса реагирующих газов к катализатору, протонной

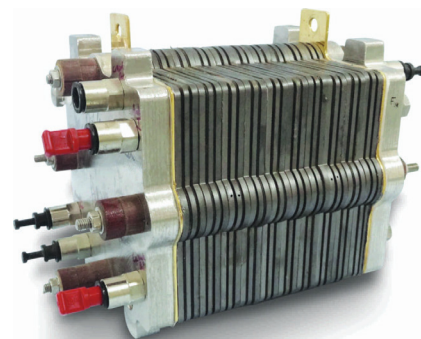


РИС. 1. Вверху: телекоммуникационные башни в Индии питаются от дизельных генераторов. Внизу: мембранный топливный элемент.

проводимости мембраны и электрической проводимости биполярных пластин.

» СОЗДАНИЕ КОНСТРУКЦИИ С МАКСИМАЛЬНЫМ КПД

КОНСТРУКЦИЯ МЕМБРАННЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

для телекоммуникационных башен в Индии должна обеспечивать максимальный КПД, однако улучшение в одной области может привести к ухудшению в другой. Например, более пористый газодиффузионный слой упрощает доступ воздуха и водорода к катоду и отвод влаги, но может понизить электрическую проводимость.

Доктор Ашиш Леле (Ashish Lele), ведущий исследователь проекта в Национальной химической лаборатории, возглавляет группу, которая моделирует и изучает разные конструкции и ищет оптимальное сочетание свойств мембранных топливных элементов, подходящих для телекоммуникационных башен в Индии. «Мы хотели понять реакции, происходящие на углеродном электроде, и изучить влияние переноса реагирующих газов и протонов в электродах на общую скорость реакции, — объясняет он. — В конечном итоге мы хотели понять, как разные параметры — условия работы, конфигурация подводящих каналов и конструкционные параметры

РИС. 2. Схема мембранного топливного элемента. Водород подается на анод, где разделяется на протоны и электроны в активных центрах катализатора. Электроны через внешнюю цепь движутся к катоду, а протоны перемещаются к катоду, проходя через электролит протонообменной мембраны. Мембрана выполнена из твердого полимера, проводящего протоны и не пропускающего электроны.

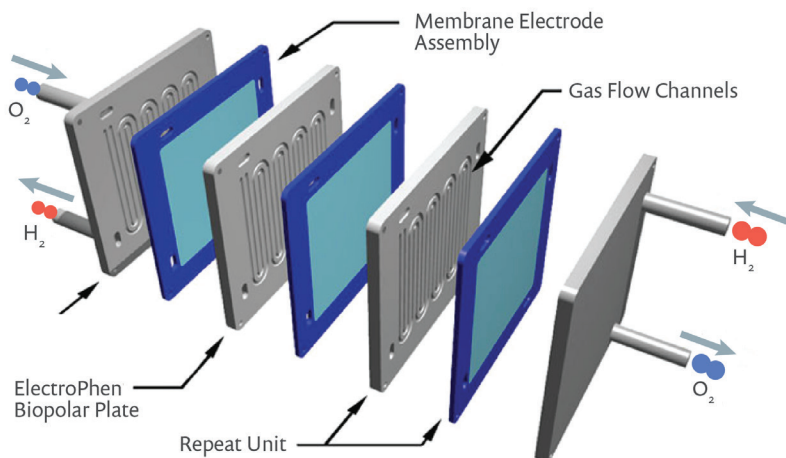
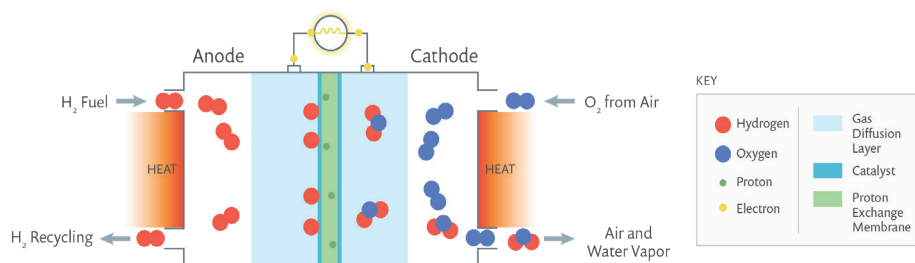


РИС. 3. Пример батареи ТЭПМ с несколькими слоями идентичных блоков.

сборки — влияют на эксплуатационные характеристики ТЭПМ в целом».

Леле и его группа моделировали конвекцию реагирующих газов одновременно с реакциями, протекающими на слоях катализатора, и переносом протонов в топливном элементе. Они пользовались функциональными возможностями программного пакета COMSOL Multiphysics® для моделирования химических реакций и электрохимической импедансной спектроскопии (EIS). Импедансная спектроскопия позволяет изучать электрохимические системы, измеряя их полное сопротивление и частотную характеристику. Врезка на следующей странице кратко описывает моделирование электрохимической импедансной спектроскопии в среде COMSOL®.

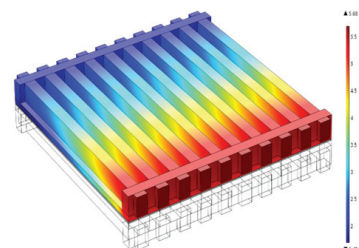
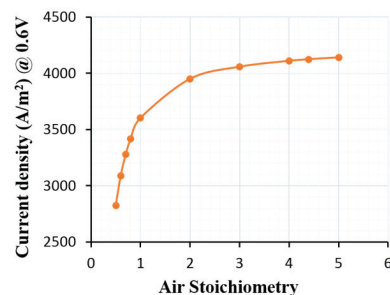
«Благодаря широкому спектру функций в COMSOL мы смогли построить комплексную модель с учетом сохранения массы, импульса, количества вещества и заряда, — говорит он. — Мы провели анализ чувствительности для разных параметров: конструктивных (например, геометрических характеристик системы подводящих каналов), рабочих

(противодавление и стехиометрия), материальных (соотношение иономера и углерода), чтобы определить, как они влияют на эксплуатационные характеристики ТЭПМ в целом». С помощью программного обеспечения для численного моделирования исследователи смогли понять, как эти переменные влияют на выходную мощность топливного элемента.

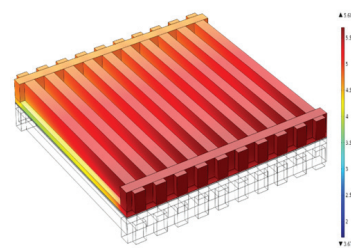
На рис. 4 показано влияние стехиометрии — соотношения фактического притока реагирующих газов и количества, необходимого для выработки заданной мощности — для параллельной схемы течения реагентов.

Группа Леле изучала различные типы полей течения, чтобы определить наилучшую форму и схему каналов. «Мы изучали четыре основных структуры расположения микроканалов: параллельное, извилистое, стержневое и гребенчатое, — продолжает он. — С помощью COMSOL мы установили, что у гребенчатого варианта есть преимущества, подходящие для высокотемпературных ТЭПМ».

Результаты сравнения плотности тока для разных вариантов расположения микроканалов подтвердили, что



Стехиометрический коэффициент по воздуху = 1



Стехиометрический коэффициент по воздуху = 5

РИС. 4. Графики плотности тока, вырабатываемого топливным элементом, для разных стехиометрических коэффициентов по воздуху. Соотношение воздуха к топливу 5:1 дает большие и более постоянные значения выходного тока.

гребенчатая структура оказалось предпочтительной (рис. 5). Точнее говоря, более высокая скорость реакции в гребенчатом поле течения возникала из-за вызванного давлением конвективного массообмена в газодиффузионном слое и в электроде, которого не было в других

вариантах поля течения. Более высокая скорость реакции увеличивает КПД и приводит к большему расходу водорода и кислорода. График давления (рис. 5) явно указывает на возможность конвекции в газодиффузионном слое из-за перепада давления в двух соседних каналах.

» ПЕРЕХОД НА БОЛЕЕ ЭКОЛОГИЧНОЕ ТОПЛИВО

ИЗУЧЕНИЕ МЕМБРАННОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА в COMSOL помогло группе выбрать правильную структуру подводящих каналов, толщину слоя углеродного волокна и расход газа, при которых достигается максимальная выходная мощность. «COMSOL помог нам увидеть, как все эти переменные влияют на конечный результат, — делает вывод Леле. — Благодаря анализу чувствительности можно узнать, какие из этих переменных наиболее важны».

Исследователи Национальной химической лаборатории планируют лицензировать технологию и начать

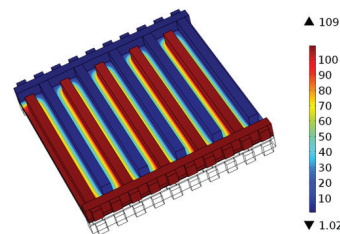
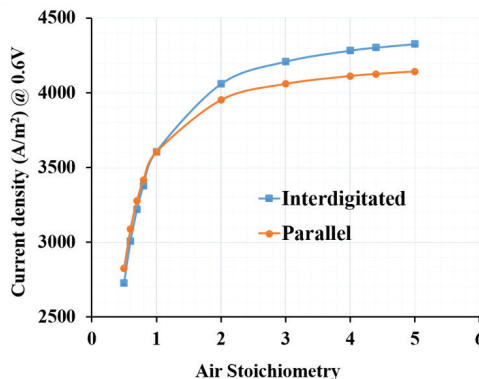


РИС. 5. Слева: сравнение средней плотности тока, выдаваемого топливным элементом, в зависимости от стехиометрического коэффициента по воздуху для гребенчатого и параллельного поля течения. Справа: давление жидкости в микроканалах гребенчатой структуры.

массовое производство ТЭПМ. Они надеются, что телекоммуникационные башни в Индии получат экологически чистый и надежный источник энергии.

В будущем такие разработки помогут всей стране перейти на более экологичное топливо для выработки электроэнергии в зданиях и транспортных сетях. ©

ВИРТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ (EIS)

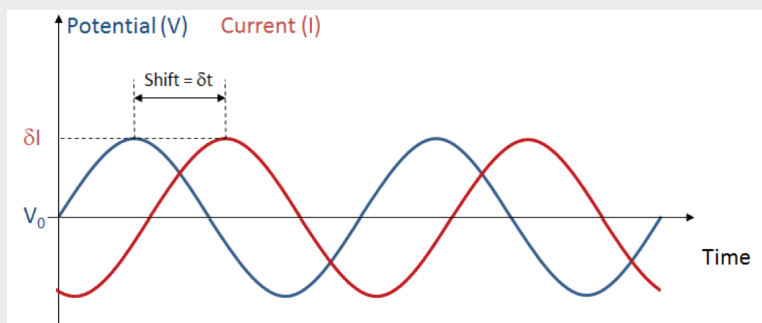
ЭД ФОНТЕС (ED FONTES)

ИДЕЯ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДОСТАТОЧНО ПРОСТА. К системе прикладывается среднее напряжение (V_0) с небольшими синусоидальными колебаниями во времени. Отклик системы на колебания напряжения представляет собой синусоидальный ток (см. рисунок ниже).

Отклик по току может быть сдвинут во времени на величину δt по сравнению с напряжением. Сдвиг может быть вызван процессами, которые задерживают отклик тока на синусоидальное колебание напряжения. Например, на низких частотах сдвиг могут вызывать такие медленные процессы, как массообмен, в то время как быстрые процессы могут точно «следовать» за колебаниями напряжения. На высоких частотах медленные процессы реагируют только на среднее значение напряжения и не реагируют на колебания. Напротив, быстрые процессы, такие как кинетика химических реакций, вызывают сдвиги на высоких частотах. Кроме того, амплитуда отклика δI может зависеть от частоты.

Данный метод позволяет путем перебора частот выделить процессы с разными постоянными времени. Сдвиг во времени и амплитуда тока при колебаниях напряжения выражаются комплексным сопротивлением: сдвиг во времени можно описать мнимой частью сопротивления, а абсолютное значение сопротивления задает величину отклика.

Комплексное сопротивление топливного элемента говорит о ряде характеристик элемента и протекающих в нем процессах. При высоких частотах на комплексное сопротивление влияют быстрые процессы: электрическая емкость, электрохимические реакции и местные сопротивления. С другой стороны, при низких частотах свой вклад вносят такие явления, как диффузия в порах, заполненных электролитом. Развертку по частоте можно снимать при разной поляризации топливного элемента, чтобы исследовать явления при различных нагрузках. Сочетая моделирование электрохимической импедансной спектроскопии и оценку параметров с экспериментальными данными, можно точно описать транспортные и реакционные свойства топливных элементов при различной нагрузке. ©



ЧИПЫ ПАМЯТИ: КАК ОТДЕЛИТЬ ВСЕ ЛИШНЕЕ

Потребителям нужны миниатюрные микросхемы памяти все более высокой емкости — поэтому инженеры оптимизируют процессы производства, чтобы обеспечить достаточную надежность электроники.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

В 1980-х годах флеш-память — технология стираемой и перезаписываемой компьютерной памяти — быстро завоевала популярность, а ее производство превратилось в процветающую отрасль промышленности. Эти микросхемы памяти теперь используются в фотокамерах, картах памяти, USB-накопителях и телефонах, храня тысячи фотографий, аудио- и видеофайлов. Незаметно для потребителей инженеры

постоянно работают над уменьшением размеров и повышением емкости таких устройств. За каждым устройством памяти стоит труд исследователей, инженеров и механиков, решающих задачи производства этих миниатюрных микросхем.

» КАК ПРЕДОТВРАТИТЬ ПОВРЕЖДЕНИЕ ПЛАСТИН-ЗАГОТОВОК

ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОСХЕМЫ ПАМЯТИ

полупроводниковую пластину диаметром 300 мм помещают на ленту-носитель, а затем разделяют ее на отдельные микросхемы. После удаления лента оставляет термопластичный клеевой слой на нижней стороне микросхемы, который позволяет прикрепить ее к подложке, используя давление и нагрев. Микросхемы склеивают в стопки, чтобы увеличить плотность памяти на занимаемой площади. Микросхемы и подложку соединяют проводами. Затем целый лист таких стопок помещают в формовочную машину, покрывают защитным слоем пластика и разделяют на множество частей, каждая из которых содержит стопку микросхем памяти (рис. 1).

Но удалить ленту, не погнув тонкие пластины, довольно сложно. Для более толстых пластин в прошлые десятилетия производители использовали игольчатый выталкиватель, который удалял ленту с помощью ряда игл. Но такой метод вызывает слишком большие механические напряжения в тонких пластинах, создавая опасность их повреждения.

«Когда восемь-десять лет назад микросхемы стали тоньше, нас ужасало, как часто пластины ломались, — говорит

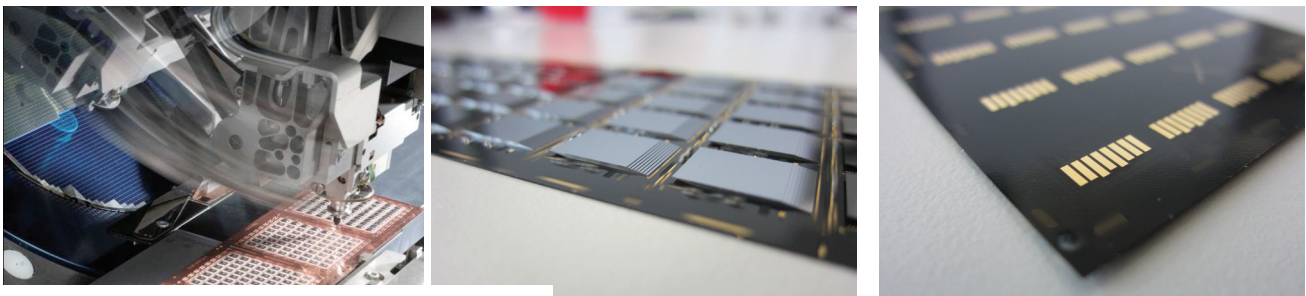


РИС. 1. Вверху слева: пластины прикрепляются к подложке, покрываются пластиком и разделяются. В центре: стопки пластин на подложке. Справа: на задней стороне подложки видны выводы для подключения микросхем памяти к устройствам большего размера.

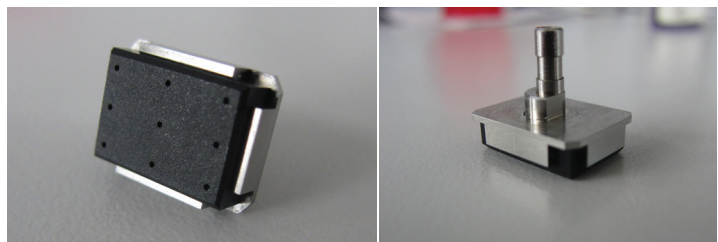
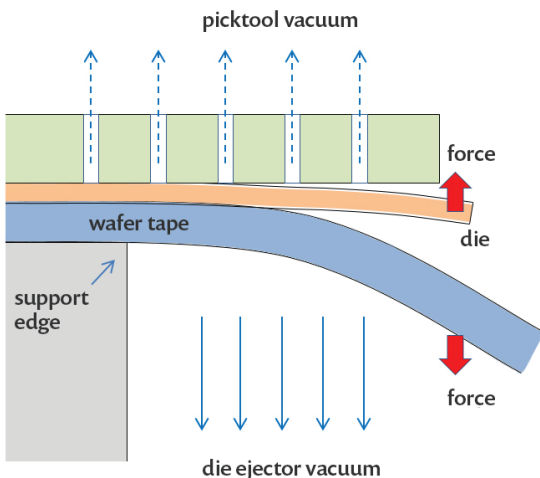


РИС. 2. Слева: иллюстрация процесса отделения многодисковым выталкивателем в устройстве монтажа микросхем, созданном Besi. Вакуумное устройство (справа) содержит резиновую накладку с отверстиями для создания вакуума.

Стефан Белер (Stefan Behler), старший инженер-технолог компании Besi Switzerland AG. — Нам был нужен новый способ удалять ленту, при котором пластины не гнулись бы так сильно». Besi разрабатывает оборудование и технологии сборки для производства подложек и пластин для потребительской электроники, автомобилей, промышленности и солнечной энергетики.

В результате обсуждения Белер и его коллеги пришли к новому способу удаления ленты с помощью дисков и вакуума, более бережному, чем игольчатый выталкиватель. В их методе массив параллельных дисков приподнимает микросхему, в то время как лента-носитель удерживается вакуумом. Диски движутся с наружной стороны внутрь и смещаются вниз, отделяя ленту от микросхемы. Граница между очищенной и неочищенной областями под микросхемой называется границей отделения. Граница сдвигается внутрь со скоростью, зависящей от действующей на клейкий слой силы разделения (рис. 2).

По словам Белера, преимущество этого метода в том, что продвижение границы отделения регулируется движением дисков, а пластинка изгибается только вдоль границы зачистки. Таким образом, это более бережный метод, чем игольчатый выталкиватель, который подвергает механическим напряжениям всю микросхему. «Мы должны были убедиться, что наша система создает напряжения ниже предела прочности пластин, — говорит он. — Если пластины изогнуть слишком сильно, они могут треснуть или стать менее прочными». Изобретение, названное многодисковым выталкивателем, было объединено с устройством для монтажа пластин

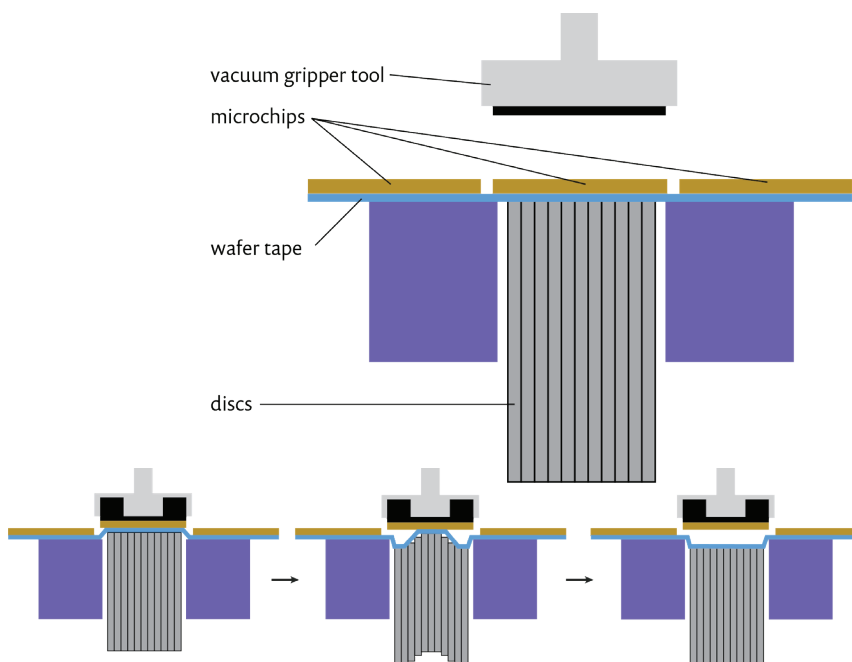


РИС. 3. Вверху: схема многодискового выталкивателя. На нижней схеме показана последовательность опускания дисков во время отделения ленты от микросхемы.

(рис. 3 и 4), которое сейчас используется на фабриках полупроводниковых изделий по всему миру.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОЛЯЕТ ЗАГЛЯНУТЬ ВНУТРИ ВЫТАЛКИВАТЕЛЯ ПОСЛЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ

инженерам потребовалось выбрать рабочие параметры для устройства монтажа пластин, а для этого нужно было хорошо понимать, какие силы действуют в процессе разделения. «Мы должны знать максимальную

величину изгиба в процессе разделения. Тогда мы можем выбрать высоту диска, скорость и удерживающее усилие вакуума так, чтобы уровень напряжения в пластине был достаточно низким и она не трескалась», — продолжает Белер. Чтобы понять физику процесса, разработать рекомендации для проектировщиков выталкивателя и оптимизировать рабочие условия, он использовал программный пакет COMSOL Multiphysics®.

Сначала Белер построил статическую модель (рис. 5), чтобы проверить, насколько чип изгибается при определенной

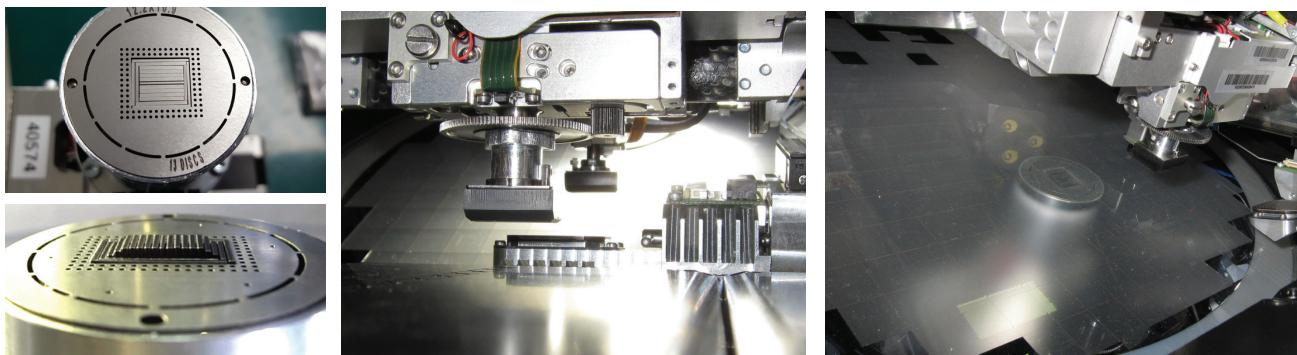


РИС. 4. Слева: вид сверху и сбоку на многодисковый выталкиватель. В центре: вакуумное устройство в устройстве монтажа микросхем. Справа: процесс удаления ленты. Видна чистая лента и многодисковый выталкиватель под ней.

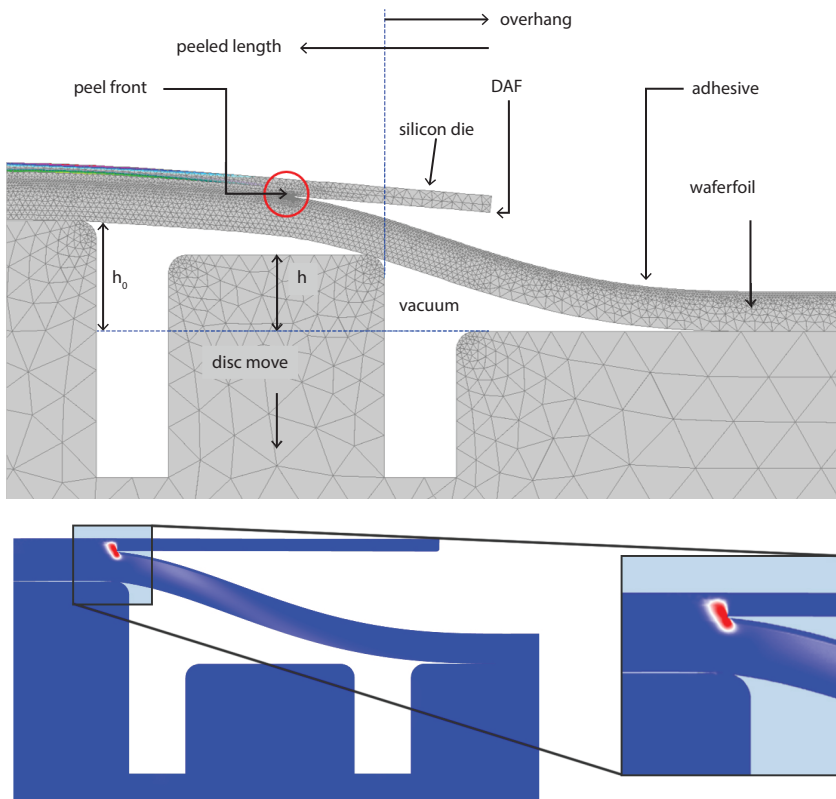


РИС. 5. Вверху: сетка геометрической модели. Внизу: результаты моделирования показывают напряжение в вертикальном направлении.

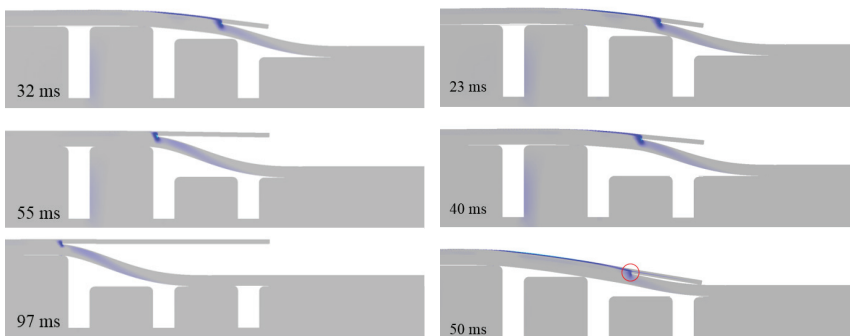


РИС. 6. Результаты моделирования показывают уровни напряжения для скорости движения границы отделения в 20 мм/с (слева) и 32 мм/с (справа). На скорости 20 мм/с вся лента отделяется от пластины; на скорости 32 мм/с пластина (микросхема) блокируется и отделение ленты становится невозможным — красная окружность показывает предельное перемещение границы отделения. Дальнейшее перемещение дисков не позволяет продолжать отделение ленты, поскольку граница отделения уже слишком далеко от самой высокой кромки диска.

геометрии диска, уровне разрезания и начальной длине границы зачистки. Зная из свойств материалов значение напряжения, при котором лента

отделяется от пластины, он рассчитал силу в вертикальном направлении. «Я использовал результаты расчета напряжения, чтобы определить энергию

или силу, требуемую для зачистки, а затем по табличным данным определил скорость зачистки, — говорит Белер. — В модели я мог увидеть, насколько граница отделения продвигается с каждым шагом моделирования, и исследовать, как микросхема изгибается в динамике. С увеличением силы разделения и скорости дисков напряжение изгиба и вероятность повреждения микросхемы также росли».

Он рассчитал максимальную скорость движения границы отделения. Она характеризовала оптимальную скорость дисков (рис. 6) и наибольшую производительность устройства, при которых пластины не ломаются.

Белер также заметил, что анимации, которые он создавал с помощью функций постобработки в COMSOL, помогли представить, что происходило с лентой и пластинками. «Когда вы смотрите на устройство, вы не видите, что делает выталкиватель, — объясняет он. — Анимации помогают понять динамику процессов, происходящих внутри устройства».

» РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ КЛИЕНТОВ

ПОСЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ Белер смог подготовить рекомендации по работе с многодисковым выталкивателем для клиентов компании Besi. Теперь его группа могла дать подробное описание рабочих параметров устройства монтажа микросхем и размещения самой микросхемы, например, как далеко она может выступать за самый дальний диск для успешного отделения. Так как клиенты используют микросхемы разных размеров, они также изготовили разные наборы дисков, которые можно при необходимости заменять в устройстве монтажа микросхем. Микросхемы памяти становятся все более тонкими и емкими, но компания Besi остается лидером в области производства устройств компьютерной памяти. ☺



Стефан Белер,
старший инженер-технолог
компании Besi
Switzerland AG.

ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЯЗЫВАЮТ ТОЧНЫЕ НАУКИ С РЕАЛЬНОЙ ЖИЗНЬЮ

Университет Хартфорда включает приложения для моделирования в учебные курсы по инженерным дисциплинам для будущих бакалавров, чтобы подготовить их к профессиональной деятельности.

ГЭРИ ДЕГЕСТАЙН (GARY DAGASTINE)

ЦЕЛЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ — В ТОМ, ЧТОБЫ ДАТЬ СТУДЕНТАМ ЗНАНИЯ И НАВЫКИ, полезные в их будущей деятельности, но обучение будущих бакалавров физике отличается рядом трудностей. Растущая привлекательность научных, технологических, инженерных и математических дисциплин только усугубляет эти проблемы из-за большого разброса в уровне подготовки и разнообразия интересов многих студентов.

Особенно трудно внедрить в учебные курсы метод исследовательского обучения, в рамках которого студенты формулируют свои собственные исследовательские проблемы и решают их. Такой практический подход, когда студенты самостоятельно решают реальные физические задачи, жизненно важен для понимания физических понятий. Однако такой метод сложно включить в лекционные курсы — время, затраченное на разбор обязательного материала, не оставляет возможности выработать узкоспециализированные навыки.

Поворотным пунктом в решении этой задачи в Университете Хартфорда в штате Коннектикут (США) стало внедрение инженерного программного обеспечения и приложений для мультифизического анализа в обязательные курсы по гидродинамике и теплопередаче для первокурсников.

«В нашем расписании для будущих бакалавров-инженеров есть много занятий, нацеленных на решение задач и выполнение проектов, — говорит доктор Ивана Миланович (Ivana Milanovic), профессор машиностроения. — Без приложений для моделирования эффективное исследовательское обучение было сложно включить в курс. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® позволяет нам быстро разрабатывать приложения, основанные на мультифизических моделях, и дополнять ими лекции».

Приложения позволяют студентам изменять некоторые входные данные, настройки и выходные данные, а упрощенный интерфейс дает возможность пользоваться мощными вычислительными инструментами без опыта численного моделирования.

В результате студенты с легкостью проводят виртуальные эксперименты. Наглядное представление процессов, происходящих при изменении рабочих параметров системы, начальных и граничных условий, помогает им понимать различные физические принципы. Приложения также способствуют исследованиям, проводимым в Университете Хартфорда при поддержке промышленных компаний, и повышают привлекательность студентов в глазах будущих работодателей, поскольку многие аэрокосмические и производственные предприятия в Коннектикуте пользуются аналогичными программными пакетами для моделирования.

» ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ: С ЧЕГО ВСЕ НАЧАЛОСЬ

ПОСЛЕ КУРСА ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ в COMSOL® для будущих магистров, который провел доктор Томас Эппес (Thomas Eppes), профессор электротехники и вычислительной техники, Миланович решила включить приложения для моделирования в следующие друг за другом курсы по гидродинамике и теплопередаче для студентов третьего года обучения.

«Ряд исследований подтвердили наш выбор программного обеспечения, но нам важнее, как отзываются о нем студенты, — отмечает Эппес. — По их словам, пользуясь программным пакетом для моделирования, они лучше учились, легко представляли сложные теоретические понятия в визуальной форме и получили ценный опыт численного моделирования. Эти отдельные отзывы подтверждает тот факт, что курс успешно завершили 99 % студентов».

Узнав об этом, Миланович задумалась о том, как включить программное обеспечение для моделирования в курсы бакалавриата, но столкнулась с определенными проблемами. «Многие преподаватели считали, что студенты бакалавриата будут тратить слишком много времени на изучение промышленных программных пакетов и будут слишком на них полагаться, — говорит преподаватель. — Они сомневались, будут ли эти пакеты полезны для студентов, не прошедших сначала, скажем, курс вычислительной гидродинамики».

«Отношение изменилось, потому что с приложениями для моделирования очень просто работать, — продолжает Миланович. — Студенты изучают теорию и решают аналитические задачи в классе и самостоятельно, теоретические знания и аналитические навыки проверяются в ходе экзаменов, а приложения позволяют вести исследовательскую работу».

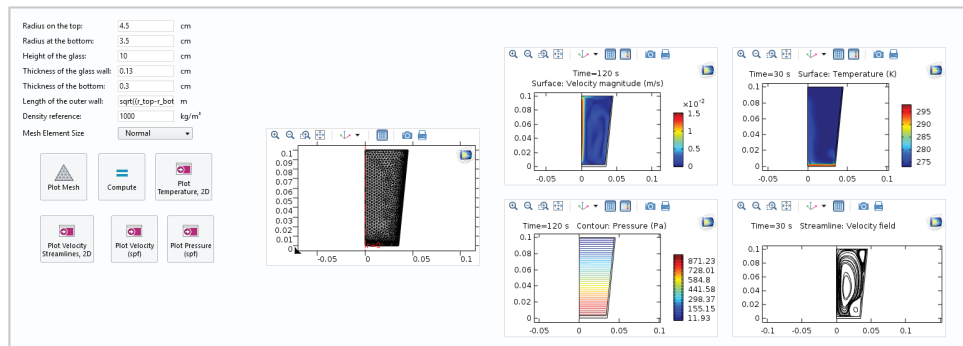


РИС. 1. В этом приложении, созданном Марком Маркевичем из Университета Хартфорда, пользователь может изучать неизоэнтальпический поток в стакане холодной воды, который нагревают до комнатной температуры. Приложение выдает скорость потока, температуру и давление в стакане.

» КАК СТУДЕНТЫ РАБОТАЮТ С ПРИЛОЖЕНИЯМИ КУРСЫ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

ТРЕТЬЕГО ГОДА ОБУЧЕНИЯ, которые ведет Миланович, содержат постепенно усложняющиеся лабораторные задания, основанные на моделировании, которые помогают студентам лучше понять, например, теплогидродинамику. Студенты также получают навыки моделирования и написания технических отчетов, которые могут сыграть важную роль в последующих исследованиях и будущем трудоустройстве. Работая с приложениями для моделирования, студенты учатся описывать граничные условия и параметры модели, а также собирать вместе данные, графики, таблицы и уравнения.

В одном из приложений, с которым студенты знакомятся в начале учебы, анализируется образец крови, протекающий через фильтрационную установку, что позволяет изучить распределение потока, электрический потенциал и распределение частиц. Студенты изучают влияние различных значений напряжения и смены полярности частиц.

В других лабораторных работах анализируются поток неньютоновской жидкости, вихревой поток вокруг вращающегося диска, реактор для очистки воды, подшипник скольжения и поток вокруг цилиндра.

Когда студенты переходят к курсу теплопередачи, они уже владеют основными навыками моделирования. «Я пользуюсь этим, давая более сложные задачи для моделирования, такие как двухмерная теплопередача с конвекционным охлаждением, теплопередача в цилиндре, теплопроводность в оболочке и так далее, — рассказывает Миланович.

» ПРИЛОЖЕНИЯ ПОМОГАЮТ СТУДЕНТАМ ОТВЕТИТЬ НА ВОПРОС «ПОЧЕМУ?»

СТУДЕНТЫ ТАКЖЕ СОЗДАЮТ СВОИ ПРИЛОЖЕНИЯ, основанные на численных моделях, со своими входными и выходными данными. Когда приложение готово, Миланович задает ряд вопросов «что, если?», чтобы проверить, хорошо ли студент понимает основные причинно-следственные связи. Студенты также готовят письменные отчеты, объясняющие, почему результаты в разных случаях отличаются.

Наконец, студенты проводят независимую исследовательскую работу: выполняют постановку задачи, обзор литературы, проводят исследование и документируют результаты.

Стефан Кайлих (Stefan Keilich), студент, специализирующийся в машиностроении и дополнительно в электротехнике, для заключительного проекта создал модель потока воздуха вокруг автомобиля в аэродинамической трубе. «Я задаю переменные для скорости воздуха, высоты модели над землей, размеров аэродинамической трубы и масштаба модели. В результате мы получаем великолепную визуализацию обтекания воздушным потоком», — рассказывает Кайлих.

Он также добавляет, что с приложениями ему гораздо проще было объяснить свою работу коллеге, не вдаваясь в технические детали. Приложения даже открыли для Кайлиха новые перспективы в карьере. «Я больше заинтересовался инженерными задачами. Я думаю о робототехнике и автоматизации, но теперь мне также интересны задачи гидродинамики и теплопередачи», — говорит он.

«Уравнения сложно визуализировать, а приложения показывают трехмерную картину физических явлений»,

— **МАРК МАРКЕВИЧ, СТУДЕНТ СО СПЕЦИАЛИЗАЦИЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

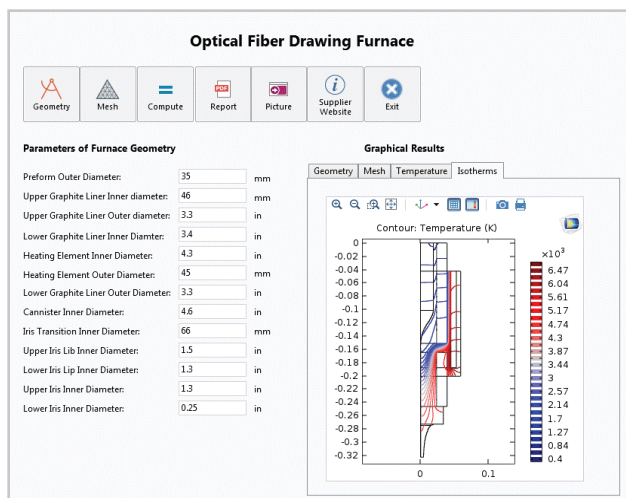


РИС. 2. Приложение, моделирующее оптоволоконно, рассчитывает поведение текучей среды при разных конфигурациях протяжной печи.

Другой студент со специализацией в машиностроении, Марк Маркевич (Mark Markiewicz), говорит, что приложения COMSOL помогли ему глубже погрузиться в учебный курс. «Уравнения сложно визуализировать, а приложения показывают трехмерную картину физических явлений».

Некоторые приложения больше ориентированы на промышленное применение. Так, одно из них описывает точный и чувствительный процесс вытягивания оптоволоконка, который требует точного контроля температуры и положения в печи, а также инертной атмосферы, предотвращающей

окисление нагревательных элементов и облицовки. Это приложение (рис. 2) позволяет пользователям изменять геометрические размеры внутреннего оборудования печи, например диаметры нагревательных элементов, и изучать скорость продувки азотом и распределение температуры.

Миланович говорит, что эти и другие результаты экспериментальных курсов, такие как оценки студентов, качество их моделей и отзывы о курсах, выглядят весьма обнадеживающе. «Очень приятно, когда студенты говорят мне, что им нравится работать с моделями, пусть это и бывает сложно». ☺



Слева: профессор Ивана Миланович. По часовой стрелке: профессор Томас Эппес, Марк Маркевич, Стефан Кайлих, Карен Бжостовский.

КОМПАНИЯ МТС СОЗДАЕТ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ЧТОБЫ ПОЛНОСТЬЮ ИЗМЕНИТЬ ПОДХОД К АДДИТИВНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Компания «Центр производственных технологий» (МТС) предлагает новый подход к проектированию деталей и междисциплинарным исследованиям, в котором для поддержки работы различных групп внутри компании используются приложения для моделирования и расчетов.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Одна из самых сложных задач в проектировании высокоточных деталей, отвечающих строгим техническим требованиям, — это обеспечение максимальной скорости и воспроизводимости процесса. Если, например, вы проектируете топливный инжектор для авиационного двигателя, вам требуются точно изготовленные детали, чтобы авиационная техника работала без сбоев, а пассажиры могли доверить свою безопасность авиаперевозчику. Чтобы добиться этого, инженеры часто должны оптимизировать не только сами детали, но и технологию их изготовления.

Аддитивное производство, также называемое 3D-печатью, за последние годы зарекомендовало себя как новый и многообещающий способ изготовления деталей, экономящий материал и позволяющий получать формы, недоступные ранее при использовании традиционных методов.

Центр производственных технологий в Ковентри (Великобритания) исследует аддитивные технологии производства и предоставляет чертежи и прототипы изготовителям деталей для аэрокосмической промышленности. Один из часто используемых методов аддитивного производства — лазерное расплавление

порошка, при котором из слоев порошка толщиной в десятки микрометров слой за слоем изготавливают деталь с помощью лазера. Для изготовления высокоточных деталей система перемещает инструмент по заранее заданной траектории.

Чтобы проверить качество и характеристики деталей, изготовленных аддитивным методом, Центр производственных технологий использовал программный пакет COMSOL Multiphysics® для виртуальных испытаний, валидации и прогнозирования рабочих характеристик. В последние два года сотрудники центра начали разрабатывать приложения, основанные на моделях COMSOL, что позволило им предоставить доступ к возможностям анализа нескольким группам, работающим над разными проектами своих клиентов.

На раннем этапе работы над приложениями мы уже брали интервью у сотрудников Центра производственных технологий (см. стр. 5 выпуска COMSOL News 2015). Два года спустя мы вернулись, чтобы узнать, как моделирование и вычислительные приложения изменили процесс проектирования и взаимодействие между отделами.

» НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДЕТАЛЕЙ КАК ОБЪЯСНЯЕТ БОРХА ЛАЗАРО ТОРАЛЬЕС

(Borja Lazaro Toralles), ведущий специалист по физическому моделированию Центра производственных технологий, у лазерного расплавления материала в заранее сформированном слое есть преимущества перед другими методами изготовления. Скорость нанесения ниже, чем в процессах профильного нанесения металла, но можно добиться лучшей точности и разрешения.

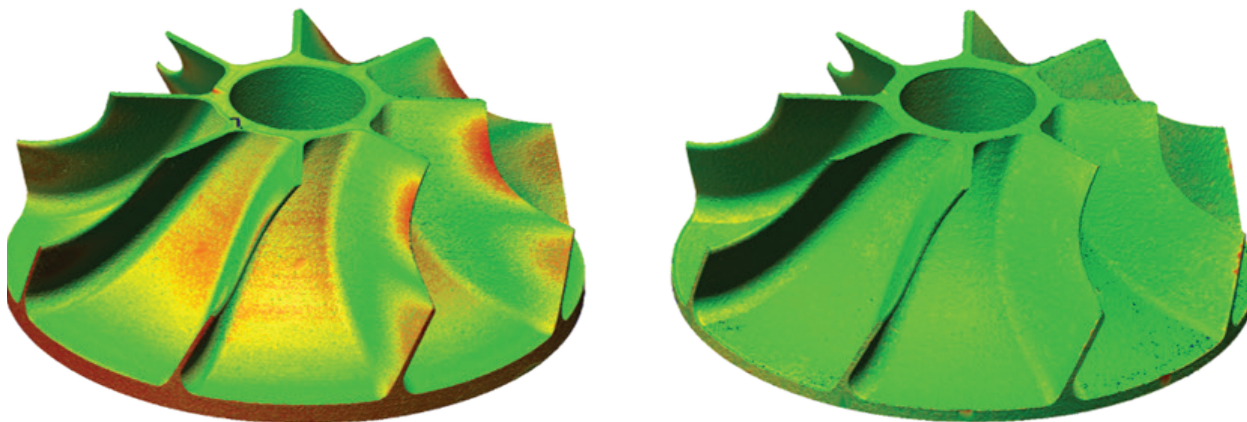


РИС. 1. Слева: изображение авиационного импеллера с лопастями, изогнутыми из-за остаточных напряжений. Красным цветом отмечены области сильной относительной деформации. Справа: конечная конструкция импеллера, учитывающая деформацию.

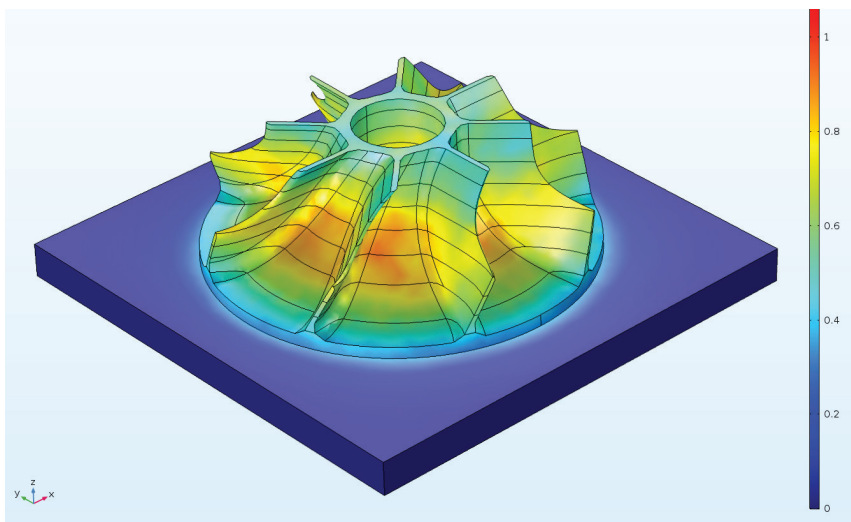


РИС. 2. Результаты моделирования деформаций импеллера, показывающие конечную форму детали.

Недостаток метода в том, что после нанесения нескольких слоев могут возникать деформации вследствие охлаждения металла. Циклические тепловые нагрузки из-за большого перепада температур и быстрое охлаждение могут создавать остаточные напряжения при нанесении металла. Они постепенно изменяют микроструктуру и приводят к деформациям готовой детали, пример которых показан на рис. 1 (слева).

В некоторых случаях деформациями можно пренебречь, но иногда отклонение всего на 100 мкм (0,1 мм) может нарушить технические требования, превращая деталь в брак. Для таких случаев сотрудники Центра производственных технологий должны были найти решение проблемы циклических тепловых нагрузок.

Избавиться от них совсем и предотвратить изменения микроструктуры сотрудники не могли, так что нашли другой подход. «Мы создали модель, рассчитывающую напряжения и деформации при построении детали, которая позволила нам понять, как деталь деформируется при печати, — рассказывает Лазаро Торальес. — Имея такие данные, мы можем «обратить» деформацию конструкции, заранее учитывая искривление материала таким образом, что готовая деталь будет деформироваться в требуемую форму».

Этот остроумный способ заблаговременного учета будущих отклонений на этапе проектирования позволил более эффективно изготавливать детали с требуемыми допусками, зная, что расчетная модель выдаст форму с минимальными отклонениями (справа на рис. 1).

Мультифизическое моделирование также открыло для группы аддитивного производства новые методы коммуникации с проектировщиками. Группа Лазаро Торальеса построила на основе модели COMSOL приложение для расчета деформаций, которое позволило их коллегам выполнять моделирование и вносить изменения в конструкцию, не нуждаясь в полном понимании исходной модели.

Прежде чем поделиться приложением с проектировщиками деталей, группа, разумеется, должна была построить высокоточную модель.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

КАК СОЗДАТЬ МОДЕЛЬ, которая работала бы с любой формой, выполненной из любого

« Мы создали модель, рассчитывающую напряжения и деформации при построении детали, которая позволила нам понять, как деталь деформируется при печати. »

— БОРХА ЛАЗАРО ТОРАЛЬЕС, ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ФИЗИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЦЕНТРА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

металла? Диапазон вариантов огромен. Чтобы построить модель, дающую инженерам-проектировщикам нужную информацию для внесения требуемых изменений в их конструкции, Лазаро Торальес и его группа сначала описали новый процесс моделирования, рассчитывающий окончательную форму больших деталей.

«Традиционные модели аддитивного производства очень точны и учитывают даже микроструктуру. Но для моделирования больших деталей они не подходят из-за вычислительной сложности, — поясняет Торальес. — Расчет занимает целую вечность. Но нам по-прежнему требуется понимать, как во время печати ведет себя деталь целиком. Чтобы обойти эту проблему, мы объединили слои печатной детали и наложили на них экспериментальные данные о поле температуры. Это снижает временные затраты на вычисления, а решение остается точным».

В Центре производственных технологий работают с разными металлами — от титана для авиакосмических задач до нержавеющей стали — поэтому входные данные для модели COMSOL представили в параметрическом виде: свойства материала, толщина объединенного слоя, крепление детали на подложке и размер элемента сетки. Таким образом, стало возможно использовать модель для деталей любой формы, размера и из любого материала.

Группа Торальеса использовала функциональные возможности прочностного анализа программной среды COMSOL®, чтобы описать линейный упругий материал с зависящими от температуры пластичностью и коэффициентом теплового расширения на основе аналитического выражения для поля температуры. Приложение также выполняет несколько автоматизированных операций по проектированию для подготовки геометрии детали к подходящему объединению слоев.

Затем при моделировании создается сетка, показывающая примерную траекторию движения инструмента, поскольку объединение слоев не позволяет использовать реальную траекторию. В узлах сетки задается поле температуры. Далее приложение рассчитывает напряжения, возникающие при нанесении, и конечную форму детали (рис. 2).

» РАСШИРЕНИЕ ДОСТУПА К ВОЗМОЖНОСТЯМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

КОГДА МОДЕЛЬ ПРЕДСКАЗЫВАЕТ

отклонения в той или иной детали, эту информацию требуется передать группе

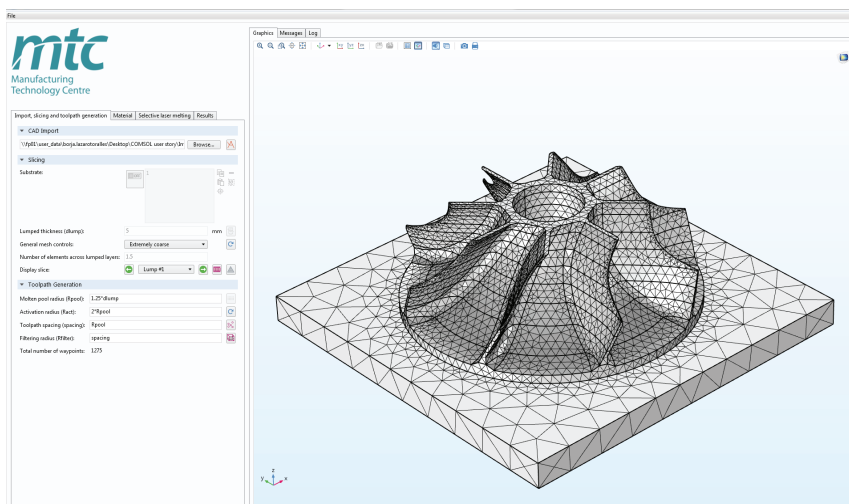


РИС. 3. Приложение МТС позволяет пользователю вносить изменения в конструкцию и проверять их на модели, но скрывает исходную мультифизическую модель.

проектировщиков в кратком и понятном виде. Во многих компаниях группы проектирования и моделирования работают отдельно, пользуясь навыками сотрудников, которые специализируются в одной из этих областей. Но тогда процессы проектирования и анализа детали перестают быть взаимосвязанными.

Приложения восстанавливают эту связь: специалисты по моделированию оформляют свою модель с помощью удобных для пользователя интерфейсов, а проектировщики проводят свои испытания, не вникая во все сложности исходной модели. Так инженерам-проектировщикам проще вносить изменения, а специалистам по моделированию не тратят время на анализ всякий раз, когда требуется определить рабочие характеристики новой детали.

Проектировщики создают сложные детали в самых разных CAD-системах, так что модель COMSOL и основанное на ней приложение должны работать надежно. Приложение включает функции импорта из CAD-систем, чтобы можно было тестировать любые формы. Это особенно важно для форм, вдохновленных природой, — растениями, животными и геологическими объектами — например, нарисованных в программе Rhino.

Приложение, созданное в среде разработки приложений COMSOL Multiphysics, показывает результаты моделирования: конечную форму, деформацию и уровни напряжения для выбранной детали — авиационного импеллера (рис. 3).

«Мы [в команде моделирования] сами часто пользуемся этим приложением, — добавляет Лазаро Торальес. — Когда приложение уже готово, проще внести в нем несколько изменений входных данных, чем возвращаться к исходной модели. Но проектировщики не занимаются моделированием. Приложение было создано для того, чтобы они импортировали модели деталей и проверяли, как деталь деформируется в процессе печати».

Среда разработки приложений, входящая в программный пакет COMSOL Multiphysics, позволяет Лазаро Торальесу полностью контролировать возможности, доступные пользователю приложения. Приложение меняется, отвечая новым требованиям компании, но он тщательно следит за отображением нужных выходных данных и блокирует некоторые входные параметры и условия, чтобы пользователи не вносили



«Поскольку модель постоянно выдавала хорошие результаты, все признали ее полезной. «Приложение может все: показать сечение геометрии печатного изделия и сетку, помочь инженерам в анализе деформаций и выдать обратную связь»»,

— БОРХА ЛАЗАРО ТОРАЛЬЕС, ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ФИЗИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЦЕНТРА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

непреднамеренных ошибок. Исходная модель остается невидимой пользователю, но доступ к моделированию получило гораздо большее число специалистов.

» УКРЕПЛЕНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

ЛАЗАРО ТОРАЛЬЕС ОТКРЫВАЕТ ДОСТУП К ПРИЛОЖЕНИЯМ с помощью COMSOL Server™ — продукта для развертывания, администрирования и запуска приложений. Приложение, размещенное в сети, становится доступно всем сотрудникам компании, получившим доступ.

Моделирование изменило взаимодействие разных групп в Центре производственных технологий. Теперь у них есть установленный порядок коммуникации между проектировщиками и специалистами по моделированию.

Отделы быстро обмениваются информацией, легко проверяют новые конструкции и вносят изменения, изготавливая для своих клиентов прототипы, предназначенные для широкомасштабного производства.

Лазаро Торальес признает, что первые приложения для моделирования в других отделах встретили скептически. «Их доверие пришлось заслужить. Но наши модели постоянно выдавали хорошие результаты, и все признали, что они полезны. Приложение может все: показать сечение геометрии печатного изделия и сетку, помочь инженерам в анализе деформаций и предоставить обратную связь». Моделирование стало важной частью рабочего процесса в Центре производственных технологий и упростило общение между проектировщиками и специалистами по физическому моделированию. В конечном итоге, изменился весь процесс проектирования деталей. ©

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Исследования в университете Кампинас (Unicamp) и Институте передовых исследований (IEAv) помогают разработать новые конструкции оптоволоконных датчиков давления.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

ПРИ СЛОВЕ «ОПТОВОЛОКНО» ОБЫЧНЫЙ ЧЕЛОВЕК представляет себе светящиеся волоски, сворачивающиеся в изящные завитки или струящиеся из патрона лампы. Но эти световодные кварцевые нити — больше, чем украшение. С момента их появления в 1950-х годах оптические волокна использовали для передачи энергии, связи, передачи изображений и измерений.

Более того, их часто используют в условиях, в которых другие методы измерения не работают. Универсальные диэлектрические оптические волокна можно использовать в условиях вакуумной камеры или океанского дна.

» ОТ ОПТОВОЛОКНА К ДАТЧИКАМ ДАВЛЕНИЯ

СТАНДАРТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА предназначены для использования в системах связи и обычно плохо подходят

для измерений. Чтобы оптоволоконно стало чувствительным к интересующему нас параметру, требуется его обработка, например внедрение волоконной решетки, или специальная микроструктура волокон. Микроструктурированные волокна могут оказаться полезными при производстве чувствительных датчиков давления для таких прикладных задач, как разведка нефтяных месторождений. Техники

и инженеры используют их для определения давления жидкости. На рис. 1 показаны примеры оптического волокна, работающего как датчик давления, взятые из литературы.

Микроструктурированные оптические волокна для датчиков давления обычно устроены так, что внешняя нагрузка вызывает асимметричное распределение напряжений в волокне. В свою очередь, это изменяет двупреломление волокна — свойство материала, отражающее оптическую анизотропию показателя преломления, — которое можно использовать для измерений.

«Оптоволоконные датчики выигрывают в чувствительности и электромагнитной защищенности, могут работать в экстремальных условиях», — говорит Жонас Озориу (Jonas Osório) из университета Кампинас. — «Обычно они очень маленькие, легкие и позволяют свободно выбирать характеристики датчика».

Но известные из литературы волокна обладают очень сложной микроструктурой: их изготавливают несколькими вытяжками

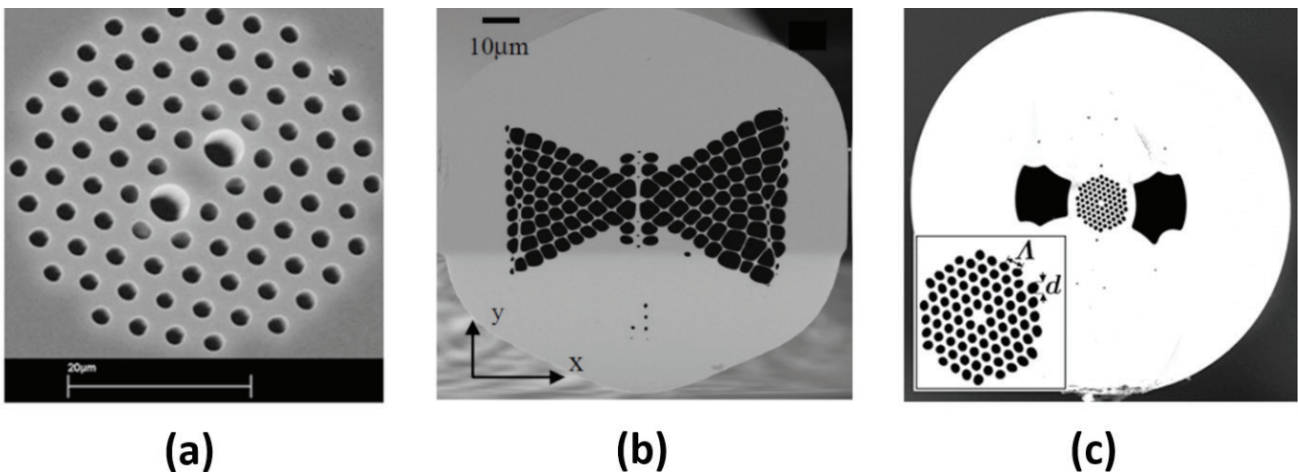


РИС. 1. Микроструктурированные оптические волокна в датчиках давления. (а) Фотонно-кристаллическое волокно¹, (b) микроструктурированное волокно с треугольной решеткой отверстий², (с) фотонно-кристаллическое волокно с боковыми отверстиями³.

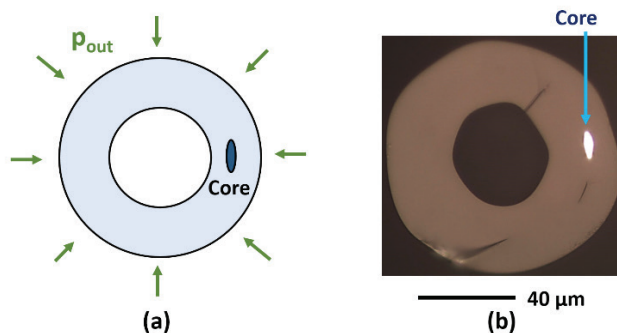


РИС. 2. (а) Схема капиллярного волокна со встроенной сердцевинкой и поперечное сечение трубки со встроенной сердцевинкой под гидростатическим давлением. (б) Поперечное сечение волокна со встроенной сердцевинкой.

и аккуратно собирают вручную. В университете Кампинас и в Институте передовых исследований в Бразилии ведутся разработки другого типа оптических волокон — капиллярного типа со встроенной сердцевинкой, работающих как высокочувствительные датчики давления. Процесс их изготовления сводится к получению заготовки и прямой вытяжке волокна.

» ПОДРОБНЕЕ О ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ КАПИЛЛЯРНОЕ ВОЛОКНО СО ВСТРОЕННОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ — это

кварцевая капиллярная трубка с легированной германием областью (сердцевинкой волокна) внутри капиллярной стенки. На рис. 2 показана структура волокна и его поперечное сечение. В отличие от волокон, показанных на рис. 1, волокно со встроенной сердцевинкой гораздо проще обычных микроструктурированных волокон, которые применяют для измерения давления.

Маркуш Франку (Marcos Franco) и Валдир Серрай (Valdir Serrão) из Института

передовых исследований, Жонас Озориу (Jonas Osório) и Кристиану Кордейру (Cristiano Cordeiro) из университета Кампинас исследовали вызванное давлением дупреломление в микроструктурированных волокнах, чтобы разработать и проверить новое конструкторское решение. Они сосредоточили свои усилия на волокнах-датчиках гидростатического давления, создаваемого неподвижным объемом жидкости, окружающим датчик. При этом они отошли от существующих конструкций, перейдя на капиллярные волокна (тонкие полые трубки) вместо сплошных волокон с регулярными воздушными отверстиями, обеспечивающими асимметричное распределение напряжения.

Их конечной целью было максимизировать зависимость дупреломления от изменения давления, увеличив таким образом чувствительность волоконного датчика. Начав с аналитической модели, они изучили вызванные давлением деформации и механические напряжения в капиллярных стенках (рис. 3). Аналитическая модель

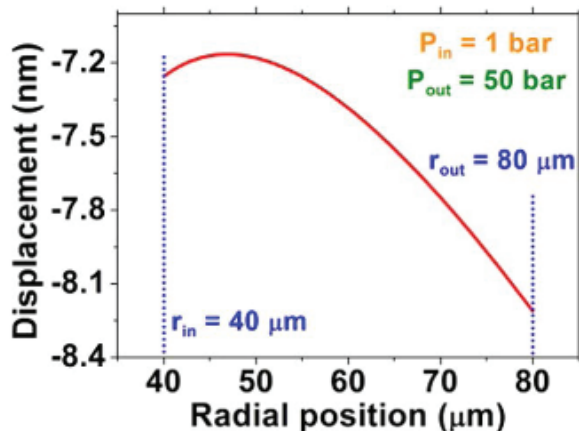


РИС. 3. Исследование капиллярного волокна без встроенной сердцевинки под давлением. Профиль смещения первоначально изучался для внутреннего радиуса $r_{in} = 40$ мкм, внешнего радиуса $r_{out} = 80$ мкм, внутреннего давления $p_{in} = 1$ бар и внешнего давления $p_{out} = 50$ бар.

показала, что приложенное давление приводит к асимметричному распределению напряжения в капиллярной стенке из-за ее структуры. Фотоупругий эффект вызывает разные изменения в показателе преломления материала в горизонтальном и вертикальном направлениях, создавая требуемое дупреломление.

» ДОСТИЖЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ОТ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS® Франку, Серрай, Кордейру и Озориу

добавили к математической модели эллиптическую сердцевину — легированную германием область внутри капиллярной стенки. Модель позволила рассчитать изменение модального дупреломления в зависимости от приложенного давления и положения сердцевинки внутри капиллярной стенки (рис. 4). Модальное дупреломление — это двойное лучепреломление оптических мод, распространяющихся по сердцевине волокна.

Модель рассчитывает эффективные показатели преломления для основных мод при различных давлениях.

“ «Опволоконные датчики выигрывают в чувствительности и электромагнитной защищенности, могут работать в экстремальных условиях»,

— ЖОНАС ОЗОРИУ, УНИВЕРСИТЕТ КАМПИНАС

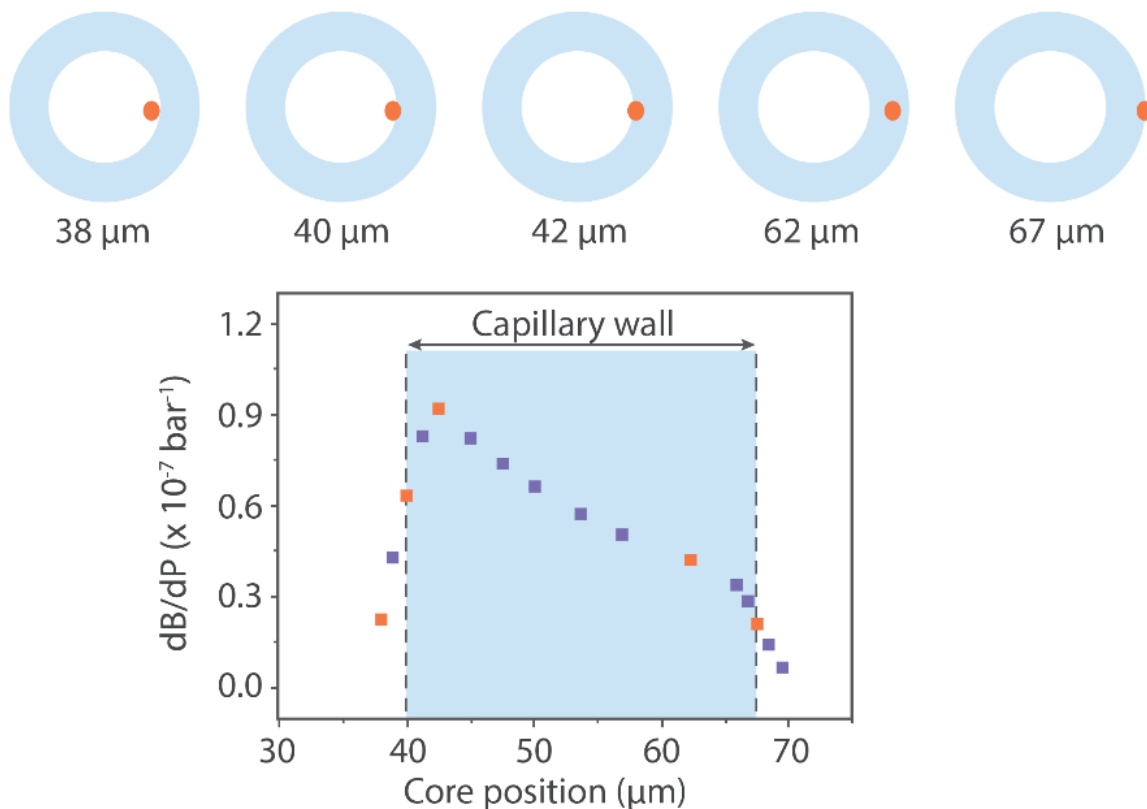


РИС. 4. Изменения модального двупреломления в зависимости от положения германиевой сердцевины внутри капиллярной стенки. Максимальное изменение двупреломления в зависимости от давления наблюдается, когда сердцевина расположена очень близко к внутреннему радиусу волокна (вверху в центре).

Эти моды возникают при распространении входящих электромагнитных волн по сердцевине волокна. Они обнаружили, что двупреломление будет сильнее всего зависеть от давления, а чувствительность датчика будет наибольшей, если сердцевину расположить полностью внутри капиллярной структуры, вблизи внутренней стенки. Изучая изменения распределения напряжения для разных геометрий, они обнаружили, что производная двупреломления по давлению была выше для волокон с более тонкими стенками и в точках, близких к внутреннему радиусу капилляра.

**» НОВЫЙ ПУТЬ
К МИКРОСТРУКТУРНЫМ
ОПТОВОЛОКОННЫМ
ДАТЧИКАМ**

**БЛАГОДАРЯ ИССЛЕДОВАНИЯМ
ЗАВИСИМОСТИ
ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ**

ОТ ДАВЛЕНИЯ Франку, Серрау, Кордейру и Озориу открыли новый способ упростить производство микроструктурированных волокон и подтвердили, что их конструкция пригодна в качестве датчика давления. Они сравнили чувствительность своего проекта с более сложно устроенными существующими волоконными структурами и установили, что их конструкция дает схожие результаты, но требует меньше сборочных работ. Волокно со встроенной

сердцевинной — это новый способ получения чувствительных оптоволоконных датчиков, которые позволят

нефтегазоведчикам легче оценивать извлекаемые ими флюиды в режиме реального времени. ☺

Литература

Группа исследователей обнаружила, что волокна со встроенной сердцевинной открывают путь к более простым оптоволоконным датчикам давления. Исследование было недавно опубликовано в журнале *Scientific Reports* группы Nature Publishing Group (nature.com/articles/s41598-017-03206-w).

¹ H. Y. Fu, et al. "Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer," *Applied Optics*, 47, 15, 2835-2839, 2008.

² A. Anuskiewicz, et al., "Sensing characteristics of the rocking filters in microstructured fibers optimized for hydrostatic pressure measurements," *Optics Express*, 20, 21, 23320-23330, 2012.

³ J. H. Osório, et al., "Photonic-crystal fiber-based pressure sensor for dual environment monitoring," *Applied Optics*, 53, 17, 3668-3672, 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМОГАЕТ РЕШАТЬ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

Важнейшие проблемы, стоящие перед конструкторами аккумуляторов, — энергетическая плотность, удельная мощность, время зарядки, срок службы, стоимость и рациональное использование ресурсов. Моделирование помогает исследователям, разработчикам и конструкторам найти решения этих проблем.

ЭД ФОНТЕС (ED FONTES)

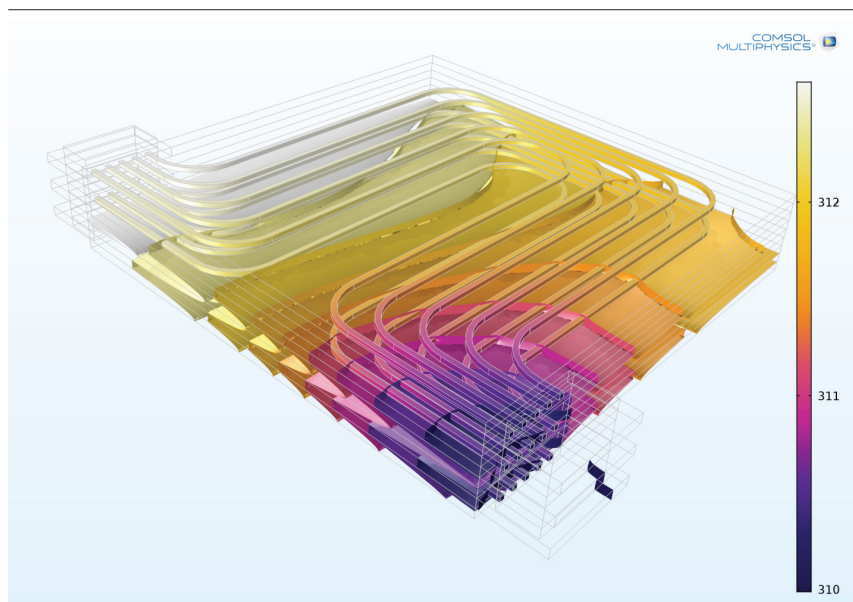


РИС. 1. Мультифизическое моделирование профиля температуры в аккумуляторной батарее с жидкостным охлаждением. Поток жидкости и температура моделируются в трех измерениях. Одномерная укрупненная модель литий-ионного аккумулятора используется для расчета источника тепла.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ОГРАНИЧЕНА химическим составом аккумулятора, который даже в отсутствие потерь ограничивает теоретическую энергетическую плотность. Химический состав определяется материалами электродов и составом электролита. Литий-воздушные аккумуляторы по энергетической плотности

близки к бензину и, вероятно, к максимально возможной для аккумуляторов плотности. Однако компоненты системы терморегуляции и токосъемники вносят свой вклад в общую массу аккумуляторной системы. Конструкция этих компонентов может сильно повлиять на энергетическую плотность аккумуляторной батареи.

» УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ И БЫСТРАЯ ЗАРЯДКА

УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ аккумулятора важна для эффективной работы электрического транспорта. Чтобы запастись большим количеством энергии за малый промежуток времени во время рекуперативного торможения или быстрой зарядки, нужна высокая удельная мощность. Здесь возникает сложная задача оптимизации, поскольку система должна работать с очень высокими плотностями тока при зарядке и относительно низкими плотностями тока при разрядке. Эта задача также связана с разработкой терморегулирования и токосъемников, о которых говорилось выше. Кроме того, для удельной мощности очень важна конструкция основных компонентов аккумулятора: электродов, сепаратора и электролита.

» СРОК СЛУЖБЫ, НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

СРОКУ СЛУЖБЫ АККУМУЛЯТОРА УДЕЛЯЕТСЯ БОЛЬШЕ ВСЕГО ВНИМАНИЯ, но безопасность и надежность батареи тесно связаны с ним. Разрядка, износ и отказы должны быть медленными, управляемыми и явными. Это вопрос не только химического состава аккумулятора, но и проектирования, поскольку неравномерное распределение плотности тока и плохое управление зарядкой, разрядкой и терморегулированием могут ускорить износ и увеличить риск отказа. Короткие замыкания, вызванные осаждением металла, также вносят вклад в снижение производительности и повышают риск неуправляемого нагрева. Чтобы постоянно оценивать состояние аккумуляторной системы и риск отказа, требуются современные технологии контроля состояния батареи.

» ЗАТРАТЫ

ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОМОЩНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ и электрических трансмиссий не так хорошо оптимизировано, как производство механических трансмиссий для двигателей внутреннего сгорания. Крупномасштабное производство компонентов аккумуляторов может дать большой выигрыш в производительности и значительно снизить затраты.

» РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

необходимо учитывать рациональное использование ресурсов. Требуется выработать стратегию для добычи ресурсов, их повторного использования, производства и утилизации новых типов

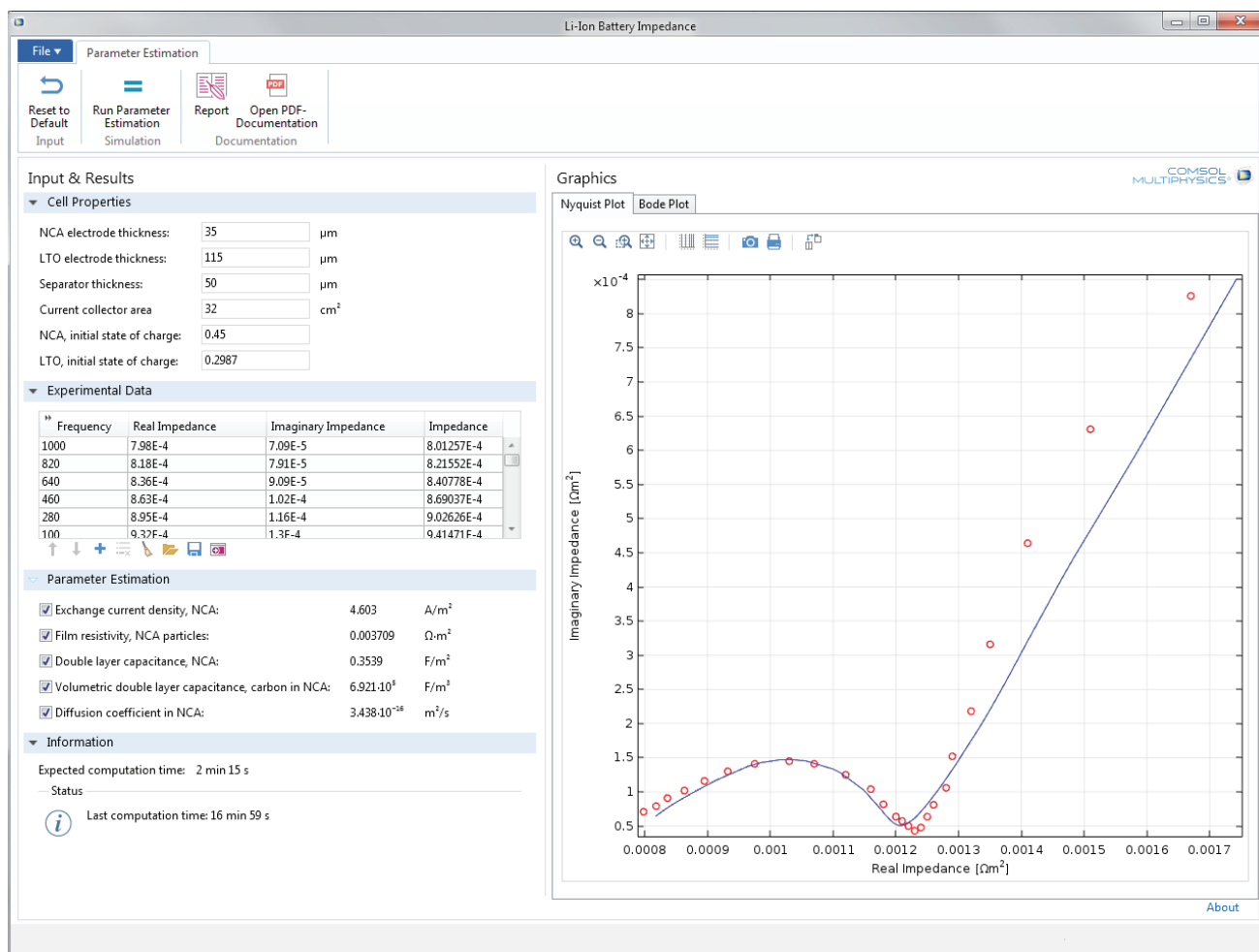


РИС. 2. Цель этого приложения — объяснить технику электрохимической импедансной спектроскопии и показать, как можно сочетать модель и измерения, чтобы исследовать характеристики литий-ионных аккумуляторов. В качестве входных данных приложение получает экспериментальные данные спектроскопии, моделирует эти измерения и оценивает по экспериментальным данным свободные параметры.

аккумуляторов. В основном это задача правительств, но об этом задумываются и производители аккумуляторов, и автомобильные компании.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТАХ АККУМУЛЯТОРА:

электродах, электролите и сепараторе, можно лучше понять и оптимизировать с помощью моделирования. Системы терморегулирования, токосъемники и системы контроля состояния аккумулятора можно также разрабатывать с помощью высокоточных численных моделей.

На рис. 1 показана модель для оптимизации каналов в пластинах охлаждения аккумуляторной батареи. Это

распространенная задача в автомобильной промышленности. Например, исследовательский центр Fiat использует математическое моделирование для изучения терморегулирования пакетных ячеек для гибридных автомобилей¹.

Эффективно исследовать компоненты аккумулятора и разрабатывать методы контроля состояния аккумулятора можно, сочетая экспериментальные измерения электрохимической импедансной спектроскопии с математическими моделями, как описано в статье французского научно-исследовательского института CEA². На рис. 2 показано приложение, которое может импортировать экспериментальные данные и использовать их в физической модели электрохимической импедансной спектроскопии. Это

позволяет оценивать такие параметры, как активность электродов, площадь поверхности, электропроводность различных компонентов, характеристики массообмена реагентов и продуктов и состояние заряда электродов. ☺

Литература

¹ *The Thermal Management of Li-ion Battery Packs.* Michele Gosso, Antonio Fiumara. Fiat Research Center, Orbassano, Italy. COMSOL News (2012), 48–49.

² *Highly Accurate Li-ion Battery Simulation.* Mikael Cugnet. French Atomic and Alternative Energy Commission (CEA), France. COMSOL News (2013), 44–45.

ЛУЧШИЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ — ПЛОД СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

СЭМ ПАРЛЕР (SAM PARLER), CORNELL DUBILIER ELECTRONICS

ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ, СОЗДАЮЩИХ НОВЫЕ ПРОДУКТЫ, каждое начало проекта «с чистого листа» открывает и обещает множество возможностей. Но по универсальному закону сохранения проблем к каждому чистому листу прилагается календарь со сроками. А в последнее время сроки все чаще отмечаются не в календаре, а на часах. Когда ограничения и цели проектирования жестко определены, входные данные размыты, а сроки не ждут, лучшие инструменты моделирования предоставляют широкие возможности и позволяют быстро выносить оценки, при этом особое значение придается взаимозаменяемости, расширяемости, автоматизации и надежности.

Необходимость численного моделирования в проектировании и разработке электронных компонентов давно доказана. Альтернатива — метод проб и ошибок — слишком дорога и медленна. Конкретный пример: ресурсные испытания конденсаторов занимают тысячи часов, так что ошибки необходимо находить как можно раньше в процессе разработки.

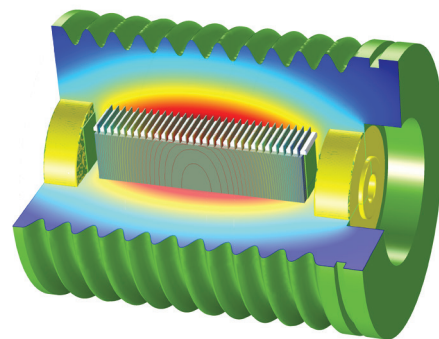
Численное исследование электрических и тепловых свойств конденсатора может показаться простым и понятным. Но разработка корпуса и его деталей обычно составляет значительную часть проектирования, поскольку именно она определяет сопряжение устройства с оборудованием потребителя. Здесь мы сталкиваемся с моделированием напряжений в очень сложных конструкциях, и становится ясно, что не все программные пакеты одинаковы. Ни один программный пакет не способен справиться со всеми задачами моделирования в любых условиях, но COMSOL® довольно близок к этому идеалу. Программное обеспечение для моделирования, способное взаимодействовать с другими нашими инструментами исследований и разработок, помогает Cornell Dubilier Electronics выйти в лидеры по параметрам качества, минимизации временных затрат и издержек.

Готовые физические интерфейсы, редактируемые свойства материалов,

задание пользовательских обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных позволяют нам сотрудничать с клиентами и создавать новые решения под их запросы. Кроме этого, наши инструменты позволяют взаимодействовать с программным пакетом MATLAB® и электронными таблицами Excel® и автоматически генерировать таблицы для нашего каталога конденсаторов. Инженер-конструктор также должен хорошо разбираться в поведении изделия, которое он разрабатывает. Обычно пространство параметров слишком велико и многомерно, чтобы изучить его в деталях, но частое использование оптимизации, анализа чувствительности и решения обратной задачи помогли нам понять многие тонкости в работе изделий.

Лучшие изделия и самые надежные модели в Cornell Dubilier Electronics — плод совместного труда многих инженеров. Всем, кто хорошо разбирается в программном обеспечении, предоставляются файлы моделей. Но чтобы извлекать пользу из разрабатываемых нами математических моделей или даже применять их непосредственно в своей работе, инженеру совсем не обязательно быть специалистом по COMSOL Multiphysics. Приложения, создаваемые в среде разработки приложений и распространяемые с помощью COMSOL

Server™, могут внести большой вклад в разработку и совместную работу всех инженеров. Каждый инженер может запускать модель со своими параметрами и проверять новые идеи, не углубляясь в искусство создания моделей. Доступность приложений формирует гораздо более открытую среду разработок и способствует достижению консенсуса по окончательной конструкции изделий. ©



Распределение температуры в конструкции нового высоковольтного некоронирующего слюдяного конденсатора типа 297 от компании Cornell Dubilier Electronics, работающего на частоте 12 кГц при среднеквадратичном напряжении 20 кВ.



СЭМ ДЖ. ПАРЛЕР, ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ИНЖЕНЕР, живет в штате Южная Каролина. Получил степень по электротехнике в Университете Клемсона. С 1988 по 1991 год он координировал работы по Стратегической оборонной инициативе в Cornell Dubilier, разрабатывая высокоемкие электролитические импульсные конденсаторы военного назначения. В 1994 году он стал сооснователем Maven Capacitor Corporation (сейчас принадлежащей Abbott Laboratories), чтобы разрабатывать и производить тонкие плоские импульсные конденсаторы для имплантируемых дефибрилляторов. Парлер работает директором по научным исследованиям в Cornell Dubilier с 1996 года, является старшим членом IEEE. Ему принадлежат пять патентов, связанных с конденсаторами, в том числе два — на герметичные алюминиевые электролитические конденсаторы.